



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# MODIFIKACE KRYSTALOGRAFICKÉ TEXTURY AUSTENITICKÉ OCELI POMOCÍ 3D TISKU

MODIFICATION OF THE CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE OF AUSTENITIC STEEL BY 3D PRINTING

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Fábry

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

BRNO 2024



## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	<b>Bc. Adam Fábry</b>
Studijní program:	Konstrukční inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2023/24

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

### **Modifikace krystalografické textury austenitické oceli pomocí 3D tisku**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Metastabilní austenitické oceli vykazují martenzitickou transformaci během deformace, tzv. transformací indukovanou plasticitu (TRIP), která je příčinou výborné kombinace pevnosti a tažnosti. Martenzitická transformace, tedy efekt "zpevnění" materiálu je významně ovlivněn orientací zrn materiálu a směrem zatěžování. Při aditivní výrobě technologií selektivního laserového tavení (SLM) lze, kromě jiného, pomocí různé kombinace procesních parametrů ovlivňovat také orientaci zrn, což otvírá možnosti pro cílené a lokalizované modifikování textury materiálu a s tím spojených mechanických vlastností.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: GAČR

## **Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem práce je objasnit možnosti cílené modifikace krystalografické textury 3D tištěné austenitické oceli a její vliv na mechanické vlastnosti.

Dílčí cíle diplomové práce:

- přehled současného stavu poznání v oblasti modifikace textury pomocí SLM,
- stanovení mapy procesních parametrů s minimální porozitou,
- optimalizace procesních parametrů pro výrobu vzorků s odlišnou texturou, – ověření mechanických vlastností vzorků s různou texturou, – zpracování a interpretace výsledků.

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

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

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

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

## **Seznam doporučené literatury:**

SUN, S., BRANDT, M., a EASTON, M. Powder bed fusion processes: An overview. *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications*, 55–77. Dostupné z:10.1016/B978-0-08-100433-3.00002-6.

ANDREAU, O., KOUTIRI, I., PEYRE, P., a kol. Texture control of 316L parts by modulation of the melt pool morphology in selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. 264, 21-31. ISSN 0924-0136. Dostupné z: 10.1016/j.jmatprotec.2018.08.049.

MARATTUKALAM, J. J., DENNIS, K., a PACHECO, V. The effect of laser scanning strategies on texture, mechanical properties, and site-specific grain orientation in selective laser melted 316L SS. *Materials & Design*. 2020, 193, 108852. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/J.MATDES. 2020. 108852.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Mikroštruktúra, a teda aj mechanické vlastnosti materiálu, závisia na rýchlosti ochladzovania a smere teplotného gradientu pri chladnutí, ktorý je možné pri aditívne vyrábaných kovových dieloch jednoducho ovplyvňovať. V predchádzajúcich výskumoch je táto zmena realizovaná zmenou skenovacej stratégie pri výrobe. Táto práca sa zaoberá modifikáciou kryštalografickej štruktúry materiálu X30Mn22 zmenou rýchlosti a výkonu lasera pri zachovaní konštantnej skenovacej stratégie meander bez rotácie. Za účelom zistenia použiteľných parametrov výroby bol vykonaný test jednoduchých zvarov, ktorý poskytol základ pre budúcu výrobu a testy objemových vzoriek. Na vyrobených objemových vzorkách bola pomocou porozity vyhodnocovaná vhodnosť použitých parametrov výroby objemu materiálu a mikroštruktúra dosiahnutá v priereze tejto vzorky vykreslená pomocou EBSD máp, kde došlo k zásadným zmenám mikroštruktúry len pomocou zmeny laserových parametrov výroby. Pre vybrané vzorky mikroštruktúry boli ďalej vyrobené ťahové vzorky a boli otestované ich mechanické vlastnosti. Výsledky ťahových skúšok ukázali medzi jednotlivými mikroštruktúrami rozdiely 18% pre medzu klzu a až 10% v prípade medze pevnosti. Najvýznamnejší rozdiel bol však v dosiahnutom module pevnosti v ťahu, ktorý sa líšil až o 27%. Práca poskytuje základné poznatky o modifikovaní a úprave štruktúry materiálu s vysokým obsahom mangánu zmenou nastavenia výkonu a rýchlosti lasera.

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

SLM, mikroštruktúra, modifikácia, X30Mn22

## ABSTRACT

The microstructure, and therefore the mechanical properties of the material, depend on the cooling rate and the direction of the temperature gradient during cooling, which can be easily influenced in additively manufactured metal parts. In previous research, this change has been achieved by altering the scanning strategy during production. This work focuses on modifying the crystallographic structure of material X30Mn22 by varying the laser speed and power while maintaining a constant meander scanning strategy without rotation. To determine the applicable production parameters, a test of simple welds was conducted, providing a basis for future production and testing of bulk samples. The suitability of the production parameters and the microstructure achieved in the sample cross-section were evaluated using porosity on the fabricated bulk samples, and the microstructure was depicted using EBSD maps, showing significant changes in microstructure solely by altering the laser production parameters. Tensile samples were further fabricated for selected microstructure samples, and their mechanical properties were tested. The results of tensile tests showed differences between individual microstructures of 18% for yield strength and up to 10% for ultimate tensile strength. However, the most significant difference was in the achieved tensile modulus, which differed by up to 27%. The work provides fundamental insights into modifying and adjusting the structure of manganese-rich material by changing laser power and speed settings.

## KEYWORDS

SLM, microstructure, modification, X30Mn22

## BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

FÁBRY, Adam. Modifikace krystalografické textury austenitické oceli pomocí 3D tisku [online]. Brno, 2024. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/158114>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Daniel Koutný.





## POĎAKOVANIE

Na tomto mieste by som rád poďakoval vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Danielovi Koutnému, Ph.D za jeho vrúcny prístup, odborné rady a vedenie. Ďalej by som rád poďakoval Ing. Miroslavovi Šmídovi, Ph.D z Ústavu fyziky materiálov AV ČR za pomoc, rady a konzultácie pri vyhodnocovaní mikroštruktúry. Ing. Ondřejovi Vaverkovi, Ing. Vítovi Šreibrovi a Ing. Filipovi Grygarovi za praktické rady pri obsluhu tlačiarne. V neposlednom rade by som rád poďakoval mojej rodine. Bez ich podpory by moje štúdium nebolo možné.

Spolužiakom, s ktorými sme prebdeli nejednu noc nad projektami, spoločne zdieľali depresívne, náročné, ale aj zábavné momenty, a s ktorými som prežil nezabudnuteľné dva roky života.

Majstrovi Oogwayovi za jeho múdrosti, a že veril v to, že stačí veriť v samého seba a nie je potrebná žiadna tajná ingrediencia. Aj keď sa jedná o polievku tajnej ingrediencie.

A samozrejme všetkým autorkám a autorom fantasy a sci-fi literatúry, beletrie, románov a poviedkam, ktorí formovali môj vnútorný svet v ktorom som v ťažkých dobách vždy našiel útočisko.

## PREHLÁSENIE AUTORA O PÔVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že diplomovou prácu som vypracoval samostatne, pod odborným vedením doc. Ing. Daniela Koutného Ph.D. Súčasne prehlasujem, že všetky zdroje obrazových a textových informácií, z ktorých som čerpal, sú riadne citované v zozname použitých zdrojov.

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA</b>	<b>14</b>
2.1	Rešeršné metódy	14
2.2	Kritická rešerš	15
2.2.1	Základné procesné parametre technológie SLM	16
2.2.2	Austenitické ocele	27
2.2.3	Aditívne spracovanie austenitických ocelí	29
2.3	Zhrnutie hlavných zistení	38
2.4	Medzera v poznaní	39
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE</b>	<b>40</b>
3.1	Výskumné otázky	40
3.2	Ciele výskumu	40
3.3	Hypotézy	41
<b>4</b>	<b>MATERIÁL A METÓDY</b>	<b>42</b>
4.1	Metodika	42
4.2	Experimentálne zariadenie a prístrojové vybavenie	43
4.2.1	Výroba vzoriek	43
4.2.2	Pozorovanie vzoriek	43
4.2.3	Skúšky mechanických vlastností	44
4.3	Materiál a testovacie podmienky	44
4.3.1	Použitý materiál	44
4.3.2	Typy vzoriek a testovacie podmienky	45
4.4	Metódy	47
4.4.1	Test jednoduchých zvarov	47
4.4.2	Test objemových telies	50
4.4.3	Test mechanických vlastností	52
4.5	Testované predikcie	52
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>54</b>
5.1	Test jednoduchých zvarov	54
5.1.1	Vonkajšia geometria zvaru	54
5.1.2	Vnútoraná geometria zvaru	55

5.1.3	Pokročilé analyzovanie jednoduchých zvarov	58
<b>5.2</b>	<b>Test objemových vzoriek</b>	<b>60</b>
5.2.1	Výroba objemových vzoriek	60
5.2.2	Porozita objemových vzoriek	62
<b>5.3</b>	<b>Vyhodnotenie mikroštruktúry</b>	<b>64</b>
5.3.1	Predbežná mikroštruktúra jednoduchých zvarov	64
5.3.2	Mikroštruktúra objemových vzoriek	65
5.3.3	Výroba ťahových vzoriek	69
5.3.4	Mikroštruktúra ťahových vzoriek	69
<b>5.4</b>	<b>Vyhodnotenie mechanických vlastností</b>	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>DISKUSIA</b>	<b>75</b>
<b>6.1</b>	<b>Interpretácia výsledkov</b>	<b>75</b>
6.1.1	Test jednoduchých zvarov	75
6.1.2	Mapa procesných parametrov	76
6.1.3	Porozita	79
6.1.4	Mikroštruktúra	81
6.1.5	Mechanické vlastnosti	85
<b>6.2</b>	<b>Verifikácia hypotéz</b>	<b>89</b>
6.2.1	Hypotéza H1	89
6.2.2	Hypotéza H2	89
<b>7</b>	<b>ZÁVER</b>	<b>90</b>
<b>8</b>	<b>VÝSLEDKY VÝSKUMU PODĽA RIV</b>	<b>92</b>
<b>9</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV</b>	<b>93</b>
<b>10</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH ZKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN</b>	<b>97</b>
10.1	Použité skratky	97
10.2	Použité fyzikálne veličiny	97
<b>11</b>	<b>ZOZNAM OBRÁZKOV</b>	<b>99</b>
<b>12</b>	<b>ZOZNAM TABULIEK</b>	<b>104</b>
<b>13</b>	<b>ZOZNAM PRÍLOH</b>	<b>105</b>

# 1 ÚVOD

Selektívne laserové tavenie (Selective Laser Melting, SLM) je aditívna technológia výroby, umožňujúca vytvárať komplexné geometrické tvary s vysokou presnosťou, ktoré by konvenčnými spôsobmi výroby nebolo možné dosiahnuť. Technológia SLM používa laserový lúč na roztavenie tenkých vrstiev kovového prášku a postupným nanášaním s spekaním týchto vrstiev vytvára požadovanú geometriu.

Austenitické ocele s nízkym obsahom uhlíka dosahujú po spracovaní austenitickú štruktúru s FCC mriežkou. V závislosti od ich chemického zloženia a dosahovanej mikroštruktúry vykazujú dva rôzne mechanizmy deformácie. Plasticitou vyvolaná transformácia (TRIP) pri materiáloch s nižším obsahom mangánu spôsobuje postupné spevňovanie materiálu vplyvom obmedzovania pohybu dislokácií a zvyšuje sa tak odolnosť proti plastickej deformácii na úkor ťažnosti materiálu. Dvojčatením vyvolaná plasticita (TWIP) pri materiáloch s vyšším obsahom mangánu spôsobuje nárast ťažnosti a deformácie do porušenia na úkor pevnosti materiálu.

Pri návrhu tvaru aditívne vyrábaných kovových dielov sa zvyčajne uvažuje izotropný materiál, prípadne materiál s miernou anizotropiou. Keďže behom výroby dochádza k postupnému spekaniu vrstvy kovového prášku, je teda možné priamo ovplyvňovať teplotný gradient chladnutia materiálu a tým aj lokálne mechanické vlastnosti súčiastky, ktoré sú na ňom závislé, nastavením a úpravou procesných parametrov výroby.

Cieľom tejto práce je preskúmanie vplyvu hlavných procesných parametrov výroby technológie SLM na vznik a modifikáciu kryštalografických štruktúr austenitickej ocele X30Mn22 s vysokým obsahom mangánu. Na základe testov jednoduchých zvarov, kde bude preskúmané široké spektrum použiteľnosti kombinácii výkonu a rýchlosti lasera, budú vytvorené objemové vzorky určené na vyhodnotenie dosahovanej mikroštruktúry. Na záver budú pre vybrané mikroštruktúry zhotovené ťahové vzorky na preskúmanie ich mechanických vlastností

## 2 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

### 2.1 Rešeršné metódy

Systematická rešerš tejto práce bola rozdelená da štyri základné časti. V prvej časti bolo potrebné zistiť, aké procesné parametre sa v súčasnosti používajú na spracovanie ocele s vysokým obsahom mangánu (*High Manganese Steel* - **HMnS**). Následne bolo nutné zistiť, aké orientácie kryštalografických zŕn dosahujeme pre jednotlivé procesné parametre a ktoré parametre majú významnejší vplyv na orientáciu zŕn v mikroštruktúre. V tretej časti bol preskúmaný vplyv procesných parametrov na porozitu vyrábaného materiálu a v poslednej časti boli zisťované mechanické vlastnosti takto spracovaného materiálu. Na základe tohto rozdelenia boli definované otázky:

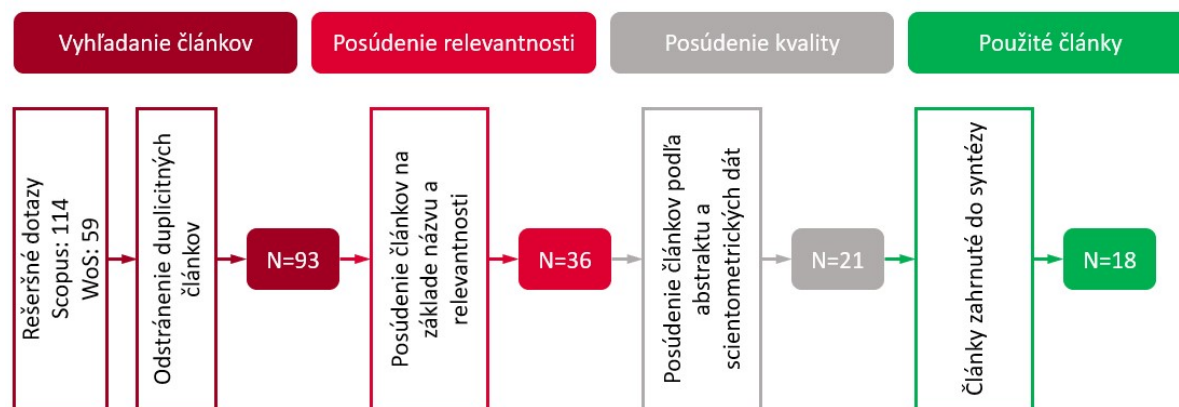
- Aké procesné parametre sa používajú pri spracovaní HMnS technológiou SLM?
- Aké orientácie kryštalografických zŕn dosahujeme pri technológii SLM pre rôzne nastavené procesné parametre?
- Aký vplyv majú procesné parametra na porozitu pri technológii SLM?
- Aké mechanické vlastnosti dosahuje HMnS s rôznymi orientácia kryštalografických zŕn vyrobená technológiou SLM?

Pre jednotlivé otázky boli definované kľúčové slová a pomocou Booleovských operátorov boli vytvorené rešeršné dotazy. Tie boli použité na vyhľadanie článkov v dvoch rôznych vedeckých databázach. Konkrétne sa jednalo o Scopus a Web of Science (WoS). V Tab. 2-1 je uvedené výsledné znenie rešeršných dotazov položených do databáze Scopus a počet nájdených článkov. V prípade WoS museli byť rešeršné dotazy s rovnakými kľúčovými slovami položené v inom znení aby bolo dosiahnuté primerané množstvo nájdených článkov.

Tab. 2-1 Rešeršné dotazy

Rešeršný dotaz	Scopus	WoS
(slm OR ("selective laser melting") AND (hmns OR ("high manganese steel")))	35	25
(slm OR lpbf) AND "process parameters" AND "grain orientation" AND "melt pool" AND (hmns OR (high AND manganese AND steel))	38	18
slm AND (porosity OR pores) AND ("process parameters" OR (power OR speed)) AND (hmns OR ("high manganese steel"))	20	9
(slm OR lpbf) AND "process parameters" AND (hmns OR (high AND manganese AND steel)) AND "mechanical properties"	21	7
	114	59

Pre definované rešeršné dotazy bolo v databáze Scopus nájdených 114 odborných článkov. Po odstránení duplicitných článkov z databázy WoS a posúdení článkov podľa ich názvu a relevantnosti bolo 36 článkov ďalej hodnotených podľa scientometrických dát autorov a údajov získaných z abstraktu. Pri hodnotení autorov boli do úvahy brané počty citácii článku a h-index hlavného autora. Z takto posúdených článkov bolo 18 z nich použitých ako základ pre túto prácu a sú bližšie popísané v kritickej rešerši. Postup výberu vhodných článkov je uvedený v PRISMA diagrame:



Obr. 2-1 PRISMA diagram – vyhľadávanie informačných zdrojov

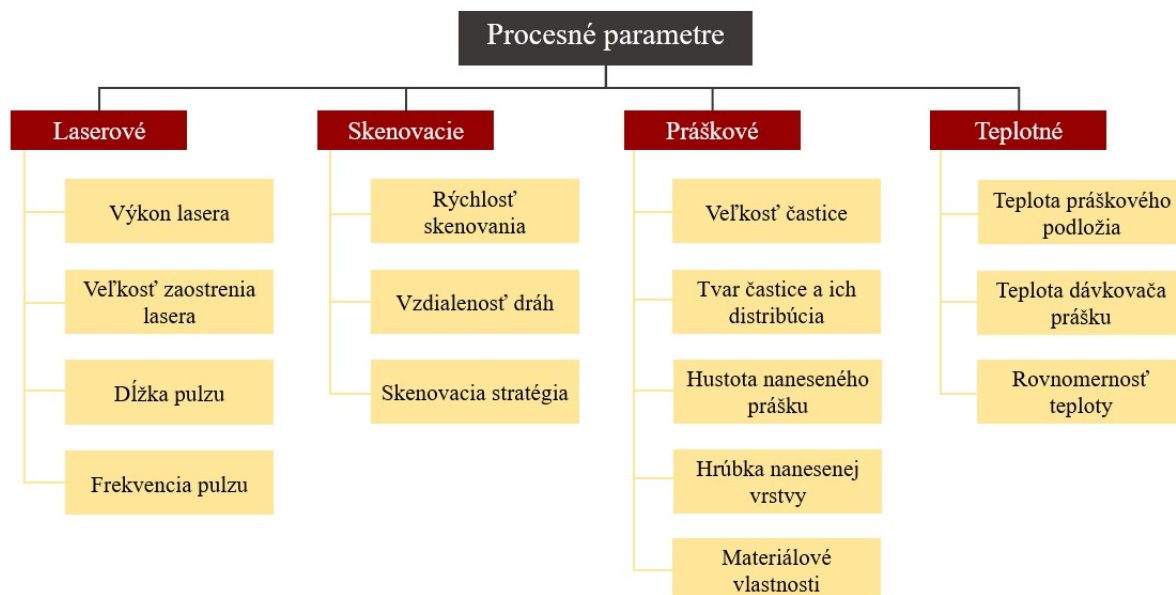
## 2.2 Kritická rešerš

Rešeršná časť je rozdelená na dve hlavné časti. Prvá časť je venovaná popisu základných procesných parametrov ako je rýchlosť a výkon lasera, ale aj vzdialenosť susedných dráh lasera a ich vplyv na tvorbu zvarového kúpeľa, na jeho tvar a rozmery. V tejto časti sú ďalej popísané režimy tavenia, najčastejšie druhy porozity, ktoré sa v takto spracovanom materiáli nachádzajú a identifikácia procesného okna v ktorom dosahujú vyrobené vzorky dostatočnú relatívnu hustotu.

Druhá časť rešerše je špecificky zameraná na rast kryštalografických zŕn v rámci spracovávanej štruktúry a ako ju ovplyvňujú procesné parametre technológie SLM. Preskúmanie rôznych druhov kryštalografických štruktúr, orientácii kryštalografických zŕn v štruktúre, identifikácia spôsobu výroby akou boli dosiahnuté a aké hodnoty mechanických vlastností takto spracovaný materiál dosahuje. Medzi skúmané mechanické vlastnosti patria hodnoty (zmluvnej) medze klzu, medze pevnosti a deformácie do porušenia.

## 2.2.1 Základné procesné parametre technológie SLM

Procesné parametre aditívnej technológie Selektívneho Laserového Tavenia (*Selective Laser Melting – SLM*) sú kľúčovou súčasťou procesu stavby súčiastky. Na nastavení týchto parametrov výroby závisí mikroštruktúra materiálu, kvalita povrchu, presnosť rozmerov a geometrie, ale aj jej mechanické vlastnosti. Výrobné parametre môžeme do štyroch základných skupín. Jedná sa o laserové, skenovacie, práškové a teplotné (Obr. 2-2) [1].



Obr. 2-2 Rozdelenie procesných parametrov [1]

Medzi hlavné procesné parametre patrí výkon lasera (*laser power - LP*), rýchlosť lasera (*laser speed - LS*), vzdialenosť susedných skenovaných dráh (*hatch spacing - HD*) a skenovacia stratégia. Keďže všetky tieto parametre výrazne ovplyvňujú kvalitu výslednej mikroštruktúry, bude ich vplyv podrobnejšie popísaný v tejto kapitole.

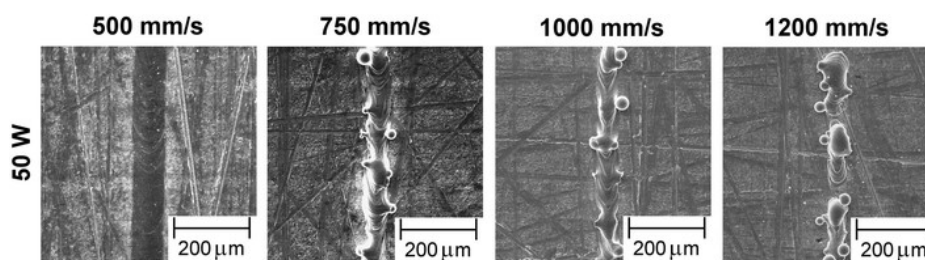
### Vplyv výkonu lasera a skenovacej rýchlosti

Jednými z hlavných parametrov ktoré významne ovplyvňujú kvalitu výslednej štruktúry sú rýchlosť a výkon lasera. Podiel týchto parametrov určuje veľkosť lineárnej energie vstupujúcej do procesu tavenia prášku. Na základné určenie vhodného použitia výkonu a rýchlosti pre nový skúmaný materiál sa používa jednoduchý návarový test (*single track test*).

Dilip a kol. [2] skúmal vplyv procesných parametrov na vývoj zvarového kúpeľa, porozitu a mikroštruktúru SLM spracovaného materiálu Ti-6Al-4V. V práci pozoroval rozmery a tvar zvarov pre viacero výkonových stupňov a rôzne rýchlosti lasera.

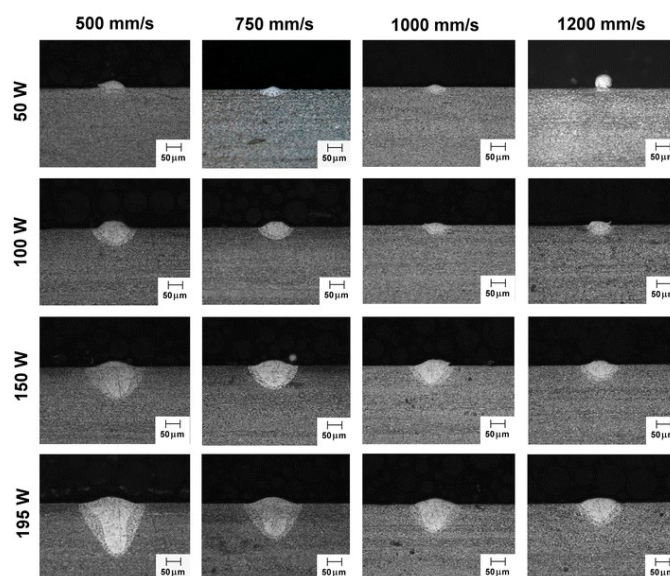


Pre malé výkony a nízke rýchlosti ( $50 \text{ W}$  a  $500 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) pozoroval súvislé a rovnomerné zvary avšak so zvyšujúcou sa rýchlosťou sa zvary stávali nekonzistentnými a nesúvislými ( $1\,000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ), čo neskôr viedlo až k ballingu ( $1\,200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) (Obr. 2-3). Ten je spôsobený dominantnými silami povrchového napätia v roztavenej zliatine [2].



Obr. 2-3 Morfológia single trackov zachytená pomocou SEM [2]

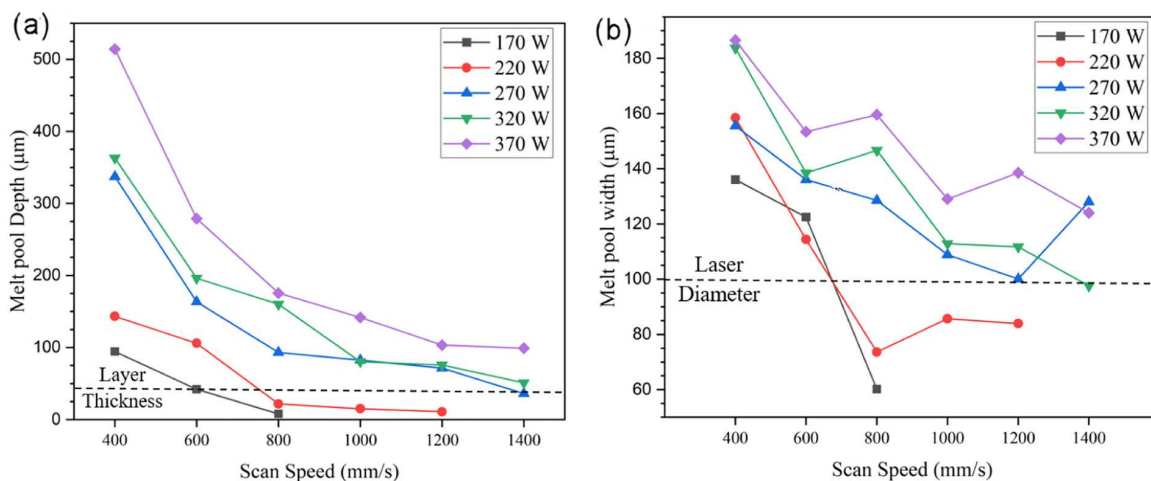
Pri vyhodnocovaní vnútornej geometrie jednotlivých zvarov dochádzalo vplyvom zvyšujúceho sa výkonu lasera k postupnému nárastu šírky a hĺbky zvarového kúpeľa. Zároveň však s rastúcou rýchlosťou skenovania dochádza k postupnému poklesu rozmerov a k vzniku nestabilit a balling efektu (Obr. 2-4) [2].



Obr. 2-4 Prierezové plochy single trackov pre vybrané procesné parametre [2]

Balbaa a kol. [3] vo svojej práci popisujú vplyv výkonu lasera a skenovacej rýchlosti na proces tuhnutia zvaru, drsnosť povrchu a zvyškové napätia pri spracovaní materiálu IN718 technológiou SLM. Ich výsledky ukázali, že hĺbka a šírka zvaru postupne klesá so zvyšujúcou sa rýchlosťou lasera, alebo s klesajúcim výkonom lasera.

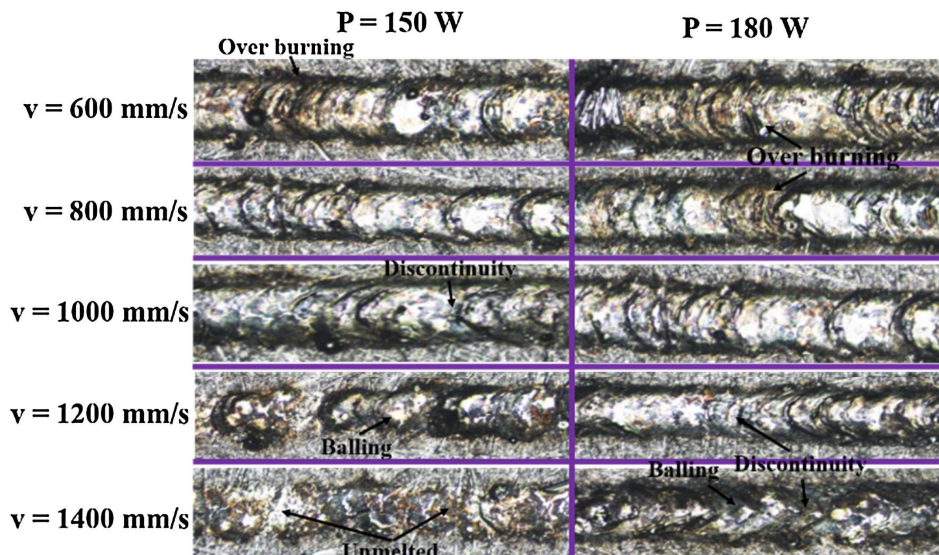
Vplyv procesných parametrov na hĺbku zvaru je zobrazený na Obr. 2-5 (a), kde je zjavné, že s klesajúcou rýchlosťou lasera dochádza k rapídному nárastu hĺbky zvarov. Rovnaký stúpajúci trend sa prejavuje aj pri všetkých skúmaných výkonoch lasera. Podobne ako pri hĺbke zvaru, aj jej šírka závisí na použitých procesných parametroch, kde s klesajúcou rýchlosťou lasera postupne narastá šírka zvaru, ale klesá so znižujúcim sa výkonom lasera Obr. 2-5 (b) [3].



Obr. 2-5 Vplyv skenovacej rýchlosti na rozmery zvarového kúpeľa [3]

Ďalším poznatkom z tejto štúdie je, že pri nízkych hodnotách lineárnej energie, alebo pri malom pomere výkonu k rýchlosti lasera, dochádza k nespojitostiam zvarových kúpeľov a k vytváraniu balling efektu. To bolo pozorované hlavne pri vzorkách vyrobených s výkonom 120 W. Pri vysoko energetických vzorkách sa tento efekt prejavil až pri rýchlostiach  $1\,200\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $1\,400\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  [3].

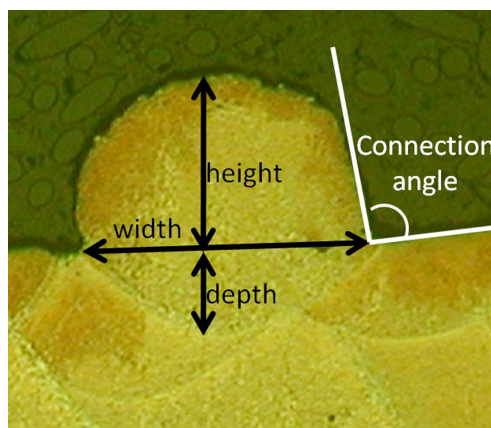
Podobný fenomén bol vypozerovaný aj v práci Wei a kol. [4], ktorý skúmal vzorky single trackov vyrobených z materiálu AlSi10Mg, kde pri konštantnom výkone lasera (150 W) a vplyvom zvyšujúcej sa rýchlosti lasera postupne dochádzalo k vzniku nespojitostí ( $1\,000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a k ballingu ( $1\,200\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) (Obr. 2-6) [4].



Obr. 2-6 Morfológia povrchu single trackov z materiálu AlSi10Mg pre rôzne procesné parametre [4]

Testy jednoduchých zvarov (*Single track test*), popísané v práci Kempen a kol. [5] sú rýchlym a jednoduchým spôsobom na identifikáciu procesného okna, kde jednotlivé zvary spĺňajú určité požiadavky. Kempen v práci skúmal materiál AlSi10Mg a procesné okno zostavoval pre výkon lasera v rozsahu 170-200 W a rýchlosť skenovania  $200\text{-}1400\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  pre výšku vrstvy  $30\text{ }\mu\text{m}$ . Vhodnosť kombinácii použitých procesných parametrov bola posudzovaná na základe požiadaviek geometrie jednoduchého zvaru, ktoré sú:

- Zvar musí byť neprerušovaný, aby nedošlo k vzniku pórov a nepravidielností.
- Aby došlo k dostatočnému prepojeniu po sebe nasledujúcich vrstiev, zvar musí jemne zasahovať do predchádzajúcej vrstvy.
- Výška zvaru musí byť približne polovicou šírky zvaru, aby došlo k vytvoreniu trojrozmiernej súčiastky.
- Kontaktný uhol medzi zvarom a predchádzajúcou vrstvou by mal byť blízky  $90^\circ$  z dôvodu zaistenia vysokej relatívnej hustoty štruktúry. Väčšie kontaktné uhly vyžadujú menšie vzdialenosti medzi susednými zvarmi.



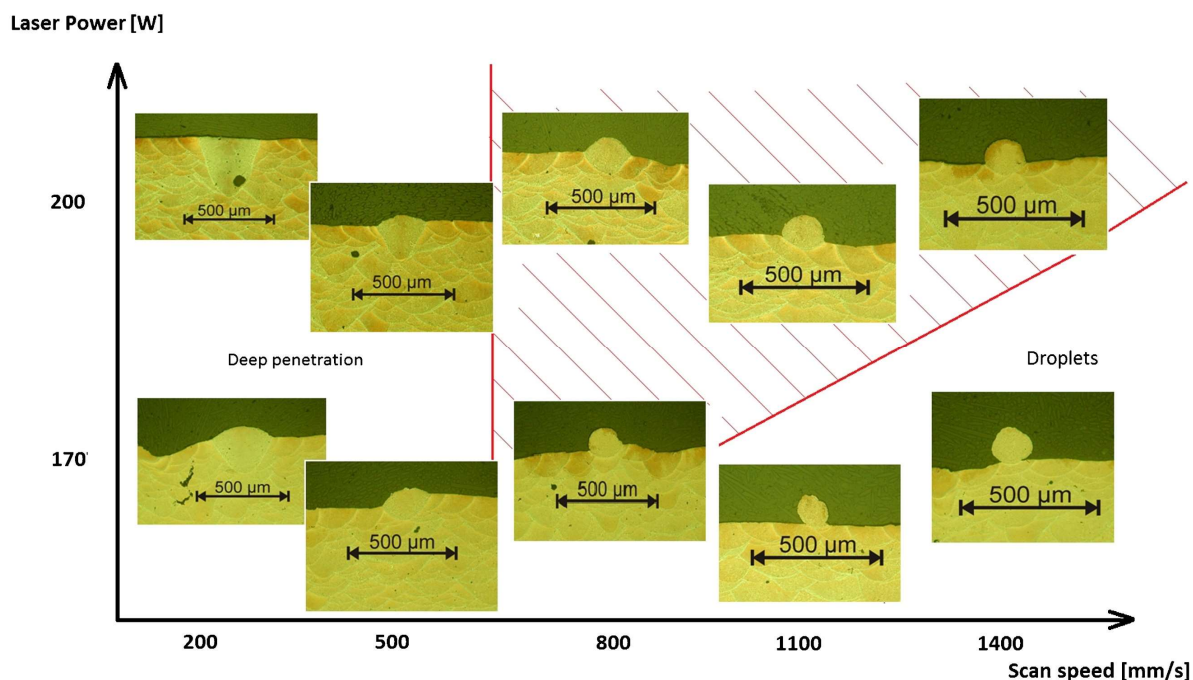
Obr. 2-7 Základné rozmery single tracku [5]

Analyzovanie jednoduchých zvarov zahŕňalo preskúmanie zvaru z pohľadu zhora a zhodnotenie geometrie jeho priečneho prierezu, ako je výška, šírka a hĺbka zvaru, ale aj jeho kontaktný uhol. Keďže tento test berie do úvahy len jedinú skenovaciu stopu namiesto skenovania plochy alebo objemu je pre analýzu použitá lineárna energia (*Linear Energy* - **LE**) daná vzťahom:

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

Kde LE je lineárna energia stiahnutá na jednotku dĺžky ( $J \cdot mm^{-1}$ ), LP je výkon laseru (W) a LS je skenovacia rýchlosť ( $mm \cdot s^{-1}$ ).

Na Obr. 2-8 je zobrazených niekoľko prierezov zvarov pre rôzne použité procesné parametre. Ako je vidieť v ľavom hornom rohu Obr. 2-8, pri použití príliš vysokej hodnoty lineárnej energie dôjde k veľmi hlbokému prievaru predchádzajúcich vrstiev materiálu, čo vedie k fenoménu tzv. kľúčovej dierky (*keyhole*). Pri tomto režime dochádza k nestabilite zvaru a k uväzneniu plynových spalín z procesu v roztavenom materiáli, čo spôsobuje vznik porozity. V pravej dolnej časti na Obr. 2-8 sú znázornené zvary s veľmi nízkou hodnotou lineárnej energie ktorá vedie k vzniku tzv. *ballingu* [5].



Obr. 2-8 Prierezové plochy single trackov vyrobené s rôznymi procesnými parametrami [5]

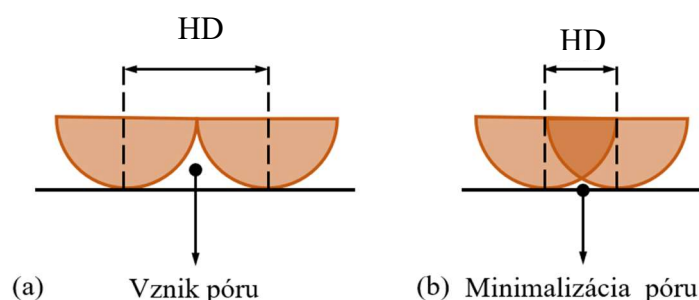
## Vplyv vzdialenosti dráh laseru

Medzi ďalšie procesné parametre, ktoré majú významný vplyv na výslednú kvalitu tlače, resp. jej defektovosť, patrí vzdialenosť dvoch vedľa seba idúcich dráh laseru pri skenovaní (HD). Nastavenie tejto vzdialenosti má vplyv na veľkosť energie dodávanej do procesu výroby objemových súčastí, na ich porozitu a kvalitu štruktúry. Veľkosť tejto objemovej energie (*Volume Energy Density -VED*) sa vypočíta pomocou vzťahu [6]:

$$VED = \frac{LP}{LS \cdot t \cdot HD} \quad (J \cdot mm^{-3}) \quad (2)$$

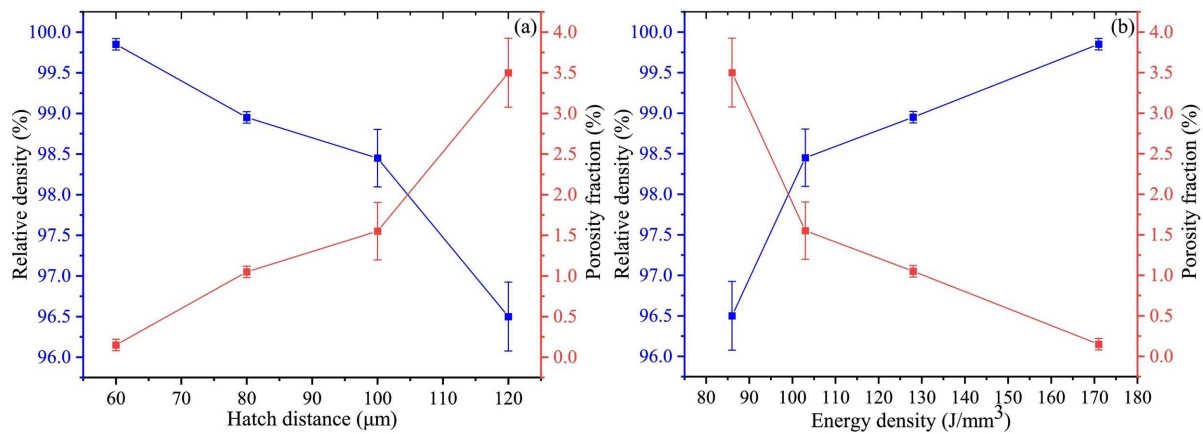
Kde VED je objemová hustota energie ( $J \cdot mm^{-3}$ ), LP je výkon laseru (W), LS je rýchlosť lasera ( $mm \cdot s^{-1}$ ), t je výška nanášanej vrstvy prášku (mm) a HD je vzdialenosť dráh laseru (mm).

Na Obr. 2-9 sú znázornené vplyvy vzdialenosti zvarov (HD) na vznik porozity v objeme materiálu. Na Obr. 2-9 (a) vzniká medzi zvarmi nepretavené miesto v ktorom dochádza k vzniku póru a hromadí sa v ňom nespracovaný prášok. Postupným približovaním dráh laseru, znižovaním HD tak, aby sa zvary prekrývali (Obr. 2-9 (b)), dokážeme tento efekt eliminovať. Pri prílišnom prekrytí susedných zvarov však dochádza k prehrievaniu materiálu, čo vedie k vzniku *keyhole* efektu. Vzdialenosť medzi jednotlivými dráhami laseru je štandardne odporúčaná v rozsahu od 50-40% šírky jedného zvaru [4][7].



Obr. 2-9 Vplyv vzdialenosti dráh na vznik pórov; (a) veľká vzdialenosť zvarov, (b) optimálna vzdialenosť zvarov

Li a kol. [8] vo svojej práci skúmajú mechanizmy tvorby porozity hliníkovej zliatiny AlMgScZr so zameraním na vplyv vzdialenosti susedných dráh laseru. Pri práci vyrobili vzorky s výkonom  $P = 370 \text{ W}$ , rýchlosťou  $v = 1200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , výškou vrstvy  $30 \mu\text{m}$  a zaostrením lasera  $100 \mu\text{m}$  pre štyri rôzne vzdialenosti dráha lasera (60, 80, 100 a  $120 \mu\text{m}$ ). Na Obr. 2-10 (a) a (b) je vykreslená výsledná závislosť relatívnej hustoty, resp. porozity, vyrobených vzoriek na vzdialenosti susedných dráh laseru (HD) resp. na objemovej hustote energie (VED). Pre všetky vyrobené vzorky sa relatívna hustota pohybovala v rozsahu od ~96,1% do ~99,8%, pričom vyššie hodnoty relatívne hustoty boli dosiahnuté pri nižších hodnotách HD.

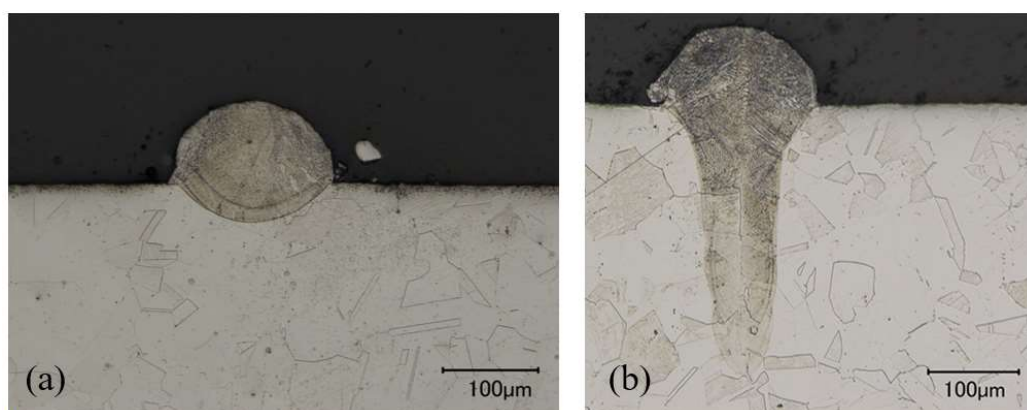


Obr. 2-10 Závislosť relatívnej hustoty a porozity na (a) HD a (b) VED [8]

V závislosti od vzdialenosti susedných dráh lasera (HD) boli vypozerované tri druhy defektov. Malé sférické póry pravdepodobne spôsobené vlhkosťou či prítomnosťou, veľké sférické (plynové) póry spôsobené vyparovaním kovu v hĺbke zvarového kúpeľa a jeho následným stuhnutím a nepravidelné (nedostatočne pretavené - *lack of fusion* - LOF) póry pre veľké hodnoty HD (menovite pre HD = 120 μm) [8].

