



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**ANALÝZA PŘESNOSTI VÝROBY LAMEL FORMY
PNEUMATIKY VYRÁBĚNÝCH SLM TECHNOLOGIÍ**

ANALYSIS OF SLM PRODUCTION ACCURACY OF SIPES FOR TIRE MOLDS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Tomeš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Jan Tomeš**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Daniel Koutný, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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:

Analýza přesnosti výroby lamel formy pneumatiky vyráběných SLM technologií

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je experimentální studium přesnosti výroby lamel pro formy pneumatik vyráběných technologií SLM užitím optické digitalizace. Výstupem práce bude srovnání přesnosti výroby lamel dvou výrobních zařízení a analýza vlivu stavěcích parametrů na strukturu povrchu.

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Materiál a metody
5. Výsledky
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, laboratorní protokol

Typ práce: experimentální

Účel práce: výzkum a vývoj

Výstup práce: publikace

Projekt: Zakázka doplňkové činnosti (HS)

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

Zásady pro vypracování práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2016.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam literatury:

Gu, D. (2015): Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials. Springer, ISBN 978--662-46088-7.

Jäggle, E., Choi, P., Van Humbeeck, J., Raabe, D. (2014). Precipitation and austenite reversion behavior of a maraging steel produced by selective laser melting. Journal of Materials Research, vol. 29, pp. 2072-2079, doi:10.1557/jmr.2014.204.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zprvu věnuje analýze a hodnocení stávající výroby lamel na dvou SLM zařízeních PXL a M2 Cusing, firem Phenix Systems a Concept Laser. Vzorky z obou strojů prošly stejným výrobním procesem a stejným procesem měření a vyhodnocení tak, aby mohlo proběhnout porovnání mezi jednotlivými stroji. Na vzorcích se porovnává geometrická přesnost, drsnost povrchu, mechanické vlastnosti a materiálová struktura. Pro lamely bylo nutné vytvořit digitální metodiku hodnocení geometrie. V další části práce jsou na základě rešerše zvoleny procesní parametry a je analyzován jejich vliv na strukturu povrchu lamel.

KLÍČOVÁ SLOVA

Additivní technologie, Selective laser melting (SLM), lamely formy pneumatiky, martenziticky vytvrditelná ocel 1.2709, geometrická přesnost, drsnost povrchu

ABSTRACT

The first part of the diploma thesis is focused on the analysis and evaluation of the current production of sipes by two SLM devices PXL and M2 Cusing, produced by Phenix Systems and Concept Laser companies. The samples of both machines went through the same manufacturing process and the same process of measurement and evaluation, in order to carry out comparison between individual machines. Geometric accuracy, surface roughness, mechanical properties, and material structure of the samples have been compared. For the sipes it was necessary to create a digital evaluation methodology of geometry. In the second part of the thesis, process parameters are selected on the basis of research and further their influence on surface roughness of manufactured sipes is analyzed.

KEY WORDS

Additive technology, Selective laser melting (SLM), sipes for tire mold, 18Ni maraging steel (300), dimensional accuracy, surface roughness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TOMEŠ, J. *Analýza přesnosti výroby lamel formy pneumatiky vyráběných SLM technologií*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 127 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Daniela Koutného, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu zdrojů.

V Brně dne 23. května 2016

.....
Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Danielu Koutnému, Ph.D. za poskytnuté rady a připomínky v průběhu řešení zadaného úkolu. Také bych chtěl poděkovat všem, kteří mi byli nápomocni při výrobě vzorků jak v Continentalu, tak na VUT. Poděkování také patří všem mým blízkým za jejich podporu a trpělivost.