#### Režimy tavenia, tvar zvarov a defekty v štruktúre

Ako už bolo zmienené v predchádzajúcich častiach, vplyvom energie vstupujúcej do procesu dochádza pri aditívnej výrobe kovových dielov k dvom rôznym režimom tavenia. Prvým z nich je konduktívny režim (*conduction*), ktorý sa vyskytuje v prípade použitia relatívne nízkeho výkonu lasera a spôsobuje vznik polkruhového zvarového kúpeľa (Obr. 2-11 (a)). Druhým tavným režimom je režim kľúčovej dierky (*keyhole*), ktorý vzniká pri relatívne vysokom výkone lasera a vytvára hlbšie a užšie tvary zvarov (Obr. 2-11 (b)) [9].



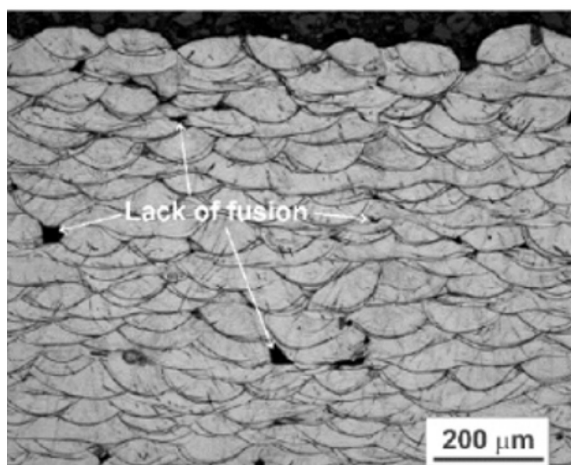
Obr. 2-11 Tavné režimy (a) konduktívny režim – *Conduction*, (b) režim kľúčovej dierky -*Keyhole* [10]

Pozorovaním režimov zvarov pri LPBF sa zaoberal aj King a kol. [10], ktorí tieto taviace režimy rozdelili na základe pomeru hĺbky zvaru ( $h_z$ ) k polovici šírky zvaru ( $s_z$ ). V prípade, ak je tento pomer (Rov.3) menší alebo rovný ako jedna, hovoríme o *conduction* režime. V opačnom prípade sa jedná o *keyhole* režim, ktorý dosahuje kritickú hodnotu pre pomere väčšom ako 2,5. Najlepšie zvary sa nachádzajú na hranici týchto režimov, kde dosahujú zvary dostatočnú šírku a zároveň dochádza k dostatočnému prepojeniu s predchádzajúcou vrstvou materiálu.

$$\frac{h_z}{\frac{s_z}{2}} = 1 (-) \quad (3)$$

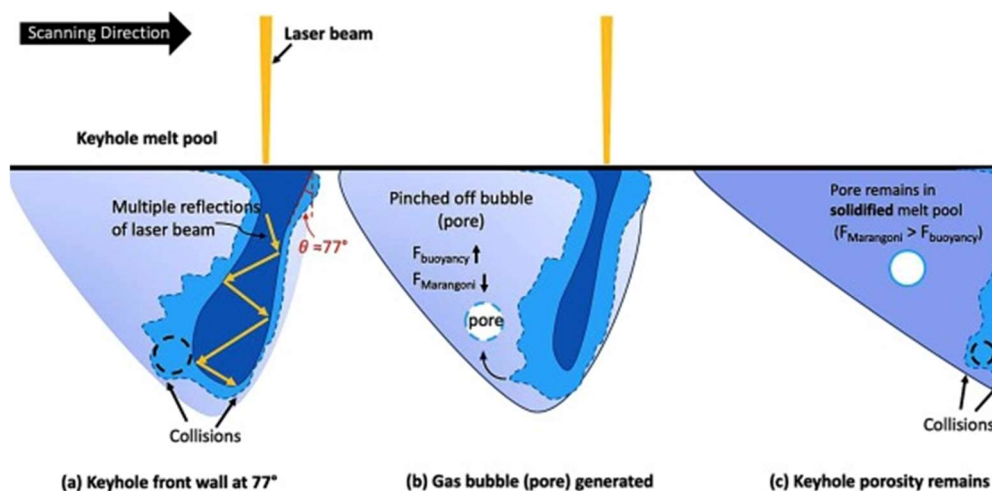
V prípade *conduction* režimu majú zvary zvyčajne polkruhový tvar (Obr. 2-11 (a)) s malým pomerom strán [10]. Tento režim je spojovaný so zvarmi, kde sú dutiny spôsobené vyparovaním kovových pár zanedbateľné, nakoľko pri tavení nedochádza vo zvarovom kúpeli k prekročeniu teploty varu spracovávaného materiálu [9].

Pri ideálnom *conduction* režime by mala vzniknúť plná štruktúra bez vnútornej porozity. Avšak pri nevhodne nastavenom prekryve (*overlap* – **OL**) susedných vrstiev, ktorý je daný ich vzdialenosťou (HD) [1], [8], [11], prípadne vplyvom nízkej energie vstupujúcej do procesu tavenia (LP/LS) [3], [12], [13] dochádza v oblasti medzi susednými zvarmi k vzniku porozity v dôsledku nedostatočnej fúzie (*LOF*). Pri LOF porozite majú vzniknuté póry nepravidelný tvar (Obr. 2-12) a môžu sa v nich vyskytovať neroztavené častice prášku, keďže nedošlo k dostatočnému pretaveniu susedných zvarov či predchádzajúcich vrstiev materiálu [14].



Obr. 2-12 *Lack Of Fusion* porozita [14]

Postupným zvyšovaním intenzity lasera dochádza k prechodu z *conduction* na *keyhole* režim. Vplyvom zvyšovania teploty až nad teplotu varu materiálu vznikajú kovové výpary vytvárajúce spätný tlak. Tento tlak tlačí roztavený kov nadol, čo vedie k vytvoreniu dlhej a štíhlej dutiny plynu – keyhole, v ktorom dochádza k odrážaniu laserového lúča od prednej a zadnej steny až do jeho úplného pohltienia [9]. Znázornenie tohto efektu je vidieť na Obr. 2-13 Predĺženie hĺbky zvaru je spôsobené práve *keyhole* efektom [15].

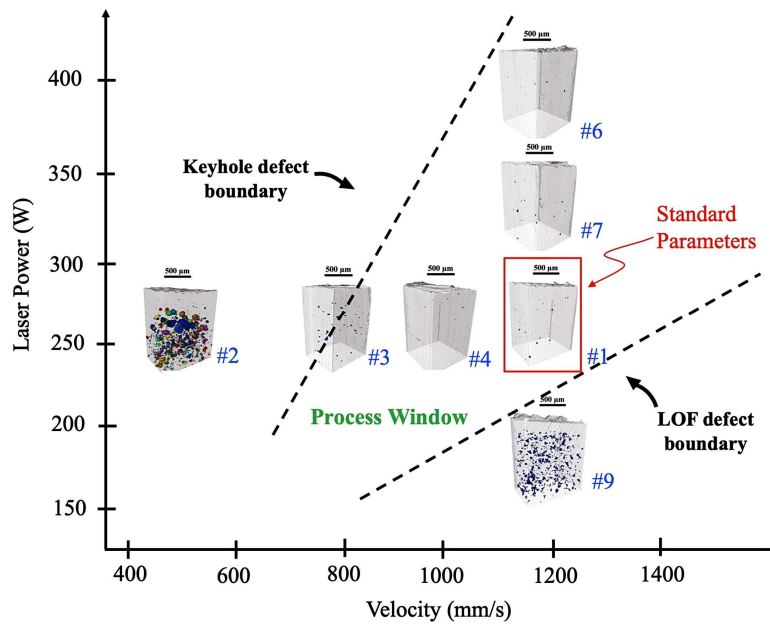


Obr. 2-13 Keyhole režim a vznik keyhole porozity [15]

Na Obr. 2-13 z práce Gordona a kol. [15] je zároveň vidieť proces vzniku keyhole porozity, kde vplyvom keyhole efektu dochádza k vytvoreniu kovových pár, ktoré vo forme póru ostávajú uväznené v stuhnutom zvarovom kúpeli. Takto vzniknuté pózy majú zvyčajne pravidelný sférický tvar.

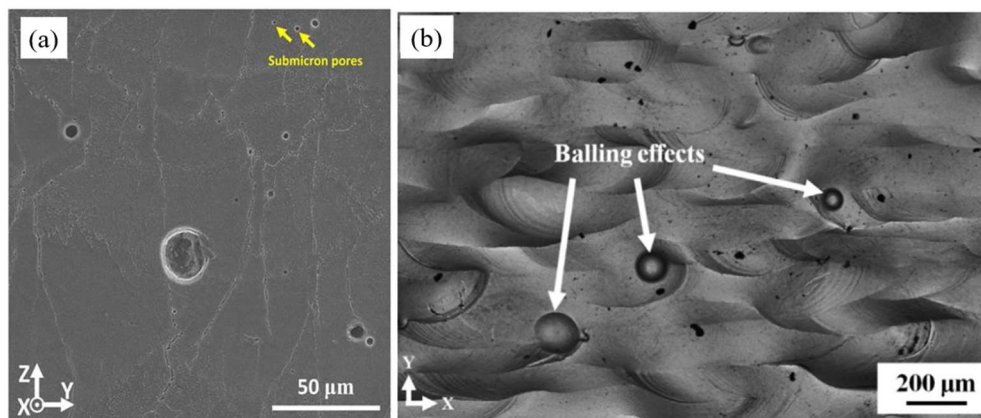
Gordon a kol. [15] vo svojej práci o štruktúrach defektov pre aditívnu výrobu technológiou LPBF pre testované vzorky z titánovej zliatiny Ti-6Al-4V ďalej vykresľujú mapu procesných parametrov. Táto mapa (Obr. 2-14) znázorňuje závislosť energie a rýchlosti lasera na druh vzniknutej porozity pozorovanej v štruktúre. Z Obr. 2-14 je zjavné, že pri zachovaní konštantného výkonu lasera (LP) a postupným znižovaním jeho rýchlosti (LS) bude v štruktúre vznikať primárne keyhole porozita. Na druhú stranu, pri zachovaní konštantnej rýchlosti lasera a s postupným znižovaním jeho výkonu budú v štruktúre vznikať primárne LOF defekty. Medzi týmito oblasťami sa nachádza takzvané procesné okno, v ktorom sú vhodne nastavené parametre procesu výroby a sú v nej dosahované najnižšie hodnoty porozity.





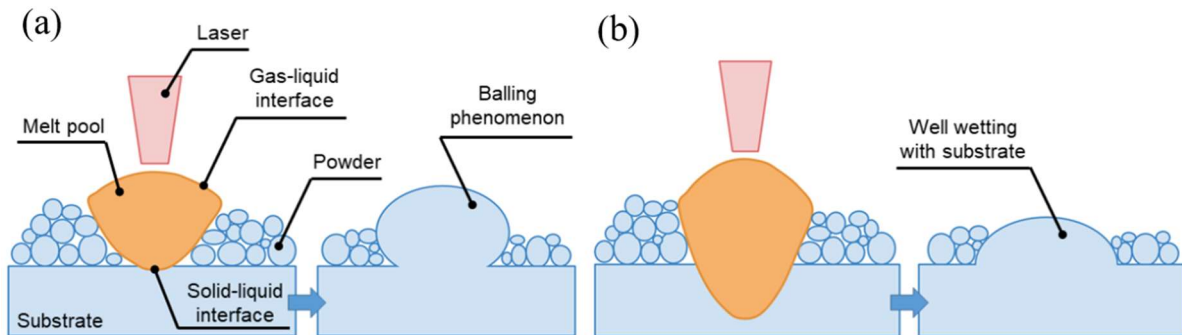
Obr. 2-14 Procesná mapa zobrazujúca oblasť Keyhole (ľavá časť) a LOF (pravá časť) defektov a procesné okno s vhodne nastavenými procesnými parametrami [15]

Okrem vyššie spomínanej porozity, ktorá vzniká priamo v súvislosti s nastavením procesných parametrov, sa pri hliníkových zliatinách vyskytuje aj porozita vo forme malých plynových pórov s veľkosťou v jednotkách mikrometrov (Obr. 2-15 (a)) prípadne v nižších desiatkach mikrometrov, ktorá vzniká vplyvom uväznenia plynu. Uväznený plyn môže byť spôsobený rôznymi vplyvmi pred alebo počas SLM procesu, ako je napríklad uväznenie plynu v prášku počas atomizácie, pri zachytení inertnej ochrannéj argónovej atmosféry počas procesu výroby alebo pri vyparovaní legujúcich prvkov a vodíka ktorý sa vytvoril z vlhkosti obsiahnutej v prášku [16], [17].



Obr. 2-15 Defekty v štruktúre (a) mikro-póry spôsobené uväzneným plynom [16]; (b) balling efekt [18]

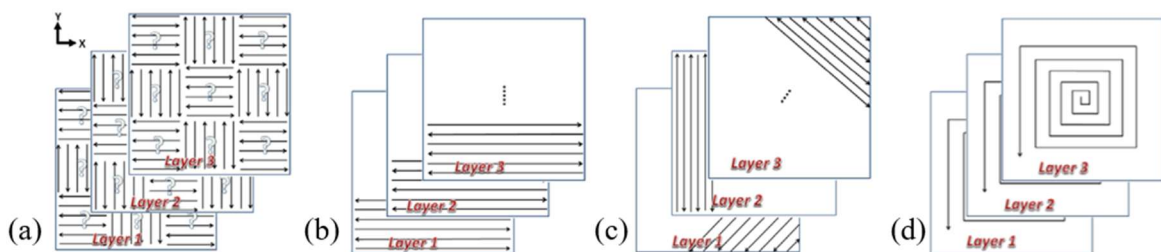
Ďalším negatívnym efektom, ktorý už bol v tejto práci spomínaný a ktorý vzniká pri SLM procese je *balling* (Obr. 2-15 (b)). Vplyvom nízkej energie sa tavenina snaží minimalizovať svoju povrchovú energiu, čo vedie k nízkej zmáčavosti, nekonzistentnosti zvaru a vysokej porozite materiálu. Zvýšením množstva energie vstupujúcej do procesu dôjde k zväčšeniu množstva taveniny a zníženiu jej viskozity, čím sa zlepši zmáčavosť a potlačí sa tak vznik *balling* efektu [19]. Proces vzniku *balling* efektu je vidieť na Obr. 2-16 (a) a jeho odstránenie na Obr. 2-16 (b).



Obr. 2-16 Tuhnutie počas SLM procesu: (a) čiastočné prenikanie lasera do prášku; (b) dostatočný prienik lasera do vrstvy prášku [20]

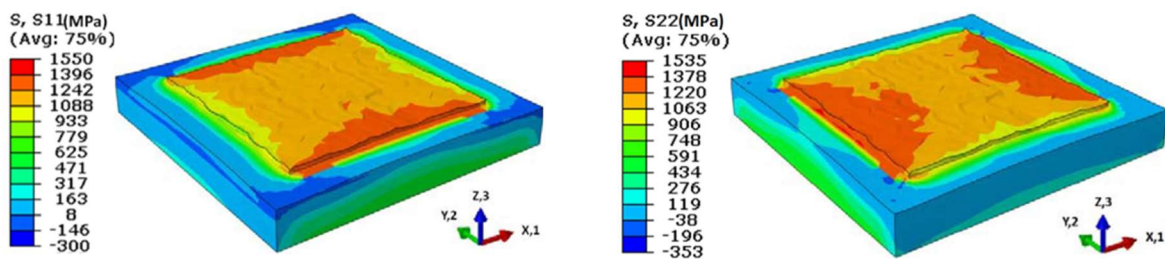
### Vplyv skenovacej stratégie

Skenovaciu stratégiu definuje dráha lasera pri tavení jednotlivých vrstiev prášku. Je všeobecne známe, že skenovacia stratégia výrazne ovplyvňuje vznik zvyškových napätí, ktoré môžu spôsobiť vznik trhlín v materiáli, delamináciu vrstiev, ale aj plastické deformácie vytlačených dielov. Dôvodom vzniku zvyškových napätí je priebeh teplotného gradientu - rýchly ohrev a následné rýchle ochladenie taveniny [21],[22].



Obr. 2-17 Príklady skenovacích stratégií (a) Island scanning; (b) Line scanning; (c) Rotation scanning; (d) In-out scanning [22]

Cheng a kol. [22] vo svojej práci skúmali vplyv skenovacej stratégie na zvyškové napätia v materiáli. Pre vzorku s rozmermi  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  s výškou  $150 \text{ }\mu\text{m}$  (troch vrstiev) vyrobených z materiálu IN718 bolo pomocou softwaru ABAQUS preskúmaných osem druhov skenovacích stratégií. Vo všetkých prípadoch bolo tlakové napätie najvyššie na stranách vzorky a znižovalo sa smerom do jej stredu. Ďalej však dochádzalo k tomu, že zvyškové napätie bolo nerovnomerne rozložené v rovine X-Y (Obr. 2-18).



Obr. 2-18 Rozloženie zvyškového napätia stratégie *Island* (a) v smere osy X; (b) v smere osy Y [16]

Ďalším poznatkom tejto štúdie bolo zistenie, že najväčšie zvyškové napätie bolo v skúšobnej vzorke dosiahnuté pri stavbe zvonku smerom dnu -stratégiou *out-in* a najmenšie pre stratégiu typu *45° line*, teda pri skenovaní pod uhlom  $45^\circ$  bez rotácie medzi jednotlivými vrstvami. Nízka hodnota napätia stratégie *45° line* súvisí s rovnomerným rozptylom teplotného gradientu do oboch smerov [16].

Pri výrobe objemových dielov sa najčastejšie používa technológia *island*, kde práve použitie kratších vektorov skenovania a rotácia nasledujúcich vrstiev znižuje koncentráciu zvyškového napätia v súčiastke. Pootočenie vektorov skenovania o určitý uhol zároveň zabraňuje indukovaniu opakujúcich sa defektov. Najčastejší uhol rotácie ďalšej vrstvy je  $67^\circ$  [21],[22].

## 2.2.2 Austenitické ocele

Jedná sa o ocele, ktoré po spracovaní dosahujú primárne austenitickú štruktúru s plošne stredenu kryštalickú mriežku (*face centred cubic - FCC*). Obsahujú veľmi nízky podiel uhlíka a austenit stabilizujúce prvky ako je nikel či mangán. Ďalším pridaním chrómu zabezpečíme ich koróznou odolnosť. Medzi bežne používané chróm-niklové austenitické ocele používané aj pri AM výrobe patria materiály ako 304 či 316L [23].

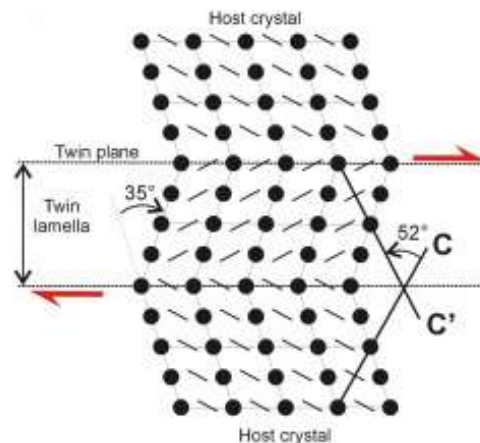
Podľa mechanizmu deformácie a ich chemického zloženia môžeme austenitické ocele rozdeliť na plasticitou vyvolanú transformáciu (*Transformation Induced Plasticity – TRIP*), pre ocele s nízkym obsahom mangánu a dvojčatením vyvolanú plasticitu (*Twinning Induced Plasticity – TWIP*) pre ocele s vysokým obsahom mangánu (*High Manganese Steel – HMnS*).

### TRIP materiál

TRIP správanie alebo deformačné spevnenie spôsobuje postupný nárast deformačného napätia – v plastickej oblasti namáhania rastie hustota dislokácií, čo obmedzuje ich ďalší pohyb a vyčerpávajú tak plasticitu materiálu. Tento jav zvyšuje odolnosť proti plastickej deformácii namáhaného materiálu na úkor jeho ťažnosti [23, 24].

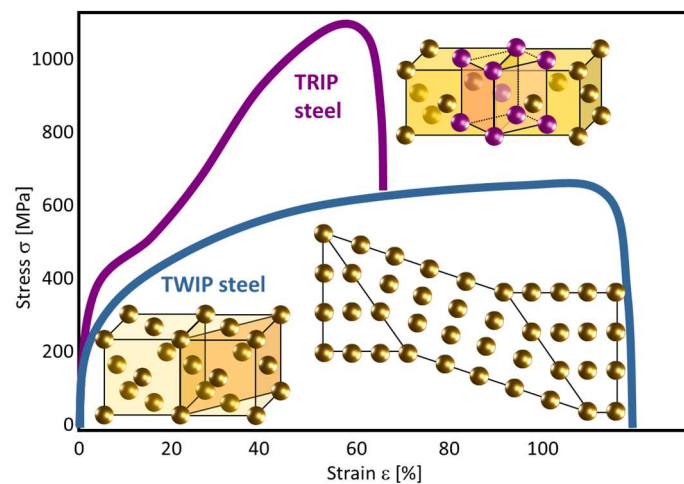
## TWIP materiál

Okrem sklzu dislokácií, ktorý spôsobuje vznik plastickej deformácie, prebieha u TWIP materiálov deformácia mechanickým dvojčatením. Pri tomto mechanizme sa časť kryštalickej mriežky posunie tak, že vytvára zrkadlový obraz neposunutej časti mriežky (Obr. 2-19). Obe časti mriežky sú symetrické podľa roviny dvojčatenia a jedná sa o zvláštny prípad sklzu dvoch rovín [24].



Obr. 2-19 Dvojčatenie [25]

Ako je vidieť na Obr. 2-20 TRIP materiály dosahujú oproti TWIP materiálom oveľa vyššie hodnoty medze pevnosti, kde so zvyšujúcim namáhaním dochádza k ich deformačnému spevňovaniu. TWIP materiály však dosahujú oveľa vyššie hodnoty deformácie do porušenia.



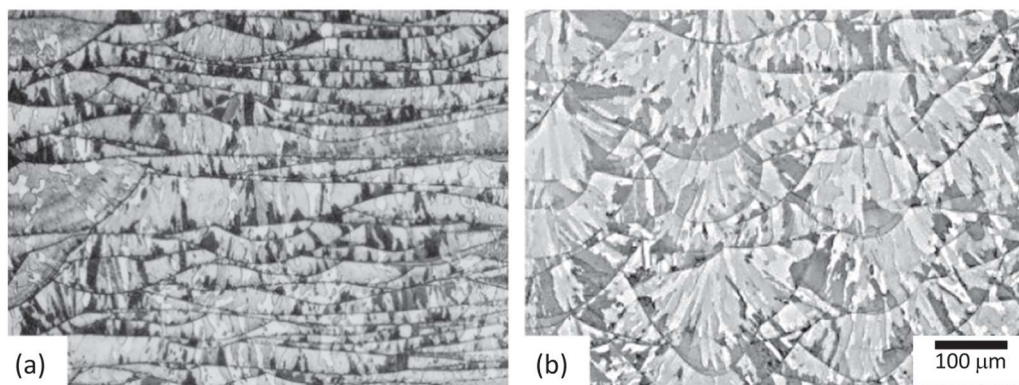
Obr. 2-20 Porovnanie TRIP a TWIP vlastností materiálu [26]

### 2.2.3 Aditívne spracovanie austenitických ocelí

#### Rast zŕn a orientácia kryštalografickej štruktúry

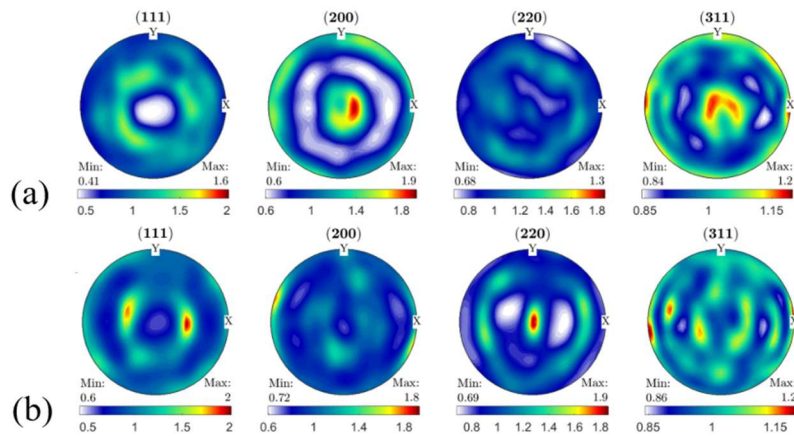
Choo a kol. [27] vo svojej práci riešil vplyv výkonu lasera na defekty, textúru a mikroštruktúru LPBF spracovanej nehrdzavejúcej ocele 316L. Pri zachovaní konštantnej rýchlosti ( $LS = 300 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) na štyroch valcových vzorkách menil nastavenie výkonu lasera ( $LP = 200, 260, 320$  a  $380 \text{ W}$ ). Ďalšie parametre vrátane zamerania lasera  $207 \mu\text{m}$ , výšky vrstvy  $t = 60 \mu\text{m}$ , vzdialenosť zvarov  $HD = 0,1 \text{ mm}$  a obvodovej skenovacej stratégie s otáčaním vrstvy o  $90^\circ$  zostávajú nezmenené.

Pre takto nastavené procesné parametre pozoroval v štruktúre významné rozdiely. Na Obr. 2-21 (a) je zobrazená prierezová plocha zvarov pre  $LP = 380 \text{ W}$ . Pre tieto parametre je tvar zvarov úzky a široký a rast stĺpcových zŕn prebieha takmer rovnobežne so smerom výstavby (BD). Pri použití nižšieho výkonu ( $LP = 200 \text{ W}$ ) dochádzalo k nárastu hĺbky zvaru a stĺpcové zrná rastú v tvare rybej šupiny radiálne pozdĺž smeru odberu tepla (Obr. 2-21 (b) [27]).



Obr. 2-21 Porovnanie tvaru prierezu zvarov v štruktúre (a) 380 W a (b) 200 W [27].

Okrem tvaru zvarov v štruktúre bola skúmaná aj závislosť medzi PP a orientáciou kryštalografickej štruktúry. Výsledná štruktúra je pre jednotlivé orientácie zobrazená pomocou pólových obrázkov (*pole figures*) na Obr. 2-22, kde stred obrázka reprezentuje osu Z rovnobežnú so smerom výstavby vzoriek. Pre výkon lasera  $LP = 380 \text{ W}$ , bola dominantná textúra s orientáciou (200) (Obr. 2-22(a)) a pre výkon  $LP = 320 \text{ W}$  textúra s orientáciou (220) (Obr. 2-22 (b)). Pre ďalej sa znižujúci výkon dochádzalo k vzniku náhodnej štruktúry.

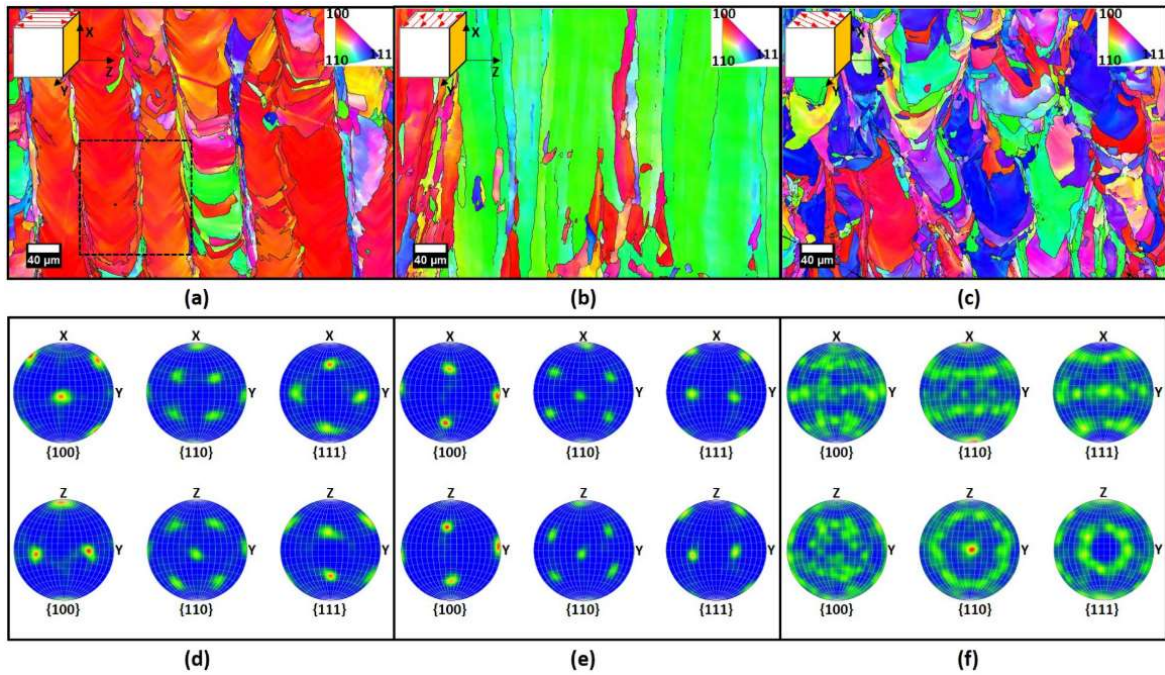


Obr. 2-22 Pole figures reprezentujúce orientáciu FCC mriežky pri výkone (a) 380 W (b) 320 W [27]

Marattukalam a kol. [28] vo svojej práci skúmali vplyv skenovacej stratégie na vznikajúcu štruktúru v austenitickej oceli 316L SS a jej vplyv na základné mechanické vlastnosti. Použité parametre výroby boli  $LP = 107 \text{ W}$ ;  $LS = 800 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $HD = 70 \text{ }\mu\text{m}$ . Použitá výška prášku bola  $h = 20 \text{ }\mu\text{m}$ , bod zaostrenia lasera bol  $40 \text{ }\mu\text{m}$  a skenovacia stratégia bola zvolená meander, ako bez rotácie nasledujúcich vrstiev, tak aj s rotáciou nasledujúcej vrstvy o  $67^\circ$ . Tieto experimenty boli vykonané na vzorkách kociek s rozmermi  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ .

Mikroštruktúra skúmaného materiálu závislá na stratégii a smere skenovania z práce Marattukalam a kol. je zobrazená v podobe EBSD máp na Obr. 2-23 (a-c) s následnou interpretáciou pomocou IPF na Obr. 2-23 (d-f).

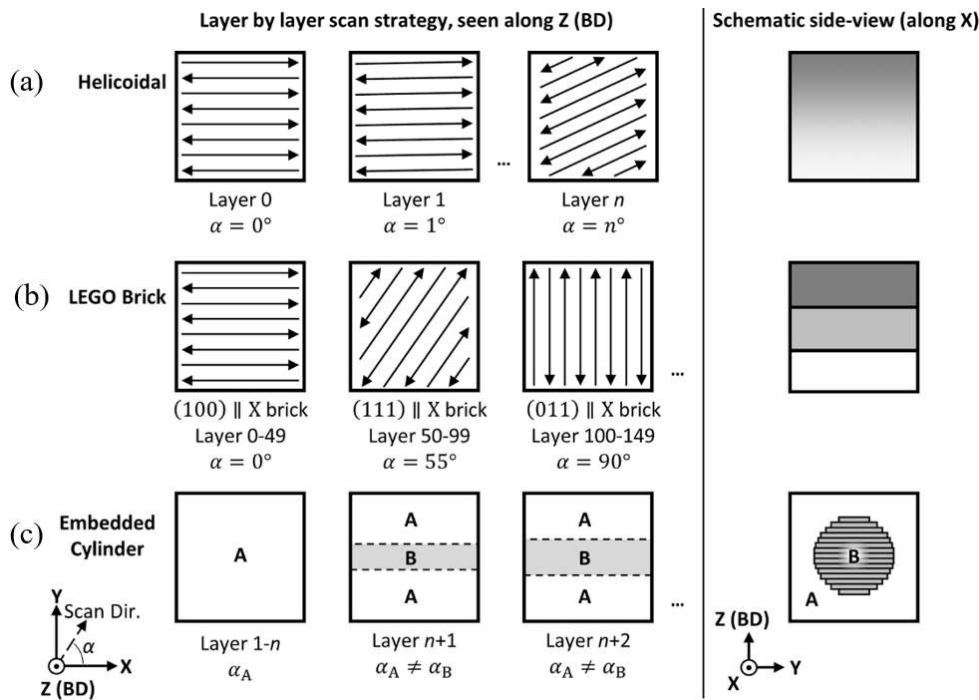
Pri použití stratégie meander bez rotácie so smerom skenovania v smere osy Z bola dosiahnutá silná kryštalografická štruktúra s orientáciou  $\langle 100 \rangle$  v tomto smere, čo potvrdzuje aj silná intenzita tejto orientácie v smere osy Z (viď. Obr. 2-23 (a,d)). Pri skenovaní bez rotácie v smere osy Y bola dosiahnutá štruktúra  $\langle 110 \rangle$  kolmá na rovinu XY (viď. Obr. 2-23 (b,e)) [28]. V oboch prípadoch vzniká jasná preferenčná štruktúra materiálu a vývoj jednotlivých zrn prebieha viacerými postupne vytváranými vrstvami materiálu.



Obr. 2-23 EBSD mapy v rovine XY pre rôzne smery skenovania (a-c); a PF vytvorené pre jednotlivé stratégie skenovania (d-f) [28]

Pri skenovaní s rotáciou nasledujúcej vrstvy o  $67^\circ$  sa stredy zvarových kúpeľov v nasledujúcich vrstvách neprekrývajú, v každej vrstve vytvárajú rôznu morfológiu a narúšajú tak vznik a vývoj jedinej kryštalickej štruktúry, ktorá potom pôsobí ako náhodná (Obr. 2-23 (c)). Pri preskúmaní IPF bola najvýznamnejšia textúra  $\{110\}$  pozorovaná kolmo na rovinu YZ. Rozptýlené krúžky zobrazené na Obr. 2-23 (f) pre orientáciu  $\{110\}$  demonštrujú vláknovú štruktúru pozdĺž osy Z [28].

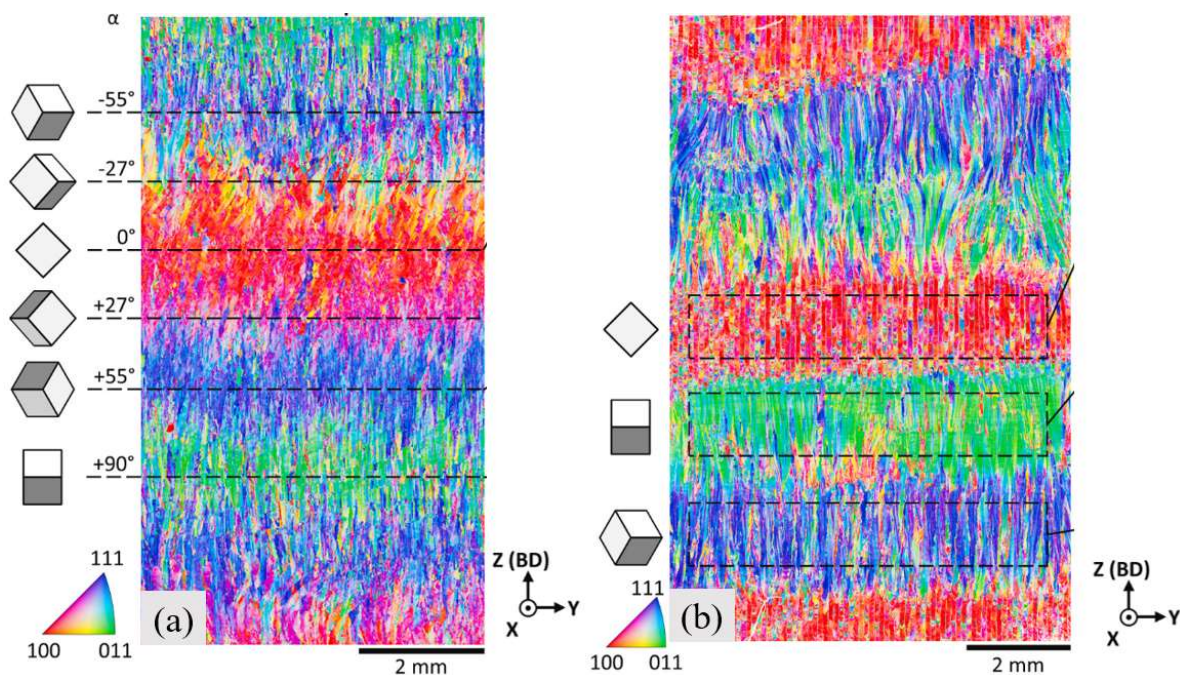
Vplyvom skenovacej stratégie na vznik a úpravu mikroštruktúry materiálu 316L sa vo svojej práci zaoberal Sofinowski a kol. [29]. Základné parametre výroby boli  $LP = 240 \text{ W}$ ;  $LS = 600 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $HD = 100 \text{ }\mu\text{m}$  a výška vrstvy bola  $h = 40 \text{ }\mu\text{m}$ . Bod zaostrenia lasera bol  $80 \text{ }\mu\text{m}$  a použité skenovacie stratégie vychádzali z modifikácie stratégie meander. Konkrétne sa jednalo o špirálovú (*Helicoidal*), kde bolo natočenie každej nasledujúcej vrstvy o  $1^\circ$  (Obr. 2-24 (a)), stratégiu LEGO kocky (*LEGO Brick*), kde bolo natočenie skenovania konštantné po dobu 50 vrstiev, potom došlo k jeho ďalšiemu otočeniu. Vzorka LEGO Brick bola vystavená z troch rôznych na seba umiestnených blokov materiálu (Obr. 2-24 (b)). Posledná stratégia bola stratégia vloženého valca (*Embedded Cylinder*), kde bol základový materiál aj vložený valec postavený s konštantným natočením skenovania bez rotácie avšak ich uhol natočenia bol rôzny (Obr. 2-24 (c)) [29].



Obr. 2-24 Skenovacie stratégie použité pri stavbe vzoriek (a) špirálová; (b) LEGO kocka; (c) vložený valec [29]

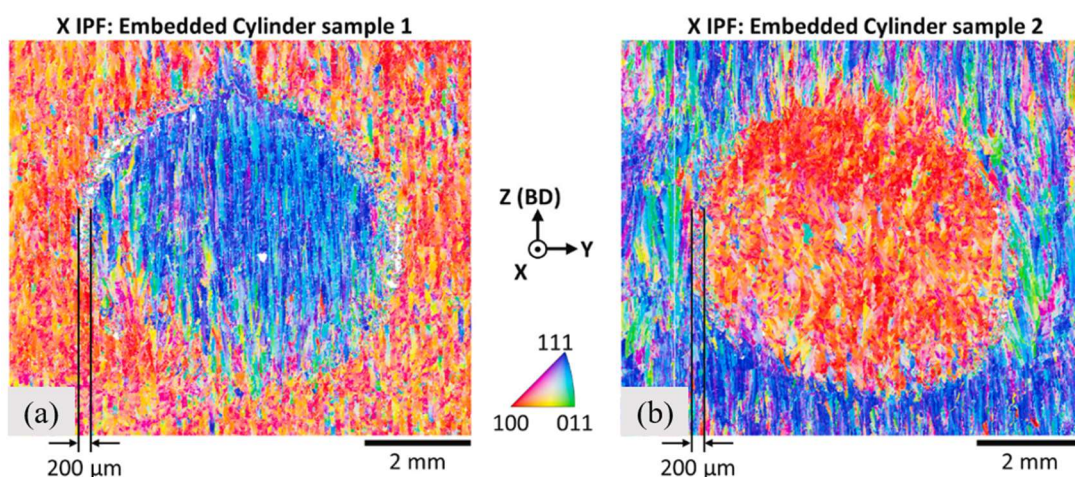
Na Obr. 2-25 (a) je zobrazená EBSD mapa špirálovej vzorky, kde je vidieť vplyv postupného natáčania smeru skenovania, ktorý vzorku rozdelil na viacero oblastí s rôznymi preferenčnými štruktúrami. Pre uhol natočenia  $0^\circ$  to bola štruktúra s výraznou orientáciou  $\langle 100 \rangle$ , pre uhol  $55^\circ$  štruktúra s orientáciou  $\langle 111 \rangle$  a pre uhol  $90^\circ$  zase štruktúra s orientáciou  $\langle 011 \rangle$ . V oblasti medzi takto definovanými natočeniami vznikali prechodové oblasti, v ktorých sa štruktúra postupne menila. Pri stratégii LEGO Brick dosahovali štruktúry rovnaké orientácie ako pri špirálovej vzorke. Pri LEGO Brick stratégii bol očakávaný ostrý prechod medzi rôzne nastaveným smermi skenovania. Bolo však vyzorované, že prechody medzi týmito stratégiami potrebovali niekoľko vrstiev materiálu na úplnú zmenu štruktúry Obr. 2-25 (b). Dĺžka prechodu medzi štruktúrami závisí od príslušných štruktúr a zmeny uhlu skenovania medzi nimi. V závislosti od zmeny tohto uhlu o  $\Delta\alpha = 35^\circ, 55^\circ, 90^\circ$  potrebovala štruktúra v priemere  $19 \pm 2,2$ ;  $23 \pm 0,52$ ;  $28 \pm 2,0$  vrstvy materiálu na úplnú zmenu preferenčnej orientácie zrn. Všetky hodnoty sú napočítané so spoľahlivosťou 95% [29].





Obr. 2-25 EBSD mapa vzorky vyrobenej stratégiou (a) špirály; (b) LEGO kocky [29]

Podobne ako pri stratégii LEGO kocky, aj v prípade vloženého valca dochádza k postupnej zmene štruktúry na ich rozhraní (Obr. 2-26). Morfológia zŕn sa postupne mení od veľkých orientovaných zŕn na horizontálnom rozhraní, na ktoré má vplyv silný teplotný gradient v BD, po jemné zrná na vertikálnych hraniciach. K prechodu na vertikálnych rozhraniach dochádza na ploche  $\sim 200 \mu\text{m}$ , čo zodpovedá približne šírke dvoch rozstupov šrafovania (HD). K prechodu medzi stĺpcovými na rovnoramenné zrná dochádza aj napriek tomu, že parametre lasera zostávajú rovnaké a mení sa len uhol skenovania na ich rozhraní [29].

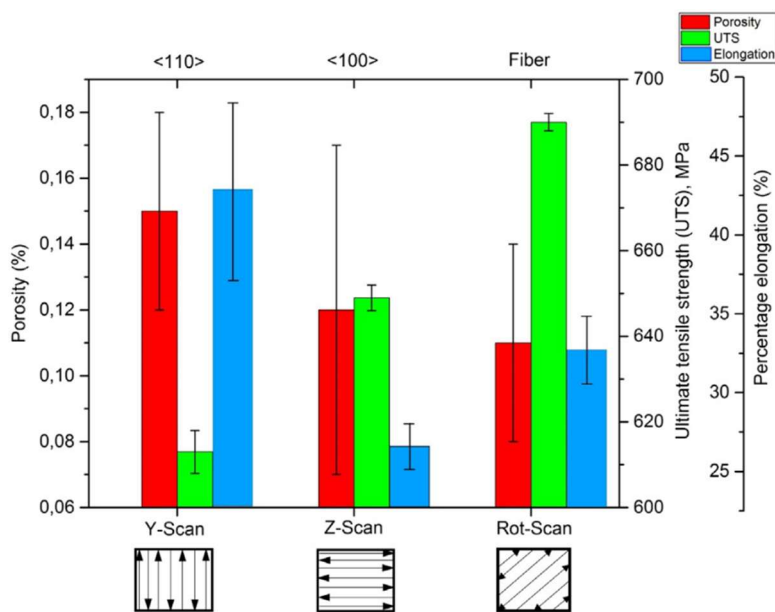


Obr. 2-26 EBSD mapa vzorky vloženého kužeľu pre dve kombinácie parametrov [29]

## Mechanické vlastnosti

V závislosti od vzniknutej kryštalografickej štruktúry a preferenčnej orientácie jej zŕn sa významne líšia aj základné mechanické vlastnosti spracovávanej austenitickej ocele. Marattukulam a kol. [28] testoval vplyv skenovacej stratégie na tvorbu kryštalografickej štruktúry a jej mechanické vlastnosti. Pri práci dosiahol tri rôzne orientácie kryštalografických zŕn závislých na skenovacej stratégii. Konkrétne sa jednalo o štruktúry s orientáciou  $\langle 110 \rangle$  a  $\langle 100 \rangle$  v smere zaťažovania a „Fibre“ štruktúru, ktorá v smere zaťažovania vykazovala náhodné rozloženie orientácii  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$ , a  $\langle 111 \rangle$ .

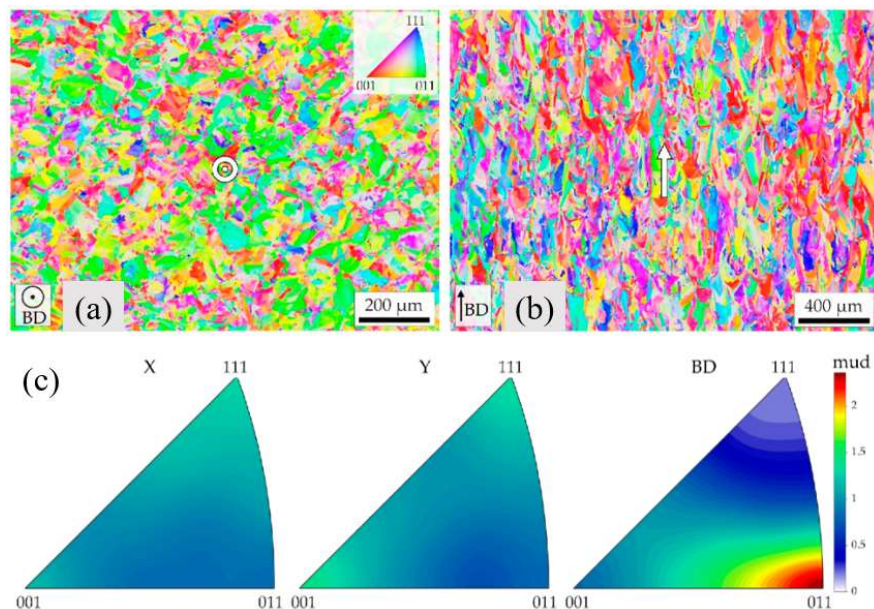
Výsledky z ťahovej skúšky zahrňujúce UTS, predĺženie do porušenia a porozitu sú zobrazené na Obr. 2-27 z ktorého jasne vyplýva, že náhodná „Fibre“ štruktúra dosiahla najvyššie hodnoty UTS a štruktúra  $\langle 110 \rangle$  najnižšie s rozdielom 11%. Štruktúra  $\langle 110 \rangle$  zároveň dosahuje najlepšie hodnoty predĺženia do porušenia ktoré sú o 38% resp. 24% vyššie ako predĺženie pre štruktúru  $\langle 100 \rangle$ , resp. Fibre štruktúru. To je spôsobené tým, že orientácia  $\langle 110 \rangle$  v smere osi zaťažovania je náchylná na mechanické dvojčatenie (*twinning*), odďaľuje nástup zužovania (*necking*) materiálu, čo vedie práve k vynikajúcemu predĺženiu počas deformácie. Najvyššie hodnoty porozity dosahovala štruktúra  $\langle 110 \rangle$  a najnižšie práve štruktúra Fibre [28].



Obr. 2-27 Výsledné mechanické vlastnosti závislé na orientácii kryštalografickej štruktúry [28]

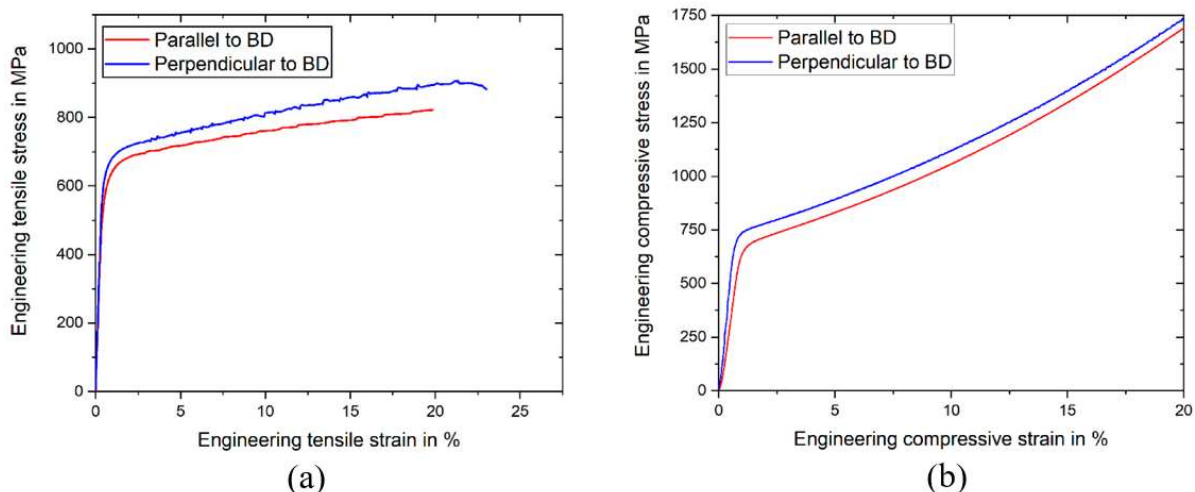
Otto a kol. [30] sa vo svojej práci zaoberal vplyvom orientácie stavby na dosahovanú mikroštruktúru a mechanické vlastnosti vzoriek z vysoko mangánovej ocele (HMnS). Pri výrobe ťahových a tlakových vzoriek bola mikroštruktúra dosiahnutá len samotnou orientáciou vzoriek, a to buď stavbou v horizontálnej, alebo vo vertikálnej polohe.

Pre tieto konfigurácie bola v smere kolmom na smer výstavby (BD) dosiahnutá veľmi silná štruktúra s menšími zrnami ( $47\ \mu\text{m}$ ) s preferenčnou orientáciou  $\langle 011 \rangle$ , ako je vidieť na EBDS mape a IPF (Obr. 2-28 (a), (c)). S smere rovnobežnom s rovinou výstavby (BD) mali vzniknuté zrná väčšie rozmery ( $77\ \mu\text{m}$ ) s hlavným smerom rastu v smere bielej šípky (Obr. 2-28 (b)) a náhodnou orientáciou zŕn [30].



Obr. 2-28 EBSD mapy štruktúry v smere (a) kolmom na BD (rovina X-Y); (b) rovnobežnom s BD (rovina Y-BD); (c) IPF reprezentácia intenzity v rovine X-Y [30]

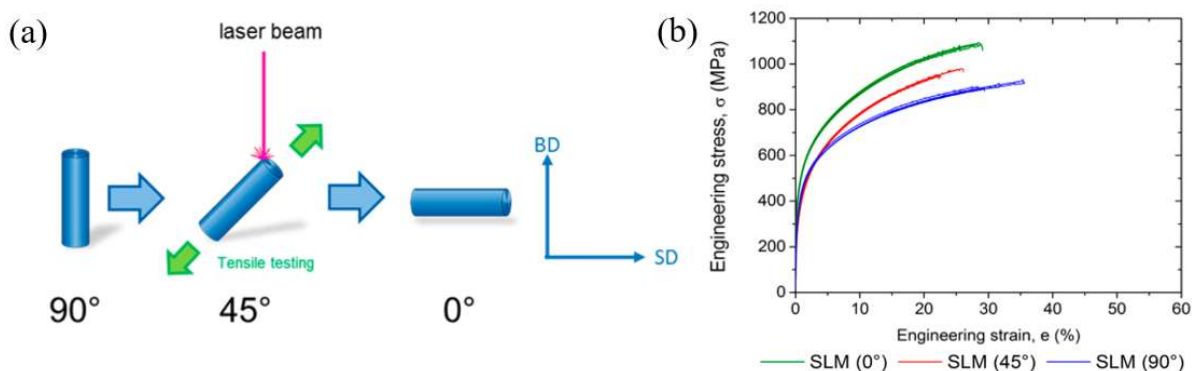
Mechanické vlastnosti v podobe závislosti napätia na predĺžení pre ťahové a tlakové vzorky sú zobrazené na Obr. 2-29 (a), (b), kde je štruktúra s primárnou orientáciou  $\langle 011 \rangle$  (kolmá na BD) v smere zaťažovania znázornená modrou farbou a štruktúra s náhodnou orientáciou (rovnobežná s BD) je zobrazená červenou farbou. Z Obr. 2-29 je zjavné, že štruktúra s náhodnou orientáciou (červená) dosahovala nižšie hodnoty mechanických vlastností a to o 8% v prípade zmluvnej medze klzu pre ťah ( $R_{p0,2}$ ), 13% pre UTS, 14% pre predĺženie do porušenia a 8% pre zmluvnú medzu klzu pre tlak [30].



Obr. 2-29 Stress-strain krivka pre (a) ťah a (b) tlak [21]

Výsledky mechanických vlastností ktoré vo svojej práci dosiahol Otto a kol. [30] sú v rozpore s vlastnosťami aké dosahoval Marattukalam a kol. [28]. Rozdiely medzi nameranými mechanickými vlastnosťami mohli byť spôsobené rozdielnou metódou výroby skúšobných vzoriek. Marattukalam dosahoval textúru zmenou skenovacej stratégie [28] a Otto zmenou orientácie vyrábaných vzoriek na platforme [30]. Tento rozdiel mohol zapríčiniť vznik väčšieho počtu medzi vrstvových defektov v smere rovnobežnom s BD v Ottových vzorkách a tým negatívne ovplyvniť výsledné mechanické vlastnosti.

Podobné výsledky ako Otto dosiahol už o pár rokov skôr Haase a kol. [31], ktorý skúmal výhody používania technológie SLM na spracovanie ocele s vysokým obsahom mangánu. Pri práci použil materiál X30Mn22 z ktorého, pri zachovaní konštantných výrobných parametrov vyrobil vzorky s rôznymi orientáciami na výrobnnej platforme (Obr. 2-30 (a)).



Obr. 2-30 Orientácia vzoriek pri výrobe (a) a grafické znázornenie mech. vlastností pre rôzne orientácie (b) [31]

V závislosti od orientácie vzorky pri výrobe sa líšili aj jej mechanické vlastnosti ako je vidieť na Obr. 2-29 (b). V prípade vertikálne orientovaných vzoriek boli dosahované najvyššie hodnoty mechanických vlastností, ktoré sa s prechodom vzorky do horizontálnej polohy znižovali. Prehľad základných mechanických vlastností vzoriek je uvedený v Tab. 2-2 kde je ako referenčný materiál uvedený konvenčne vyrábaný materiál X30Mn22 [31].

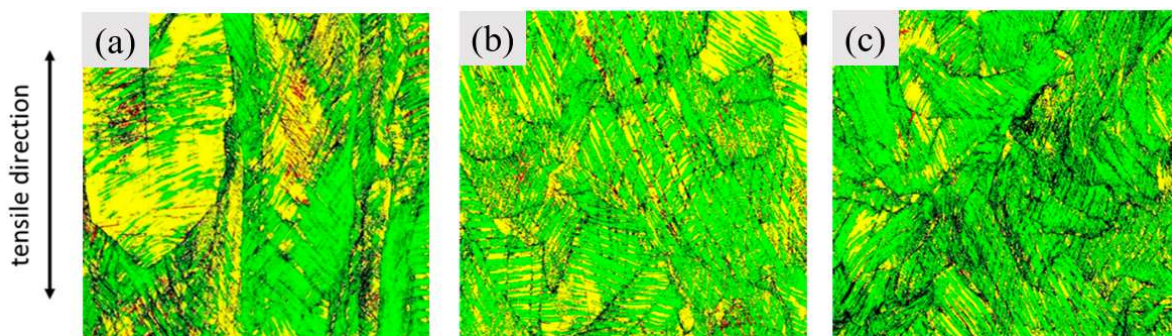
Tab. 2-2 Mechanické vlastnosti materiálu závislé na jeho orientácii počas stavby [31]

Stav	YS (MPa)	UTS (MPa)	$e_{pl}$ (%)
SLM (0°)	416 ± 9	1 085 ± 6	27,4 ± 1,2
SLM (45°)	302 ± 16	966 ± 14	23,8 ± 1,6
SLM (90°)	329 ± 3	906 ± 11	31,2 ± 2,9
Referenčný	275	894	52

Z nameraných vlastností materiálu je vidieť, že SLM spracovaný materiál dosahuje vo všetkých pevnostných kategóriách lepšie vlastnosti ako ten referenčný. To však neplatí pre deformáciu do porušenia, ktorej hodnota je najvyššia pre referenčný materiál. Najväčší rozdiel medzi YS pre uhol 45° a 0° je až 27%. V prípade UTS pre 90° a 0° je to 16% a pre predĺženie medzi 45° a 90° je rozdiel 23%.

Po preskúmaní mikroštruktúry v ťahových vzorkách bolo na EBSD mapách prekrytých fázovými mapami pre jednotlivé orientácie 90° (Obr. 2-31 (a)), 45° (Obr. 2-31(b)) a 0° (Obr. 2-31 (c)) vyzorované, že štruktúra je tvorená primárne austenitom (zelený), hexagonálnym  $\epsilon$ -martenzitom (žltý), tetragonálnym  $\alpha'$ -martenzitom (červený). Pri porovnaní prítomnosti martenzitu v štruktúre a nameranými mechanickými vlastnosťami je zjavné, že čím väčší podiel martenzitu sa v štruktúre nachádza, tým sú hodnoty medze klzu (YS) a medze pevnosti (UTS) vyššie .

Prítomnosť  $\epsilon$  a  $\alpha'$  martenzitu je spôsobená veľmi rýchlym ochladením zvaru pri SLM procese. Podobne ako prítomnosť martenzitu, tak aj hustota dislokácií v mikroštruktúre sa môže meniť v závislosti od rýchlosti ochladzovania zvaru čo môže byť použité na modifikovanie medze klzu (YS).



Obr. 2-31 EBSD mapa zobrazujúca austenitickú (zelenú), hexagonálnu  $\epsilon$ -martenzitickú (žltú) a tetragonálnu  $\alpha'$ -martenzitickú (červenú) štruktúru vzorky vyrábaných pod uhlom 90° (a), 45° (b) a 0° (c)

## 2.3 Zhrnutie hlavných zistení

Po zhrnutí poznatkov z vybraných článkov bolo zistené, že zmenou nastavenia hlavných procesných parametrov výroby technológie SLM, ako je výkon lasera (LP), či jeho rýchlosť (LS), dokážeme meniť tvar a rozmery zvarového kúpeľa [5]. Zvyšovaním rýchlosti lasera (LS) dochádza k zmenšovaniu hĺbky aj šírky zvaru, a pridávaním výkonu dochádza k ich zväčšovaniu [2], [3]. Chladnutie jednoduchého zvaru prebieha smerom z rozhrania tuhého materiálu do jeho stredu, čo má za následok rast stĺpcových zŕn v smere tohto teplotného gradientu.

Prekrytím jednoduchých zvarov - *overlapom* (OL) a nastavením ich vzájomnej vzdialenosti (HD) prejdeme do výroby objemu materiálu. Kombinovaním týchto parametrov procesu výroby (LP, LS a HD) dostaneme procesnú mapu, na ktorej pre vhodné parametre vznikne procesné okno s nízkou porozitou a kvalitne spracovaným materiálom ktorý je možné použiť na výrobu objemových telies [2], [15]. V prípade nevhodne zvolenej kombinácie procesných parametrov dochádza k vzniku porozity v dôsledku nedostatku energie v procese, kedy hovoríme o LOF (*Lack Of Fusion*) porozite [3], [8], [12], [13]. V opačnom prípade, ak je v procese energie priveľa, dochádza k vzniku keyhole porozity v koreni zvaru [9], [15].

Spracovaním materiálu s vysokým obsahom mangánu (HMnS s obsahom mangánu viacej ako 20 hm.%) sa zaoberalo viacero štúdií, ktorých cieľom bolo preskúmanie materiálu na absorpciu energie, anisotropickej plasticity, či vplyvu orientácie stavby na mikroštruktúru. Niektoré z týchto štúdií uvádzam v rešerši tejto práce. Ostatné, bližšie neskúmané práce, spoločne s prácami v rešerši však tvorili základ pri určení procesných parametrov bežne používaných pri spracovaní materiálu s vysokým obsahom mangánu. Použitie výkonu lasera bolo v relatívne nízkej oblasti v rozsahu LP = 90-180 W, skenovacia rýchlosť sa pohybovala v rozsahu LS = 550-800 mm·s<sup>-1</sup> a výška nanášanej vrstvy práškoveho materiálu bola 30 μm. Podrobný popis procesných parametrov použitých pri spracovaní materiálu s obsahom mangánu nad 20 hm.% so zameraním na čo najnižšiu porozitu materiálu je uvedený v Tab. 2-3.

Tab. 2-3 Procesné parametre spracovania HMnS z rôznych štúdií

Materiál	LP (W)	LS (mm·s <sup>-1</sup> )	Spot diam. (μm)	HD (μm)	Výška vrstvy (μm)	Skenovacia stratégia	Rotácia nasledujúcej vrstvy (°)	Referencia
X30Mn23	120	700	82	70	30	meander	33	[32]
X30Mn21	120	700	82	70	30	meander	33	[33]
Fe-30Mn	90-150	550-800	80	85-105	35	meander	67 a 90	[34]
Fe-30Mn	175	700	80	90	30	meander	79	[30]

X30Mn21	120	550-750	80	70	30	meander	33	[35]
X30Mn22	120	750	-	70	30	meander	-	[36]
X30Mn22	180	571	60	100	30	meander	90	[31]

Pri SLM spracovávaní austenitických ocelí a modifikovaní ich mikroštruktúry a tým aj ich mechanických vlastností bol v doterajších výskumoch kladený dôraz na zmenu skenovacej stratégie, prípadne na orientáciu skúmaných vzoriek počas stavby. Zmenou smeru skenovania, či už postupnou alebo náhlou, dochádzalo k ovplyvňovaniu teplotného gradientu chladnutia materiálu, čím bola dosiahnutá rôzna preferenčná orientácia kryštalografických zŕn a ich mikroštruktúra [27], [28], [29].

Meraním základných mechanických vlastností materiálu, ako je medza klzu, medza pevnosti alebo ťažnosť materiálu bol vyzorovaný signifikantný rozdiel v závislosti od kryštalickej štruktúry danej vzorky v smere pôsobenia zaťažujúcej sily. Rozdiely mechanických vlastností v takto získaných štruktúrach sa líši o približne 13% v prípade UTS, 8% pre medzu klzu a takmer 20% pre deformáciu do porušenia [28], [30], [31].

## 2.4 Medzera v poznaní

Pri aditívne vyrábaných súčiastkach dochádza vplyvom nesprávne nastavených parametrov výroby k ich vnútornej porozite, čo má negatívny dopad na ich mechanické vlastnosti. Pre materiál s vysokým obsahom materiálu sa používajú parametre v rozsahu  $LP = 90 - 180 \text{ W}$ ;  $LS = 550 - 800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  a výška nanášanej vrstvy materiálu je  $30 \mu\text{m}$ . Pre tieto rozsahy procesných parametrov je dosahovaný kvalitne spracovaný materiál s minimálnou porozitou.

Okrem samotnej porozity závisia mechanické vlastnosti aj od mikroštruktúry, ktorá v takto vyrobenej súčiastke vznikne. Úpravou teplotného gradientu chladnutia materiálu je možné ju modifikovať. Väčšina publikácií zameraná na modifikáciu štruktúry pracuje so zmenou skenovacej stratégie, zmenou uhlu skenovania počas výroby, či orientáciou vyrábanej súčiastky počas stavby, čím dosahujú cielené výsledky a zmenu kryštalografickej štruktúry. Zmena smeru skenovania je najviac očividný spôsob ako meniť smer teplotného gradientu pri tuhnutí materiálu. Vzhľadom k pomerne úzkej oblasti bežne používaných parametrov výkonu a rýchlosti lasera, s ktorými je dosahovaný kvalitne spracovaný materiál, sa ponúka možnosť preskúmania širšej oblasti vysoko-výkonových a nízko-rýchlostných parametrov, pri ktorých predpokladáme dosiahnutie rôznych teplotných gradientov a teda aj výslednej mikroštruktúry. Základom je dosiahnutie kvalitne spracovaného materiálu s rôznymi kryštalografickými štruktúrami, ktoré vznikli kombinovaním výkonu a rýchlosti lasera pri nezmenenej skenovacej stratégii.

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

### 3.1 Výskumné otázky

Procesné parametre bežne používané pri spracovaní HMnS technológiou SLM sa pohybujú v oblasti výkonov  $LP = 90 - 180 \text{ W}$  a rýchlostí  $LS = 550 - 800 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pri týchto parametroch lasera je dosahovaná dobrá kvalita spracovaného materiálu s vysokou relatívnou hustotou a minimálnou porozitou. Modifikácia kryštalografickej štruktúry v doterajších výskumoch bola realizovaná úpravou teplotného gradientu tuhnutia zmenou skenovacej stratégie, prípadne uhlom, pod ktorým skenovanie prebiehalo [27], [28], [29].

**O1:** Aké kryštalografické štruktúry a orientácie zŕn s relatívnou hustotou vyššou ako 99% dosiahneme v materiáli X30Mn22 kombinovaním rýchlosti a výkonu lasera pri zachovaní smeru skenovania?

**O2:** Aké mechanické vlastnosti ( $R_m$ ;  $R_{p0,2}$ ;  $\epsilon$ ) dosiahneme pre rôzne kryštalografické štruktúry získané kombináciami rýchlosti a výkonu lasera?

### 3.2 Ciele výskumu

Cieľom diplomovej práce je preskúmanie vplyvu procesných parametrov technológie SLM, konkrétne výkonu a rýchlosti lasera, pri modifikácii štruktúry austenitickej ocele a vplyv týchto parametrov na vznikajúcu mikroštruktúru a tým aj na mechanické vlastnosti.

Medzi dlhodobé ciele práce patrí:

- Stanovenie mapy procesných parametrov s minimálnou porozitou
- Optimalizácia procesných parametrov pre výrobu testovacích vzoriek s rozdielnou textúrou
- Overenie mechanických vlastností vzoriek s rozdielnou textúrou
- Štatistické spracovanie a interpretácia výsledkov

Predbežná práca je založená na experimentálnom stanovení mapy procesných parametrov spracovania HMnS technológiou SLM, preskúmanie oblasti použitia vyššieho výkonu lasera a vyššej rýchlosti skenovania za súčasného dosiahnutia relatívnej hustoty vyrábaných vzoriek nad 99%. Prínosom práce je preskúmanie vplyvu výkonu a rýchlosti lasera na kryštalografickú štruktúru HMnS a jej mechanické vlastnosti, čo by mohlo viesť na lokálne modifikovanie mechanických vlastností v rámci vyrábanej súčiastky.



### 3.3 Hypotézy

Na základe analýzy súčasného stavu poznania o vplyve procesných parametrov a skenovacích stratégiách technológie SLM na vznik kryštalických štruktúr materiálu boli pre navrhnuté výskumné otázky vytvorené nasledujúce hypotézy:

**H1:** Pri použití rôznych stupňov výkonu lasera a vhodne zvolenej rýchlosti skenovania so zachovaním obojsmerného skenovania bez rotácie dôjde k ovplyvneniu tepelného gradientu chladnutia materiálu a vzniknú rôzne kryštalografické štruktúry.

V závislosti od rôznych kombinácii výkonu a rýchlosti lasera dodávaných do SLM procesu by bolo možné ovplyvniť teplotný gradient chladnutia zvarového kúpeľa a tak, aby došlo k vzniku rôznych kryštalografických štruktúr takto spracovaného materiálu bez nutnosti meniť skenovaciu stratégiu výroby.

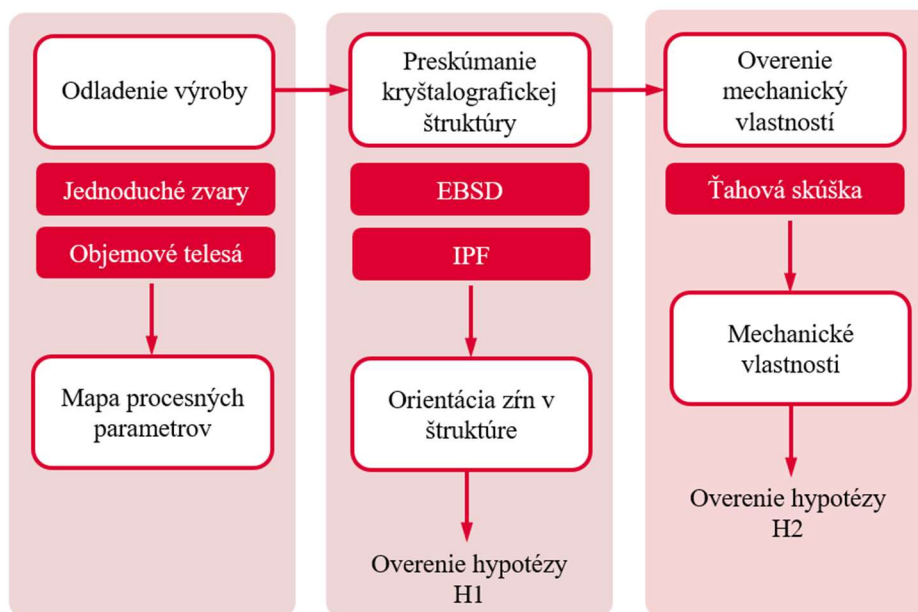
**H2:** Pre rôzne kombinácie procesných parametrov dosiahneme pri zaťažovaní zmeny v mechanických vlastnostiach takto vytvorených štruktúr až do **10%**.

V závislosti od dosiahnutej mikroštruktúry a orientácii kryštalografických zŕn vzniknutých vplyvom orientovaného tuhnutia materiálu sa zásadne menia aj mechanické vlastnosti vyrobeného materiálu a vzniká anizotropia [31]. Pre skúšobné vzorky vyrobené s definovanými procesnými parametrami tak môžeme získať rôzne mechanické vlastnosti.

## 4 MATERIÁL A METÓDY

### 4.1 Metodika

Na základe položených výskumných otázok bol riešený výskumný problém stanovený ako relačný, keďže pri riešení bolo potrebné stanoviť vzťah medzi základnými procesnými parametrami technológie SLM (výkonom lasera a rýchlosťou skenovania) a kryštalografickou štruktúrou takto vyrobeného materiálu. Pri samotnom riešení bola použitá empirická metóda výskumu pozostávajúca z meraní a experimentov zameraná na kvantitatívne získavanie výsledkov mechanických vlastností a preskúmanie orientácii zŕn vo vzniknutej štruktúre. Na začiatku bola zostavená prehľadná schéma postupu riešenia diplomovej práce zobrazená na Obr. 4-1 Podrobnejší popis jednotlivých metód riešenia je detailnejšie popísaný v Kap. 4.4.



Obr. 4-1 Schéma metodiky riešenia výskumu

Pri riešení zadanej problematiky bol celkový postup rozdelený na tri základné časti. Jednalo sa o **odladenie výroby** vzoriek pozostávajúce z dvoch stupňov experimentov, a to konkrétne z jednoduchých zvarov a z objemových teliesok. Výstupom tejto časti bola mapa procesných parametrov pri ktorých dosahovali vzorky požadovanú relatívnu hustotu 99%. Takto určené parametre boli použité na výrobu objemových vzoriek pre ďalšie experimenty a pozorovania.

Ďalšou časťou postupu bolo **preskúmanie kryštalografickej štruktúry** vyrobených objemových vzoriek, kde boli preverené rôzne výkonové stupne a im prislúchajúce rýchlosti skenovania. Na základe takto nastavených procesných parametrov ovplyvňujúcich teplotný gradient chladnutia zvarového kúpeľa by malo dôjsť z vzniku rôznych kryštalografických štruktúr s rozdielnou veľkosťou, tvarom a orientáciou kryštalografických zŕn, čím by došlo k otestovaniu hypotézy **H1**.

Na základe vyhodnotenia orientácie zŕn v štruktúre boli vybrané procesné parametre, pre ktoré boli zhotovené skúšobné vzorky na **overenie mechanických vlastností** materiálu. Tie boli testované ťahovou skúškou a namerané hodnoty napätí boli porovnané v závislosti na vzniknutej kryštalografickej štruktúre a smere zaťažovania. Týmto spôsobom bola testovaná hypotéza **H2**.

## 4.2 Experimentálne zariadenie a prístrojové vybavenie

### 4.2.1 Výroba vzoriek

Na výrobu vzoriek v prvej a tretej časti tejto práce bola použitá 3D tlačiareň SLM 280 HL dodaná spoločnosťou SLM Solutions AG (Lubeck, Nemecko). Tlačiareň pracuje na princípe selektívneho laserového tavenia (SLM), pri ktorom je nanosená vrstva prášku skenovaná 700 W laserom YLR 700 WC od spoločnosti IPG Photonics (Oxford, Massachusetts, USA) s vlnovou dĺžkou 1 070 nm. Pracovný priestor 3D tlačiarne je 280 x 280 x 325 mm<sup>3</sup>. V prípade použitia menšej stavebnej platformy je možné použiť redukčný rámik a tlačiť tak na platformu s rozmermi 100 x 100 mm<sup>2</sup>. Maximálna možná teplota predohrevu platformy je 200°C. Pri plnom výkone je tlačiareň schopná vyrábať rýchlosťou 20 cm<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> s maximálnou rýchlosťou skenovania 10 m·s<sup>-1</sup>. Pri stavbe z HMnS sa používa argónová inertná atmosféra (max. koncentrácia kyslíku je 0,2%) ktorá zabraňuje oxidácii spracovávaného materiálu a zároveň odvádza spaliny z procesu. Všetky výrobné dáta boli pripravené v softwari Magics 23.01 (Materialise, Belgicko).

### 4.2.2 Pozorovanie vzoriek

Pri odladžovaní výroby boli vzorky jednoduchých zvarov pozorované pomocou svetelného mikroskopu Olympus SZX7 (Olympus, Tokio, Japonsko). Na získaných snímkach bola vyhodnocovaná súvislosť a tvar zvarov, ale aj makroskopické defekty ako je vytváranie guľôčok roztaveného materiálu (*balling*) a zvýšená prítomnosť rozstreknutého materiálu (*spatter*).

Na preskúmanie tvaru a rozmerov zvaru bol použitý svetelný mikroskop Keyence VHX-6000 (Keyence, Osaka, Japonsko) vybavený objektívom so zväčšením 250-2500x. Tento prístroj umožňuje meranie objektov v klasickom 2D, ale aj v 3D.

Podrobnejšia analýza objemových vzoriek pomocou skenovacieho elektrónového mikroskopu (SEM) bola vykonaná na mikroskope TESCAN LYRA3 XMU (TESCAN ORSAY HOLDING, Brno, Česká Republika). Zariadenie bolo ďalej vybavené detektorom Ultim Max100 EDS a detektorom spätného rozptylu elektrónov (EBSD) Symmetry.

### 4.2.3 Skúšky mechanických vlastností

Skúšky mechanických vlastností boli vykonané v spolupráci s Ústavom fyziky materiálov Akadémie Vied Českej Republiky (AV ČR) na zariadení Zwick/Roell Z250. Toto zariadenie je schopné vyvinúť maximálnu silu 250 kN s presnosťou do 0,2% zaťaženia a zaznamenať predĺženie s presnosťou 0,53-0,17% meranej dĺžky. Skúšky boli vykonané pri teplote 22°C a rýchlosť zaťažovania bola 0,6 mm·min<sup>-1</sup>.

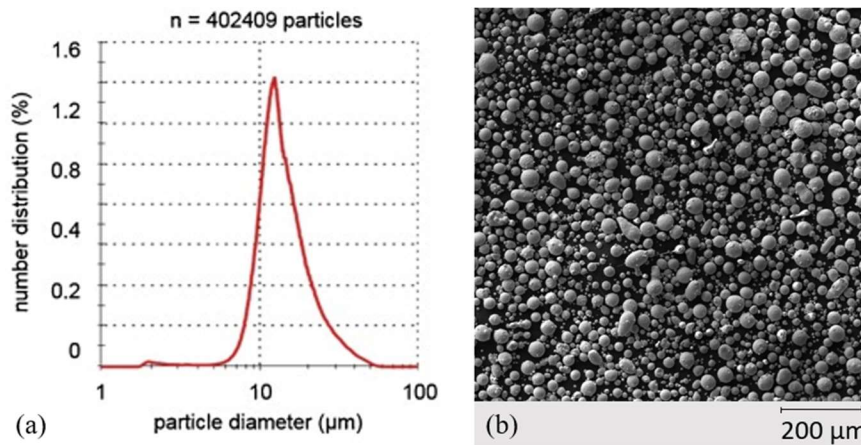
## 4.3 Materiál a testovacie podmienky

### 4.3.1 Použitý materiál

Na výrobu bol použitý kovový práčok X30Mn22 od spoločnosti Thyssenkrupp Materials Trading GmbH, Essen, Nemecko vyrobený atomizáciou v dusíku. Veľkostná distribúcia zrn prášku je zobrazená na Obr. 4-2 a chemické zloženie v hmotnostných percentách je uvedené v Tab. 4-1.

Tab. 4-1 Chemické zloženie materiálu

	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>
Hmot. %	77,62	21,5	0,29	0,33	0,26



Obr. 4-2 Distribúcia veľkosti zŕn práčku [35] (a), SEM mikrograf materiálu X30Mn22 (b)

### 4.3.2 Typy vzoriek a testovacie podmienky

#### SINGLE TRACKY

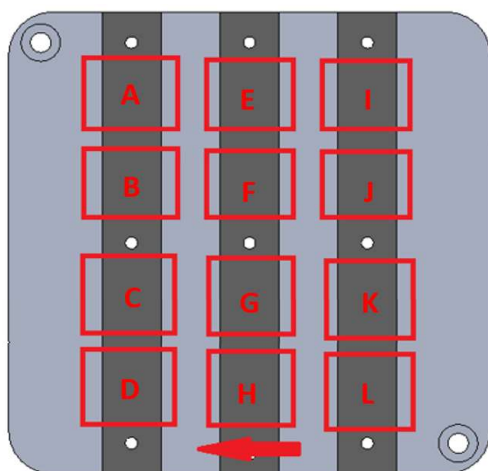
Na začiatku experimentálnej fázy boli vykonané tri experimenty zamerané na stavbu jednoduchých zvarov. Tie sa stavali na platformy s rozmerom  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  a s vloženými páskami z materiálu 304L a so súčasným predohrevom platformy na teplotu  $100^\circ\text{C}$ .

Pri jednotlivých stavbách bolo na každej platforme umiestnených 96 vzoriek s rôznymi procesnými parametrami. Konkrétne sa jednalo o 12 výkonových skupín (A-L) a pre každú skupinu 8 rôznych rýchlostí skenovania. Pri experimentoch boli testované procesné parametre navrhnuté tak, aby pokryli celý rozsah výkonu lasera v zariadení SLM 280 HL v rozsahu **LP 50-650 W**. K výkonom lasera bola zvolená aj rýchlosť lasera, a to v rozsahu **LS 100-1200  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$** . Pri teste jednoduchých zvarov bola platforma predhriata na teplotu  $100^\circ\text{C}$  a ako ochranný plyn sa použil argón. Jednotlivé procesné parametre spolu s vypočítanou lineárnou energiou použité pri výrobe jednoduchých zvarov sú zobrazené v Tab. 4-2. Príklad rozloženia jednotlivých zvarov na stavebnej platforme je zobrazené na Obr. 4-3.

Tab. 4-2 Navrhnuté procesné parametre

LE (J/mm)		LS (mm/s)											
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
LP (W)	100	1,00	0,50	0,33	0,25	0,20	0,17	0,14	0,13				
	150	1,50	0,75	0,50	0,38	0,30	0,25	0,21	0,19				
	200	2,00	1,00	0,67	0,50	0,40	0,33	0,29	0,25				
	250	2,50	1,25	0,83	0,63	0,50	0,42	0,36	0,31				
	300	3,50	1,50	1,00	0,75	0,60	0,50	0,43	0,38				
	350	3,50	1,75	1,17	0,88	0,70	0,58	0,50	0,44				
	400	4,00	2,00	1,33	1,00	0,80	0,67	0,57	0,50				
	450	4,50	2,25	1,50	1,13	0,90	0,75	0,64	0,56				
	500		2,50	1,67	1,25	1,00	0,83	0,71	0,63	0,56			
	550			1,83	1,38	1,10	0,92	0,79	0,69	0,61	0,55		
	600				1,50	1,20	1,00	0,86	0,75	0,67	0,60	0,55	
	650					1,30	1,08	0,93	0,81	0,72	0,65	0,59	0,54

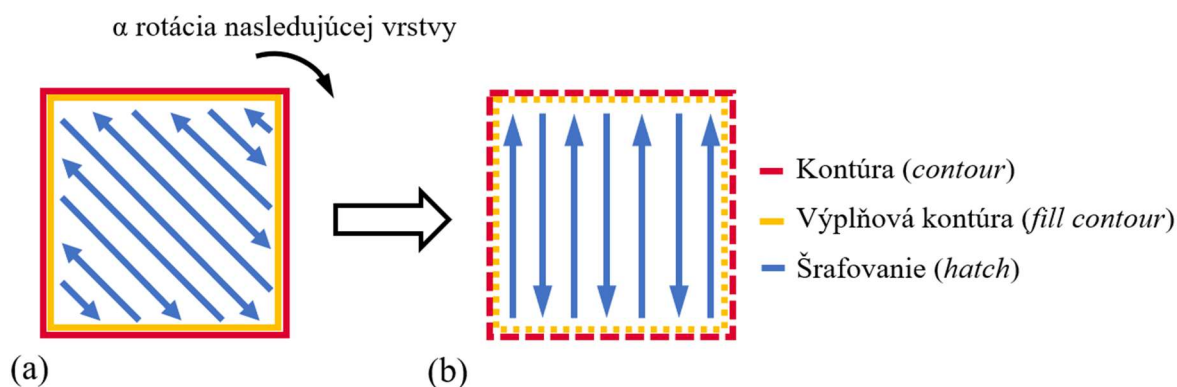
Po analyzovaní vzoriek jednoduchých zvarov boli nevyhovujúce procesné parametre odstránené a neboli uvažované pri ďalších experimentálnych častiach tejto práce. Procesné parametre ktoré mali predpoklady na vytvorenie súvislého a stabilného zvaru bez väčších defektov a nedokonalostí boli následne použité pri ďalších experimentoch.



Obr. 4-3 Rozloženie vzoriek jednoduchých zvarov na platforme

## VOLUMETRIC SAMPLES

Vzorky objemových telies slúžili na overenie schopnosti vytvoriť objemové teleso s požadovanou relatívnou hustotou materiálu vyššou ako 99% . Pri tomto experimente boli vyrábané kocky s rozmermi  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ . Použité procesné parametre vychádzali z predchádzajúcich experimentov jednoduchých zvarov. Použitá skenovacia stratégia vychádzala z typu meander Obr. 4-4 (a), založená na obojstrannom ukladaní zvarov vedľa seba s dodržaním konštantnej vzdialenosti medzi vrstvami. Odstránením oboch kontúr, nastavením smeru skenovania kolmo resp. rovnobežne so stenou vyrábanej vzorky a odstránením rotácie medzi jednotlivými vrstvami Obr. 4-4 (b) dostaneme stratégiu použitú pri výrobe objemových vzoriek. Pri výrobe bola platforma bola predhriata na teplotu  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  a ako ochranná atmosféra bol použitý argón.

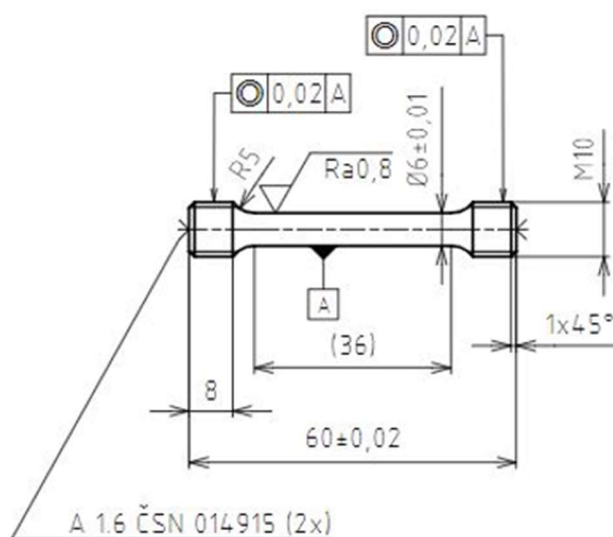


Obr. 4-4 Skenovacia stratégia Meander pri stavbe objemových vzoriek (a) pôvodná, bežne používaná; (b) upravená stratégia použitá pri tejto práci

Na takto vyrobených vzorkách bola analyzovaná porozita pomocou softwaru ImageJ. Ten bol použitý na úpravu snímok pripravených na optickom mikroskope na čierno-bielu kontrastnú snímku. Na nej bola ďalej vyhodnotená porozita na základe pomeru kontrastných oblastí. Z vyrobených vzoriek boli vybrané tie, ktorých procesné parametre výroby umožňovali dosiahnuť požadovanú relatívnu hustotu materiálu. Takto získané parametre dotvorili celkovú mapu procesných parametrov, v hodných na spracovanie materiálu X30Mn22.

## ŤAHOVÉ VZORKY

Na určenie mechanických vlastností materiálu, ktorý vznikol zo skúmaných procesných parametrov na základe vyhodnotenia objemových vzoriek boli vytvorené ťahové vzorky s rozmermi 12 x 12 x 70 mm<sup>3</sup>. Ťahové vzorky boli ďalej obrobené podľa normy ťahových skúšok DIN 50125 pre typ B s testovacím priemerom 6 mm. Následne boli obrobené vzorky vybrúsené a elektrolyticky leštené z dôvodu citlivosti skúmaného materiálu voči deformačnému ovplyvneniu vnútornej štruktúry. Tvar a rozmery ťahovej vzorky sú zobrazené na Obr. 4-5.



Obr. 4-5 Ťahová vzorka typu B podľa DIN 50125

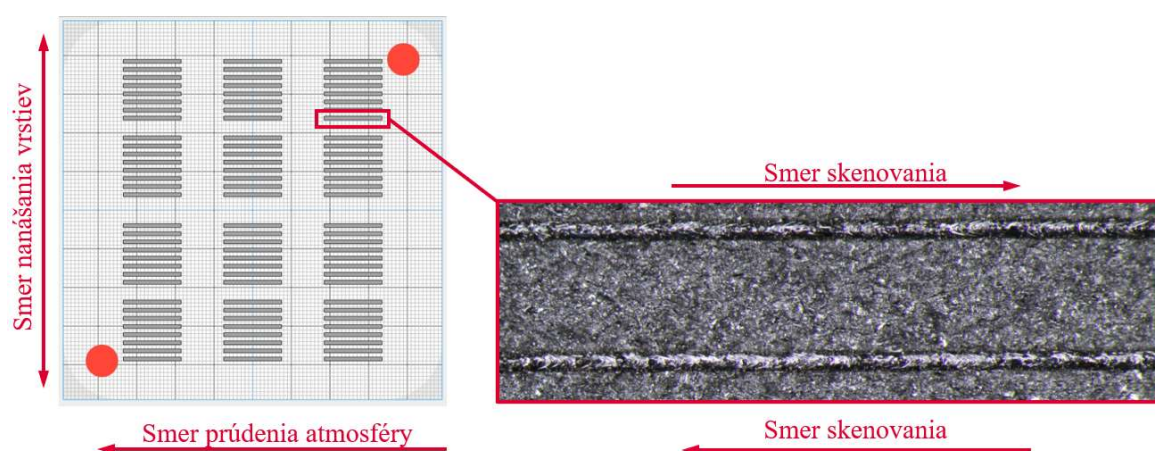
## 4.4 Metódy

### 4.4.1 Test jednoduchých zvarov

Testy jednoduchých zvarov (*singletrack*) je založený na nanosení jedinej vrstvy kovového prášku materiálu na výrobnú platformu. Na nanosenie bol použitý špeciálny prípravok, nakoľko zariadenie SLM 280 HL nie je schopné pomocou recoateru naniest' len jedinú vrstvu kovového prášku s požadovanou výškou tejto vrstvy.