OBSAH

1 Úvod	13
2 Přehled současného stavu poznání	14
2.1 Výroba segmentu formy	14
2.2 Technologie Selective Laser Melting	14
2.2.1 Princip SLM	14
2.2.2 Základní parametry	15
2.3 Studie procesních parametrů	17
2.4 Studie procesních parametrů k danému materiálu	22
3 Analýza problému a cíl práce	26
3.1 Smysl a přínos práce	26
3.2 Rozbor studií	26
3.3 Cíl diplomové práce	28
4 Materiál a metody	29
4.1 SLM zařízení	29
4.1.1 PXL	29
4.1.2 M2 Cusing	29
4.1.3 SLM [®] 280 ^{HL}	30
4.2 Proces výroby lamel pro porovnání strojů	30
4.2.1 SLM výroba	30
4.2.2 Tepelné zpracování - Žihání	30
4.2.3 Řezání	31
4.2.4 Omílání	31
4.3 Digitalizace a rozměrová přesnost lamel	31
4.3.1 Měřicí systém ATOS Triple Scan	31
4.3.2 Optická digitalizace vzorků	31
4.3.3 Vybrané vzorky pro porovnání strojů	32
4.3.4 Vliv tepelného zpracování na rozměrovou přesnost	32
4.3.5 Hodnocení geometrie lamel	33
4.4 Měření struktury povrchu lamel	33
4.4.1 Optický interferometr	33
4.4.2 Způsob měření na vzorcích	34
4.5 Materiálové a mechanické analýzy	34
4.5.1 Metalografická analýza	34
4.5.2 μ CT analýza	35
4.5.3 Mechanické vlastnosti	35
4.6 Použitý materiál	36
4.6.1 Chemické složení	36
4.6.2 Rozložení velikosti částic	36
4.7 Testování procesních parametrů	39
4.7.1 Princip testování	39
4.7.2 Zvolené parametry pro testování	39
4.7.3 Nastavení navržených strategií šrafování na M2 Cusing	39
5 Výsledky	40
5.1 Materiálové analýzy	40
5.1.1 Metalografická analýza	40
5.1.2 μ CT analýza	45

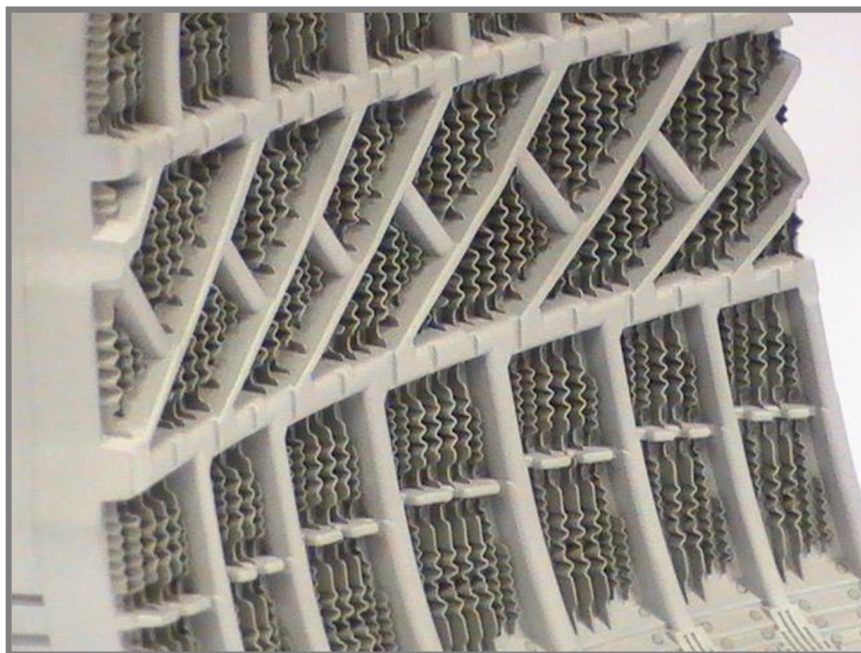
5.1.3 Mechanické vlastnosti	45
5.2 Hodnocení rozměrové přesnosti lamel	50
5.2.1 Vzorek lamely typu 2	51
5.2.2 Vzorek lamely typu 2	51
5.2.3 Vzorek lamely typu 3	51
5.2.4 Vzorek lamely typu 4	51
5.2.5 Analýza vlivu TZ - vzorek lamely typu 5	51
5.2.6 Analýza vlivu TZ - vzorek lamely typu 6	51
5.2.7 Analýza vlivu TZ - vzorky lamel typu 1, typu 2	51
5.2.8 Shrnutí poznatků a zhodnocení rozměrové přesnosti	51
5.3 Srovnání kvality povrchu lamel	51
5.3.1 Výsledky měření na lamele typu 3	51
5.3.2 Výsledky měření na lamele typu 1 a 2	52
5.3.3 Zhodnocení kvality povrchů	52
5.4 Testování výrobních parametrů	52
5.4.1 Test výkonu a rychlosti pohybu laseru	52
5.4.2 Další testy	52
5.4.3 Test přenositelnosti parametrů	52
5.4.4 Test přenositelnosti parametrů 2	52
6 Diskuze	53
7 Závěr	55
8 Seznam použitých zdrojů	56
9 Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin	59
10 Seznam obrázků a grafů	60
11 Seznam tabulek	62

1 ÚVOD

Aditivní technologie výroby je v posledních letech v prudkém vývinu. Díky neustálému vývoji a zvyšování produktivity výrobních zařízení, už nejsou aditivní technologie používány v průmyslu pouze pro rychlou tvorbu prototypů, ale nacházejí uplatnění při výrobě čím dál více konečných součástí. Hlavní výhodou těchto technologií je možnost výroby tvarově složitých dílů, kterých by pomocí konvenčních metod výroby bylo obtížné nebo nemožné docílit. Např. součásti s komplexní vnitřní strukturou, jako jsou chladicí kanálky nebo prostorová struktura pro odlehčení [1]. Mezi nejvýznamnější v oblasti kovové aditivní výroby patří technologie Selective laser melting (SLM).