Výrobné dáta boli spracované v programe Magics 23.0. Kvôli obmedzeniam tohto programu, ktorý neumožňoval vytvorenie len jednostopového skenovania boli vzorky jednoduchých zvarov vytvorené ako kvádre s rozmermi  $15 \times 1 \times 0,1 \text{ mm}^3$ , pri ktorých výrobe bolo vypnuté vnútorné šrafovanie a tak vznikla len obvodová textúra vzorky.

Každému takto vytvorenému obvodovému zvaru obdĺžnika boli priradené konkrétne procesné parametre. Keďže výroba obvodového zvaru prebiehala v smere hodinových ručičiek, docielili sme na každej vzorky dva zvary, z ktorých jeden bol v smere prúdenia ochrannej atmosféry a druhý proti smeru jej prúdenia. Táto konfigurácia umožnila zanesenie vplyvu kovových výparov vznikajúcich pri procese tavenia kovového prášku do výsledných hodnôt, preto boli výsledné rozmery geometrie zvarov priemerované. Vzorky boli pri výrobe na platforme usporiadané do 12 skupín podľa výkonu lasera a k nemu prislúchajúcim rýchlostiam skenovania vid'. Obr. 4-6.



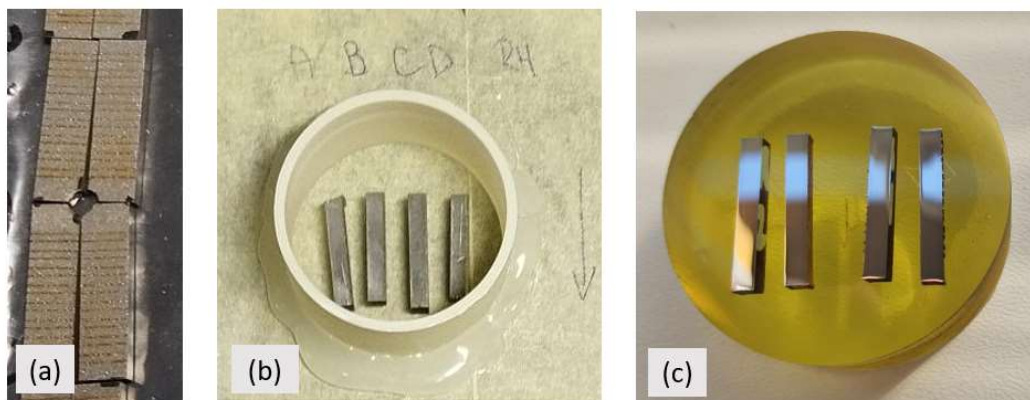
Obr. 4-6 Rozloženie vzoriek jednoduchých zvarov podľa výkonových skupín, smer prúdenia ochrannej atmosféry a smer nanášania vrstiev kovového prášku (vľavo) a smer skenovania jednotlivých jednoduchých zvarov v rámci jednej vzorky (vpravo)

Pri vizuálnom analyzovaní geometrie jednoduchých zvarov digitálnym mikroskopom boli aplikované dva spôsoby vyhodnocovania. Jednalo sa o preskúmanie vonkajšej a vnútornej geometrie zvaru.

Analyzovanie vonkajšej geometrie vzoriek sa vykonávalo pri pohľade zhora, kde bola vyhodnocovaná súvislosť a rovnomernosť vzniknutého zvaru po celej jeho dĺžke. Zároveň sa pri vzorkách jednoduchých zvarov vyhodnocovali rôzne druhy defektov, ako je vznik *ballingu* alebo zvýšená prítomnosť roztrúsených častíc spečeného materiálu – *spatteru*. Toto pozorovanie bolo vykonané na vzorkách stále zasadených vo výrobnnej platforme.



Pri analýze vnútornej geometrie boli vzorky podrobené metalografickému rozboru a boli na nich pozorované prierezové rozmery a samotný tvar jednoduchého zvaru. Vzorky vyrobené na kovových páskach boli odobraté z výrobných platformy, narezané na jednotlivé výkonové skupiny a priečne rozrezané tak, aby vyhodnotenie prierezových rozmerov prebiehalo v strede vyrobených jednoduchých zvarov. Takto narezané vzorky boli ďalej zaliate do tvrdnúcej hmoty (Obr. 4-7). Skúmaný povrch bol postupne vybrúsený, leštený a vyleptaný 2% roztokom kyseliny dusičnej a etanolu – Nitalom. Vďaka naleptaniu bolo docielené zvýraznenie kryštalickej štruktúry a zvýraznilo sa tak rozhranie medzi prierezom zvaru a základným materiálom. Proces zalievania vzoriek je zobrazený na Obr. 4-7.

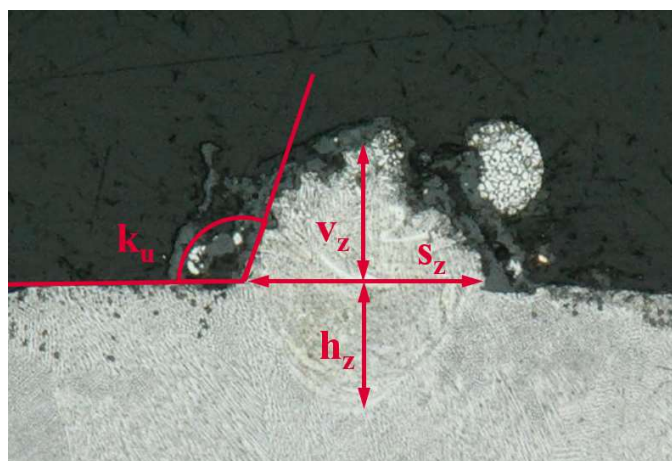


Obr. 4-7 Proces prípravy vzoriek: (a) narezanie vzoriek pomocou drôtovej rezačky; (b) zaliatie vzoriek do tvrdnúcej hmoty; (c) vybrúsenie, vyleštenie a naleptanie zaliatých vzoriek

Na takto pripravenom priereze bola následne meraná **výška zvaru** ( $v_z$ ), **hlĺbka zvaru** ( $h_z$ ), **šírka zvaru** ( $s_z$ ) a **kontaktný uhol** ( $k_u$ ) (Obr. 4-8). Vhodnosť jednotlivých vzoriek bola posudzovaná na základe týchto kritérií:

- Výška zvaru musí mať dostatočnú veľkosť. Približne polovicu šírky zvaru [5]
- Hĺbka zvaru pri konduktívnom režime tavenia musí byť dostatočne hlboká a musí pretaviť predchádzajúce vrstvy [10]
- Šírka zvaru slúži k zisteniu taviaceho režimu
- Kontaktný uhol musí byť blízky  $90^\circ$  aby bola zabezpečená dostatočná rozmerová presnosť a relatívny hustota štruktúry. Nemal by však byť nižší. [5]

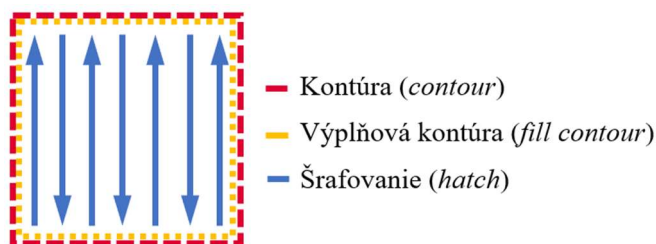
Každá vzorka jednoduchého zvaru s konkrétnymi procesnými parametrami bola tvorená dvomi prierezmi pre rozdielny smer skenovania. Pri analyzovaní boli brané do úvahy priemerné hodnoty z oboch prierezov. V prípade výskytu výrazného defektu v jednom zo vzniknutých zvarov, bola táto vzorka z hodnotenia vyradená.



Obr. 4-8 Základné rozmery jednoduchého zvaru; ( $k_u$ ) kontaktný uhol; ( $v_z$ ) výška zvaru; ( $h_z$ ) hĺbka zvaru; ( $s_z$ ) šírka zvaru

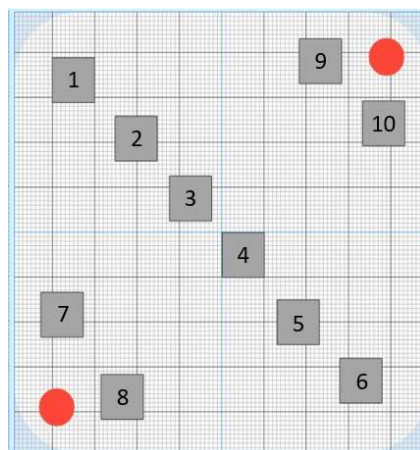
#### 4.4.2 Test objemových telies

Na test objemových vzoriek boli použité vzorky s rozmermi  $10 \times 10 \times 10 \text{mm}^3$  a vybrané procesné parametre boli zvolené na základe vyhodnotenia vzoriek jednoduchých. Pri vytváraní výrobných dát v programe Magics 23.01, bola použitá skenovacia stratégia typu meander bez rotácie nasledujúcich vrstiev (Obr. 4-9), a kde bol smer skenovania zvolený v smere nanášania prášku, teda kolmo na smer prúdenia ochrannej atmosféry.



Obr. 4-9 Použitá skenovacia stratégia pri výrobe

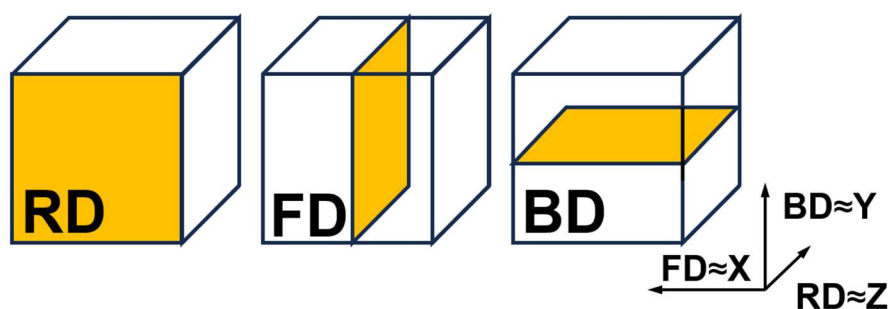
Pri výrobe boli objemové vzorky rozmiestnené na platforme diagonálne tak, ako je zobrazené na Obr. 4-10. Toto usporiadanie umožňuje výrobu až 10 vzoriek súčasne, bez toho, aby sa vzorky vzájomne teplotne ovplyvňovali, a aby sa minimalizovala možnosť vzájomnej kontaminácie obletujúcimi časticami pri ich výrobe. Objemové vzorky a ich PP budú označované ako VS\_X, kde X bude číslo reprezentujúce použité procesné parametre.



Obr. 4-10 Rozmiestnenie objemových vzoriek pri výrobe

Takto vyrobené kocky materiálu boli opäť odrezané z výrobnjej platformy. Na rozdiel od vzoriek jednoduchých zvarov boli objemové vzorky zalisované do čiernej vodivej hmoty - duroplastu, určenej na prípravu vzoriek na EBSD pozorovania. Zalisované vzorky boli následne postupne vybrúsené až po diamantovú s veľkosťou častice 3  $\mu\text{m}$ , elektrolyticky leštené a následne mikroskopicky pozorované. Základné pozorovanie a posúdenie porozity takto spracovaného materiálu prebiehalo s použitím mikroskopu Keyence s následným vyhodnotením porozity v programe ImageJ.

Pri vyhodnocovaní objemových vzoriek boli zadefinované tri hlavné roviny, ktorých názvy zodpovedajú normálam hlavných smerov výroby vzoriek. K názvom jednotlivých rovín bola zároveň priradený smerový vektor korešpondujúci s globálnou súradnicovou sústavou výrobného zariadenia. Konkrétne sa jedná o *Recoating Direction* (RD) a smer Z, *Flow Direction* (FD) so smerom X a *Build Direction* (BD) so smerom Y. Grafické znázornenie jednotlivých rovín je na Obr. 4-11.

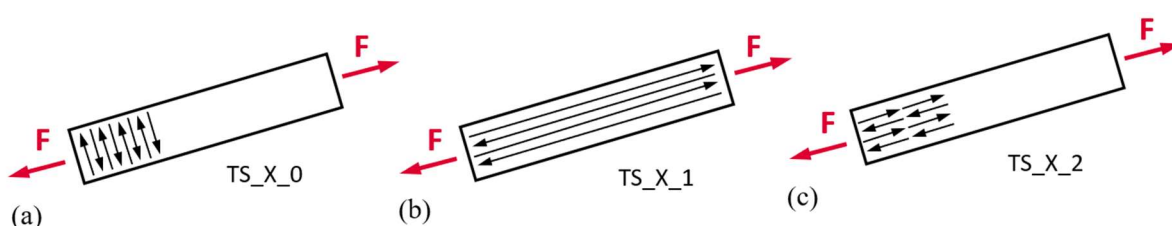


Obr. 4-11 Určenie hlavných rovín pozorovaných vzoriek

Objemové vzorky vykazujúce dostatočnú objemovú hustotu boli podrobené EBSD analýze. Vyhodnotenie mikroštruktúry pomocou spätného odrazu elektrónov bolo realizované na zariadení TESCAN LYRA 3 XMU v spolupráci s Ústavom Fyziky Materiálov AV ČR. Výsledkom tejto analýzy bolo preskúmanie mikroštruktúry vyrobenej vzorky, orientácie jej kryštalografických zŕn a ich následná reprezentácia pomocou farebnej EBSD mapy a PF.

### 4.4.3 Test mechanických vlastností

Pre procesné parametre, ktoré vykazovali dostatočnú relatívnu hustotu a zároveň bola ich mikroštruktúra a orientácia zŕn v štruktúre perspektívna, boli vytvorené ťahové vzorky. Samotné ťahové vzorky s rozmermi  $12 \times 12 \times 70 \text{ mm}^3$  boli vyrábané v dvoch sériách. V prvej sérii boli vzorky s označením TS\_X\_0<sup>1</sup> natočené o  $45^\circ$ , skenované po kratšej strane vzorky (Obr. 4-12(a)) a vyrábané samostatne, vždy 1 ks na platformu. V druhej sérii boli vzorky natočené o  $25^\circ$  a boli skenované po dlhšej strane buď to kontinuálne (Obr. 4-12(b)), alebo po segmentoch (Obr. 4-12(c)) dlhých 10 mm. V tomto prípade boli naraz vyrábané obe vzorky s rovnakými procesnými parametrami, ale rozdielnou stratégiou skenovania po dlhej strane vzorky. Zo všetkých blokov ťahových vzoriek bola následne odobraná vzorka 5 mm od čela na preskúmanie vzniknutej mikroštruktúry v ťahovej vzorke. Na Obr. 4-12 je zároveň znázornený smer zaťažovania jednotlivých ťahových vzoriek po ich obrobení.



Obr. 4-12 Orientácia vyrábanej ťahovej vzorky počas stavby

Vyrobené bločky materiálu boli ďalej obrobené podľa normy DIN 50125 ako vzorky typu B s testovaným priemerom 6 mm (Obr. 4-5) a testované na zariadení Zwick/Roell Z250. Z priebehu namáhania bola určená krivka závislosti napätia na deformácii, z ktorej boli neskôr určené základné mechanické vlastnosti materiálu, ako je Youngov modul pružnosti, zmluvná medza klzu, medza pevnosti a pomerná deformácia do porušenia vzorky.

## 4.5 Testované predikcie

Predikcia vplyvu výkonu lasera a skenovacej rýchlosti na zmenu preferenčnej orientácie kryštalických zŕn austenitickej ocele je, že vplyvom zvyšujúceho sa výkonu lasera a pomerne malej skenovacej rýchlosti dosiahneme teplotný gradient, ktorý umožní rast zŕn v jeho smere.

---

<sup>1</sup> Pri označovaní vzorky TS\_X\_0 platí, že TS (Tensile Sample) je druh vzorky, X sú základné procesné parametre definované pri objemových vzorkách a číslo za druhým podčiarkovníkom určuje skenovaciu stratégiu definovanú v Obr. 4-12.

Hypotéza H1 bola overovaná na zhotovených objemových vzorkách, ktorých procesné parametre boli určené na základe testov jednoduchých zvarov tak, aby objemové vzorky dosahovali dostatočnú relatívnu hustotu materiálu. Použité procesné parametre vystupovali ako kontrolované premenné ovplyvňujúce mikroštruktúru. Závislou premennou pri tejto predikcii bola pozorovaná mikroštruktúra vyhodnotená pomocou spätného odrazu elektrónov (EBSD) a výsledný prehľad vzniknutých kryštalických štruktúr bol interpretovaný pomocou PF máp jednotlivých výbrusov.

Predikcia rôznych mechanických vlastností vychádza z rôznych dosiahnutých mikroštruktúr a orientácii kryštalografických zŕn v hlavných smeroch stavby (BD, FD, RD) objemových vzoriek.

Hypotéza H2 bola testovaná pri skúškach mechanických vlastností vzoriek, ktorých procesné parametre vychádzali z predchádzajúcich testov. Závislou premennou boli mechanické vlastnosti skúmaného materiálu, závislé práve od vzniknutej kryštalografickej štruktúry.

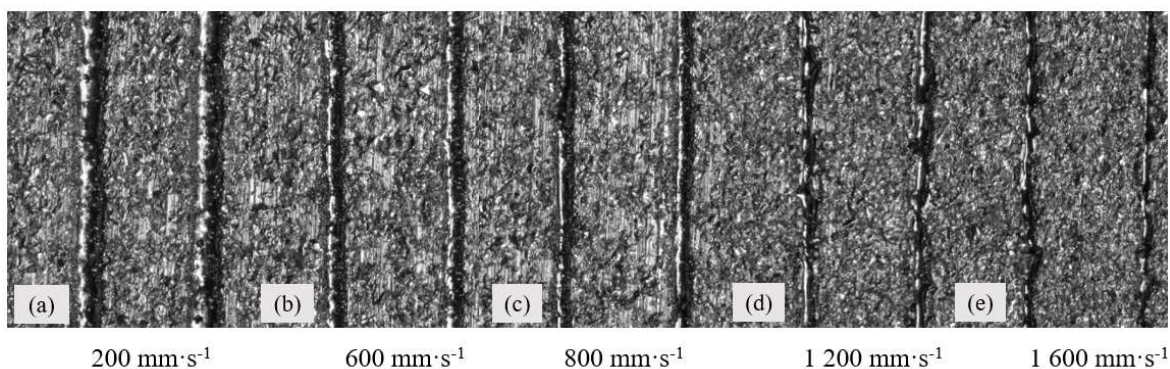
## 5 VÝSLEDKY

### 5.1 Test jednoduchých zvarov

Pri teste jednoduchých zvarov bola najskôr vyhodnotená vonkajšia geometria, teda pri pohľade zhora, a následne bol vykonaný metalografický rozbor priečného prierezu jednotlivých vzoriek.

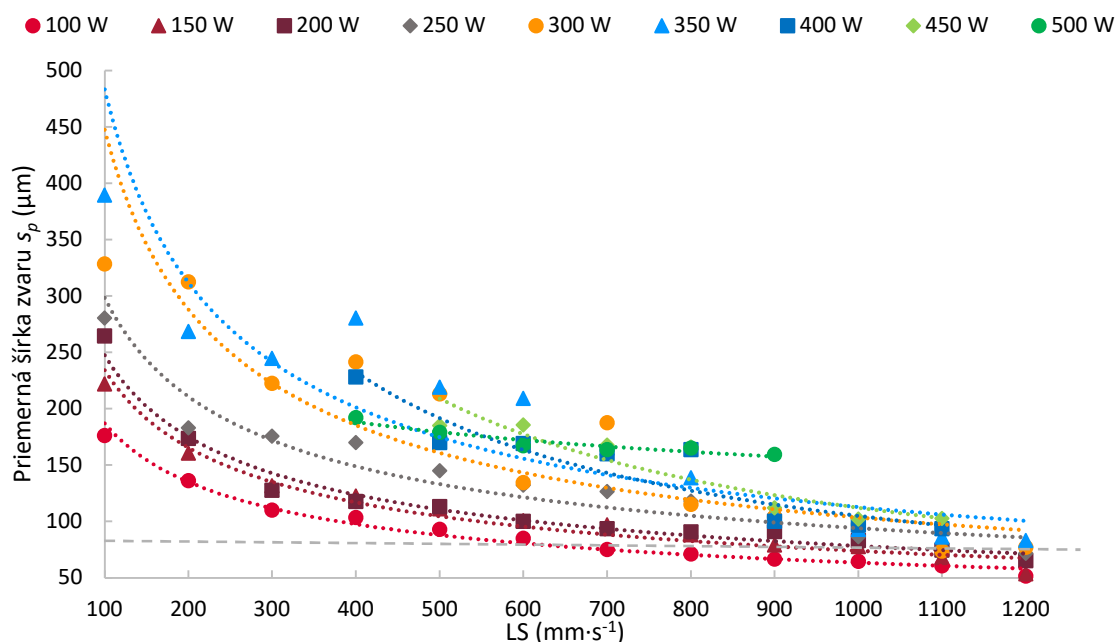
#### 5.1.1 Vonkajšia geometria zvaru

Medzi hlavné hodnotiace kritéria pri skúmaní vonkajšej geometrie zvarov patrila rovnomernosť ich šírky a celková stabilita zvaru. Po preskúmaní vzoriek na rovnakej výkonovej hladine bolo pozorované, že so zvyšujúcou sa rýchlosťou lasera postupne dochádza k vzniku nestability a nepravidelnosti zvaru. Pri LS vyššej ako  $1100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  (Obr. 5-1 (d)) dochádza k výraznému prerušovaniu kontinuity zvarov, nepravidelnostiam a vzniku kvapôčok namiesto súvislých zvarov. Použitie LP nad 350 W malo pri nižších hodnotách LS za následok vznik širokého zvaru, podobného ako pri zváraní na tupo. So zvyšujúcou sa LS dochádzalo k postupnému vytváraniu viditeľnej zvarovej húsenky na pretavenom substráte ktorá však postupne prešla do nestabilného a nesúvislého zvaru. Všetky vizuálne nevyhovujúce zvary budú odstránené.



Obr. 5-1 Vplyv LS na stabilitu a kontinuitu Singletracku

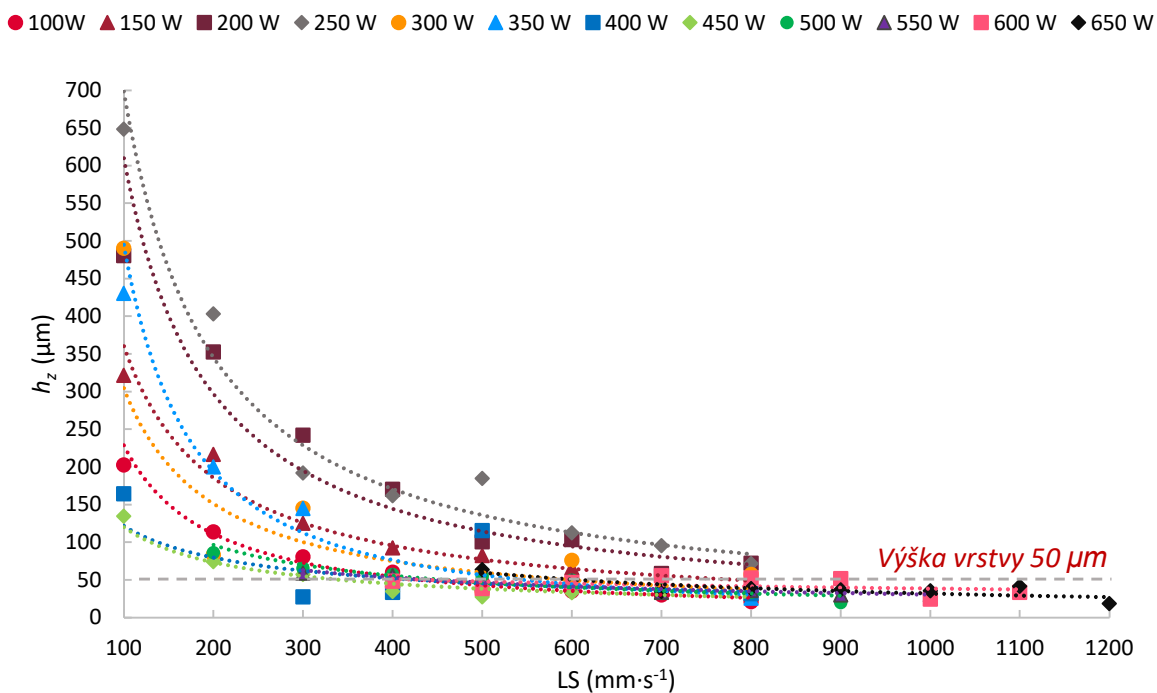
Po vizuálnom preskúmaní zvarov bola ďalej odmeraná ich priemerná šírka ( $s_p$ ). V Obr. 5-2 je zobrazená závislosť priemernej šírky jednotlivých zvarov závislá na LP a LS. Jednotlivé body merania boli preložené mocninovou spojnicou trendu. Z Obr. 5-2 ďalej vyplýva, že so zvyšujúcou sa LS postupne klesá priemerná šírka zvaru a so zvyšujúcou sa LP šírka zvaru rastie. Tento trend bol pozorovaný už počas vizuálneho posúdenia vzoriek Od hodnoty LP 400 W a vyššej boli do grafu vynášané len jednoznačne merateľné hodnoty šírky zvaru a príliš pretavené zvary neboli uvažované. Od hodnoty LP vyššej ako 500 W neboli do grafu zahrnuté žiadne dáta, keďže zvary boli príliš nerovnomerné a nekonzistentné a neposkytovali by tak relevantné informácie o zmene šírky zvaru.



Obr. 5-2 Vplyv LS a LP na priemernú šírku zvaru  $s_p$

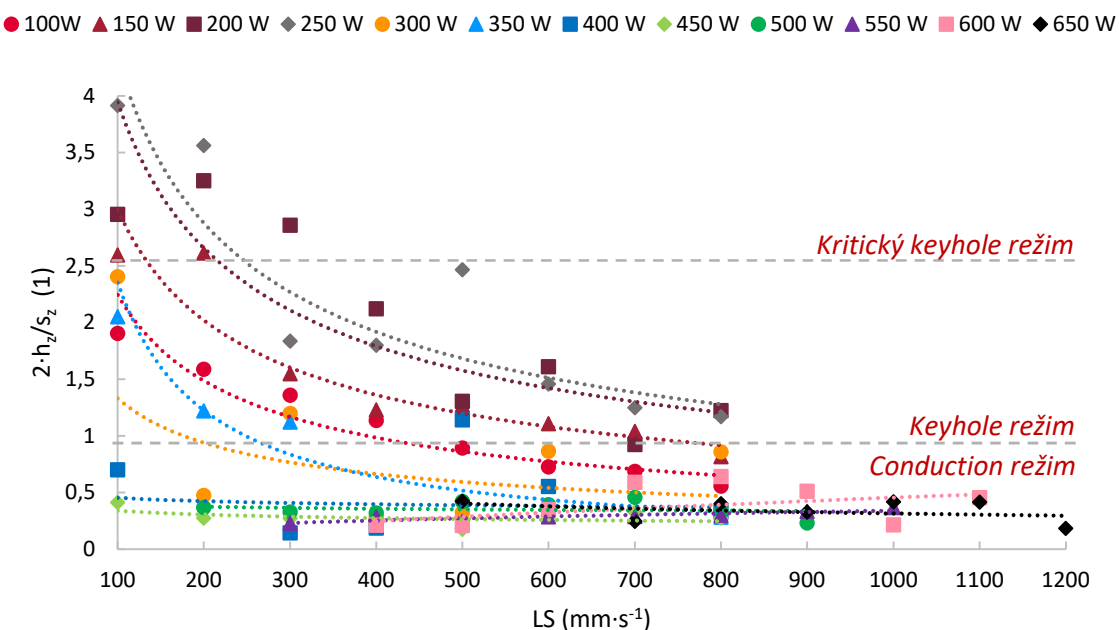
### 5.1.2 Vnútrotná geometria zvaru

Jedným z vyhodnocovacích kritérií vnútornej geometrie zvaru je hĺbka samotného zvaru ( $h_z$ ) ktorej závislosť na LP a LS je znázornená v Obr. 5-3. Vynesené body boli preložené mocninovou spojnicou trendu, ktorej spoľahlivosť sa pohybovala nad hodnotou 0,9. Z priebehu trendov jasne vyplýva, že so zvyšujúcou sa LS dochádza k poklesu hĺbky zvaru. Najnižšie hodnoty hĺbok zvaru dosahujeme pri hodnotách LP vyšších ako 400 W, kde ich hĺbka postupne klesá so zvyšujúcou sa LS až pod hranicu 50  $\mu\text{m}$ . Vzorky, ktorých hĺbka zvaru je menšia ako výška nanesej vrstvy, nedokážu vytvoriť dostatočne kvalitné spojenie s predchádzajúcimi vytvorenými vrstvami. Pre naše skúmané procesné parametre vykazuje až 89% parametrov vyššiu hĺbku zvaru ako je nanosená vrstva 50  $\mu\text{m}$ . Všetky parametre pod touto hranicou budú vyradené.



Obr. 5-3 Vplyv LS a LP na hĺbku zvaru  $h_z$

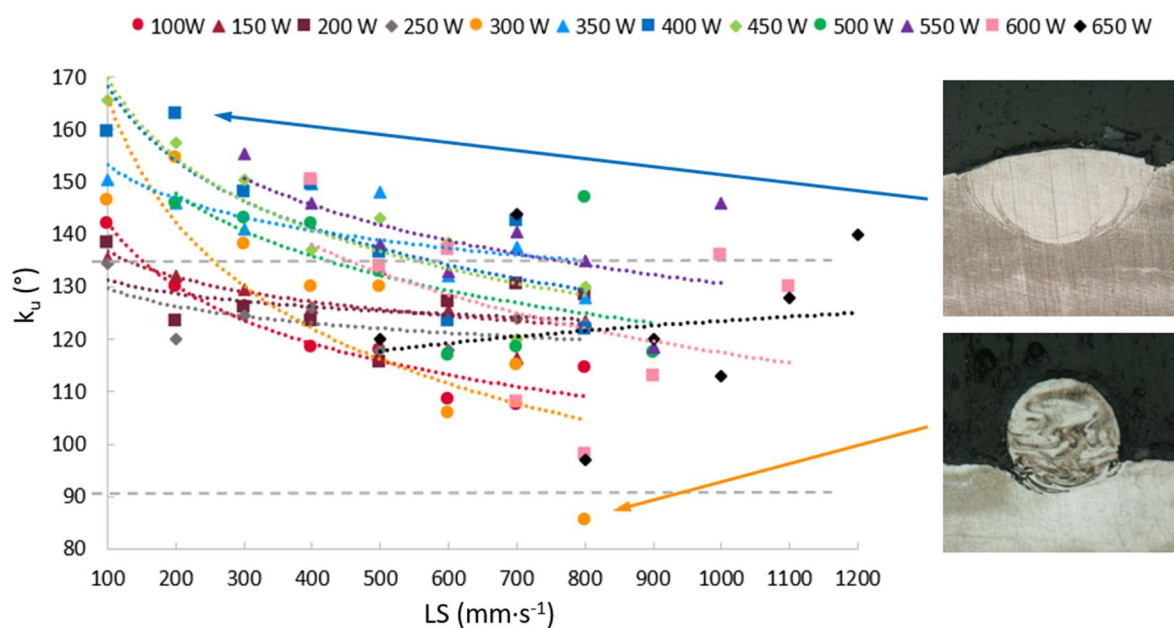
Vyhodnotenie typu taviaceho režimu je zobrazené na Obr. 5-4. Pri pomere hĺbky ( $h_z$ ) k polovici šírky zvaru ( $s_z$ ) väčšej ako jedna dochádza k vzniku zvaru v *Keyhole* režime. V prípade, ak bude tento pomer vyšší ako 2,5, dochádza ku hlbokému prievaru a k vzniku kritickému *Keyhole* režimu. Parametre ktoré sa nachádzajú v *Conduction* režime budú z nasledujúcich experimentov vyradené. Celkovo toto kritérium spĺňa iba 33 % navrhnutých vzoriek.



Obr. 5-4 Vplyv LS a LP na taviaci režim



Ďalším hodnotiacim kritériom vnútornej geometrie je kontaktný uhol ( $k_u$ ). Ten sa pri skúmaných vzorkách pohyboval v rozmedzí od  $85,5^\circ$  až po  $165,5^\circ$ . Vzorky s vysokou hodnotou kontaktného uhla zároveň vykazujú nízku výšku zvaru ( $v_z$ ), ktorá by mala dosahovať aspoň polovicu hĺbky zvaru ( $h_z$ ). Táto podmienky však nie je splnená pri vzorkách s kontaktným uhlom vyšším ako  $140^\circ$ . Na Obr. 5-5 je zobrazený priebeh kontaktného uhla zvaru v závislosti na LS a LP. Vynesená dáta sú preložené mocninovou spojnicou trendu. Obr. 5-5 vyplýva, že s narastajúcou LS dochádza k poklesu kontaktného uhla ( $u_z$ ). Zároveň je však vidieť, že s narastajúcou LP a so zvyšujúcou sa LS síce stále dochádza k poklesu kontaktného uhla, ale namerané dáta vykazujú nízku mieru spoľahlivosti. Z nameraných vzoriek sa 74% nachádzalo v rozmedzí medzi  $90^\circ$  a  $140^\circ$ .



Obr. 5-5 Vplyv LS a LP na uhol zvaru  $k_u$

Na základe predchádzajúcich analýz bola vypracovaná mapa procesných parametrov zobrazujúca použiteľné parametre výroby jednoduchých zvarov. Ako je vidieť na Obr. 5-6 v tejto mape sú zelenou rozlíšené parametre s dobrou vonkajšou aj vnútornou geometriou, oranžovou farbou sú vyznačené parametre s použiteľnou vonkajšou geometriou dosahujúce nadkritickú hodnotu režimu zvaru. Zelené a oranžové vzorky budú ďalej použité pri teste objemových vzoriek. Červenou sú zvýraznené parametre vyradené z ďalších testov na základe vonkajšej či vnútornej geometrie zvaru. Podrobnejšia mapa spoločne s fotkami jednotlivých jednoduchých zvarov je uvedená v Prílohe A na strane 106.

LE (J/mm)		LS (mm/s)											
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
LP (W)	100	1,00	0,50	0,33	0,25	0,20	0,17	0,14	0,13				
	150	1,50	0,75	0,50	0,38	0,30	0,25	0,21	0,19				
	200	2,00	1,00	0,67	0,50	0,40	0,33	0,29	0,25				
	250	2,50	1,25	0,83	0,63	0,50	0,42	0,36	0,31				
	300	3,50	1,50	1,00	0,75	0,60	0,50	0,43	0,38				
	350	3,50	1,75	1,17	0,88	0,70	0,58	0,50	0,44				
	400	4,00	2,00	1,33	1,00	0,80	0,67	0,57	0,50				
	450	4,50	2,25	1,50	1,13	0,90	0,75	0,64	0,56				
	500		2,50	1,67	1,25	1,00	0,83	0,71	0,63	0,56			
	550			1,83	1,38	1,10	0,92	0,79	0,69	0,61	0,55		
	600				1,50	1,20	1,00	0,86	0,75	0,67	0,60	0,55	
	650					1,30	1,08	0,93	0,81	0,72	0,65	0,59	0,54

Obr. 5-6 Mapa procesných parametrov závislých na LP a LS s vypočítanou LE

### 5.1.3 Pokročilé analyzovanie jednoduchých zvarov

Ďalším výstupom z analýzy single trackov sú rovnice predikujúce hĺbku a šírku zvaru. Tie boli vytvorené kvadratickou regresnou analýzou nameraných dát pre jednotlivé výkonové kategórie. Obe rovnice pozostávajú z koeficientov A až E, do ktorých sa dosadzuje rýchlosť lasera (LS) v  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$  a lineárne energia (LE) vstupujúca do procesu v  $\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$ .

Pre výpočet hĺbky zvaru  $h_z$  sa použije vzťah (4) a hodnoty koeficientov pre jednotlivé výkonové kategórie z Tab. 5-1.

$$h_z = A + LS \cdot B + LS^2 \cdot C + LE \cdot D + LE^2 \cdot E \quad (4)$$

Tab. 5-1 Koeficienty výpočtu hĺbky zvaru ( $h_z$ ) pre jednotlivé výkonové kategórie

LP [W]	A	B	C	D	E
100	53,586	-0,096	4,05E-5	154,142	4,421
150	-664,440	1,200	-7,3E-4	1202,554	-413,383
200	673,984	-1,736	12,42E-4	-33,170	8,642
250	-1747,820	3,162	-18,9E-4	1703,724	-345,592
300	-4152,970	6,888	-37,7E-4	3190,703	-619,967
350	-255,000	0,844	-7,4E-4	187,701	-3,956
400	-127,043	0,456	-3,4E-4	24,300	9,514

Pre výpočet šírky zvaru  $s_z$  sa použije vzťah (5) a hodnoty koeficientov pre jednotlivé výkonové kategórie z Tab. 5-2.

$$s_z = A + LS \cdot B + LS^2 \cdot C + LE \cdot D + LE^2 \cdot E \quad (5)$$

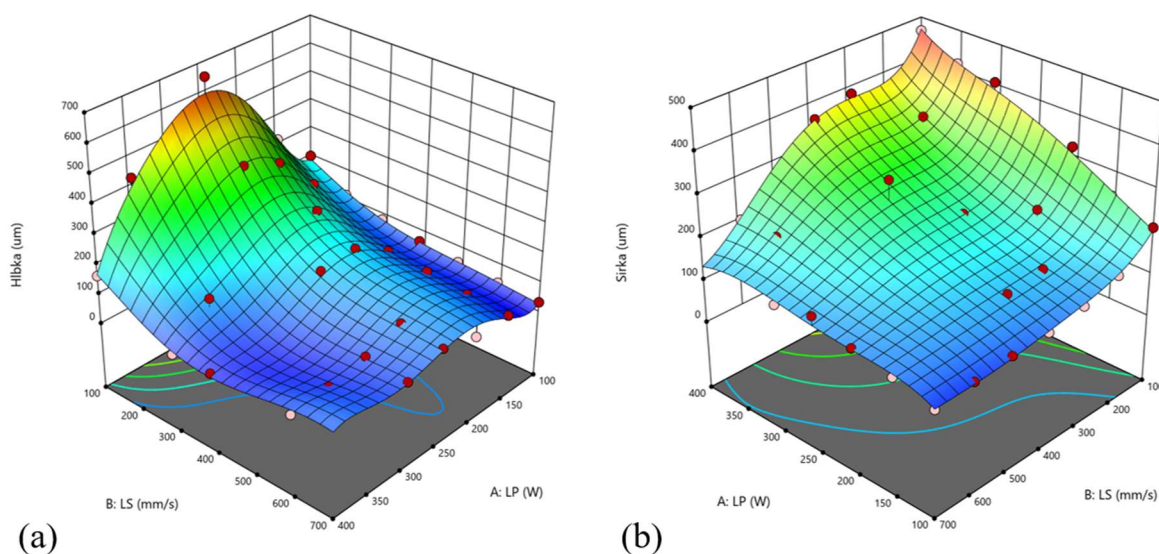
Tab. 5-2 Koeficienty výpočtu šírky zvaru ( $s_z$ ) pre jednotlivé výkonové kategórie

LP [W]	A	B	C	D	E
100	-101,397	0,398	-3E-4	432,670	-155,056
150	630,326	-0,959	5,4E-4	-589,386	263,233
200	3,910	0,225	-1,8E-4	195,882	-22,686
250	252,157	-0,210	7,42E-5	-12,507	20,810
300	-56,061	0,472	-4,6E-4	286,253	-48,522
350	-257,371	0,749	-4,5E-4	360,637	-52,058
400	6704,358	-12,457	76,04E-4	-3037,070	442,598

Pre takto zostavené rovnice (4) a (5) sa vypočítané predikčné rozmerov zvarov líšili od nameraných hodnôt v priemere o približne 3%. Najväčšie odchýlky nameraných a vypočítaných hodnôt boli zistené pri výkonoch LP = 250 a 300 W, kde sa líšili až o 9% pre hĺbku ( $h_z$ ) zvaru a 7% pre šírku zvaru ( $s_z$ ).

Pre súbor nameraných rozmerov dát bola v programe Design-Expert následne vypracovaná plocha odozvy hlavných rozmerov zvaru na vstupujúce procesné parametre. Obe plochy odozvy boli vykreslené na základe matematického modelu piateho stupňa so spoľahlivosťou vyššou ako 0,95.

Na Obr. 5-7 (a) je zobrazený vplyv LS a LP na vzniknutú hĺbku zvaru. Z tohto obrázka je zjavné, že so znižujúcou sa rýchlosťou lasera (LS) dochádzalo k významnému nárastu hĺbky zvaru. Zároveň však môžeme pozorovať, že pri znižovaní výkonu z LP = 400 W na približne LP = 250 W najskôr dochádza k nárastu hĺbky zvaru, no pri ďalšom poklese sa začne hĺbka zvaru opäť znižovať.



Obr. 5-7 Plocha odozvy (a) hĺbky zvaru a (b) šírky zvaru na rýchlosti a výkone lasera

V prípade plochy odozvy vytvorenej pre šírku zvaru môžeme na Obr. 5-7 (b) pozorovať, že k zvyšovaniu jej hodnoty dochádza súčasne so zvyšujúcou sa hodnotou výkonu lasera (LP) a s poklesom rýchlosti lasera (LS). Zápis použitých rovníc na vykreslenie plôch odozvy spoločne s dosadenými koeficientmi uvedený v Prílohe B na strane 107.

## 5.2 Test objemových vzoriek

### 5.2.1 Výroba objemových vzoriek

Pri výrobe objemových vzoriek bola použitá skenovacia stratégia bližšie popísaná v Kap. 4.3.2, výrobné parametre boli založené na výsledkoch z testov jednoduchých zvarov (Obr. 5-6) pri ktorých sa pre každú kombináciu parametrov zvlášť nastavovala vzdialenosť susedných zvarov pri skenovaní (*hatch distance* - *HD*). Táto vzdialenosť bola volená tak, aby bolo dosiahnuté určité prekrytie susedných zvarov (*overlap* – *OL*). Na výpočet HD bol použitý vzťah:

$$HD = (1 - OL) \cdot s_z \quad (6)$$

Kde HD je vzdialenosť susedných kontúr pri skenovaní v mm, OL je zvolené prekrytie susedných zvarov dosadzované ako desatinné číslo a  $s_z$  je odmeraná šírka zvaru z testu jednoduchých zvarov.

Pre zvolené prekrytie zvarov  $OL = 40\%$  bolo v dvoch stavbách vyrobených 20 vzoriek. Procesné parametre vybraných a testovaných vzoriek (LP a LS) spoločne s ich označením a stanovenou vzdialenosťou kontúr HD sú zobrazené v Tab. 5-3.

Tab. 5-3 Označenie objemových vzoriek a ich výrobné parametre

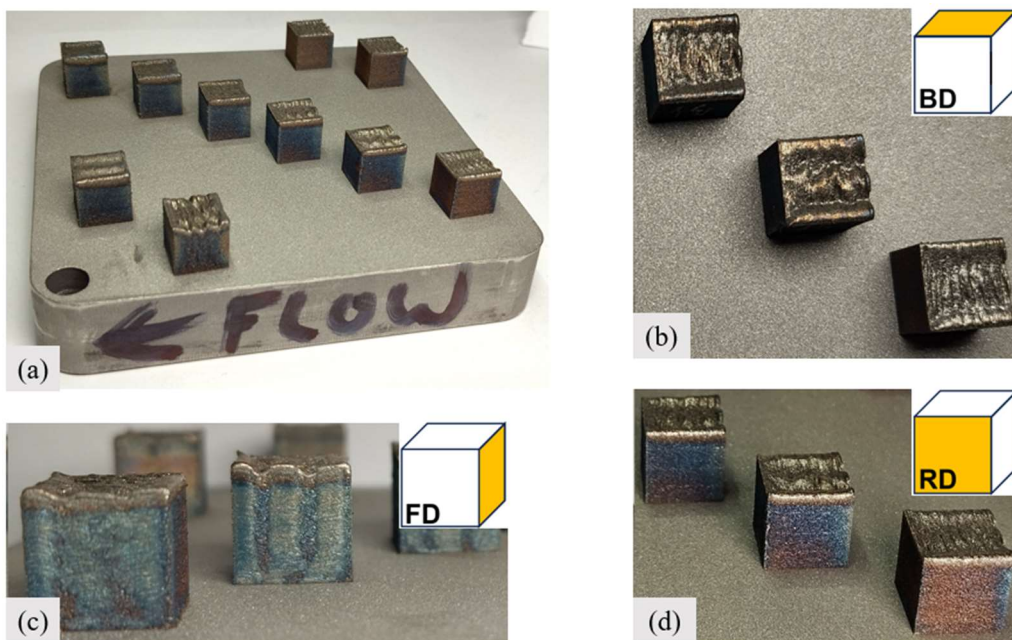
Č. vzorky	LP (W)	LS (mm·s <sup>-1</sup> )	HD (mm)
1	250	100	0,1986
2	250	200	0,1362
3	100	200	0,0810
4	150	200	0,0996
5	100	300	0,0714
6	150	300	0,0972
7	200	100	0,1956

---

8	150	100	0,1488
9	200	300	0,1020
10	200	400	0,0966
11	350	300	0,1554
12	300	300	0,1458
13	250	300	0,1260
14	250	400	0,1080
15	250	500	0,0900
16	250	600	0,0930
17	400	500	0,1218
18	200	200	0,1302
19	150	400	0,0906
20	200	500	0,0930

---

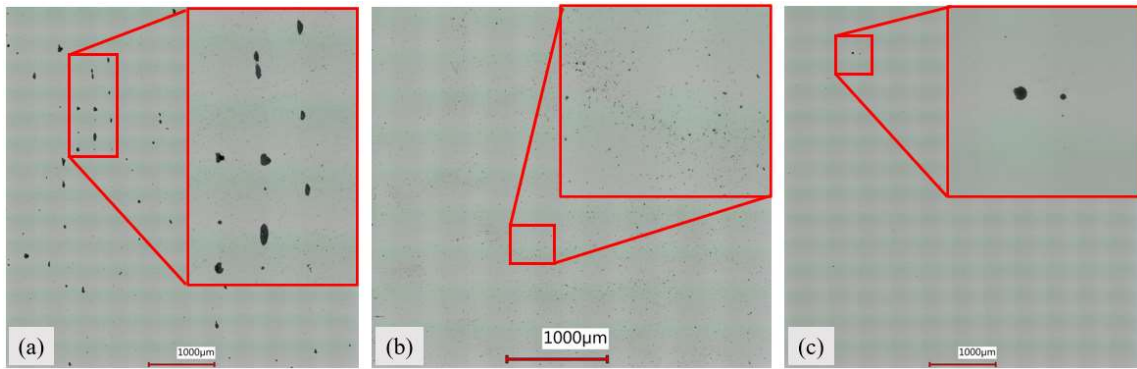
Vzhľadom k veľkému počtu vzoriek bola výroba objemových vzoriek realizovaná v dvoch separátnych stavbách. V oboch prípadoch došlo k výraznému zdeformovaniu hornej (BD) a bočnej (FD) strany vzorky ako je vidieť na Obr. 5-8 (b) a (c). Tento efekt mohol byť spôsobený vplyvom veľkej energie vstupujúcej do procesu výroby, resp. v dôsledku nedostatku času na ochladenie vzorky pred nanesením a spracovaním ďalšej vrstvy. Ďalším pozorovaným fenoménom bolo modré sfarbenie na FD a RD strane vzoriek (Obr. 5-8 (c) a (d)), ktoré bolo zapríčinené reakciou zvyškového kyslíku vo výrobnnej komore a mangánu v spracovávanom materiáli. Tento efekt a s ňou spojená oxidácia vzorky vznikla aj keď bola počas celej doby výroby hladina kyslíka menšia ako 0,2%.



Obr. 5-8 Objemové vzorky (a) rozmiestnenie na platforme a detailné pohľady na (b) BD, (c) FD a (d) RD rovinu

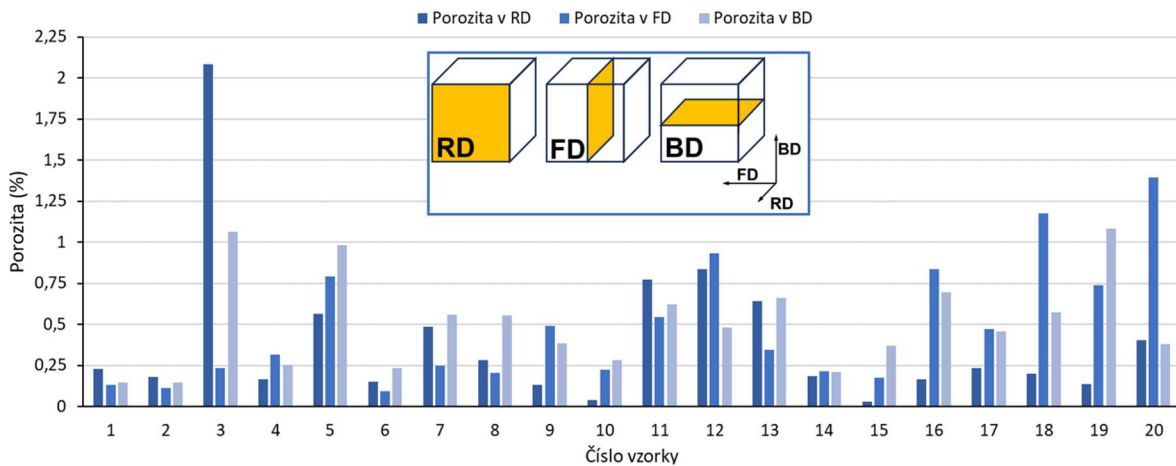
## 5.2.2 Porozita objemových vzoriek

Po vykonaní metalografických výbrusov boli vzorky pozorované pod optickým mikroskopom. V pozorovaných vzorkách sa vyskytovali primárne tri druhy vnútornej porozity. Jednalo sa o porozitu spôsobenú nedostatkom fúzie (LOF) spôsobenú príliš veľkou vzdialenosťou susedných vrstiev materiálu (HD), prípadne keyhole porozitu spôsobenú práve príliš malou vzdialenosťou susedných zvarov. Na Obr. 5-9 (a), kde je zobrazený výbrus RD roviny vzorky číslo 13 je tento fenomén vidieť v podobe nepravidelných oválnych pórov umiestnených v zreteľných líniách nad sebou. Ďalším druhom vnútorných defektov bola mikroporozita pozorovaná v BD a FD rovine, ako je vidieť na Obr. 5-9 (b), kde je zobrazený výbrus BD roviny vzorky číslo 16. Veľkosť týchto mikropórov sa pohybovala v rozmedzí od nízkych jednotiek mikrometrov po približne 20 mikrometrov. Posledným druhom pozorovanej porozity boli ojedinelé guľaté póry v inak kvalitne spracovanom materiáli ako je vidieť na Obr. 5-9 (c) pre výbrus RD roviny vzorky číslo 15. Obrázky porozity všetkých vyhodnocovaných vzoriek vo všetkých rovinách sú uvedené v Prílohe C na strane 108.



Obr. 5-9 Druhy porozity v pozorovaných vzorkách (a) nepravidelná LOF porozita medzi trackmi, (b) mikroporozita, (c) guľaté póry

Výsledky z merania porozity všetkých vzoriek sú zobrazené na Obr. 5-10. Najvyššia odmeraná porozita bola na vzorke číslo 3 v rovine RD a mala hodnotu 2,08%. Táto hodnota vysoko prevyšovala ostatné vzorky vo všetkých skúmaných smeroch. V samotnom RD smere dosiahlo 15 vzoriek porozitu nižšiu ako 0,5%. Pre smer FD a porozitu 0,5% to bolo 13 vzoriek a najvyššia hodnota porozity s hodnotou 1,4% bola nameraná na vzorke číslo 20. Najmenší počet vzoriek s porozitou nižšou ako 0,5% bol zistený v smere BD, a to 11, čo zodpovedalo len 55% z ich celkového počtu.



Obr. 5-10 Porozita vzoriek v hlavných rovinách pri OL=40%

Samotný vplyv procesných parametrov na porozitu v jednotlivých rovinách je prehľadnejšie zobrazený na Obr. 5-11 (a-c). Priemerná porozita zobrazená na Obr. 5-11 (d) je určená aritmetickým priemerom hodnôt nameraných v jednotlivých rovinách. Pri vyhodnocovaní porozity v rovine RD (Obr. 5-9 (a)) bola najvýraznejšie pozorovaná keyhole porozita v tvare oválnych pórov s minimálnym zastúpením mikroporozity (Obr. 5-11 (a) resp. (b)). Mikroporozita však bola výrazne zastúpená v rovinách BD a FD, kde tvorila väčšinový podiel nameranej porozity. Posúdenie vplyvu a závislosti porozity na samotných procesných parametroch (LS a LP) pri OL = 40% je pre jednotlivé pozorované roviny spracované formou plôch odozvy a je k dispozícii v Prílohe D na strane 111.

RD	LS (mm/s)					
	100	200	300	400	500	600
100		2,081	0,564			
150	0,284	0,165	0,149	0,137		
200	0,486	0,198	0,13	0,04	0,404	
250	0,227	0,182	0,641	0,183	0,031	0,166
300			0,836			
350			0,772			
400					0,235	

(a)

BD	LS (mm/s)					
	100	200	300	400	500	600
100		1,063	0,98			
150	0,554	0,253	0,232	1,084		
200	0,558	0,576	0,383	0,281	0,379	
250	0,144	0,147	0,66	0,21	0,371	0,695
300			0,481			
350			0,62			
400					0,459	

(b)

FD	LS (mm/s)					
	100	200	300	400	500	600
100		0,233	0,794			
150	0,207	0,316	0,092	0,741		
200	0,25	1,177	0,492	0,222	1,396	
250	0,132	0,113	0,346	0,216	0,177	0,838
300			0,933			
350			0,544			
400					0,473	

(c)

∅	LS (mm/s)					
	100	200	300	400	500	600
100		1,126	0,779			
150	0,348	0,245	0,158	0,654		
200	0,431	0,650	0,335	0,181	0,726	
250	0,168	0,147	0,549	0,203	0,193	0,566
300			0,750			
350			0,645			
400					0,389	

(d)

Obr. 5-11 Mapy porozity v smere (a) RD, (b) BD, (c) FD a (d) priemerná hodnota porozity

Na základe veľmi nízkej porozity vo všetkých skúmaných rovinách a dobrej variabilite procesných parametrov výroby boli vzorky s označením 1, 6, 10, a 15 podrobené ďalším experimentom. K týmto vzorkám boli následne pridané vzorky s označením 4 a 17 ktorých parametre výroby poskytovali navýšenie variability, teda možnosť porovnania významnejších rozdielov v použitých procesných parametroch a ktorých relatívna hustota bola stále prijateľná.

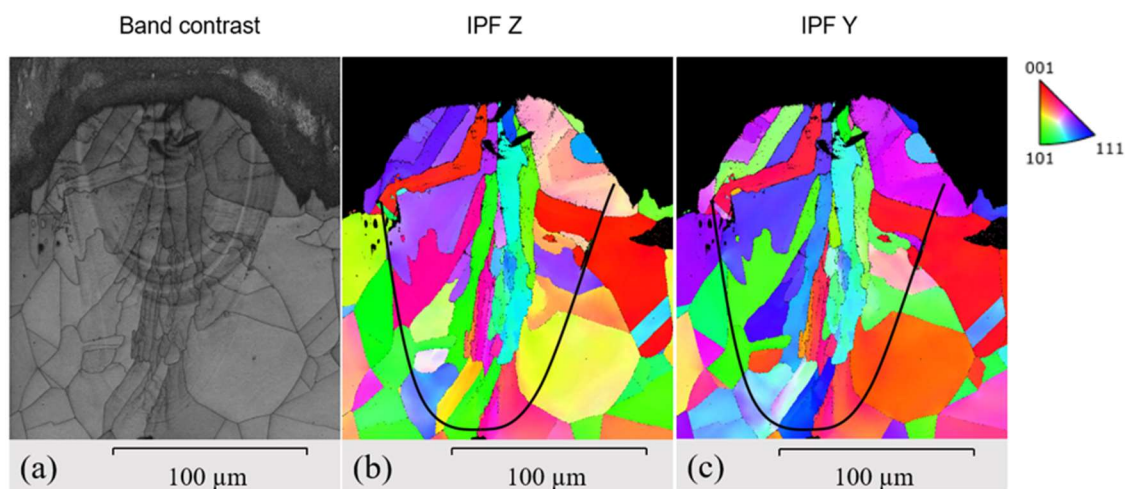
## 5.3 Vyhodnotenie mikroštruktúry

### 5.3.1 Predbežná mikroštruktúra jednoduchých zvarov

Okrem určenia procesnej mapy s dobrou porozitou a predikcie rozmerov zvarového kúpeľa v závislosti od použitých procesných parametrov bola pri jednoduchých zvaroch ambícia určiť aj ich predbežnú kryštalickú štruktúru a orientáciu kryštalografických zrn. Preto boli perspektívne vzorky jednoduchých zvarov zaliate do čierneho duroplastu a podrobené EBSD analýze.



Vyhodnotenie EBSD analýzy vzorky jednoduchého zvaru s  $LP = 100 \text{ W}$  a  $LS = 200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  je zobrazené na Obr. 5-12. Na kontrastnej snímke indikujúcej intenzitu difrakcie elektrónov, (Obr. 5-12 (a)) je zobrazená prierezová plocha zvaru s jemne viditeľnou hranicou medzi zvarom a podkladovým materiálom. Táto hranica je vynesená aj na Obr. 5-12 (b) a (c), kde je zobrazená schematická reprezentácia orientácií zŕn v štruktúre pomocou EBSD mapy. Z obrázkov jasne vyplýva, že zrná rastúce v rámci jednoduchého zvaru preberajú kryštalickú štruktúru základného materiálu. To znamená, že zrná rastúce na rozhraní zvarového kúpeľa a základného materiálu preberajú smer rastu zŕn zo základného materiálu. Keďže bol tento fenomén pozorovaný na všetkých EBSD analyzovaných vzorkách, nebolo z nich možné vyvodit' žiadne relevantné závery, ktoré by jednoznačne dali do súvislosti vplyv procesných parametrov na rast zŕn v jednoduchých zvaroch.



Obr. 5-12 EBSD analýza jednoduchého zvaru (a) kontrastný snímok; (b) IPF v ose Z a (c) IPF v ose Y

### 5.3.2 Mikroštruktúra objemových vzoriek

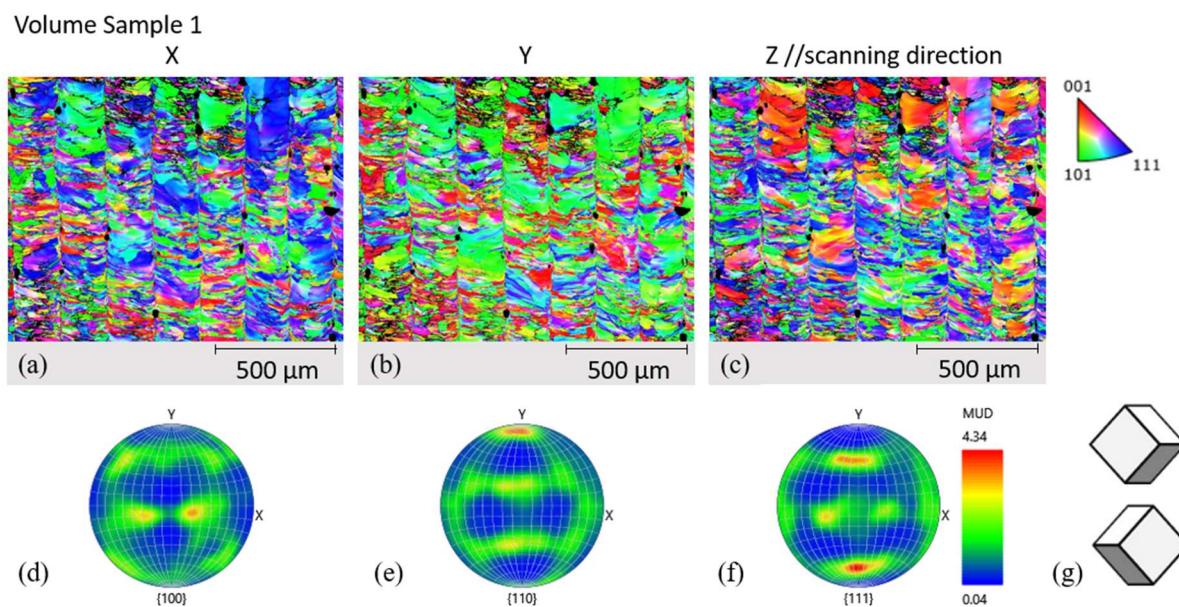
Na šiestich vybraných objemových vzorkách (vzorky 1, 4, 6, 10, 15 a 17) bola vykonaná EBSD analýza. Z tohto analyzovania vzoriek boli najzaujímavejšie výsledky pre vzorku 1 (Obr. 5-13), 4 (Obr. 5-14) a 15 (Obr. 5-15), kde bolo vidieť najvýznamnejšie zmeny v kryštalografickej štruktúre v závislosti od použitých procesných parametrov výroby. Výsledky ostatných vzoriek zahrňujúce EBSD mapy a IPF sú uvedené v E na strane 113.

Ako je vidieť na Obr. 5-13 (a-c), vzorka 1 ( $LP = 250 \text{ W}$ ;  $LS = 100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $HD = 0,1986 \text{ mm}$ ) je tvorená veľkým množstvom malých zŕn. Čo sa týka tvaru týchto zŕn, primárne sa jedná o nízke, horizontálne natiahnuté zrná. Vertikálne línie, ktoré sa môžu zdať ako hranice medzi vedľa seba stojacimi zvarmi sú v skutočnosti stredové osy zvaru, čo platí pre všetky vyhodnocované vzorky. Pri bližšom pohľade na štruktúru je vidieť, ako pri tuhnutí zvarového kúpeľa dochádzalo k prebratiu horizontálnej mikroštruktúry predchádzajúceho zvaru, teda že zrno rastúce jedným smerom v pôvodnom zvare pokračovalo v raste rovnakým smerom v nasledujúcom zvare až do momentu, kedy narazilo na osu zvaru.

Ďalej je zjavné, že porozita vznikajúca v štruktúre sa nachádza práve v oblasti osy zvaru, takže sa jedná o keyhole porozitu. Ostatné čierne pixely (zero solutions) viditeľné hlavne v hornej a strednej časti na Obr. 5-13 (a-c) sú spôsobené neschopnosťou oindexovať jednotlivé pixely a jednoznačne im priradiť smer odrazenie elektrónov do detektora. Tento jav môže byť spôsobený jemnozrnnou štruktúrou s veľkým počtom hraníc zŕn alebo nedokonalým zaostrením zväzkom na okrajoch mapy.

Samotná farebná reprezentácia orientácie kryštalografických zŕn zobrazená na EBSD mapách jasne ukazuje preferenčné modré sfarbenie reprezentujúce orientáciu  $\langle 111 \rangle$  s malým množstvom zelenej  $\langle 101 \rangle$  a červenej  $\langle 001 \rangle$  pre smer X (Obr. 5-13 (a)). V smere Y je primárne sfarbenie zelené s preferenčnou orientáciu práve  $\langle 101 \rangle$  s občasnými červenými  $\langle 001 \rangle$  a modrými  $\langle 111 \rangle$  oblastami (Obr. 5-13 (b)). V smere skenovanie, teda v smere Z (Obr. 5-13 (c)), nie je jednoznačne možné určiť preferenčnú orientáciu zŕn, keďže žiadna zo zobrazených orientácii nie je vyslovene dominantná. Preto ju nazvime náhodnou, kde sa vyskytujú všetky smery a orientácie kryštalografický zŕn.

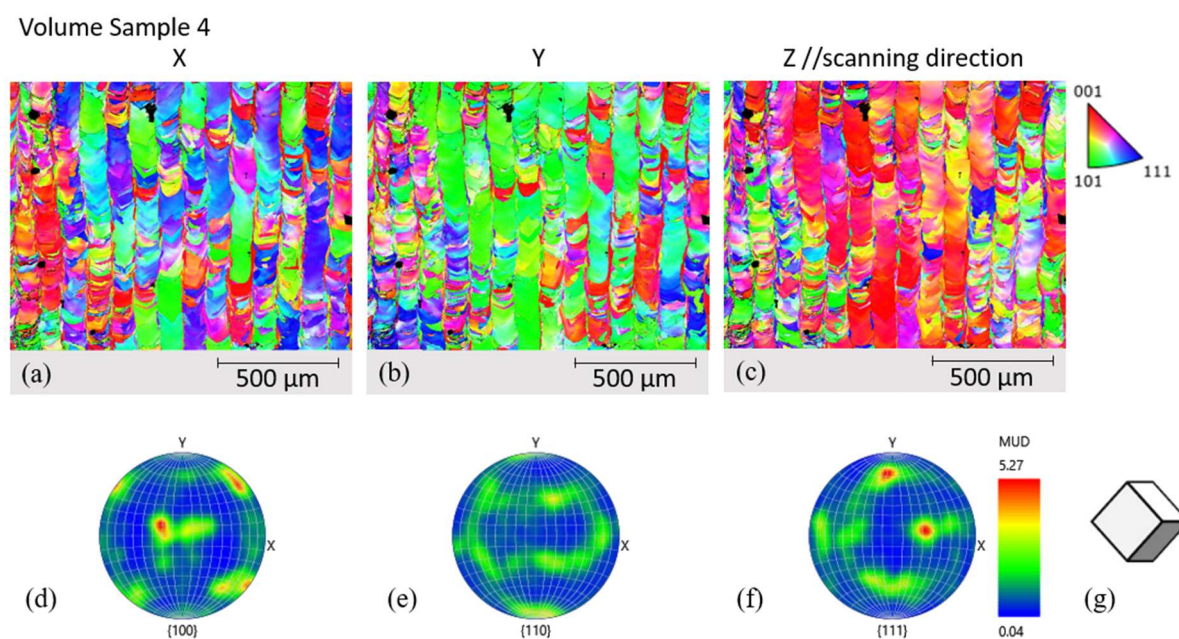
Intenzita orientácie FCC štruktúry je zobrazená pomocou PF máp Obr. 5-13 (d-f). Vzhľadom k najvýraznejšej intenzite smeru  $\{111\}$  zobrazenej na Obr. 5-13 (f) je možné posúdiť výrazný smer tejto rodiny rovín. Zároveň však oblasti nižších intenzít zobrazené na všetkých PF mapách zelenou farbou vylučujú len jedinú preferenčnú orientáciu kryštalickej štruktúry. Z celkového rozloženia intenzity na PF mapách sa v štruktúre predpokladajú dve hlavné orientácie štruktúry. Ich grafické zobrazenie je vidieť na Obr. 5-13 (g). Celkovo vzorka VS\_1 vykazuje prevažne štruktúru 011 v smere osy Y (BD) s relatívne náhodnou orientáciou v osách X a Z.



Obr. 5-13 Kryštalografická analýza vzorky 1 (a-c) EBSD mapy pre jednotlivé smery; (d-f) PF zobrazujúce intenzitu orientácii zŕn v jednotlivých smeroch a (g) schematické znázornenie orientácie FCC v materiáli

Vzorka 4 ( $LP = 150 \text{ W}$ ;  $LS = 200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $HD = 0,0996 \text{ mm}$ ) zobrazená na Obr. 5-14 podobne ako vzorka 1 vykazuje keyhole porozitu v oblasti osi zvarov, avšak zná v jej štruktúre sú výrazne väčšie a ich tvar je skôr vyšší ako širší. Jedná sa o lamelárnu štruktúru a zrná rastú cez viacero nanesených vrstiev materiálu. Čo sa týka farebnej reprezentácie samotných zrn, v smere X (Obr. 5-14 (a)) sa jedná primárne o kombináciu modrej a zelenej s orientáciami  $\langle 101 \rangle$  resp.  $\langle 111 \rangle$ , kde nie je možné jednoznačne určiť, ktorá z nich je prevládajúca. V smere Y je jednoznačne dominantná štruktúra s orientáciou  $\langle 101 \rangle$  reprezentovaná zelenou farbou (Obr. 5-14 (b)) a v smere skenovania (v smere Z) je dominantná štruktúra s orientáciou  $\langle 001 \rangle$  zobrazená ako červená.

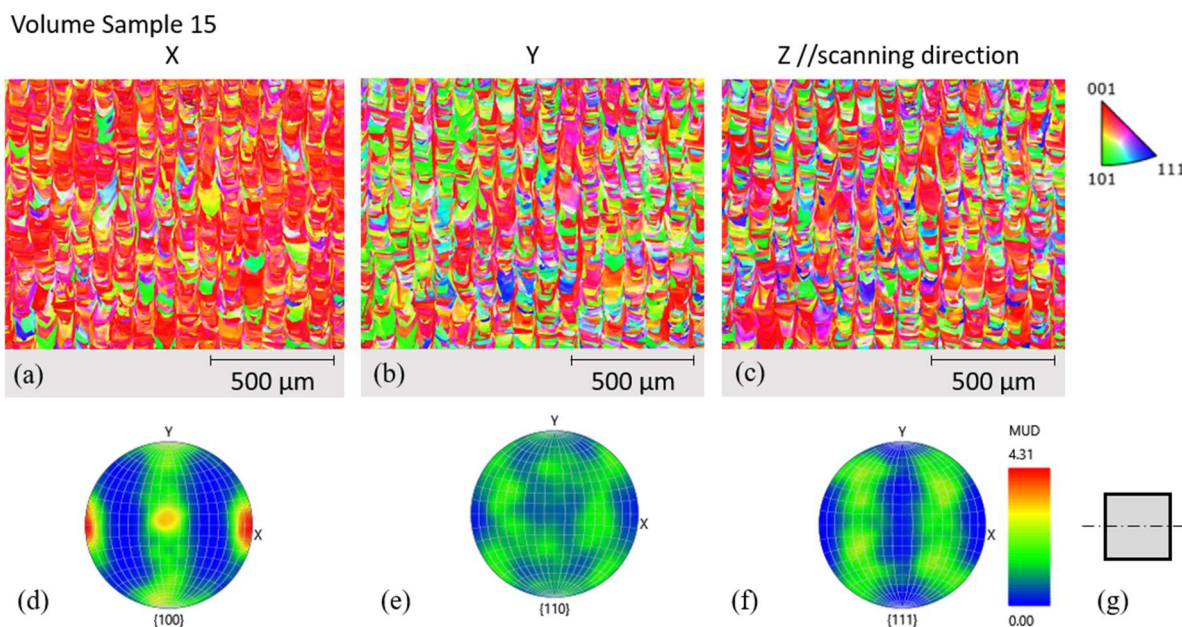
Na Obr. 5-14 (d-f) je pomocou PF zobrazená orientácia hlavných rovín kryštalografickej štruktúry. Najväčšia intenzita roviny s orientáciou  $\{100\}$  sa jemne odkláňa od smeru Z smerom k smeru X a zároveň sa ďalšie dve špičky intenzít nachádzajú v prvom a štvrtom kvadrante roviny XY (Obr. 5-14 (d)). Ďalšie významné špičky intenzity je vidieť na Obr. 5-14 (f) pre roviny  $\{111\}$ , ktoré sa od smeru Z odkláňajú do smerov X resp. Y. Preferenčná orientácia kryštalickej mriežky v štruktúre materiálu je schematicky zobrazená na Obr. 5-14 (g) pomocou orientovanej kocky. Vzorka VS\_4 dosahuje *cube* štruktúru s výraznými orientáciami v osách Y a Z.



Obr. 5-14 Kryštalografická analýza vzorky 4 (a-c) EBSD mapy pre jednotlivé smery; (d-f) PF zobrazujúce intenzitu orientácii zrn v jednotlivých smeroch a (g) schematické znázornenie orientácie FCC v materiáli

Poslednou podrobnejšie popisovanou vzorkou je vzorka 15 ( $LP = 250 \text{ W}$ ;  $LS = 500 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $HD = 0,0900 \text{ mm}$ ), ktorej zrná sú opäť nižšie a širšie a vytvárajú akoby tvar písmena „L“ (Obr. 5-15 (a-c)). V porovnaní so vzorkami 1 a 4 je farebné spektrum EBSD máp výrazne odlišné. Kým pri vzorkách 1 a 4 boli farby primárne modrá, resp. zelená a im prislúchajúce orientácie  $\langle 111 \rangle$  resp.  $\langle 101 \rangle$ , pri vzorke 15 je štruktúra vo všetkých smeroch silne orientovaná v smere  $\langle 001 \rangle$ , čo je reprezentované výrazným zastúpením červenej na EBSD mape, s miernymi náznakmi zelenej pri smere Y. Podobnú štruktúru, ktorá bola pozorovaná na vzorke 15 dosahovali aj vzorky 6, 10 a 17. Tieto výsledky sú k dispozícii v Prílohe E na strane 113.

Silná intenzita roviny  $\{100\}$  v smere osy X zobrazená na Obr. 5-15 (d) jasne udáva orientáciu kryštalickej mriežky schematicky zobrazenej na Obr. 5-15 (g), kde je vidieť aj os rotácie okolo ktorej sa natáča FCC štruktúra. Túto orientáciu aj s jej nakláňaním ďalej podporujú aj PF mapy rovín  $\{110\}$  a  $\{111\}$ , kde sa zelené oblasti vyššej intenzity týchto rovín správajú tak, akoby rotovali okolo vyznačenej osy rotácie. Po preskúmaní intenzity zobrazenej na PF je zjavné, že objemová vzorka 15 vykazuje *fibre* textúru.



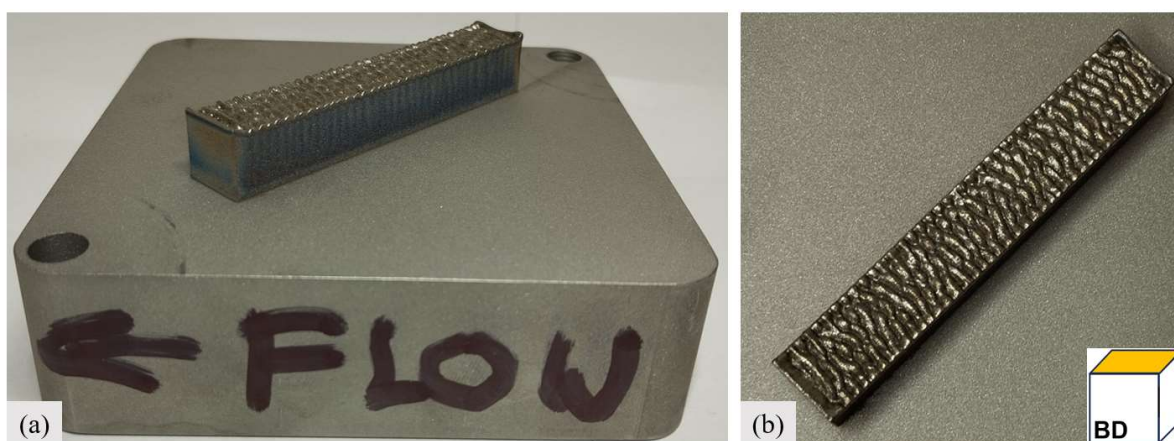
Obr. 5-15 Kryštalografická analýza vzorky 15 (a-c) EBSD mapy pre jednotlivé smery; (d-f) PF zobrazujúce intenzitu orientácií zrn v jednotlivých smeroch a (g) schematické znázornenie orientácie FCC v materiáli

Na základe preskúmania EBSD máp a PF zobrazení jednotlivých štruktúr, vykazovala vzorka VS\_1 prevažne štruktúru s orientáciou 011 v BD s relatívne náhodnou orientáciou v osiach X a Z, vzorka VS\_4 dosahoval *cube* štruktúru a vzorka VS\_15 jasnú *fibre* štruktúru.

### 5.3.3 Výroba ťahových vzoriek

Výroba ťahových vzoriek je bližšie popísaná v Kap.4.4.3. Na Obr. 5-16 je zobrazená vyrobená ťahová vzorka TS\_4\_0. Ako je vidieť na stranách vzorky, aj v prípade výroby ťahových vzoriek došlo k modrému sfarbeniu pravdepodobne spôsobenom prítomnosťou zvyškového kyslíku vo výrobnej komore. Opäť však treba podotknúť, že počas celého procesu výroby bola hladina kyslíku pod hodnotou 0,2%. Pri pohľade na vrchnú časť vyrobenej vzorky (Obr. 5-16 (b)) je vidieť vysokú vlnitosť jej povrchu. Tento efekt môže byť spôsobený napríklad vplyvom odletených častí spečeného materiálu na už spracovaný povrch vzorky, kde pri nanášaní ďalších vrstiev prášku vzniká nerovnomerná vrstva a táto chyba sa ďalej akumuluje. Ďalej ho môže spôsobovať aj prílišná koncentrácia energie pri výrobe, prípadne nerovnomernosť ochladzovania vzorky. Dôsledkom tohto zvlnenia môže byť zvýšená vnútorná porozita vzorky spôsobná práve nerovnomernosťou nanášanej a spracovávanej vrstvy materiálu.

Kvôli prílišnému zvlneniu a hroziacej kolízii s recoaterom bola výroba vzorky TS\_15\_2 približne v polovici stavby zrušená, preto už v ďalších častiach tejto práce nefiguruje.



Obr. 5-16 Umiestnenie ťahovej vzorky TS\_4\_0 na výrobnej platforme (a); pohľad zhora na ťahovú vzorku (b)

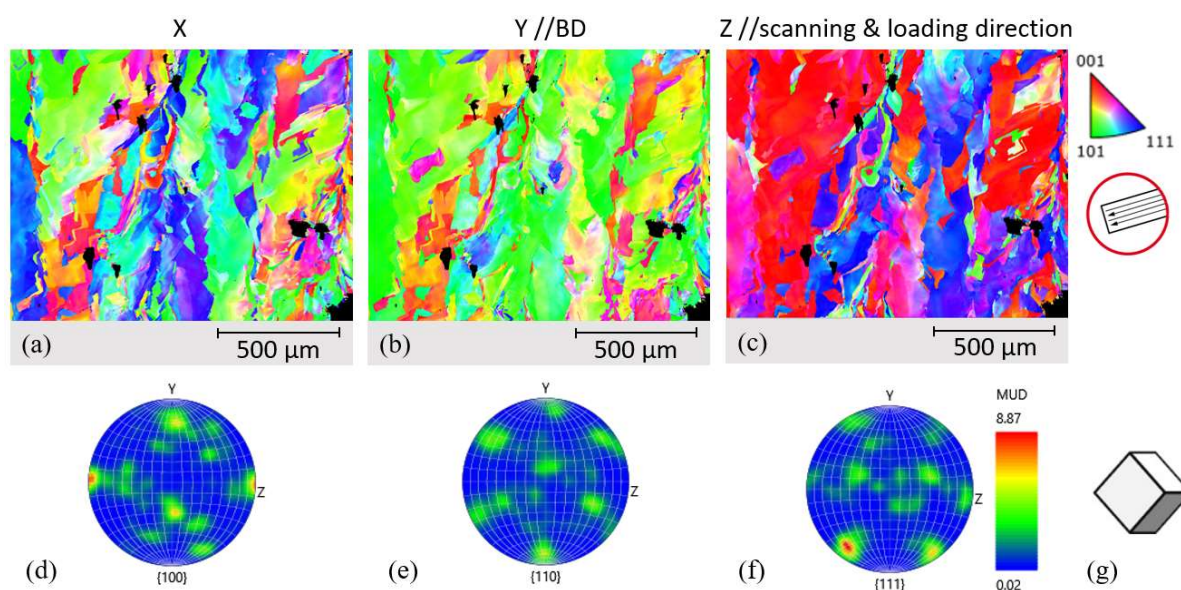
Vyrobené ťahové vzorky boli následne odrezané od výrobnej platformy, a z ich koncov boli odrezané 5 mm široké bločky materiálu na kontrolu dosiahnutej mikroštruktúry popísanej v Kap. 5.3.4. Z hlavných častí vzoriek boli vyrobené ťahové vzorky typu B podľa DIN 50125 na otestovanie mechanických vlastností. Tie sú ďalej popísané v Kap. 5.4.

### 5.3.4 Mikroštruktúra ťahových vzoriek

Okrem objemových vzoriek bola mikroštruktúra vyhodnocovaná aj na ťahových vzorkách, kde sa pri variante TS\_X\_0 predpokladala rovnaká mikroštruktúra, ako v prípade vyššie popísaných objemových vzoriek.

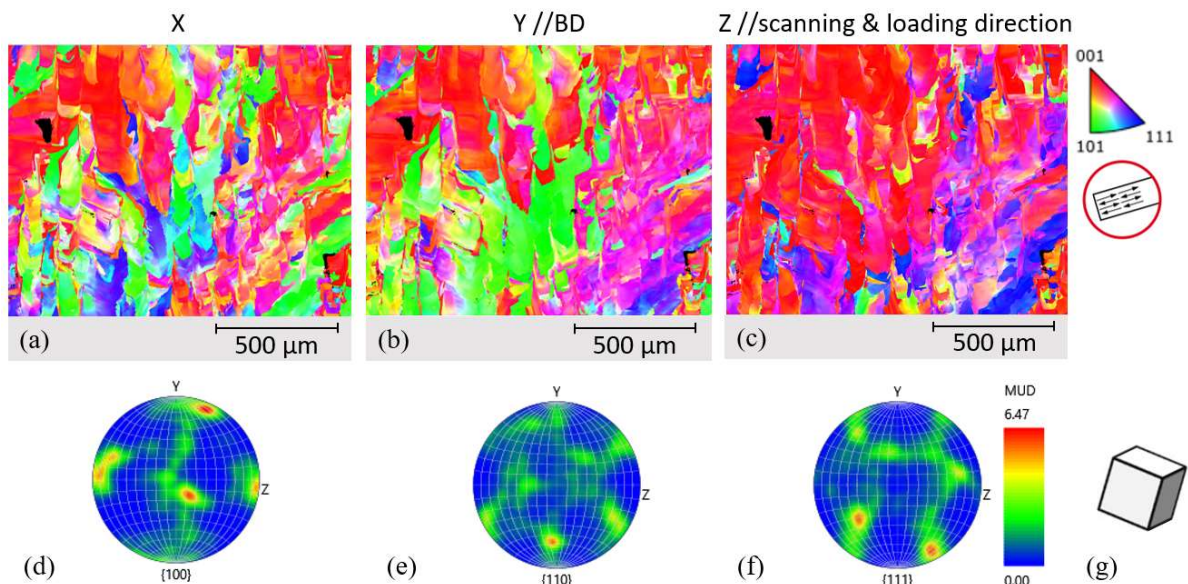
Vzorka TS\_4\_1 zobrazená na Obr. 5-17 vyrábaná skenovaním po celej dĺžke dlhej strany dosahovala vo svojej mikroštruktúre pomerne veľké vertikálne zrná. Čierne pixely na Obr. 5-17 (a-c) predstavujú vnútornú porozitu vzorky, ktorá bola značná. V smere X bola ich orientácia náhodná s výraznejším zastúpením smerov  $\langle 111 \rangle$  a  $\langle 101 \rangle$ . V smere Y ktorá zodpovedal smeru BD bola orientácia výrazná v smere  $\langle 101 \rangle$ . Orientácia zrn v smere skenovania, a zároveň v smere zaťažovania ťahovej vzorky, vykazovala primárne orientácie  $\langle 001 \rangle$  a  $\langle 111 \rangle$ .

Na základe PF máp intenzity orientácii v priestore zobrazených na Obr. 5-17 (d-f) dosahuje vzorka najväčšiu intenzitu v rovine  $\{111\}$  v smere Y-Z (Obr. 5-17 (f)). Ďalšie významné vrcholy intenzity vznikli v smere Z na Obr. 5-17 (d). Celková orientácia mikroštruktúry je graficky reprezentovaná na Obr. 5-17 (g). Táto orientácia zodpovedá *cube* štruktúre.



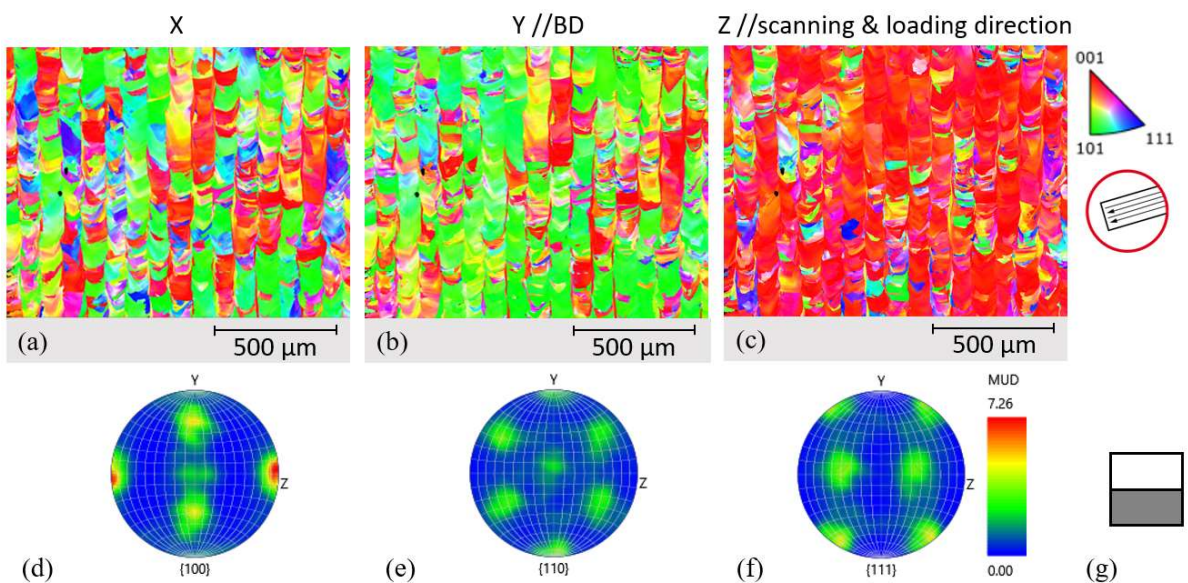
Obr. 5-17 Kryštalografická analýza vzorky TS\_4\_1 vyrábanej súvislým skenovaním po dlhej strane (a-c) EBSD mapy pre jednotlivé smery; (d-f) PF zobrazujúce intenzitu orientácii zrn v jednotlivých smeroch a (g) schematické znázornenie orientácie FCC v materiáli

Pri segmentovanom skenovaní vyrábanej vzorky TS\_4\_2 (Obr. 5-18) bola v smere skenovania, teda v smere Z dosiahnutá podobná štruktúra, ako pri vzorke TS\_4\_1 (Obr. 5-17), a to s primárnou orientáciou zrn v smeroch  $\langle 001 \rangle$  a  $\langle 111 \rangle$ . Na rozdiel od predchádzajúcej vzorky však smery X a Y s pôvodnými orientáciami  $\langle 101 \rangle$  a  $\langle 111 \rangle$  (Obr. 5-17 (a)), resp. primárne s orientáciou  $\langle 101 \rangle$  (Obr. 5-17 (b)) dosahovali vo vzorke TS\_4\_2 značný podiel štruktúry s orientáciou  $\langle 001 \rangle$ , čo je jasne zobrazené na Obr. 5-18 (a, b). V prípade vzorky TS\_4\_2 je interpretácia PF máp (Obr. 5-18 (d-f)) jednoduchšia. Opäť sa jedná o *cube* štruktúru materiálu graficky reprezentovanú orientovanou kockou na Obr. 5-18 (g).



Obr. 5-18 Kryštalografická analýza vzorky TS\_4\_2 vyrábanej segmentovaným skenovaním po dlhej strane (a-c) EBSD mapy pre jednotlivé smery; (d-f) PF zobrazujúce intenzitu orientácii zŕn v jednotlivých smeroch a (g) schematické znázornenie orientácie FCC v materiáli

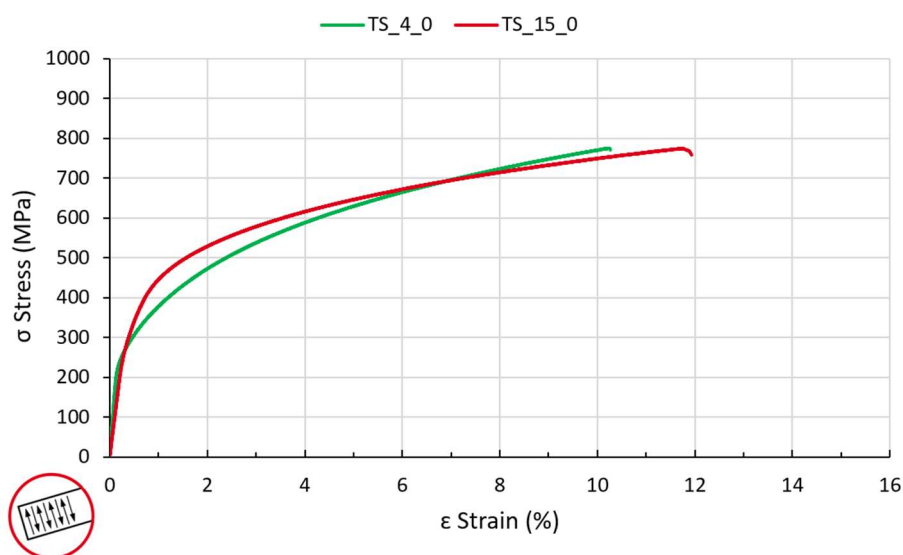
Posledná pozorovaná vzorka TS\_15\_1 je zobrazená na Obr. 5-19. Orientácie zŕn v smeroch X a Y sú primárne  $\langle 101 \rangle$  avšak s nezanedbateľným príspevkom orientácie  $\langle 001 \rangle$ . V smere Z je hlavná orientácia zŕn v smere  $\langle 001 \rangle$ . Interpretácia PF máp (Obr. 5-19 (d-f)) je graficky reprezentovaná na Obr. 5-19 (g), čo zodpovedá jasnej *fibre* štruktúre materiálu. Tá je však oproti vzorke VS\_15 (Obr. 5-15) slabšia, čo môže byť zapríčinené size efektom, spatterom alebo warpingom.



Obr. 5-19 Kryštalografická analýza vzorky TS\_15\_1 vyrábanej súvislým skenovaním po dlhej strane (a-c) EBSD mapy pre jednotlivé smery; (d-f) PF zobrazujúce intenzitu orientácii zŕn v jednotlivých smeroch a (g) schematické znázornenie orientácie FCC v materiáli

## 5.4 Vyhodnotenie mechanických vlastností

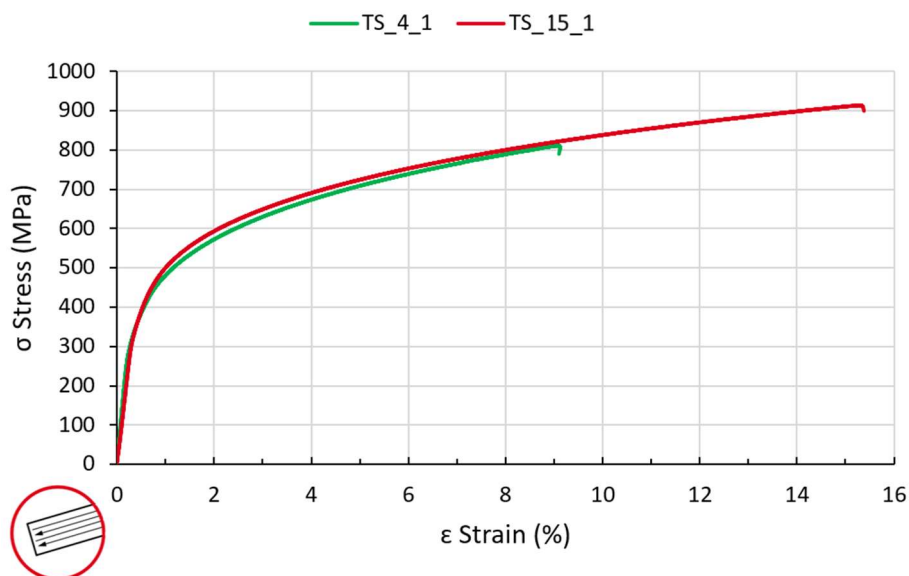
Mechanické vlastnosti vzoriek sú vyjadrené pomocou závislosti napätia na predĺžení (*Stress-Strain*). Na Obr. 5-20 je zobrazený priebeh ťahovej skúšky vzoriek TS\_4\_0 resp. TS\_15\_0 vyrábaných v smere kratšej hrany vzorky so štruktúrou zobrazenou na Obr. 5-14 (a) resp. Obr. 5-15 (a). Obe testované vzorky vykazujú plastickú deformáciu s nevýraznou medzou klzu. Na základe lineárnej časti krivky bol vyhodnotený modul pružnosti v ťahu (Youngov modul), ktorý dosahoval hodnoty  $E_{4_0} = 156$  GPa resp.  $E_{15_0} = 101$  GPa. Zmluvná medza klzu ( $R_{p0,2}$ ) bola určená z nameraného napätia pri plastickej deformácii 0,2% a dosahovala hodnotu  $R_{p0,2} = 283$  MPa pre vzorku TS\_4\_0 resp.  $R_{p0,2} = 356$  MPa pre vzorku TS\_15\_0. Aj keď sa hodnoty medze klzu oboch ťahových vzoriek líšia o viac ako 20%, ich medze pevnosti sú takmer identické a dosahujú hodnotu  $R_{m4} \approx R_{m15} = 775$  MPa. Ďalším pozorovaným rozdielom je pomerná deformácia do porušenia. Tá pre vzorku TS\_15\_0 dosahuje hodnotu  $\varepsilon_{15} = 11,9\%$ , čo je o 13% viac ako dosahuje vzorka TS\_4\_0 a hodnotou  $\varepsilon_4 = 10,3\%$ .



Obr. 5-20 Deformačne-napätiová závislosť ťahových vzoriek skenovaných v krátkom smere

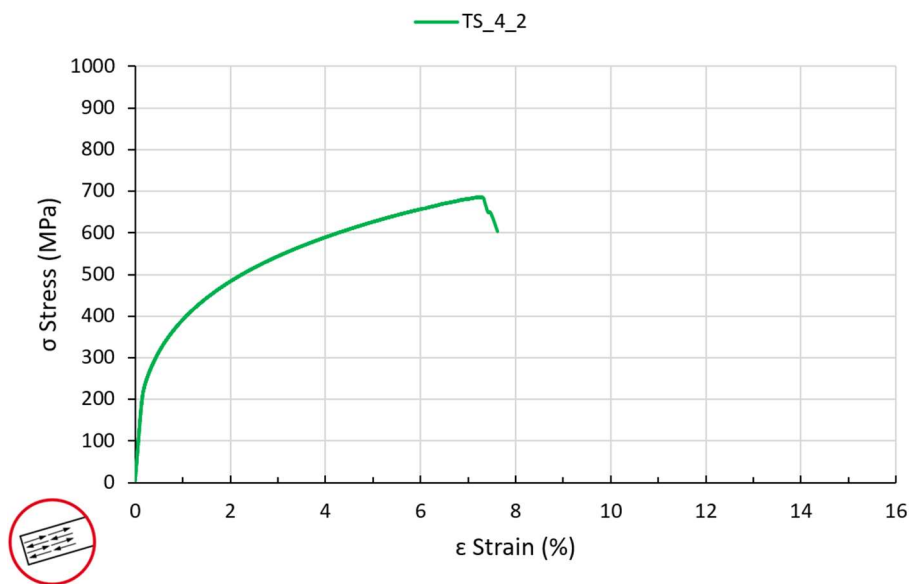
Na Obr. 5-21 je zobrazená Stress-Strain závislosť ťahových vzoriek TS\_4\_1 a TS\_15\_1 vyrábaných skenovaním po celej dĺžke dlhšej časti zo štruktúrou zobrazenou na Obr. 5-17 resp. Obr. 5-19. Podobne ako v predchádzajúcom prípade vykazujú obe vzorky plastickú deformáciu s nevýraznou medzou klzu. Youngov modul pružnosti vzoriek bol  $E_{4_1} = 132$  GPa resp.  $E_{15_1} = 107$  GPa. Zmluvná medza klzu dosahuje hodnoty  $R_{p0,2} = 380$  MPa pre vzorku TS\_4\_1 resp.  $R_{p0,2} = 420$  MPa pre vzorku TS\_15\_1, čo je rozdiel 9,5%. Na rozdiel od predchádzajúcich vzoriek, kde bola medza pevnosti ťahových vzoriek takmer identická, pri vzorkách TS\_4\_1 resp. TS\_15\_1 vychádza rozdiel v medzi pevnosti až na úrovni 11,3%, čo zodpovedá hodnotám  $R_{m4_1} = 811$  MPa a  $R_{m15_1} = 914$  MPa. Predĺženie do deformácie vzorky TS\_4\_1 s hodnotou 9,1% bolo oproti vzorke TS\_15\_1 s hodnotou 15,4% takmer polovičné.





Obr. 5-21 Deformačne-napätová závislosť ťahových vzoriek skenovaných v dlhom smere po celej dĺžke

Kvôli komplikáciám pri výrobe vzorky TS\_15\_2, kde dochádzalo k jej prehrievaniu a výraznému vlneniu povrchu, bola stavba tejto vzorky predbežne zastavená, aby nedošlo k poškodeniu recoateru prípadne vzorky TS\_4\_2. Priebeh napätí a predĺženia vzorky TS\_4\_2 je zobrazený na Obr. 5-22, kde táto vzorky dosahuje Youngov modul  $E_{4_2} = 142$  GPa, zmluvnú medzu klzu  $R_{p0,2} = 293$  MPa, medzu pevnosti  $R_{m_{4_2}} = 686$  MPa a k jej porušeniu dôjde pri deformácii 7,6%.



1

Obr. 5-22 Deformačne-napätová závislosť ťahových vzoriek skenovaných v dlhom smere po segmentoch

Prehľad všetkých získaných mechanických vlastností ťahových vzoriek aj s počiatočným priemerom a prierezovou plochou a nameranou porozitou ( $\Psi$ ) z odobratých bločkov pred zaťažovaním ťahových vzoriek je uvedený v Tab. 5-4

Tab. 5-4 Mechanické vlastnosti všetkých vyhodnocovaných ťahových vzoriek

Označenie vzorky	$d_0$ (mm)	$S_0$ (mm <sup>2</sup> )	E (GPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$\epsilon_t$ (%)	$\Psi$ (%)
TS_4_0	5,982	28,10	156	283	775	10,3	0,31
TS_4_1	5,963	27,93	132	380	811	9,1	1,44
TS_4_2	5,964	27,94	142	293	686	7,6	0,29
TS_15_0	5,984	28,12	101	356	774	11,9	0,11
TS_15_1	5,971	28,00	107	420	914	15,4	0,05

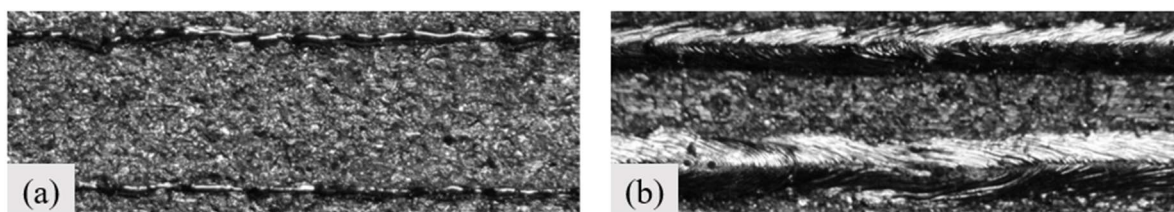
## 6 DISKUSIA

### 6.1 Interpretácia výsledkov

Nasledujúce kapitoly práce sú venované podrobnejšiemu pohľadu na výsledky dosiahnuté v priebehu riešenia tejto práce.

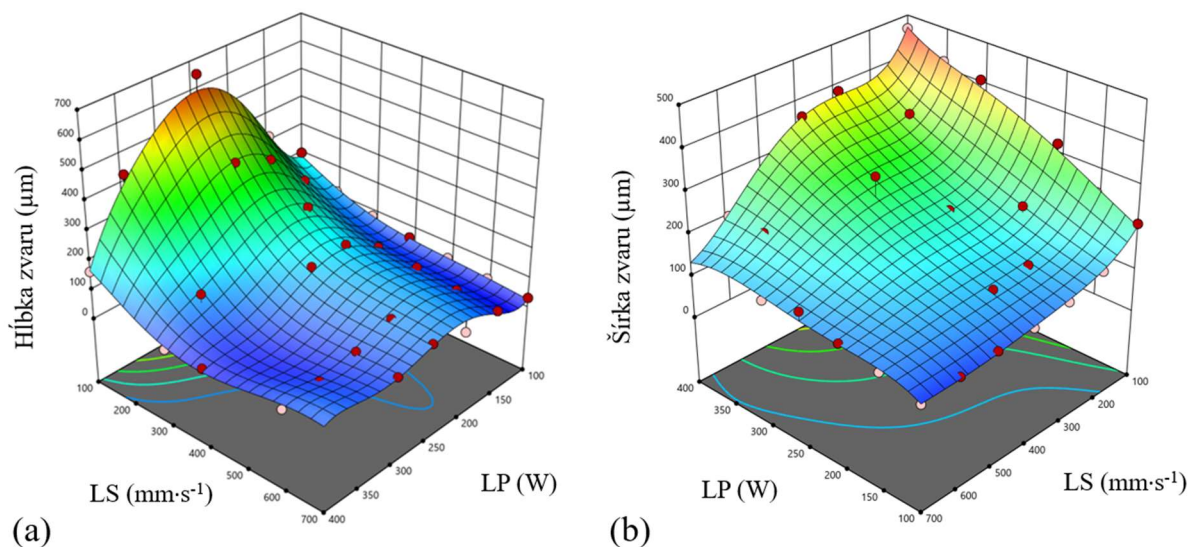
#### 6.1.1 Test jednoduchých zvarov

Pri teste jednoduchých zvarov bola na výrobnú platformu nanesená jediná vrstva kovového materiálu X30Mn22 s výškou 50  $\mu\text{m}$  a bolo na nej vyrobených 96 vzoriek jednoduchých zvarov. Hodnotená bola ich vonkajšia a vnútorná geometria. V prípade vonkajšej geometrie zvaru dochádzalo pri použití skenovacej rýchlosti vyššej ako  $LS = 800 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  k vzniku nerovnomerného a nespojitého zvaru (Obr. 6-1 (a)), čo bolo pozorované už v predchádzajúcich prácach [2],[4], a pri stavbe objemového telesa by tento efekt spôsoboval *Lack of Fusion* porozitu. Použitie vyššieho výkonu nad  $LP = 450 \text{ W}$  v kombinácii s rýchlosťou do  $LS = 700 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  malo za následok vytvorenie širokých pásov roztaveného materiálu pripomínajúci zvarový spoj (Obr. 6-1 (b)). Ako sa neskôr ukázalo pri vyhodnocovaní vnútornej geometrie týchto intenzívnych zvarov, ich použitie bolo nevhodné, keďže nedosahovali dostatočný prievar do základného materiálu.



Obr. 6-1 Defekty vonkajšej geometrie zvaru (a) nerovnomerný a nespojitý zvar; (b) široký rozliaty zvar pripomínajúci zvarový spoj

Pri skúmaní vplyvu výkonu a rýchlosti lasera na šírku a hĺbku zvarového sa predpokladalo, že s rastúcim výkonom bude rásť jeho hĺbka aj šírka, a s rastúcou rýchlosťou skenovania bude výška aj šírka zvaru klesať [2], [3]. Tento predpoklad je v tejto práci dosiahnutý len pre šírku zvaru, kde k zvyšovaniu šírky dochádza zvyšovaním výkonu a znižovaním skenovacej rýchlosti (Obr. 6-2 (b)). V prípade hĺbky zvaru skutočne platí, že znižovaním rýchlosti skenovania dôjde k nárastu hĺbky zvaru, avšak zvyšovaním výkonu dosiahneme maximálnu hĺbku zvaru približne pri 250W, kde kulminuje (Obr. 6-2 (a)). Ďalším pridávaním výkonu začne hĺbka zvaru klesať až pri výkone 450W nedôjde k prevareniu pôvodnej vrstvy materiálu prípadne je hĺbka zvaru nemerateľná (Príloha A – Mapa jednoduchých zvarov na strane 106).



Obr. 6-2 Vplyv výkonu (LP) a rýchlosti lasera (LS) na (a) hĺbku a (b) šírku jednoduchého zvaru

Domnievam sa, že dôvodom nepretavenia základného materiálu pri vyšších výkonoch môže byť vyššia odrazivosť základného materiálu, aj keď došlo k jeho opieskovaniu. Keďže stavba jednoduchých zvarov bola realizovaná na oceľové vložky z materiálu 304L, aby bolo možné jednoduché zvary demontovať, narezať a vyhodnotiť.

### 6.1.2 Mapa procesných parametrov

Na základe analýzy jednoduchých zvarov bola vytvorená mapa procesných parametrov na spracovanie materiálu X30Mn22 pri výške vrstvy 50  $\mu\text{m}$ . Keďže bola v tejto práci použitá výška nanášanej vrstvy 50  $\mu\text{m}$  a v rešerši bola táto výška 30  $\mu\text{m}$  (Tab. 2-3), tak priama konfrontácia a porovnanie použitých PP s tými z rešerše nemala význam. Preto bolo zvolené porovnanie na základe objemovej hustoty energie (*VED* - vzťah 2).

#### Volume Energy Density - VED

VED bola napočítaná pre celý skúmaný rozsah procesných parametrov a aj pre parametre zistené z rešerše, ktorých energia sa bola v rozsahu  $VED = 50 - 100 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$ . Na Obr. 6-3 je zobrazená mapa procesných parametrov s napočítanými objemovými energiami pre výšku vrstvy 50  $\mu\text{m}$  a šírku zvaru určenú z analýzy jednoduchých zvarov. Na modro zvýraznená oblasť prekrývajúca túto mapu reprezentuje rozsah VED z rešerše s odchýlkou  $\pm 5\%$ . Ako je vidieť, v oblasti do  $LP = 250 \text{ W}$  a do  $LS = 400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  dochádza k prekrytiu 75% skúmaných hodnôt. To však neplatí pre ostatné oblasti procesnej mapy. Vo vysoko-výkonovej a vysoko-rýchlostnej boli dosiahnuté nevhodné výsledky singletrackov aj napriek tomu, že podľa VED by mohli byť použiteľné. Opačne to platí pri výkonoch  $LP = 200$  a  $250 \text{ W}$  a rýchlostiach nad  $LS = 400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , kde boli dosiahnuté uspokojivé výsledky singletrackov, ale výpočet VED ich nepredpokladal.

VED (J·mm <sup>-3</sup> )		LS (mm/s)											
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
LP (W)	100	156,49	116,14	93,37	78,25	64,10	56,98	53,81	54,11				
	150	134,41	100,40	68,59	55,19	51,48	46,69	43,09	39,12				
	200	102,41	76,80	65,55	51,92	43,15	43,07	37,35	35,16				
	250	100,70	73,58	53,04	46,30	44,44	35,84	31,02	33,88				
	300	81,70	47,48	45,82	28,44	31,01	31,48	17,64	31,21				
	350	79,46	50,81	42,98	21,56	20,42	27,23	20,01	22,83				
	400	71,23	-	28,86	23,08	32,84	35,84	-	21,37				
	450	51,01	30,84	26,49	28,84	20,90	23,95	22,10	16,47				
	500		53,19	41,72	34,82	38,31	32,94	42,14	31,09	32,49			
	550			32,27	31,97	27,25	24,33	30,40	25,77	30,44	29,76		
	600				27,35	27,03	31,09	37,79	37,88	27,43	21,69	30,51	
	650					33,33	-	25,33	32,22	24,80	29,24	22,56	20,37

Obr. 6-3 Objemová hustota energie VED pre skúmaný rozsah procesných parametrov, kde na zeleno zvýraznená oblasť reprezentuje rozsah VED vypočítanej z procesných parametrov použitých v rešerši

### Termálne vlastnosti materiálu

Ďalšie posúdenie vhodnosti použitia procesnej mapy bolo vykonané na základe termálnych vlastností spracovávaného materiálu. Tento prístup bol použitý v práci Rankouhiho a kol. [37] na predikciu univerzálnych procesných parametrov pri LPBF procese. Keďže hodnoty špecifického tepla ( $C_p - \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), tepelnej vodivosti ( $k - \text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) priamo pre materiál X30Mn22 nebolo možné dohľadať v relevantnej literatúre či katalógových listoch tohto materiálu bolo na ich výpočet použité pravidlo zmesí definované ako:

$$C_p = \left(\frac{m_n}{m}\right) \cdot C_{p n} + \left(\frac{m_{n+1}}{m}\right) \cdot C_{p n+1} \quad (7)$$

Kde  $C_p$  je výsledné špecifické teplo v  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $C_{pn}$  je špecifické teplo jednotlivých prvkov zmesi v  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $m_n$  je hmotnosť jednotlivých prvkov a  $m$  je celková hmotnosť zmesi v hm%. Podobným princípom bola spočítaná aj tepelná vodivosť a tepelná difúzia. Výsledné hodnoty boli vypočítané podľa vzťahu (7) a ich hodnoty sú:  $C_p = 770,24 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $k = 59,809 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Na predikciu parametrov budeme uvažovať konštantnú výšku vrstvy a priemer lasera a použijeme bezrozmernú veličinu definovanú a použitú v práci Rankouhiho a kol. [37].

$$\Pi_1 = \frac{C_p \cdot LP}{k \cdot LS^2 \cdot HD} \quad (8)$$

Kde  $\Pi_1$  je bezrozmerné hodnotiace kritériu,  $C_p$  je výsledné špecifické teplo v  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ,  $LP$  je výkon lasera vo W,  $k$  tepelná vodivosť vo  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ,  $LS$  je skenovacia rýchlosť v  $mm \cdot s^{-1}$  a  $HD$  je vzdialenosť susedných zvarov v mm. Vzdialenosť zvarov bola v tejto predikcii fixne uvažovaná  $HD = 0,07$  mm. Hodnoty bezrozmerného  $\Pi_1$  sú pre jednotlivé procesné parametre napočítané a zobrazené na Obr. 6-4. Na tomto obrázku sú pre celý rozsah výkonu lasera zariadenia SLM 280 HL a pre rýchlosti od  $2\,000$   $mm \cdot s^{-1}$  zobrazené a farebne rozdelené dáta podľa vypočítaného bezrozmerného čísla  $\Pi_1$ , kde sú hodnoty v rozsahoch  $38 < \Pi_1 < 61$  a  $146 < \Pi_1 < 360$  vyznačené žltou farbou a reprezentujú vzorky s relatívnou hustotou vyššou ako 99%, hodnoty v rozsahu  $61 < \Pi_1 < 146$  zobrazené zelenou farbou reprezentujú vzorky s relatívnou hustotou vyššou ako 99,5%. Ostatné, červenou farbou vyznačené vzorky, sú vzorky s relatívnou hustotou nižšou ako 99%. Tieto hraničné hodnoty  $\Pi_1$  sú z práce Rankouhiho a kol. [37], ktoré zodpovedali takto nameranej relatívnej hustote. Modrou zvýraznená oblasť reprezentuje dáta získané v experimentálnej časti tejto práce pri preskúmaní vnútornej geometrie a rozmerov jednoduchých zvarov, a pre ktoré bola analyzovaná porozita v objemových vzorkách spomínaná v Kap. 5.3. Test objemových vzoriek.

		LS (mm/s)																																						
		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000
LP (W)	100	1840	818	460	294	204	150	115	90,9	73,6	60,8	51,1	43,5	37,5	32,7	28,7	25,5	22,7	20,4	18,4	16,7	15,2	13,9	12,8	11,8	10,9	10,1	9,39	8,75	8,18	7,66	7,19	6,76	6,37	6,01	5,68	5,38	5,1	4,84	4,6
	150	2760	1226	690	442	307	225	172	136	110	91,2	76,7	65,3	56,3	49,1	43,1	38,2	34,1	30,6	27,6	25	22,8	20,9	19,2	17,7	16,3	15,1	14,1	13,1	12,3	11,5	10,8	10,1	9,55	9,01	8,52	8,06	7,64	7,26	6,9
	200	3679	1635	920	589	409	300	230	182	147	122	102	87,1	75,1	65,4	57,5	50,9	45,4	40,8	36,8	33,4	30,4	27,8	25,6	23,5	21,8	20,2	18,8	17,5	16,4	15,3	14,4	13,5	12,7	12	11,4	10,8	10,2	9,68	9,2
	250	4599	2044	1150	736	511	375	287	227	184	152	128	109	93,9	81,8	71,9	63,7	56,8	51	46	41,7	38	34,8	31,9	29,4	27,2	25,2	23,5	21,9	20,4	19,1	18	16,9	15,9	15	14,2	13,4	12,7	12,1	11,5
	300	5519	2453	1380	883	613	451	345	273	221	182	153	131	113	98,1	86,2	76,4	68,1	61,2	55,2	50,1	45,6	41,7	38,3	35,3	32,7	30,3	28,2	26,3	24,5	23	21,6	20,3	19,1	18	17	16,1	15,3	14,5	13,8
	350	6439	2862	1610	1030	715	526	402	318	255	213	179	152	131	114	101	89,1	79,5	71,3	64,4	58,4	53,2	48,7	44,7	41,2	38,1	35,3	32,9	30,6	28,6	26,8	25,2	23,7	22,3	21	19,9	18,8	17,8	16,9	16,1
	400	7359	3271	1840	1177	818	601	460	363	296	243	204	174	150	131	115	102	90,9	81,5	73,6	66,7	60,8	55,6	51,1	47,1	43,5	40,4	37,5	35	32,7	30,6	28,7	27	25,5	24	22,7	21,5	20,4	19,4	18,4
	450	8279	3679	2070	1325	920	676	517	409	331	274	230	196	169	147	129	115	102	91,7	82,8	75,1	68,4	62,6	57,5	53	49	45,4	42,2	39,4	36,8	34,5	32,3	30,4	28,6	27	25,6	24,2	22,9	21,8	20,7
	500	9199	4088	2300	1472	1023	751	554	454	368	304	256	218	188	164	144	127	114	102	92	83,4	76	69,6	63,9	58,9	54,4	50,5	46,9	43,8	40,9	38,3	35,9	33,8	31,8	30	28,4	26,9	25,5	24,2	23
	550	10119	4497	2530	1619	1124	826	632	500	405	334	281	239	207	180	158	140	125	112	101	91,8	83,6	76,5	70,3	64,8	59,9	55,5	51,6	48,1	45	42,1	39,5	37,2	35	33	31,2	29,6	28	26,6	25,3
600	11038	4906	2760	1766	1226	901	690	545	442	365	307	261	225	196	172	153	136	122	110	100	91,2	83,5	76,7	70,6	65,3	60,6	56,3	52,5	49,1	45,9	43,1	40,5	38,2	36	34,1	32,3	30,6	29	27,6	
650	12078	5315	2990	1913	1329	976	747	591	478	395	332	283	244	213	187	166	148	133	120	108	98,8	90,4	83	76,5	70,8	65,6	61	56,9	53,1	49,8	46,7	43,9	41,4	39	36,9	34,9	33,1	31,4	29,9	
700	12878	5724	3220	2061	1431	1051	805	636	515	426	358	305	263	229	201	178	159	143	129	117	106	97,4	89,4	82,4	76,2	70,7	65,7	61,3	57,2	53,6	50,3	47,3	44,6	42,1	39,7	37,6	35,7	33,9	32,2	

Obr. 6-4 Porovnanie predikcie mapy použiteľných procesných parametrov podľa Rankouhiho a kol. [37] a experimentálne získanou mapou PP

Vzhľadom k faktu, že hodnoty špecifického tepla  $C_p$ , a tepelnej vodivosti  $k$  pre materiál X30Mn22 nebolo možné dohľadať v relevantnej literatúre či katalógových listoch materiálu, ale ich hodnoty boli počítané pomocou pravidla na výpočet špecifického tepla  $C_p$  pre zmesi na základe ich chemického zloženia, nie je možné jednoznačne posúdiť správnosť predikcie mapy procesných parametrov podľa metódy Rankouhiho a kol. [37].

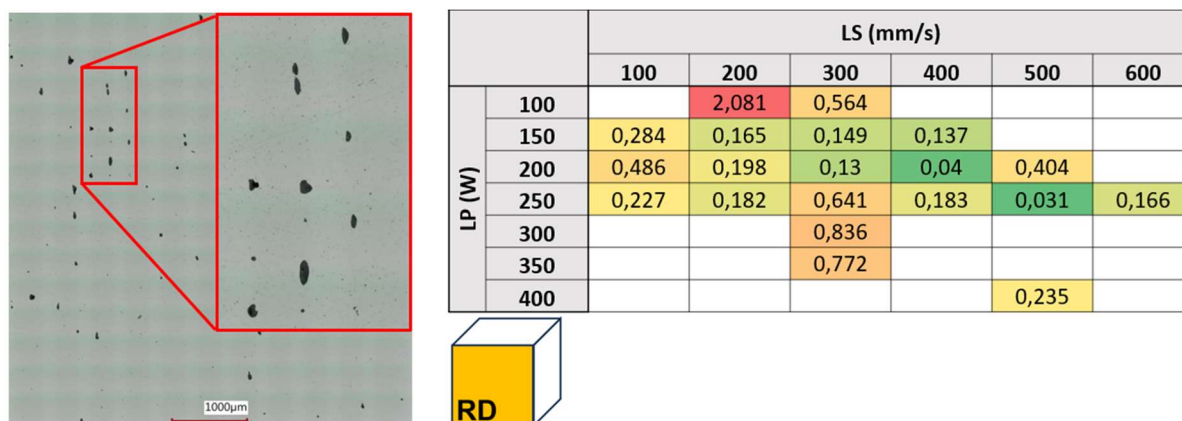
Porovnaním hodnotiacich kritérií pomocou VED a Rankouhiho metódu s dátami získanými experimentálne došlo k veľmi malému prieniku spracovaného materiálu s predpokladanou relatívnou hustotou vyššou ako 99% v oblasti výkonov v rozsahu  $LP = 100 - 200$  W a  $LS = 300 - 400$   $mm \cdot s^{-1}$ . Samotný experiment však ukázal oveľa väčšiu oblasť procesného okna ako bolo predikované a nameraná porozita dosahovala nižšie hodnoty.

### 6.1.3 Porozita

Porozita bola vyhodnocovaná zo snímok získaných pomocou optického mikroskopu Keyence v programe ImageJ v troch výrobných rovinách. Súhrn výsledkov získaných pre jednotlivé kombinácie procesných parametrov pri prekryve susedných zvarov OL = 40% uvedených v Tab. 5-3 v Kap. 5.2.1 pozorovaných v jednotlivých rovinách je uvedený na Obr. 5-11 v Kap.5.2.2.

Pri bližšom preskúmaní roviny RD (rovnobežná so smerom skenovania) je pozorovaná primárne keyhole porozita vyskytujú sa nad sebou v pravidelných prerušovaných líniách (Obr. 6-5 vľavo). Z nameraných dát (Obr. 6-5 vpravo) je jasné, že jej vplyv nie je zanedbateľný a na získanie lepších hodnôt porozity bude potrebná dodatočná úprava a nastavenie vzdialenosti susedných zvarov pomocou Hatch Distance (HD). Táto skutočnosť poukazuje na fakt, že pôvodná úvaha nastaviť HD ako 40% prekrytie susedných zvarov na základe odmeranej šírky singletrackov nie je najvhodnejšia.

Tento prístup určenia HD na základe šírky singletrackov je postačujúci na určenie predbežného nastavenia výroby avšak na dosiahnutie lepších výsledkov a zníženie vnútornej porozity je potrebné vykonať niekoľko ďalších iterácií.

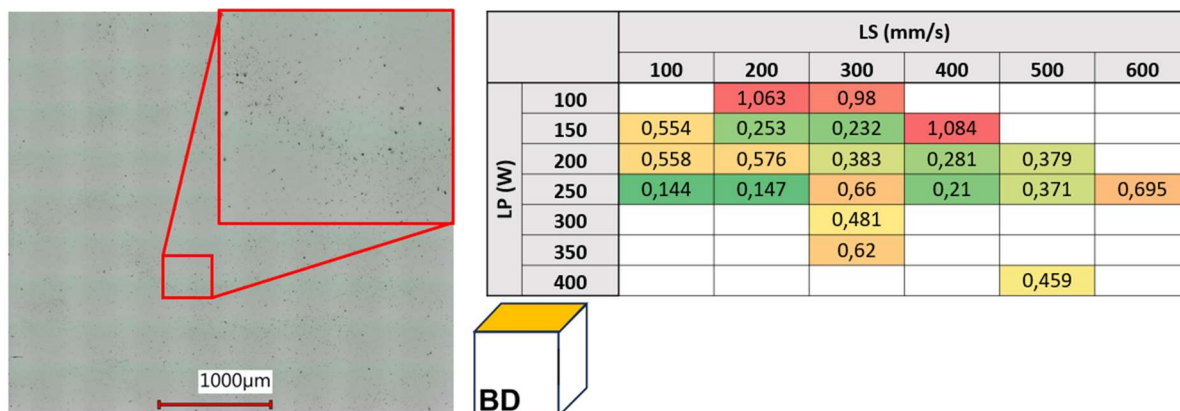


Obr. 6-5 Porozita v RD rovine (vľavo) grafická reprezentácia; (vpravo) hodnoty porozity v % pre jednotlivé kombinácie procesných parametrov pre OL = 40%

Ďalším druhom pozorovanej porozity bola mikro-porozita (Obr. 6-6 vľavo) najvýraznejšie zastúpená v rovinách FD a BD. Zdrojom tejto porozity mohol byť plyn ochrannej atmosféry zachytený v roztavenom materiáli počas stavby, prípadne zvýšená vlhkosť prášku. Pred stavbou objemových vzoriek bola relatívna vlhkosť prášku odmeraná a dosahovala hodnotu 7% a hladina kyslíku bola počas stavby držaná pod úrovňou 0,2%. Keďže však bola výroba vzoriek rozdelená na dve po sebe nasledujúce stavby bolo nutné overiť, či malo poradie sérii, v ktorých boli vzorky vyrábané, vplyv na mikro-porozitu potencionálne spôsobenú navlhnutím prášku v main tanku výrobného zariadenia.

Ako sa ukázalo, priemerná porozita vzoriek v prvej sérii stavby (vzorky 1-10) dosahovala hodnotu 0,285%, čo bolo o 43% nižšie ako druhá séria vzoriek (vzorky 11-20) ktorých priemerná porozita bola na úrovni 0,502%. Z oboch priemerov boli vyňaté vzorky, na ktorých sa viditeľne vyskytovala LOF či Keyhole porozita (vzorky 3, 5, 8, 11, 12, 17, 19 a 20).

Na základe signifikantného rozdielu v priemernej porozite prvej a druhej stavby vzoriek je možné usúdiť, že medzi stavbami mohlo dôjsť k navlhnutiu prášku v zásobníku stroja, čo sa ukázalo ako negatívny faktor spôsobujúci vyšší výskyt mikro-porozity vzoriek.



Obr. 6-6 Porozita v BD rovine (vľavo) grafická reprezentácia; (vpravo) hodnoty porozity v % pre jednotlivé kombinácie procesných parametrov pre OL = 40%

Porozita vzoriek je jedným z najväčších problémov aditívne vyrábaných dielov. Pri výrobe objemových vzoriek sa objavovala keyhole porozita, na ktorej odstránenie je nutná úprava vzdialenosti susedných zvarov (Hatch Distance), ale aj mikro-porozita, ktorú by bolo možné eliminovať lepšou starostlivosťou a prípravou kovového prášku.

Po odstránení vzoriek s vysokou porozitou vznikla pre skúmané PP mapa použiteľných procesných parametrov zobrazená na Obr. 6-7

LE (J/mm)		LS (mm/s)					
		100	200	300	400	500	600
LP (W)	100	1,00	0,50	0,33	0,25	0,20	0,17
	150	1,50	0,75	0,50	0,38	0,30	0,25
	200	2,00	1,00	0,67	0,50	0,40	0,33
	250	2,50	1,25	0,83	0,63	0,50	0,42
	300	3,50	1,50	1,00	0,75	0,60	0,50
	350	3,50	1,75	1,17	0,88	0,70	0,58
	400	4,00	2,00	1,33	1,00	0,80	0,67
	450	4,50	2,25	1,50	1,13	0,90	0,75

Obr. 6-7 Mapa použiteľných procesných parametrov spracovania materiálu X30Mn22



## 6.1.4 Mikroštruktúra

Táto kapitola sa zaoberá popisom a porovnaním dosahovaných mikroštruktúr a tvaru zŕn jednotlivých vzoriek a predpokladaných mechanických vlastností na základe týchto skutočností. Tieto štruktúry boli dosiahnuté pre rôzne kombinácie rýchlosti (LS) a výkonu lasera (LP) pri zachovaní konštantnej skenovacej stratégie typu meander bez rotácie nasledujúcej vrstvy so štruktúrami dosiahnutými na iných pracoviskách a pre rôzne skenovacie metódy a stratégie.

### Dosahovaná mikroštruktúra

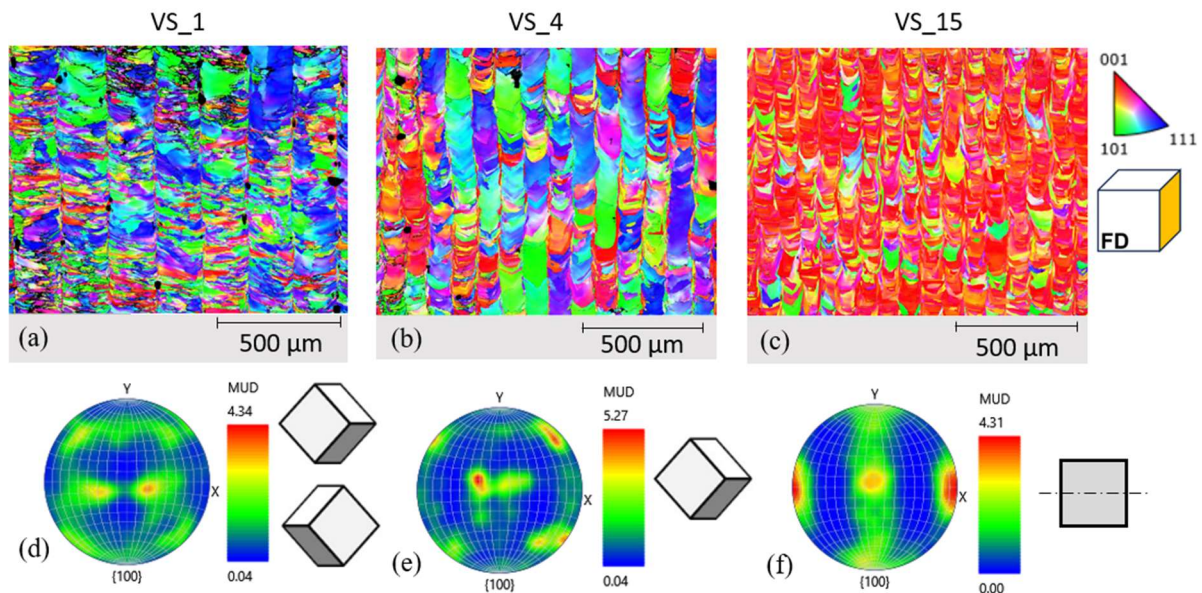
Pri porovnaní EBSD máp v rovine RD je vidieť zásadné rozdiely v dosahovanej mikroštruktúre. Výrobné parametre týchto vzoriek sú uvedené v Tab. 6-1. Na tomto mieste však pripomínam, že všetky štruktúry boli vytvorené zmenou resp. nastavením hlavných parametrov výroby pozostávajúce z výkonu a rýchlosti lasera a vzdialenosti susedných dráh. Na výrobu bola použitá skenovacia stratégia typu meander bez rotácie nasledujúcej vrstvy.

Tab. 6-1 Parametre výroby vybraných objemových vzoriek

Č. vzorky	LP (W)	LS (mm·s <sup>-1</sup> )	HD (mm)
1	250	100	0,199
4	150	200	0,099
15	250	500	0,090

Na Obr. 6-8 sú zobrazené EBSD mapy v smere osy X (RD) a PF rovín {100} aj s ich intenzitou pre všetky skúmané objemové vzorky. Mikroštruktúra vzorky VS\_1 (Obr. 6-8 (a)) dosahuje veľký počet nízkych ale širokých zŕn rastúcich primárne v horizontálnom smere. Ako je ďalej vidieť, mikroštruktúra vzorky VS\_1 na obrázku, je primárne tvorená zrnami, ktorých orientácia je v smeroch  $\langle 111 \rangle$  - modrá a  $\langle 101 \rangle$  - zelená a vzniká v nej výrazná keyhole porozita reprezentovaná čiernymi oblasťami medzi vertikálnymi líniami zvarov.

Na základe EBSD mapy (Obr. 6-8 (a)) mikroštruktúry a PF zobrazenia orientácie vzorky VS\_1 v priestore (Obr. 6-8 (d)), ktorého reprezentácia je graficky znázornená pomocou natočených kociek, dosahuje táto vzorka relatívne náhodnú štruktúru. Zároveň budú malé zrná a veľký počet hraníc zŕn brániť prechodu dislokácii čo bude mať zásadný vplyv na pevnosť materiálu. Pri zaťažovaní takto vytvorenej štruktúry materiálu bude dochádzať k deformačnému spevňovaniu.



Obr. 6-8 EBSD mapy v rovine RD (a, b, c) a PF snímky (d, e, f) vzoriek VS\_1 (a, d), VS\_4 (b, e) a VS\_15 (c, f)

Mikroštruktúra vzorky VS\_4 (Obr. 6-8 (b)) je na rozdiel od vzorky VS\_1 tvorená veľkými vertikálnymi zrnami, ktoré rástli cez viacero vrstiev nanoseného materiálu. V pozorovanej oblasti sa opäť výraznejšie vyskytujú zrná s orientáciou v smeroch  $\langle 111 \rangle$  a  $\langle 101 \rangle$ , ale prítomnosť zrn s orientáciou  $\langle 001 \rangle$ , už nie je zanedbateľná. PF (Obr. 6-8 (e)) jasne zobrazuje intenzitu orientácie takto vytvorenej štruktúry materiálu v priestore, čo poukazuje na veľmi intenzívnu *cube* štruktúru.

Prítomnosť veľkých zrn v mikroštruktúre a malý počet hraníc zrn vzorky VS\_4 bude znižovať mechanické vlastnosti ako je napríklad pevnosť či krehkosť takto spracovaného materiálu na úkor zvýšenia jeho ťažnosti a deformácie do porušenia.

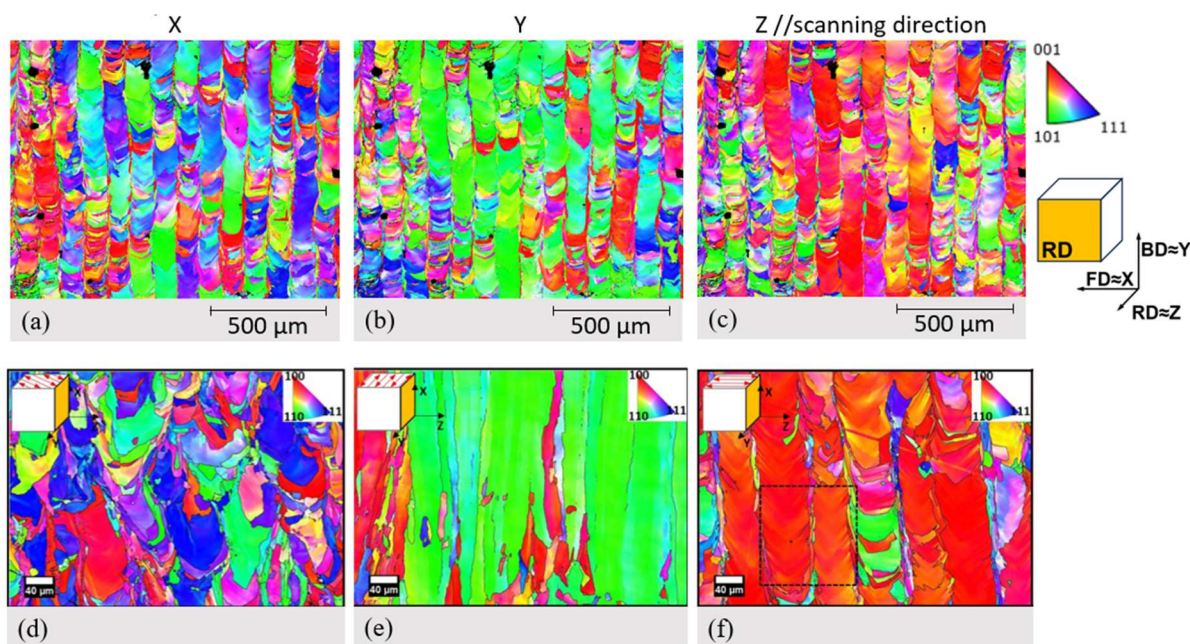
Poslednou bližšie skúmanou štruktúrou bola vzorka VS\_15. Na EBSD mape (Obr. 6-8 (c)) je vidieť výrazný rozdiel od predchádzajúcich štruktúr. Zrná štruktúry VS\_1 boli nízke a široké a zrná v štruktúre VS\_4 boli prevažne vyššie a rástli cez viacero vrstiev materiálu. Vo vzorke VS\_15 sa vyskytuje zmes nízkych a širších zrn s kombináciou zrn v tvare písmena „L“, prípadne „U“. Ďalším jasným rozdielom medzi vzorkami je ten, že zrná vzorky VS\_15 majú silnú orientáciu v smere  $\langle 001 \rangle$ , čo je na obrázku zobrazené výrazným červeným sfarbením celej EBSD mapy v smere roviny RD. Zvyčajne je štruktúra s orientáciou v smere  $\langle 001 \rangle$  dosiahnutá v smere skenovania, no pri vzorke VS\_15 vyšla v smere kolmom. Posledným rozdielom je interpretácia PF (Obr. 6-8 (f)), kde štruktúra vzorky VS\_15 dosahuje *fibre* štruktúru.

Orientácia zrn  $\langle 001 \rangle$  spôsobuje, že materiál bude síce dosahovať nízke hodnoty pevnosti, ktoré sa prejavujú nízkym modulom pružnosti či modulom pevnosti, ale bude dosahovať výborné ťažné vlastnosti. Túto skutočnosť ešte umocní *cube* štruktúra takto spracovaného materiálu.

## Porovnanie štruktúry s inými pracoviskami

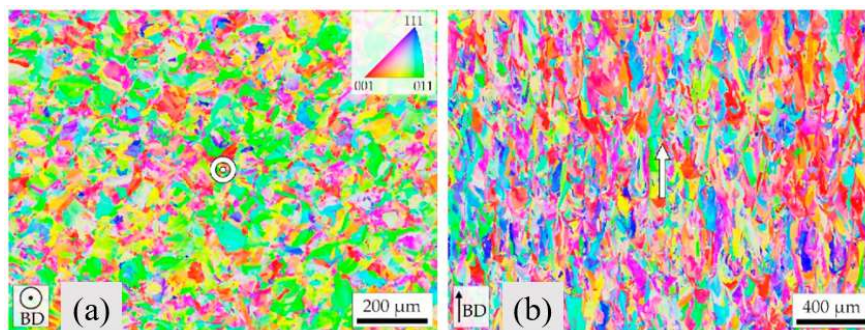
Na Obr. 6-9 je zobrazené porovnanie mikroštruktúry dosiahnutej vo vzorke VS\_4 (a-c) so vzorkami mikroštruktúry z práce Marattukalam a kol. [28] (d-f). Pri vzorke VS\_4 je pozorovaná plocha rovnobežná so smerom skenovania, ako je vidieť aj na ilustračnom obrázku (Obr. 6-9 vpravo), a označenia X,Y a Z reprezentujú EBSD mapy rodín smerov mikroštruktúry pre jednotlivé smery pozorovania. To znamená že smeru X zodpovedá rovina FD, smeru Y zodpovedá rovina BD a smeru Z zodpovedá rovina RD ako je zadané pri označovaní rovín v metódach tejto práce na Obr. 4-11. Mikroštruktúra vzoriek z práce Marattukalam a kol. [28] bola pozorovaná v rovine FD a bola dosiahnutá pre rôzne skenovacie stratégie resp. pre rôzne smery skenovania bez rotácie nasledujúcej vrstvy (Obr. 6-9 e-f) a s rotáciou nasledujúcej vrstvy o  $67^\circ$  pre štruktúru na Obr. 6-9 (d).

Náhodná mikroštruktúra zobrazená na Obr. 6-9 (a) obsahujúca primárne zrná s orientáciou  $\langle 111 \rangle$  a  $\langle 101 \rangle$  v smere osy X je podobná ako náhodná mikroštruktúra dosiahnutá na Obr. 6-9 (d) pri skenovaní s rotáciou nasledujúcich vrstiev. Pri porovnaní týchto obrázkov síce dostávame podobnú mikroštruktúru, ale rotácia vrstiev priaznivo prispieva k eliminácii vnútornej porozity materiálu.



Obr. 6-9 Porovnanie mikroštruktúry objemovej vzorky VS\_4 (a-c) s vzorkami mikroštruktúry z práce Marattukalam a kol. [28] (d-f)

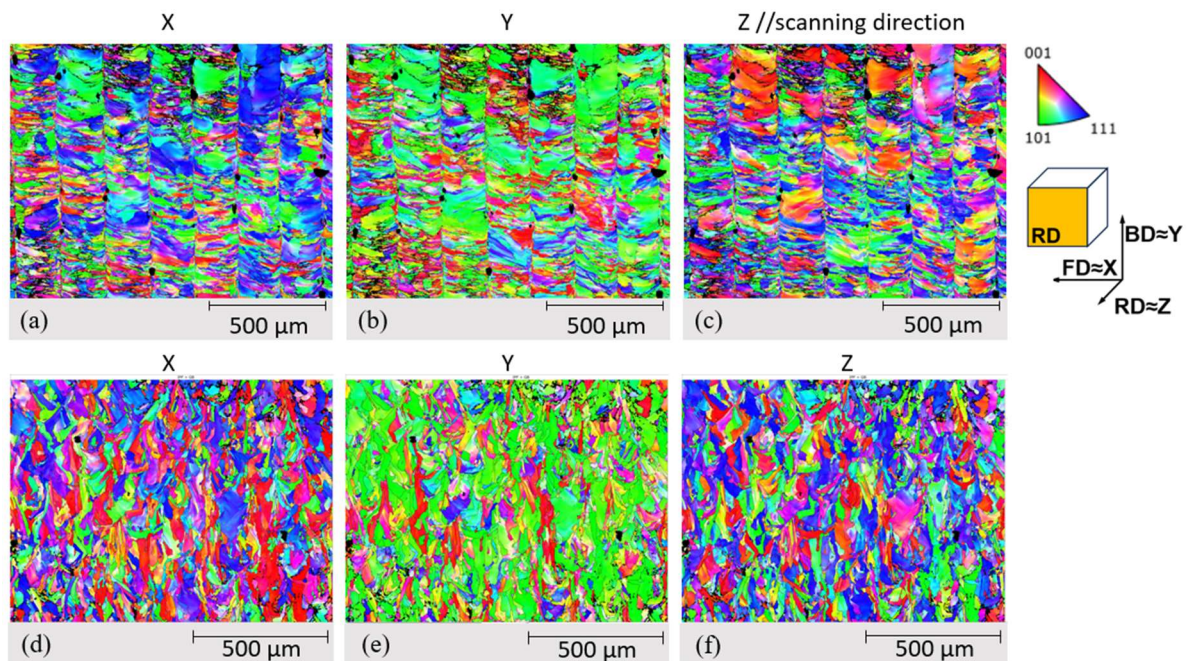
Štruktúra zobrazená pomocou EBSD mapy na Obr. 6-9 (b) zodpovedá smeru Y, ktorému prislúcha orientácia kryšlografických rovín  $\langle 101 \rangle$  v rovine BD, teda v smere výstavby vzorky. Rovnaký výsledok v BD rovine dosiahol so svojej práci Otto a kol. [30] (Obr. 6-10 (a)) pri skenovaní s rotáciou nasledujúcej vrstvy o  $79^\circ$ . Marattukalam túto štruktúru s orientáciou  $\langle 101 \rangle$  dosiahol v rovine kolmej na smer skenovania, kde v smere výstavby zároveň vznikali relatívne dlhé stĺpcové zrná. Posledná skúmaná štruktúra zobrazená na Obr. 6-9 (c) a (f) je v oboch prípadoch pozorovaná rovnobežne so smerom skenovania. V oboch prípadoch je jasná preferenčná orientácia so smerom  $\langle 001 \rangle$ . V prípade preskúmania RD roviny z práce Otta a kol. [30] je aj navzdory rotácii nasledujúcich vrstiev vidieť zrná s primárnymi orientáciami  $\langle 001 \rangle$  a  $\langle 111 \rangle$ .



Obr. 6-10 Mikroštruktúra v BD rovine (a) a v RD rovina (b) z práce Otta a kol. [30]

Ďalšia vzorka je VS\_1 (Obr. 6-11 (a - c)), ktorej EBSD mapa je porovnávaná so vzorkou náhodnej štruktúry poskytnutou Ústavom Fyziky Materiálov Akadémie Vied Českej republiky ((Obr. 6-11 (d - f)). Obe vzorky boli pozorované v smere roviny RD a EBSD mapy v smeroch X, Y a Z reprezentujú smery kryštalografických zŕn v štruktúre.

Vzhľadom k faktu, že každá štruktúra vznikla inou skenovacou stratégiou, nie je možné jednoznačne porovnať tvar jednotlivých zŕn v štruktúre a porovnanie bude len na základe farebného rozloženia EBSD máp a PF intenzity orientácie oboch vzoriek. Ako je vidieť na (Obr. 6-11 farebné zobrazenie v smeroch X a Z je pre obe vzorky veľmi podobný a nachádzajú sa v nich zrná s primárnou orientáciou  $\langle 111 \rangle$ . Prínos smerov  $\langle 101 \rangle$   $\langle 001 \rangle$  je pomerne malý, no nie však zanedbateľný. Podobná analógia je vidieť pri porovnaní EBSD máp v smere Y. V tomto smere dosahuje štruktúra oboch vzoriek jasnú orientáciu  $\langle 101 \rangle$  s minimálnym príspevkom ostatných orientácií.



Obr. 6-11 Porovnanie mikroštruktúry objemovej vzorky VS\_1 (a-c) s vzorkami mikroštruktúry poskytnutými Ústavom Fyziky Materiálov AVČR (d-f)

Pri porovnaní výsledných štruktúr dosiahnutých v tejto práci s dosahovanými štruktúrami z ďalších publikácií a výskumov [28], [30] je zrejme, že dosahované výsledky v podobe štruktúry sú principiálne podobné, líšia sa však metódy, ktorými boli štruktúry dosiahnuté. V rámci tejto práce boli použité kombinácie výkonu a rýchlosti lasera na dosiahnutie rôznych mikroštruktúr, čo bolo v prácach Marattukalama [28] a Sofinowského [29] dosiahnuté zmenou skenovacej stratégie.

### 6.1.5 Mechanické vlastnosti

Na základe nameraných hodnôt mechanických vlastností jednotlivých ťahových vzoriek budú v nasledujúcich častiach postupne porovnané výsledky získané samostatne pre vzorky TS\_4 a samostatne pre vzorky TS\_15. Následne budú tieto výsledky vzájomne porovnané.

#### Ťahové vzorky TS\_4

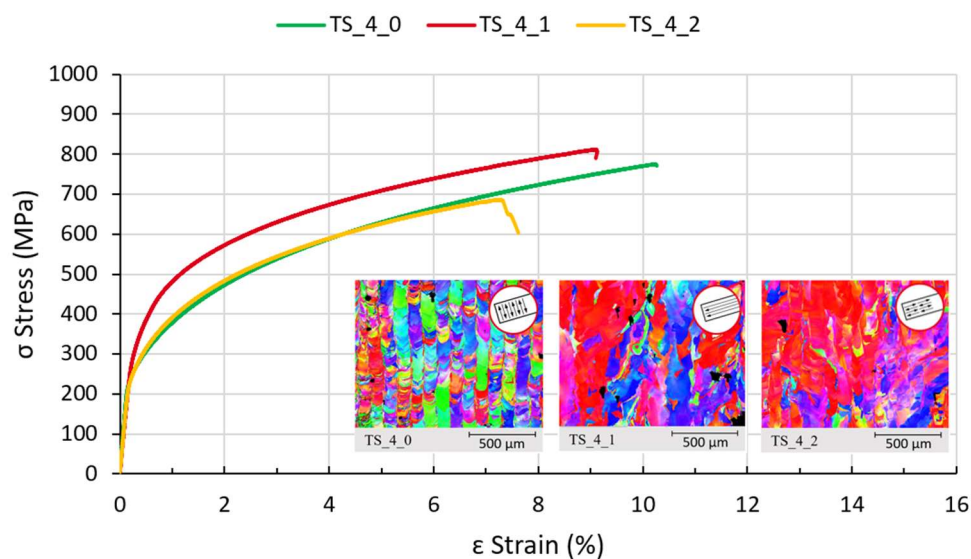
Na Obr. 6-12 je zobrazený priebeh ťahovej skúšky všetkých ťahových vzoriek vyrobených s parametrami s označením 4 (t.j. LP = 150 W; LS = 200 mm·s<sup>-1</sup>; HD = 0,0900 mm) aj s mikroštruktúrami pozorovanými v ťahovej rovine jednotlivých vzoriek.

Z nameraných (Tab. 5-4) a zobrazených výsledkov (Obr. 6-12) je pri všetkých vzorkách vidieť rozdielny priebeh lineárnej časti elastickej deformácie, z ktorej bol vyhodnotený Youngov modul pružnosti materiálu s hodnotou  $E_4=143,3 \pm 9,84$  GPa. Priebeh namáhania vzoriek TS\_4\_0 a TS\_4\_2 bol veľmi podobný s rozdielom v zmluvnej medze klzu  $R_{p0,2}$  na úrovni 10 MPa. Porozita oboch vzoriek sa pohybovala na úrovni približne 0,3%. Rozdiel v medzi pevnosti ( $R_m$ ) a deformácie do porušenia ( $\epsilon$ ) bol však značný, čo mohlo byť spôsobené práve vplyvom rozdielnej mikroštruktúry v smere zaťažovania.

Vzorka TS\_4\_1 vyrábaná po celej dĺžke síce vykazuje porozitu na úrovni 1,44%, no aj napriek tomu dosahuje jednoznačne najvyššiu hodnotu zmluvnej medze klzu  $R_{p0,2} = 380$  MPa, čo je o 100 MPa viac ako zvyšné vzorky. V tomto prípade je jej mikroštruktúra takmer identická so vzorkou TS\_4\_2 takže tieto významné rozdiely v mechanických vlastnostiach museli byť spôsobené iným faktorom. Mohla na to mať vplyv napríklad už spomenutá porozita, ktorá bránila pohybu dislokácii pri namáhaní a tak spôsobila deformačné spevnenie vzorky TS\_4\_1. Póry v štruktúre vzorky TS\_4\_1 boli dosť veľké a mohli teda pôsobiť skôr ako koncentrátoři napätia než ako prostriedok na zmenu správania materiálu pri namáhaní.

Ďalším faktorom ovplyvňujúcim mechanické vlastnosti mohol byť smer samotného skenovania, ktorý bol v prípade vzorky TS\_4\_0 kolmo na smer zaťažovania a pre vzorky TS\_4\_1 a TS\_4\_2 v smere pôsobiaceho zaťaženia pri určovaní mechanických vlastností. Zároveň však mohlo dôjsť k tomu, že získaná EBSD mapa vzorky TS\_4\_0 plne nereprezentuje reálnu štruktúru v takto vyrobenej vzorke.

Vyvodenie presných záverov z doposiaľ nameraných mechanických vlastností a mikroštruktúr je vzhľadom k jedinej testovanej sade vzoriek dosť optimistické. Na ich overenie a validáciu by bolo potrebné vytvorenie štatisticky významnej sady vzoriek obsahujúcej aspoň 3 kusy z každej testovanej vzorky.



Obr. 6-12 Porovnanie mechanických vlastností vzoriek TS\_4

## Ťahové vzorka TS\_15

Na Obr. 6-13 je zobrazený priebeh ťahovej skúšky všetkých ťahových vzoriek vyrobených s parametrami s označením 15 (t.j. LP = 250 W; LS = 500 mm·s<sup>-1</sup>; HD = 0,0900 mm) aj s mikroštruktúrami pozorovanými v ťahovej rovine jednotlivých vzoriek.

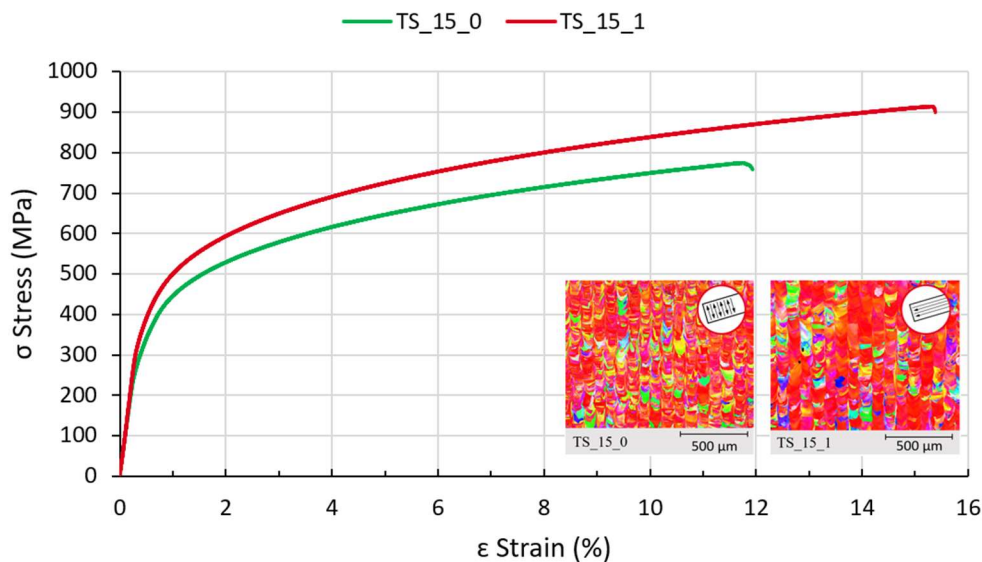
Z nameraných (Tab. 5-4) a zobrazených výsledkov (Obr. 6-13) je vidieť, že lineárne časti oboch ťahových vzoriek majú takmer identickú smernicu a nameraný Youngov modul dosahoval hodnotu  $E_4 = 104 \pm 3$  GPa.<sup>2</sup> Rozdiely v ostatných mechanických vlastnostiach však zostávajú signifikantné na úrovni 15% pre zmluvnú medzu klzu ( $R_{p0,2}$ ), 15% pre medzu pevnosti ( $R_m$ ) a 23% pre deformáciu do porušenia ( $\epsilon$ ) aj napriek veľmi nízkej porozite oboch vzoriek ( $\Psi_{15_0} = 0,11\%$ ,  $\Psi_{15_1} = 0,05\%$ ).

Mikroštruktúra v oboch vzorkách vykazovala silnú *fibre* štruktúru s preferenčnou orientáciou zŕn  $\langle 001 \rangle$  (červenú) v smere zaťažovania. Drobným rozdielom bola veľkosť zŕn, ktoré dosahovali vo vzorke TS\_15\_1 mierne väčšie rozmery, no tento rozdiel nie je možné považovať za relevantný. Relevantným však bol smer skenovania voči smeru zaťažovania ťahovej vzorky. Z Obr. 6-13 jasne vyplýva, že vzorky TS\_15\_1 vyrábaná súvislým skenovaním v smere zaťažovania (po dlhej strane vzorky) dosiahla oveľa lepšie mechanické vlastnosti ako vzorka TS\_15\_0 vyrábaná skenovaním kolmo na smer zaťažovania (po krátkej strane vzorky).

Na tomto mieste by som opäť rád podotkol, že každá z testovaných vzoriek bola originál, a na jasné potvrdenie či vyvrátenie týchto záverov by bola potrebná výroba štatisticky významného množstva vzoriek s doposiaľ dosiahnutými štruktúrami.

---

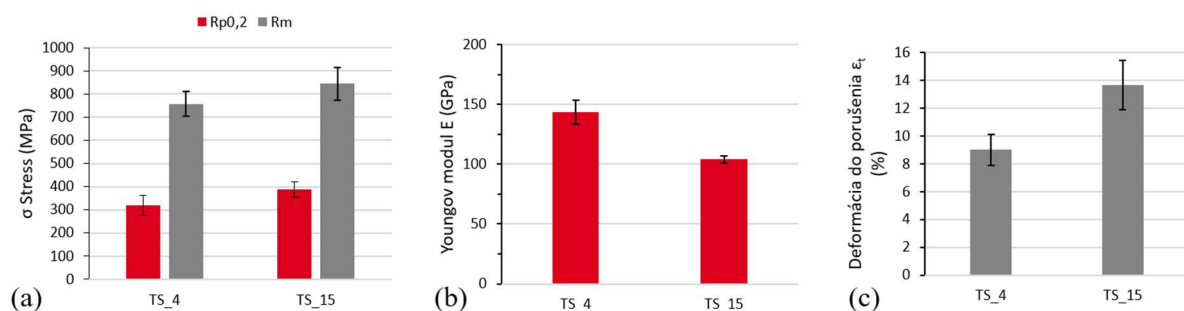
<sup>2</sup> Inými slovami oblasť vyhodnocovania bola zospodu orezaná pre-loadom skúšobného zariadenia a zhora vplyvom predčasne začatej (pravdepodobne lokálnej) plastickej deformácie zŕn v štruktúre. Z tohto dôvodu nebola lineárna časť v dostatočnom rozsahu a teda aj jej vyhodnotenie v podobe medze pevnosti v ťahu môže byť zkreslené.



Obr. 6-13 Porovnanie mechanických vlastností vzoriek TS\_15

### Porovnanie mechanických vlastností ťahových vzoriek

Namerané hodnoty mechanických vlastností pre všetky ťahové vzorky z Tab. 5-4 sú pre jednotlivé vzorky spriemerované a spolu s chybovými úsečkami vykreslené na Obr. 6-14. Pri porovnaní zmluvnej medze klzu ( $R_{p0,2}$ ) a medze pevnosti ( $R_m$ ) vzoriek TS\_4 a TS\_15 (Obr. 6-14 (a)) dosahujú priemerné hodnoty vzorky TS\_15 vyššie hodnoty a to o 18% pre medzu klzu s hodnotou 388 MPa pre TS\_15 oproti 319 MPa pre TS\_4 a 10% pre medzu pevnosti s hodnotou 844 MPa pre TS\_15 oproti 757 MPa pre TS\_4. Najvýznamnejší rozdiel bol zistený pri module pružnosti v ťahu (Obr. 6-14 (b)). Vzorky TS\_4 dosahovali hodnotu  $E_4 = 143 \pm 9,8$  GPa, čo bolo o 27% viac ako vzorky TS\_15 s hodnotou  $E_{15} = 104 \pm 3$  GPa. V prípade deformácie do porušenia (Obr. 6-14 (c)) dosiahli vzorky TS\_15 hodnoty  $\epsilon_{15} = 13,7 \pm 1,7\%$ , oproti vzorkám TS\_4 s hodnotou  $\epsilon_4 = 9,0 \pm 1,1\%$ .



Obr. 6-14 Porovnanie mechanických vlastností vzoriek TS\_4 a TS\_15 (a) zmluvná medza klzu a medza pevnosti (b) Youngov modul pružnosti, (c) deformácia do porušenia

Ako už bolo v tejto kapitole viackrát spomenuté, výsledky boli získané z relatívne malej štatistickej vzorky a na zvýšenie jej výpovednej hodnoty a na ich potvrdenie a validáciu by bolo potrebné vykonanie ďalších testov za rovnakých podmienok.



## 6.2 Verifikácia hypotéz

### 6.2.1 Hypotéza H1

Hypotéza, či použitím rôznych stupňov výkonu lasera a vhodne zvolenej rýchlosti lasera so zachovaním obojsmerného skenovania bez rotácie nasledujúcej vrstvy dôjde k ovplyvneniu teplotného gradientu chladnutia materiálu a vzniku rôznych kryštalografických štruktúr je na základe EBSD a PF analýzy mikroštruktúry objemových vzoriek VS\_1, VS\_4 a VS\_15 potvrdená.

Testy ukázali, že použitie výkonu  $LP = 250W$  a rýchlosti  $LS = 100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  na vzorke VS\_1 vedie na vytvorenie jemnozrnej štruktúry s preferenčnou orientáciou zŕn v smer  $\langle 111 \rangle$  v ktorej sa očakáva deformačné spevňovanie. Zachovaním výkonu, ale navýšením rýchlosti na  $LS = 500 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  dôjde k vytvoreniu jemnej *fibre* štruktúry, kde zrná vzorky VS\_15 dosahujú tvar písmen „L“ a „U“ s preferenčnou orientáciou zŕn v smer  $\langle 001 \rangle$ . Pri tejto vzorke sa očakávajú lepšie ťažné vlastnosti na úkor pevnostných. Vo vzorke VS\_4 pri  $LP = 150W$  a  $LS = 200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  rastú vertikálne zrná na výšku niekoľkých vrstiev materiálu a štruktúra vykazuje *cube* štruktúru. V tejto vzorke sa predpokladajú lepšie pevnostné vlastnosti na úkor ťažných. V oboch prípadoch však treba brať do úvahy negatívny vplyv porozity materiálu.

Z rešeršnej časti tejto práce vyplýva, že k modifikovaniu, resp. zmene kryštalografickej štruktúry spracovávaného materiálu dochádza úpravou smeru teplotného gradientu chladnutia zvarového kúpeľu. Táto zmena bola v predchádzajúcich prácach realizovaná zmenou skenovacej stratégie, resp. pre rôzne smery skenovania bola dosiahnutá rôzna mikroštruktúra. V tejto práci je zmena mikroštruktúry realizovaná zmenou rýchlosti a výkonu lasera.

### 6.2.2 Hypotéza H2

Hypotéza, či pre mikroštruktúru vytvorenú rôznymi kombináciami procesných parametrov dosiahneme rozdiely v mechanických vlastnostiach až do 10% je na základe vykonaných ťahových skúšok ťahových vzoriek TS\_4 a TS\_15 potvrdená.

Ťahové skúšky ukázali, že vzorky TS\_4 vykazovali výrazne vyšší modul pružnosti v ťahu s hodnotou  $E_4 = 143 \pm 9,8 \text{ GPa}$ , čo je o 27% viacej ako vzorky TS\_15 s hodnotou  $E_{15} = 104 \pm 3 \text{ GPa}$ . Na druhú stranu, všetky ostatné vyhodnocované mechanické vlastnosti boli lepšie pre vzorky TS\_15, kde bola medza klzu vyššia o 18% s hodnotou , medza pevnosti vyššia o 10% a deformácia do porušenia až o 34% vyššia ako pri vzorke TS\_4.

## 7 ZÁVER

Cieľom tejto diplomovej práce bolo preskúmanie vplyvu základných procesných parametrov, teda výkonu a rýchlosti lasera na modifikáciu kryštalografickej štruktúry austenitickej vyrobenej technológiou SLM. Z analýzy súčasného stavu poznania bol preskúmaný vplyv procesných parametrov na vývoj a tvar jednoduchého zvaru, ale aj na dosahované kryštalografické štruktúry. Ich modifikácia bola v doteraz publikovaných prácach realizovaná pomocou zmeny skenovacej stratégie pri výrobe. Ďalej bol získaný počiatočný rozsah bežne používaných procesných parametrov pri spracovaní materiálu s vysokým obsahom mangánu X30Mn22 pri výške vrstvy 30  $\mu\text{m}$ .

Keďže bola v tejto práci použitá výška vrstvy nanášaného prášku 50  $\mu\text{m}$ , výrobné dáta pre test jednoduchých zvarov boli navrhnuté v rozsahu  $LP = 100\text{-}650\text{ W}$  a  $LS = 100\text{-}1200\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  aby bola pokrytá dostatočne veľká oblasť a vznikla tak procesná mapa kvality spracovaného materiálu.

Z testu jednoduchých zvarov vyplýva, že najkvalitnejšie vyrobené jednoduché zvary sa vyskytujú v oblasti do výkonu 400 W a rýchlosti lasera do 700  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Zvary mimo tento rozsah vykazovali značné imperfekcie a nespojitosti. Na vyhovujúcich vzorkách jednoduchých zvarov bola zistená závislosť medzi procesnými parametrami a rozmermi prierezovej plochy zvaru. Hĺbka zvaru postupne rástla so znižujúcou sa rýchlosťou avšak s rastúcim výkonom rástla hĺbka zvaru len do výkonu 250W, kde kulminovala a pri ďalšom zvyšovaní výkonu postupne klesala. So zvyšujúcim sa výkonom a so znižujúcou sa rýchlosťou narastala šírka jednoduchého zvaru, ktorá bola neskôr použitá na stanovenie vzdialenosti susedných zvarov pri výrobe objemových vzoriek.

Objemové vzorky pre vybrané procesné parametre boli vyrobené skenovacou stratégiou meander bez rotácie a vzdialenosť susedných zvarov bola zvolená tak, aby bolo ich prekrytie 40% šírky jednoduchého zvaru. Na takto vyrobených vzorkách bola vyhodnotená porozita tvorená primárne keyhole porozitou v smere pohybu lasera a mikroporozitou v rovine výstavby (BD). Na vzorkách VS\_1, VS\_4 a VS\_15 ktoré dosahovali vysoké hodnoty relatívnej hustoty bola ďalej analyzovaná mikroštruktúra.

Výsledky EBSD analýzy ukázali značné rozdiely v mikroštruktúre dosiahnuté zmenou rýchlosti a výkonu lasera. Jednotlivé mikroštruktúry sa líšili tvarom a rozmermi rastúcich zŕn, ale aj preferenčnou orientáciou zŕn definovanou ich smerom. Ďalšie rozdiely v štruktúre ukázali výsledky získané z Pole Figures, ktoré ukázali, že vzorka VS\_1 má preferenčnú štruktúru 011 v smere výstavby (BD) s náhodnou orientáciou v ostatných smeroch, vzorka VS\_4 dosahujú *cube* štruktúru a vzorka VS\_15 *fibre* štruktúru. Z týchto vzoriek boli vybrané vzorky VS\_4 a VS\_15 na preskúmanie ich mechanických vlastností.

Ťahové vzorky pre varianty procesných parametrov TS\_4 a TS\_15 vyrobené v kolmo na smer zaťažovania a rovnobežne so smerom zaťažovania ukázali značné rozdiely v mechanických vlastnostiach. Tie boli všeobecne lepšie pre vzorku TS\_15, ktorej zmluvná medza klzu bola o 18% vyššia a medza pevnosti bola vyššia o 10% oproti vzorke TS\_4. Navzdory týmto výsledkom však dosahoval vzorka TS\_4 modul pružnosti v ťahu  $E_4 = 143 \pm 9,8$  GPa, čo bolo o 27% viacej ako vzorky TS\_15 s hodnotu  $E_{15} = 104 \pm 3$  GPa. Ďalšie rozdiely v mechanických vlastnostiach sa ukázali aj pri rôznych orientáciách smeru skenovania voči smeru zaťažovania.

Z výsledkov dosiahnutých v tejto práci bolo zjavné, že mechanické vlastnosti materiálu záviseli na dosiahnutej mikroštruktúre vyrábanej vzorky, ktorú tvorila veľkosť, tvar a orientácia zrn materiálu dosiahnutá len zmenou rýchlosti a výkonu lasera. Ďalej na ňu mal vplyv smer skenovania voči smeru zaťažovania a vzniknutá porozita, ktorá bolo pri niektorých vyrobených vzorkách značná. Na základe poznatkov získaných v tejto práci by bolo možné zmenou rýchlosti a výkonu lasera dosiahnuť lokálnu zmenu mikroštruktúry, a teda aj mechanických vlastností v rámci vyrábanej súčiastky, bez nutnosti prispôbovať jej natočenie vo výrobnej komore alebo meniť smer jej skenovania. Vzhľadom k malému počtu objemových vzoriek vybraných z procesnej mapy použiteľných parametrov, na ktorých bola v tejto práci pozorovaná mikroštruktúra by mohol byť ďalší výskum zameraný na preskúmanie mikroštruktúry ďalších vzoriek, na minimalizáciu ich porozity a následné preskúmanie ich mechanických vlastností.

## 8 VÝSLEDKY VÝSKUMU PODĽA RIV

Výsledky dosiahnuté v tejto diplomovej práci je možné publikovať v súhrnnej forme v podobe manuskriptu, ktorý je podkladom pre publikačný výsledok.

**Názov článku:** Modification of austenitic steel X30Mn22 crystallographic structure by laser related process parameters.

**Autori:** A. Fábry, D. Koutný, M. Šmíd

### **Abstrakt:**

Targeted modification of the crystallographic structure of additively manufactured material in order to improve its mechanical properties is currently implemented by modifying the scanning strategy. This work investigates the effect of laser-related process parameters on the formation and modification of the crystallographic structure of X30Mn22 austenitic steel without changing the scanning strategy. A map of usable process parameters for a layer height of 50  $\mu\text{m}$  was obtained using the single-track test, based on which the volume samples were fabricated. The microstructure obtained on volume samples was evaluated by using electron backscatter diffraction (EBSD) and pole figures (PF), showing changes in grain size, shape and orientation. Tensile specimens were fabricated and tested for the selected microstructures. The mechanical properties varied for the different structures was achieved. The material properties were compared with those commonly achieved. The most significant difference in the fabricated specimens was in the achieved Young's modulus, which varied by up to 27% for the different tested specimens. However, a negative factor influencing the results was the relatively significant porosity of the material. The main result of this work is the achievement of different microstructures using only different laser-related process parameters, which may contribute to the knowledge of targeted modification of material structure.

## 9 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] ABOULKHAIR, Nesma T., et al. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2014, **1-4**, 77–86. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2014.08.001
- [2] DILIP, J. J. S., et al. Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting. *Progress in Additive Manufacturing* [online]. 2017, **2(3)**, 157–167. ISSN 2363-9520. Dostupné z: doi:10.1007/s40964-017-0030-2
- [3] BALBAA, Mohamed, et al. On selective laser melting of Inconel 718: densification, surface roughness, and residual stresses. *Materials & Design* [online]. 2020, **193**, 108818. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2020.108818
- [4] WEI, Pei, et al. The AlSi10Mg samples produced by selective laser melting: single track, densification, microstructure and mechanical behavior. *Applied Surface Science* [online]. 2017, **408**, 38–50. ISSN 0169-4332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2017.02.215
- [5] KEMPEN, K., et al. Processing AlSi10Mg by selective laser melting: parameter optimisation and material characterisation. *Materials Science and Technology* [online]. 2014, **31(8)**, 917–923. ISSN 1743-2847. Dostupné z: doi:10.1179/1743284714y.0000000702
- [6] LIU, Zhiyuan, et al. Additive manufacturing of metals: microstructure evolution and multistage control. *Journal of Materials Science & Technology* [online]. 2022, **100**, 224–236. ISSN 1005-0302. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmst.2021.06.011
- [7] LOUVIS, Eleftherios, Peter FOX, and Christopher J. SUTCLIFFE. Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2011, **211(2)**, 275–284. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019
- [8] LI, Xiang, et al. Porosity formation mechanisms, microstructure evolution and mechanical performance of AlMgScZr alloy fabricated by laser powder bed fusion: effect of hatch distance. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2023, **94**, 107–119. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2023.03.047
- [9] MOSTAFAEI, Amir, et al. Defects and anomalies in powder bed fusion metal additive manufacturing. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* [online]. 2022, **26(2)**, 100974. ISSN 1359-0286. Dostupné z: doi:10.1016/j.cossms.2021.100974

- [10] KING, Wayne E., et al. Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2014, **214**(12), 2915–2925. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2014.06.005
- [11] TANG, Ming, P. Chris PISTORIUS, and Jack L. BEUTH. Prediction of lack-of-fusion porosity for powder bed fusion. *Additive Manufacturing* [online]. 2017, **14**, 39–48. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2016.12.001
- [12] CUNNINGHAM, Ross, et al. Keyhole threshold and morphology in laser revealed by ultrahigh-speed x-ray imaging. *Science* [online]. 2019, **363**, 849-852. Dostupné z: doi:10.1126/science.aav468
- [13] ZHAO, Cang, et al. Real-time monitoring of laser powder bed fusion process using high-speed X-ray imaging and diffraction. *Scientific Reports* [online]. 2017, **7**(1). ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-017-03761-2
- [14] SABZI, Hossein Eskandari, and Pedro E. J. RIVERA-DÍAZ-DEL-CASTILLO. Defect prevention in selective laser melting components: compositional and process effects. *Materials* [online]. 2019, **12**(22), 3791. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma12223791
- [15] GORDON, Jerard V., et al. Defect structure process maps for laser powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing* [online]. 2020, **36**, 101552. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2020.101552
- [16] TAN, Qiyang, et al. Effect of processing parameters on the densification of an additively manufactured 2024 Al alloy. *Journal of Materials Science & Technology* [online]. 2020, **58**, 34–45. ISSN 1005-0302. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmst.2020.03.070
- [17] YANG, Kun V., et al. Porosity formation mechanisms and fatigue response in Al-Si-Mg alloys made by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2018, **712**, 166–174. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2017.11.078
- [18] ATTAR, H., et al. Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2014, **593**, 170–177. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2013.11.038
- [19] ZHANG, Jinliang, et al. A review of selective laser melting of aluminum alloys: processing, microstructure, property and developing trends. *Journal of Materials Science & Technology* [online]. 2019, **35**(2), 270–284. ISSN 1005-0302. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmst.2018.09.004

- [20] RAZAVYKIA, Abbas, et al. An overview of additive manufacturing technologies—a review to technical synthesis in numerical study of selective laser melting. *Materials* [online]. 2020, **13**(17), 3895. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13173895
- [21] ALI, Haider, Hassan GHADBEIGI, and Kamran MUMTAZ. Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2018, **712**, 175–187. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2017.11.103
- [22] CHENG, Bo, Subin SHRESTHA, and Kevin CHOU. Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2016, **12**, 240–251. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2016.05.007
- [23] Britannica, T. Editors of Encyclopaedia. stainless steel. *Encyclopedia Britannica*, March 29, 2024. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/stainless-steel>.
- [24] PTÁČEK, Luděk, a kol.: *Nauka o Materiálu I*. Brno: CERM, 2003. ISBN: 8072042831
- [25] PASCAL, Christophe. Mechanical Twinning. *Paleostress Inversion Techniques* [online]. 2022, Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/mechanical-twinning>
- [26] MAX PLANCK INSTITUTE FOR SUSTAINABLE MATERIALS. *Ab initio Based Description of the Stacking Fault Properties in High-Mn Steels*. Online. © 2024. Dostupné z: <https://www.mpie.de/3085082/Stacking-faults-in-high-Mn-steels>. [cit. 2024-02-15].
- [27] CHOO, Hahn, et al. Effect of laser power on defect, texture, and microstructure of a laser powder bed fusion processed 316L stainless steel. *Materials & Design* [online]. 2019, **164**, 107534. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2018.12.006
- [28] MARATTUKALAM, Jithin James, et al. The effect of laser scanning strategies on texture, mechanical properties, and site-specific grain orientation in selective laser melted 316L SS. *Materials & Design* [online]. 2020, **193**, 108852. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2020.108852
- [29] SOFINOWSKI, Karl A., et al. Layer-wise engineering of grain orientation (LEGO) in Laser Powder Bed Fusion of stainless steel 316L. *Additive Manufacturing* [online]. 2020, 101809. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2020.101809
- [30] OTTO, Martin, et al. Effect of build orientation on the microstructure, mechanical and corrosion properties of a biodegradable high manganese steel processed by laser powder bed fusion. *Metals* [online]. 2021, **11**(6), 944. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met11060944

- [31] HAASE, Christian, et al. Exploiting process-related advantages of selective laser melting for the production of high-manganese steel. *Materials* [online]. 2017, **10**(1), 56. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma10010056
- [32] KIES, Fabian, et al. Design of high-manganese steels for additive manufacturing applications with energy-absorption functionality. *Materials & Design* [online]. 2018, **160**, 1250–1264. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2018.10.051
- [33] MOTAMAN, S. Amir H., Franz ROTERS, and Christian HAASE. Anisotropic polycrystal plasticity due to microstructural heterogeneity: a multi-scale experimental and numerical study on additively manufactured metallic materials. *Acta Materialia* [online]. 2020, **185**, 340–369. ISSN 1359-6454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2019.12.003
- [34] SEEDE, Raiyan, et al. A lightweight Fe–Mn–Al–C austenitic steel with ultra-high strength and ductility fabricated via laser powder bed fusion. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2023, 145007. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2023.145007
- [35] KÖHNEN, Patrick, et al. Understanding the process-microstructure correlations for tailoring the mechanical properties of L-PBF produced austenitic advanced high strength steel. *Additive Manufacturing* [online]. 2019, **30**, 100914. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2019.100914
- [36] EWALD, Simon, et al. Precise control of microstructure and mechanical properties of additively manufactured steels using elemental carbon powder. *Materials Letters* [online]. 2021, **295**, 129788. ISSN 0167-577X. Dostupné z: doi:10.1016/j.matlet.2021.129788
- [37] RANKOUHI, Behzad, et al. A dimensionless number for predicting universal processing parameter boundaries in metal powder bed additive manufacturing. *Manufacturing Letters* [online]. 2021, **27**, 13–17. ISSN 2213-8463. Dostupné z: doi:10.1016/j.mfglet.2020.12.002



# 10 ZOZNAM POUŽITÝCH ZKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

## 10.1 Použité skratky

2D	Dvojmerný
3D	Trojmerný
AM	Additive Manufacturing
AV ČR	Akademie Věd České Republiky
BD	Build Direction
DIN	Deutsches Institut für Normung
EBS	Electron BackScatter Diffraction
FCC	Face Centred Cubic
FD	Flow Direction
HD	Hatch Distance
HMnS	High Manganese Steel
IPF	Inverse Pole Figures
LOF	Lack of Fusion
LPBF	Laser Powder Bed Fusion
OL	Overlap
PF	Pole Figure
PP	Procesné Parametre
RD	Recoating Direction
SLM	Selective Laser Melting
SS	Stainless Steel
TRIP	Transformation Induced Plasticity
TS	Tensile Sample
TWIP	Twinning Induced Plasticity
WoS	Web of Science

## 10.2 Použité fyzikálne veličiny

$C_p$	Špecifické teplo
$C_{p,n}$	Špecifické teplo prvku n
$h_z$	Hĺbka zvaru
k	Tepelná vodivosť
$k_u$	Kontaktný uhol zvaru

LE	Linear Energy
LP	Laser Power
LS	Laser Speed
m	Celková hmotnosť
$m_n$	Hmotnosť prvku n
P	Výkon
$R_m$	Medza klzu
$R_{p0,2}$	Zmluvná medza klzu
$s_z$	Šírka zvaru
t	Výška nanášanej vrstvy
UTS	Ultimate Tensile Strength
v	Rýchlosť
VED	Volume Energy Density
$v_z$	Výška zvaru
YS	Yield Strength
$\delta$	Deformácia do porušenia
$\Pi_1$	Bezrozmerné hodnotiace kritérium

## 11 ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 2-1 PRISMA diagram – vyhľadávanie informačných zdrojov .....	15
Obr. 2-2 Rozdelenie procesných parametrov [1] .....	16
Obr. 2-3 Morfológia single trackov zachytená pomocou SEM [2] .....	17
Obr. 2-4 Prierezové plochy single trackov pre vybrané procesné parametre [2] .....	17
Obr. 2-5 Vplyv skenovacej rýchlosti na rozmery zvarového kúpeľa [3].....	18
Obr. 2-6 Morfológia povrchu single trackov z materiálu AlSi10Mg pre rôzne procesné parametre [4] .....	19
Obr. 2-7 Základné rozmery single tracku [5] .....	19
Obr. 2-8 Prierezové plochy single trackov vyrobené s rôznymi procesnými parametrami [5] .....	20
Obr. 2-9 Vplyv vzdialenosti dráh na vznik pórov; (a) veľká vzdialenosť zvarov, (b) optimálna vzdialenosť zvarov .....	21
Obr. 2-10 Závislosť relatívnej hustoty a porozity na (a) HD a (b) VED [8] .....	22
Obr. 2-11 Tavné režimy (a) konduktívny režim – <i>Conduction</i> , (b) režim kľúčovej dierky - <i>Keyhole</i> [10].....	22
Obr. 2-12 <i>Lack Of Fusion</i> porozita [14] .....	23
Obr. 2-13 Keyhole režim a vznik keyhole porozity [15] .....	24
Obr. 2-14 Procesná mapa zobrazujúca oblasť Keyhole (ľavá časť) a LOF (pravá časť) defektov a procesné okno s vhodne nastavenými procesnými parametrami [15].....	25
Obr. 2-15 Defekty v štruktúre (a) mikro-póry spôsobené uväzneným plynom [16]; (b) <i>balling</i> efekt [18] .....	25
Obr. 2-16 Tuhnutie počas SLM procesu: (a) čiastočné prenikanie lasera do prášku; (b) dostatočný prienik lasera do vrstvy prášku [20] .....	26
Obr. 2-17 Príklady skenovacích stratégií (a) Island scanning; (b) Line scanning; (c) Rotation scanning; (d) In-out scanning [22].....	26
Obr. 2-18 Rozloženie zvyškového napätia stratégie <i>Island</i> (a) v smere osy X; (b) v smere osy Y [16].....	27
Obr. 2-19 Dvojčatenie [25].....	28
Obr. 2-20 Porovnanie TRIP a TWIP vlastností materiálu [26].....	28
Obr. 2-21 Porovnanie tvaru prierezu zvarov v štruktúre (a) 380 W a (b) 200 W [27].....	29

Obr. 2-22 Pole figures reprezentujúce orientáciu FCC mriežky pri výkone (a) 380 W (b) 320 W [27] .....	30
Obr. 2-23 EBSD mapy v rovine XY pre rôzne smery skenovania (a-c); a PF vytvorené pre jednotlivé stratégie skenovania (d-f) [28] .....	31
Obr. 2-24 Skenovacie stratégie použité pri stavbe vzoriek (a) špirálová; (b) LEGO kocka; (c) vložený valec [29] .....	32
Obr. 2-25 EBSD mapa vzorky vyrobenej stratégiou (a) špirály; (b) LEGO kocky [29] .....	33
Obr. 2-26 EBSD mapa vzorky vloženého kužeľu pre dve kombinácie parametrov [29] .....	33
Obr. 2-27 Výsledné mechanické vlastnosti závislé na orientácii kryštalografickej štruktúry [28] .....	34
Obr. 2-28 EBSD mapy štruktúry v smere (a) kolmom na BD (rovina X-Y); (b) rovnobežnom s BD (rovina Y-BD); (c) IPF reprezentácia intenzity v rovine X-Y [30] .....	35
Obr. 2-29 Stress-strain krivka pre (a) ťah a (b) tlak [21] .....	36
Obr. 2-30 Orientácia vzoriek pri výrobe (a) a grafické znázornenie mech. vlastností pre rôzne orientácie (b) [31] .....	36
Obr. 2-31 EBSD mapa zobrazujúca austenitickú (zelenú), hexagonálnu $\epsilon$ -martenzitickú (žltú) a tetragonálnu $\alpha'$ -martenzitickú (červenú) štruktúru vzorky vyrábaných pod uhlom $90^\circ$ (a), $45^\circ$ (b) a $0^\circ$ (c) .....	37
Obr. 4-1 Schéma metodiky riešenia výskumu .....	42
Obr. 4-2 Distribúcia veľkosti zrn práčku [35] (a), SEM mikrograf materiálu X30Mn22 (b) .....	45
Obr. 4-3 Rozloženie vzoriek jednoduchých zvarov na platforme .....	46
Obr. 4-4 Skenovacia stratégia Meander pri stavbe objemových vzoriek (a) pôvodná, bežne používaná; (b) upravená stratégia použitá pri tejto práci .....	46
Obr. 4-5 Ťahová vzorka typu B podľa DIN 50125 .....	47
Obr. 4-6 Rozloženie vzoriek jednoduchých zvarov podľa výkonových skupín, smer prúdenia ochrannej atmosféry a smer nanášania vrstiev kovového prášku (vľavo) a smer skenovania jednotlivých jednoduchých zvarov v rámci jednej vzorky (vpravo) .....	48
Obr. 4-7 Proces prípravy vzoriek: (a) narezanie vzoriek pomocou drôtovej rezačky; (b) zaliatie vzoriek do tvrdnúcej hmoty; (c) vybrúsenie, vyleštenie a naleptanie zaliatych vzoriek .....	49
Obr. 4-8 Základné rozmery jednoduchého zvaru; ( $k_u$ ) kontaktný uhol; ( $v_z$ ) výška zvaru; ( $h_z$ ) hĺbka zvaru; ( $s_z$ ) šírka zvaru .....	50
Obr. 4-9 Použitá skenovacia stratégia pri výrobe .....	50

Obr. 4-10 Rozmiestnenie objemových vzoriek pri výrobe.....	51
Obr. 4-11 Určenie hlavných rovín pozorovaných vzoriek .....	51
Obr. 4-12 Orientácia vyrábanej ťahovej vzorky počas stavby.....	52
Obr. 5-1 Vplyv LS na stabilitu a kontinuitu Singletracku.....	54
Obr. 5-2 Vplyv LS a LP na priemernú šírku zvaru $s_p$ .....	55
Obr. 5-3 Vplyv LS a LP na hĺbku zvaru $h_z$ .....	56
Obr. 5-4 Vplyv LS a LP na taviaci režim .....	56
Obr. 5-5 Vplyv LS a LP na uhol zvaru $k_u$ .....	57
Obr. 5-6 Mapa procesných parametrov závislých na LP a LS s vypočítanou LE.....	58
Obr. 5-7 Plocha odozvy (a) hĺbky zvaru a (b) šírky zvaru na rýchlosti a výkone lasera ....	59
Obr. 5-8 Objemové vzorky (a) rozmiestnenie na platforme a detailné pohľady na (b) BD, (c) FD a (d) RD rovinu .....	62
Obr. 5-9 Druhy porozity v pozorovaných vzorkách (a) nepravidelná LOF porozita medzi trackmi, (b) mikroporozita, (c) guľaté póry .....	63
Obr. 5-10 Porozita vzoriek v hlavných rovinách pri OL=40%.....	63
Obr. 5-11 Mapy porozity v smere (a) RD, (b) BD, (c) FD a (d) priemerná hodnota porozity .....	64
Obr. 5-12 EBSD analýza jednoduchého zvaru (a) kontrastný snímok; (b) IPF v ose Z a (c) IPF v ose Y .....	65
Obr. 5-13 Kryštalografická analýza vzorky 1 (a-c) EBSD mapy pre jednotlivé smery; (d-f) PF zobrazujúce intenzitu orientácii zŕn v jednotlivých smeroch a (g) schematické znázornenie orientácie FCC v materiáli .....	66
Obr. 5-14 Kryštalografická analýza vzorky 4 (a-c) EBSD mapy pre jednotlivé smery; (d-f) PF zobrazujúce intenzitu orientácii zŕn v jednotlivých smeroch a (g) schematické znázornenie orientácie FCC v materiáli .....	67
Obr. 5-15 Kryštalografická analýza vzorky 15 (a-c) EBSD mapy pre jednotlivé smery; (d-f) PF zobrazujúce intenzitu orientácii zŕn v jednotlivých smeroch a (g) schematické znázornenie orientácie FCC v materiáli .....	68
Obr. 5-16 Umiestnenie ťahovej vzorky TS_4_0 na výrobnnej platforme (a); pohľad zhora na ťahovú vzorku (b) .....	69
Obr. 5-17 Kryštalografická analýza vzorky TS_4_1 vyrábanej súvislým skenovaním po dlhej strane (a-c) EBSD mapy pre jednotlivé smery; (d-f) PF zobrazujúce intenzitu orientácii zŕn v jednotlivých smeroch a (g) schematické znázornenie orientácie FCC v materiáli.....	70

Obr. 5-18 Kryštalografická analýza vzorky TS_4_2 vyrábanej segmentovaným skenovaním po dlhej strane (a-c) EBSD mapy pre jednotlivé smery; (d-f) PF zobrazujúce intenzitu orientácii zŕn v jednotlivých smeroch a (g) schematické znázornenie orientácie FCC v materiáli .....	71
Obr. 5-19 Kryštalografická analýza vzorky TS_15_1 vyrábanej súvislým skenovaním po dlhej strane (a-c) EBSD mapy pre jednotlivé smery; (d-f) PF zobrazujúce intenzitu orientácii zŕn v jednotlivých smeroch a (g) schematické znázornenie orientácie FCC v materiáli .....	71
Obr. 5-20 Deformačne-napät'ová závislosť ťahových vzoriek skenovaných v krátkom smere .....	72
Obr. 5-21 Deformačne-napät'ová závislosť ťahových vzoriek skenovaných v dlhom smere po celej dĺžke .....	73
Obr. 5-22 Deformačne-napät'ová závislosť ťahových vzoriek skenovaných v dlhom smere po segmentoch .....	73
Obr. 6-1 Defekty vonkajšej geometrie zvaru (a) nerovnomerný a nespojitý zvar; (b) široký rozliaty zvar pripomínajúci zvarový spoj .....	75
Obr. 6-2 Vplyv výkonu (LP) a rýchlosti lasera (LS) na (a) hĺbku a (b) šírku jednoduchého zvaru .....	76
Obr. 6-3 Objemová hustota energie VED pre skúmaný rozsah procesných parametrov, kde na zeleno zvýraznená oblasť reprezentuje rozsah VED vypočítanej z procesných parametrov použitých v rešerši .....	77
Obr. 6-4 Porovnanie predikcie mapy použiteľných procesných parametrov podľa Rankouhiho a kol. [37] a experimentálne získanou mapou PP .....	78
Obr. 6-5 Porozita v RD rovine (vľavo) grafická reprezentácia; (vpravo) hodnoty porozity v % pre jednotlivé kombinácie procesných parametrov pre OL = 40% .....	79
Obr. 6-6 Porozita v BD rovine (vľavo) grafická reprezentácia; (vpravo) hodnoty porozity v % pre jednotlivé kombinácie procesných parametrov pre OL = 40% .....	80
Obr. 6-7 Mapa použiteľných procesných parametrov spracovania materiálu X30Mn22 ...	80
Obr. 6-8 EBSD mapy (a, b, c) a IPF X snímky (d, e, f) vzoriek VS_1 (a, d), VS_4 (b, e) a VS_15 (c, f) .....	82
Obr. 6-9 Porovnanie mikroštruktúry objemovej vzorky VS_4 (a-c) s vzorkami mikroštruktúry z práce Marattukalam a kol. [28] (d-f) .....	83
Obr. 6-10 Mikroštruktúra v BD rovine (a) a v RD rovina (b) z práce Otta a kol. [30] .....	84
Obr. 6-11 Porovnanie mikroštruktúry objemovej vzorky VS_1 (a-c) s vzorkami mikroštruktúry poskytnutými Ústavom Fyziky Materiálov AVČR (d-f) .....	85
Obr. 6-12 Porovnanie mechanických vlastností vzoriek TS_4 .....	86

Obr. 6-13 Porovnanie mechanických vlastností vzoriek TS_15 .....	88
Obr. 6-14 Porovnanie mechanických vlastností vzoriek TS_4 a TS_15 (a) zmluvná medza klzu a medza pevnosti (b) Youngov modul pružnosti, (c) deformácia do porušenia .....	88

## 12 ZOZNAM TABULIEK

Tab. 2-1 Rešeršné dotazy .....	14
Tab. 2-2 Mechanické vlastnosti materiálu závislé na jeho orientácii počas stavby [31].....	37
Tab. 2-3 Procesné parametre spracovania HMnS z rôznych štúdií .....	38
Tab. 4-1 Chemické zloženie materiálu .....	44
Tab. 4-2 Navrhnuté procesné parametre.....	45
Tab. 5-1 Koeficienty výpočtu hĺbky zvaru ( $h_z$ ) pre jednotlivé výkonové kategórie .....	58
Tab. 5-2 Koeficienty výpočtu šírky zvaru ( $s_z$ ) pre jednotlivé výkonové kategórie .....	59
Tab. 5-3 Označenie objemových vzoriek a ich výrobné parametre .....	60
Tab. 5-4 Mechanické vlastnosti všetkých vyhodnocovaných ťahových vzoriek.....	74
Tab. 6-1 Parametre výroby vybraných objemových vzoriek .....	81



## 13 ZOZNAM PRÍLOH

Príloha A – Mapa jednoduchých zvarov

Príloha B – Rovnice plochy odozvy

Príloha C – Obrázky porozity vzoriek v rovinách BD, FD a RD

Príloha D – Posúdenie vplyvu procesných parametrov na porozitu objemových vzoriek

Príloha E – Výsledky pozorovania mikroštruktúry vybraných objemových vzoriek

## Príloha A – Mapa jednoduchých zvarov

Mapa procesných parametrov zobrazuje tvar jednotlivých jednoduchých zvarov pre dané parametre výroby. Zvar naľavo je vyrábaný proti smeru prúdenia ochrannej atmosféry a zvar napravo v smere jej prúdenia



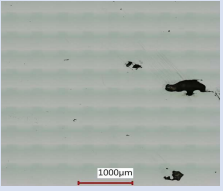
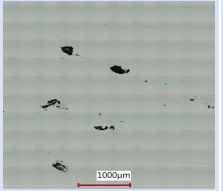
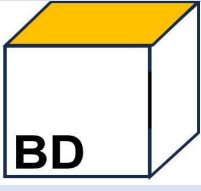
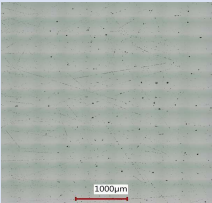
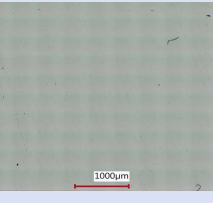
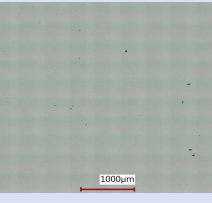
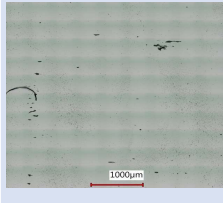
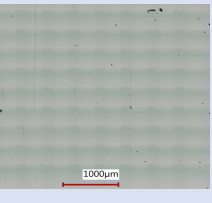
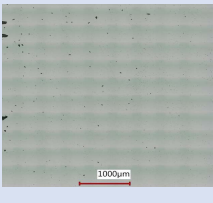
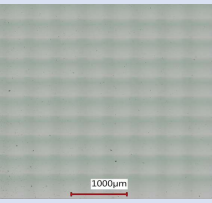
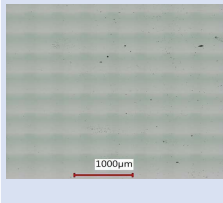
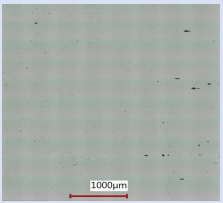
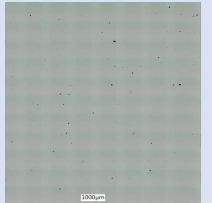
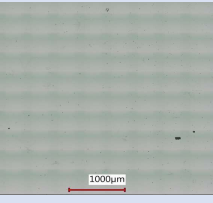
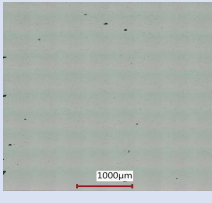
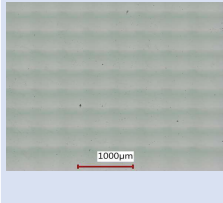
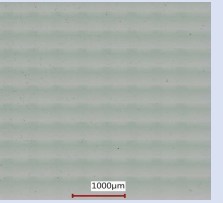
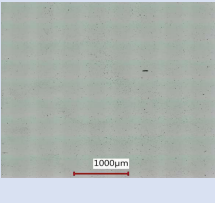
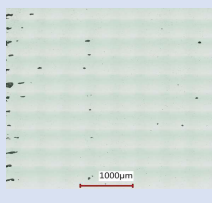
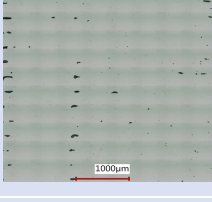
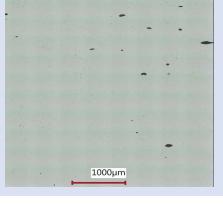
## Príloha B – Rovnice plochy odozvy

Rovnice vygenerované software-om Design-Expert použité pri vytváraní plochy odozvy v Kap. 5.1.3 pre hĺbku zvaru ( $h_z$ ) a šírku zvaru ( $s_z$ ). Za LP treba dosadzovať výkon laseru vo W a za LS rýchlosť laseru v  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

$$\begin{aligned}h_z = & 2481,4261196356 - 60,774234189062 \cdot LP - 0,64699821541339 \cdot LS \\ & + 0,025469541253419 \cdot LP \cdot LS + 0,57543080729516 \cdot LP^2 \\ & - 0,0047265308270941 \cdot LS^2 - 0,00028699905827932 \cdot LP^2 \cdot LS \\ & + 2,3368757293266e - 06 \cdot LP \cdot LS^2 - 0,0023119710773107 \cdot LP^3 \\ & + 1,4257281301091e - 05 \cdot LS^3 + 9,6567295042852e - 08 \cdot LP^2 \cdot LS^2 \\ & + 7,469803711226e - 07 \cdot LP^3 \cdot LS + 1,9634753411079e - 09 \cdot LP \\ & \cdot LS^3 + 4,2816420061781e - 06 \cdot LP^4 - 1,8532315164225e - 08 \cdot LS^4 \\ & - 3,0500934888361e - 10 \cdot LP^3 \cdot LS^2 + 5,757580798173e - 11 \cdot LP^2 \\ & \cdot LS^3 - 4,35090293087e - 10 \cdot LP^4 \cdot LS - 2,0774757918311e - 11 \cdot LP \\ & \cdot LS^4 - 3,0944582188761e - 09 \cdot LP^5 + 9,7600676563531e - 12 \cdot LS^5\end{aligned}$$

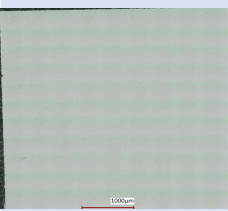
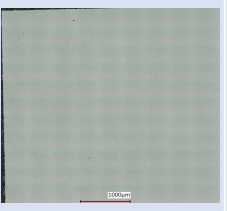
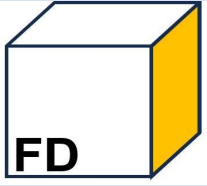
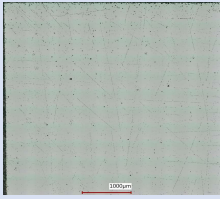
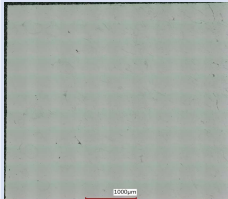
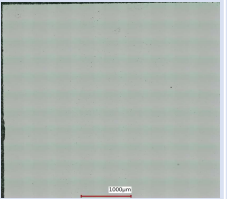
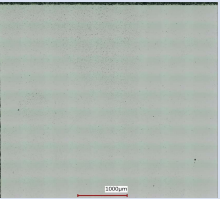
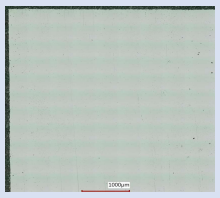

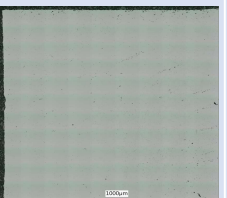
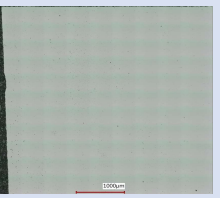
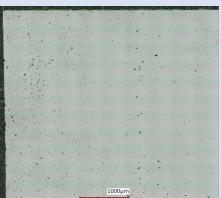

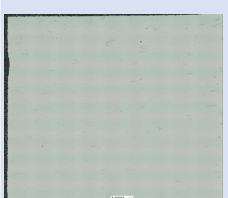
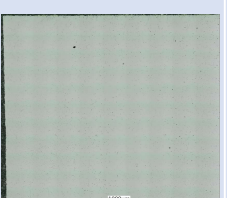

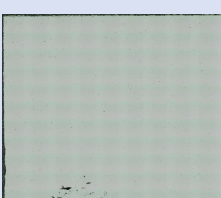
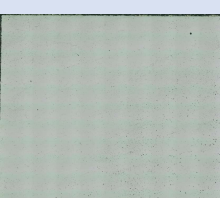
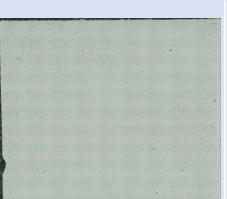
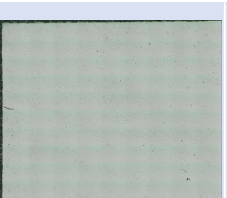

$$\begin{aligned}s_z = & 122,36382281478 + 2,0891992501141 \cdot LP - 0,0064129854865517 \cdot LS \\ & - 0,021000091338978 \cdot LP \cdot LS + 0,0035402058473731 \cdot LP^2 \\ & + 0,00020682474630333 \cdot LS^2 - 4,9269124789546e - 05 \cdot LP^2 \cdot LS \\ & + 0,00010701324446151 \cdot LP \cdot LS^2 + 4,9921143358467e - 06 \cdot LP^3 \\ & - 9,2262481059417e - 06 \cdot LS^3 - 1,0118598806354e - 07 \cdot LP^2 \cdot LS^2 \\ & + 2,7273618300669e - 07 \cdot LP^3 \cdot LS - 1,3368971424547e - 07 \cdot LP \\ & \cdot LS^3 - 1,0134225024838e - 07 \cdot LP^4 + 1,8142423322181e - 08 \cdot LS^4 \\ & - 2,9365879557929e - 11 \cdot LP^3 \cdot LS^2 + 8,136363542379e - 11 \cdot LP^2 \\ & \cdot LS^3 - 2,59881354301e - 10 \cdot LP^4 \cdot LS + 5,5104231675143e - 11 \cdot LP \\ & \cdot LS^4 + 1,5300329650549e - 10 \cdot LP^5 - 9,9305539696599e - 12 \cdot LS^5\end{aligned}$$

Príloha C – Obrázky porozity vzoriek v rovinách BD, FD a RD

Procesná mapa VS 50 µm V2						
Rýchlosť [mm/s]						
Výkon [W]	100 C	200 C	300C	400 C	500 C	600 C
100						
150						
200						
250						
300						
350						
400						

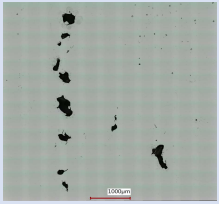
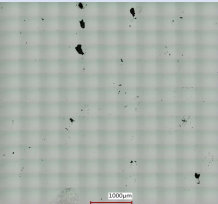

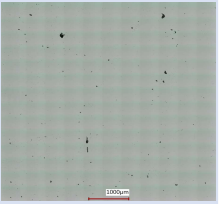
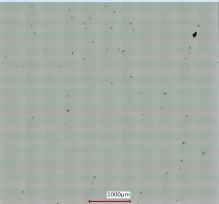
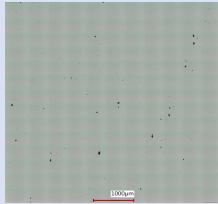
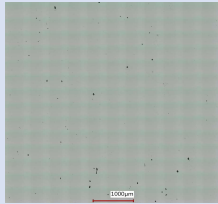
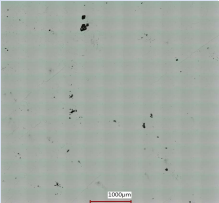
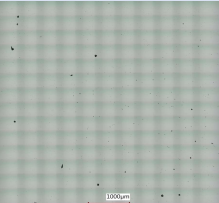
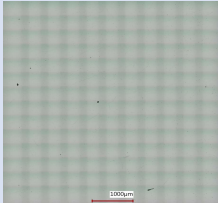
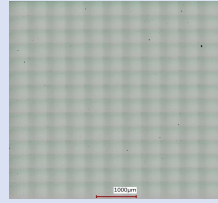
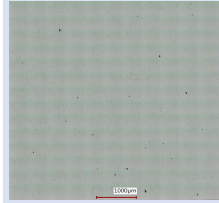
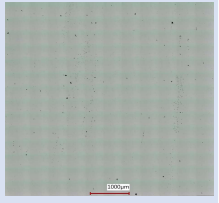
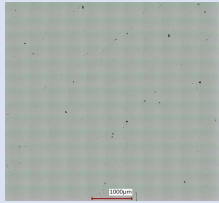
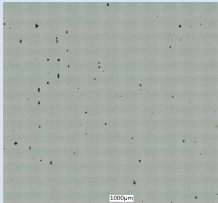
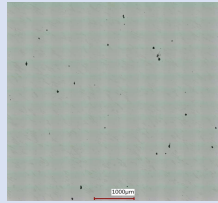
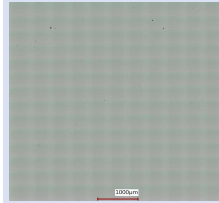
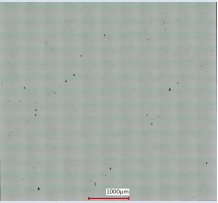
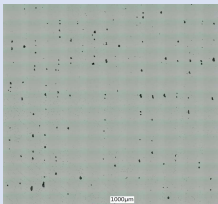
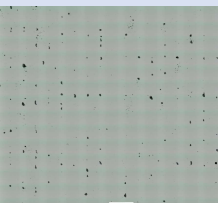
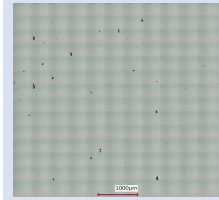
Procesná mapa VS 50 µm V2

Rýchlosť [mm/s]

Výkon [W]	100 B	200 B	300 B	400 B	500 B	600 B
100						
150						
200						
250						
300						
350						
400						

Procesná mapa VS 50 µm V2

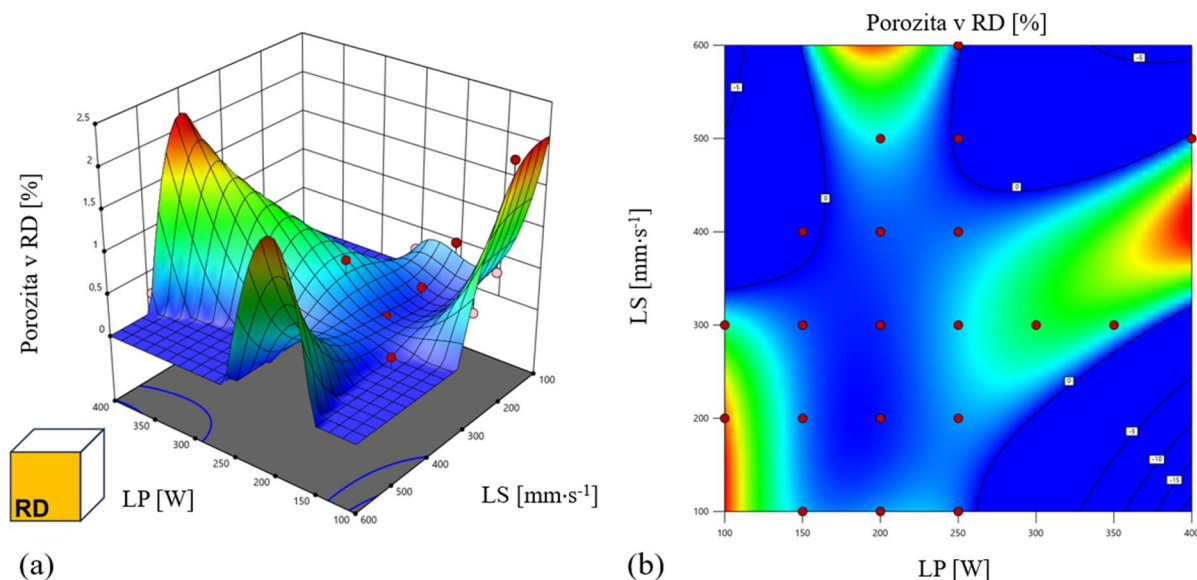
Rýchlosť [mm/s]

Výkon [W]	100 A	200 A	300 A	400 A	500 A	600 A
100						
150						
200						
250						
300						
350						
400						

## Príloha D – Posúdeniu vplyvu procesných parametrov na porozitu objemových vzoriek

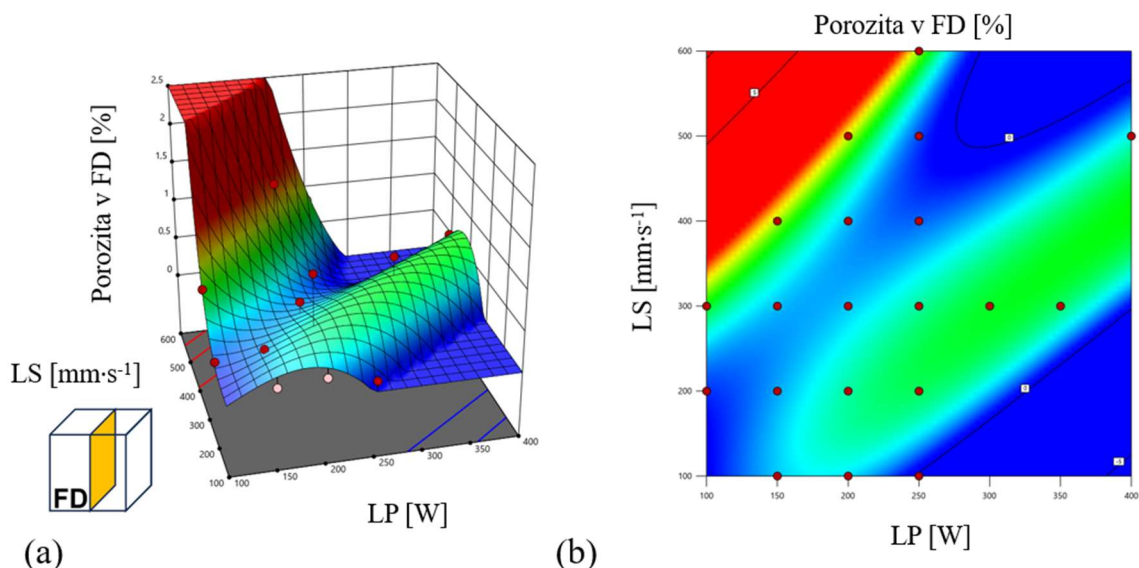
Z nameraných hodnôt porozity bližšie popísané v Kap. 5.2.2 uvedené na Obr. 5-11 boli vypracované analýzy závislosti porozity v jednotlivých rovinách a procesných parametrov (LP a LS) zobrazené na Obr. C-1. Všetky analýzy boli vykonané v programe Design Expert pomocou plochy odozvy, kde boli na prekladanie dát použité automaticky navrhnuté polynómy, ktorých stupeň sa pre jednotlivé prípady líšil.

Pri porozite v RD bol na preloženie dát použitý polynóm štvrtého stupňa so spoľahlivosťou  $R^2 = 0,9173$ , čo môžeme považovať za relevantný výsledok. Grafické zobrazenie plochy odozvy porozity v RD je zobrazené na Obr. C-1 (a) kde je vidieť prudký nárast v oblastiach s absenciou dát. Konkrétne sa jedná o oblasti s  $LP = 300-400$  W;  $LS = 350-450$  mm·s<sup>-1</sup> a  $LP = 150-250$  W;  $LS = 550-600$  mm·s<sup>-1</sup>, ktoré nezodpovedajú realite. Namerané hodnoty sú reprezentované červenými, resp. ružovými značkami nad, resp. pod plochou odozvy.



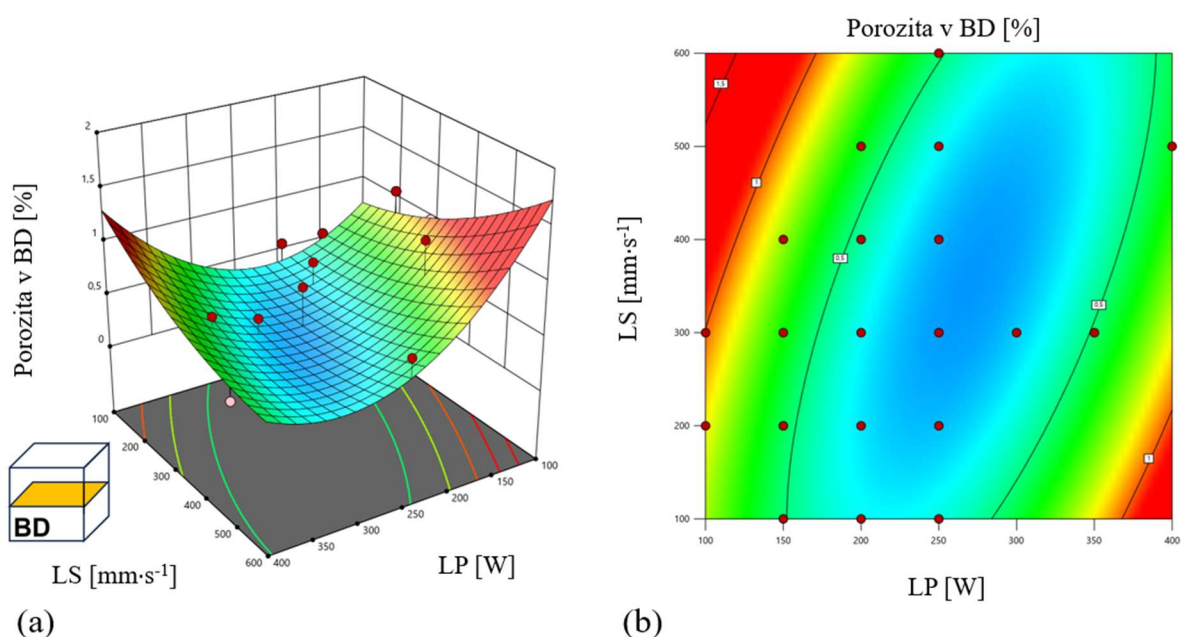
Obr. C-1 Plocha odozvy závislosti porozity v rovine RD na výkone (LP) a rýchlosti (LS) lasera

Plocha odozvy porozity v rovine FD bola vytvorená polynómom tretieho stupňa, ktorý bol programom Design Expert navrhnutý ako najvhodnejší. Pri vyhodnotení bola dosahovaná spoľahlivosť  $R^2 = 0,5763$ , a preto túto plochu a závislosť nemôžeme považovať za relevantnú. Jej grafické zobrazenie je na Obr. C-2.



Obr. C-2 Plocha odozvy závislosti porozity v rovine FD na výkone (LP) a rýchlosti (LS) lasera

Posledná vyhodnocovaná plocha odozvy porozity v rovine BD bola tvorená polynómom druhého stupňa. Tento polynóm bol opäť navrhnutý programom Design Expert ako najvhodnejší. Pri vyhodnotení bola dosahovaná spoľahlivosť len  $R^2 = 0,4347$ , a preto túto plochu zobrazenú na Obr. C-3 nemôžeme považovať za relevantnú.



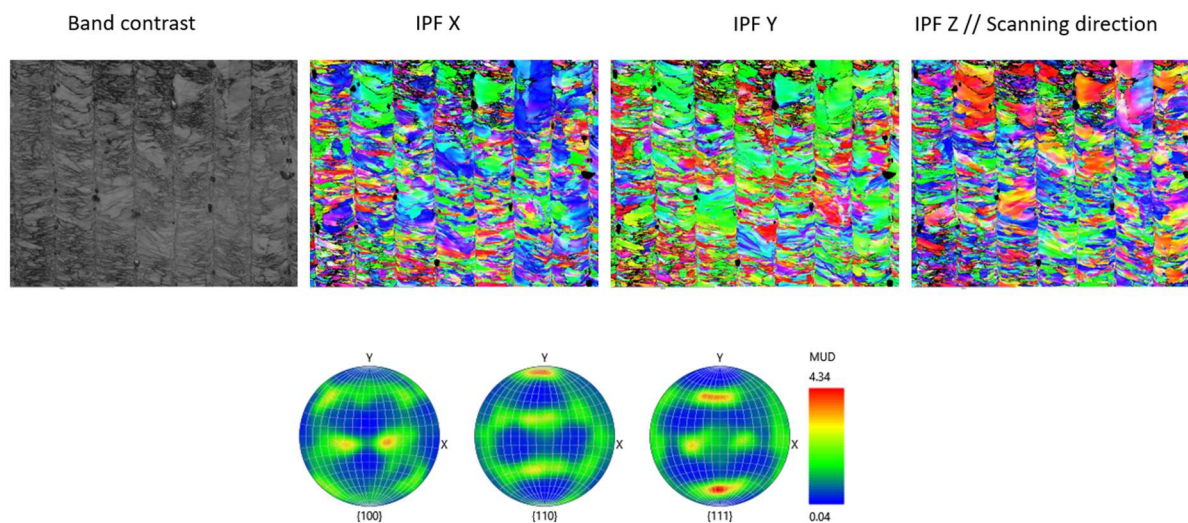
Obr. C-3 Plocha odozvy závislosti porozity v rovine BD na výkone (LP) a rýchlosti (LS) lasera

Na základe predchádzajúcich analýz porozity v jednotlivých rovinách (hlavne kvôli absencii ďalších údajov) nie je možné jednoznačne určiť závislosť medzi procesnými parametrami a porozitou vznikajúcou v týchto rovinách, preto sú tieto výsledky uvádzané v prílohe a nie v samotnom texte práce.

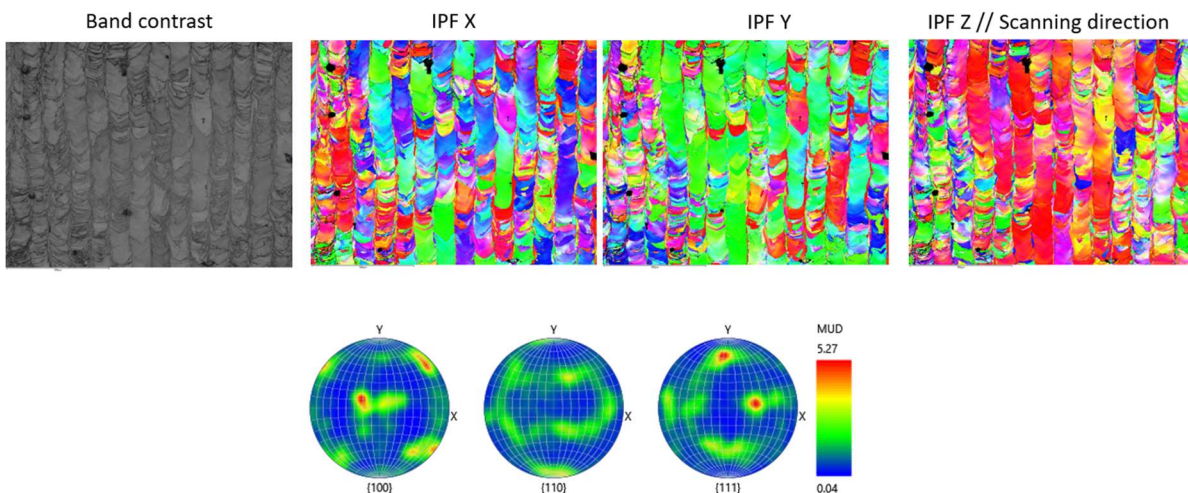


Príloha E – Výsledky pozorovania mikroštruktúry vybraných objemových vzoriek

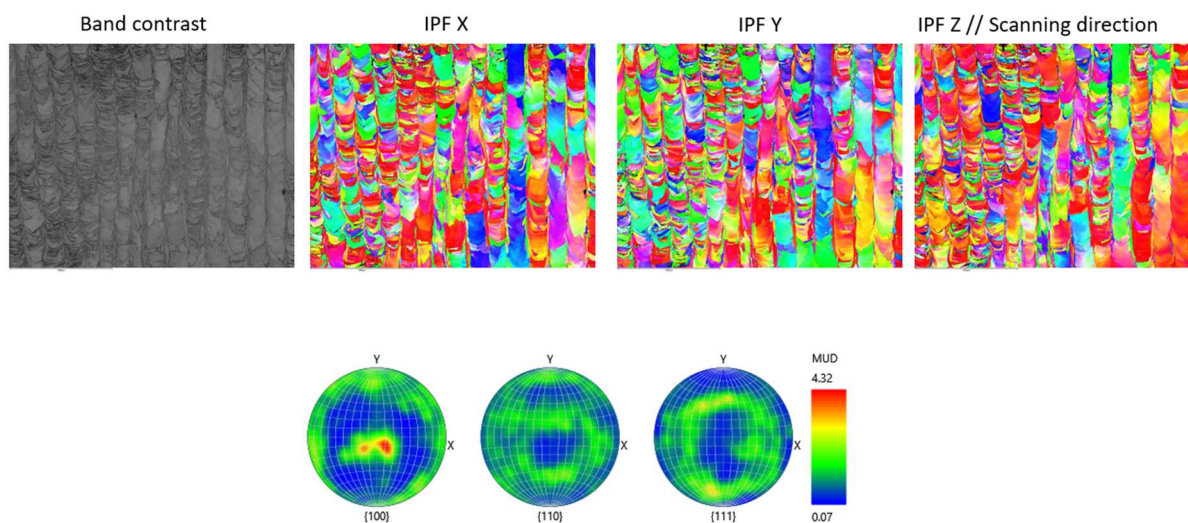
**Vzorka 1**    LP = 250 W    LS = 100 mm·s<sup>-1</sup>    LE = 2,5 J/mm    HD = 0,1986 mm



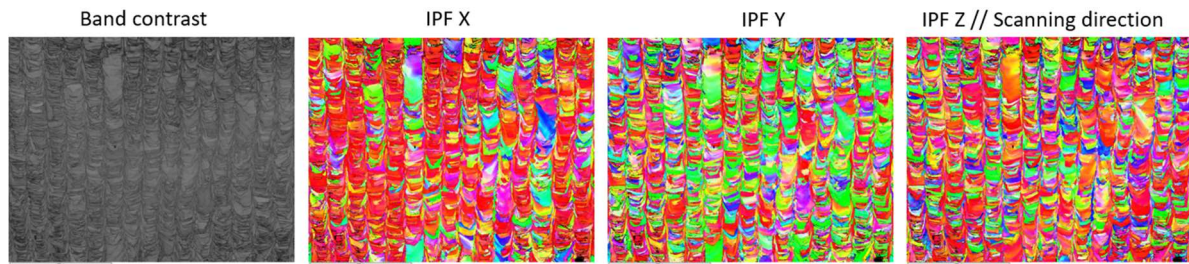
**Vzorka 4**    LP = 150 W    LS = 200 mm·s<sup>-1</sup>    LE = 0,75 J/mm    HD = 0,0996 mm



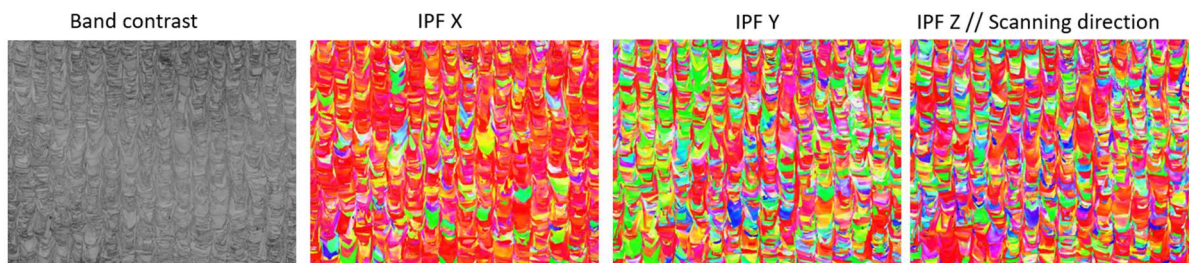
**Vzorka 6**    LP = 150 W    LS = 300 mm·s<sup>-1</sup>    LE = 0,5 J/mm    HD = 0,0972 mm



**Vzorka 10**   LP = 200 W   LS = 400 mm·s<sup>-1</sup>   LE = 0,5 J/mm   HD = 0,0966 mm



**Vzorka 15**   LP = 250 W   LS = 500 mm·s<sup>-1</sup>   LE = 0,5 J/mm   HD = 0,0900 mm



**Vzorka 17**   LP = 400 W   LS = 500 mm·s<sup>-1</sup>   LE = 0,8 J/mm   HD = 0,1218 mm