Pneumatika automobilu je velice složitý funkční celek, složený s více částí, kde každá má svou specifickou roli. Jedním z těchto prvků jsou menší drážky (zářezy) v blocích měkké části pneumatiky, zajišťující mimořádnou přilnavost v kontaktu s vozovkou. S rostoucími nároky na výkon pneumatiky rostou i nároky na tvarovou složitost těchto drážek. Lamely, které ve formě pneumatiky tyto drážky tvoří, už nelze vyrábět pomocí konvenčního tváření. Proto se výrobci pneumatik zaměřují na nový způsob výroby, kterým je technologie SLM. Konkrétně firma Continental začíná vyrábět tvarově složitě lamely na SLM zařízeních a v budoucnu plánuje výrobu celých segmentů formy pomocí této technologie.

Technologie Selective laser melting přináší menší omezenost tvaru, avšak nese s sebou i značnou řadu komplikací, například v nalezení optimálních procesních parametrů. Ty jsou závislé nejen na použitém materiálu, ale i na výrobním zařízení a tvaru výsledné součásti.



Obr. 1-1 Segment formy pneumatiky [2]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Výroba segmentu formy

Utajeno...

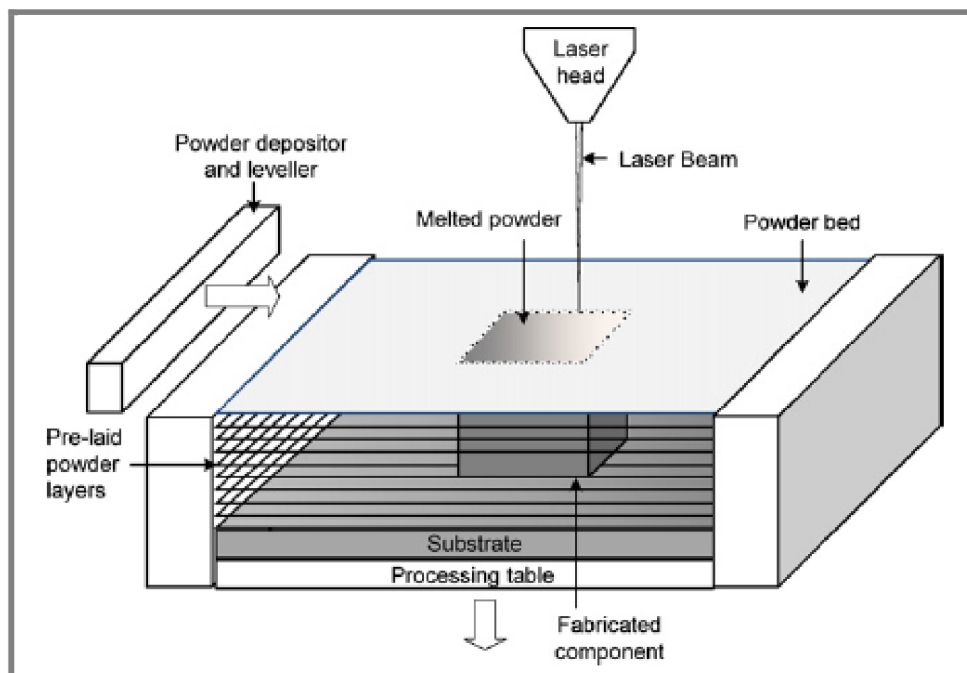
2.2 Technologie Selective Laser Melting

2.2.1 Princip SLM

SLM patří mezi Aditivní technologie, také nazývanými 3D tisk. Ty umožňují přímou výrobu součásti z navrhnutého CAD modelu.

Výroba dílu pomocí technologie SLM začíná nahráním modelu součásti do softwaru pro přípravu výroby. Pro přenos dat se většinou používá univerzální formát STL. Součást se umístí podle potřeby na virtuální pracovní plochu, nastaví se podpory pro převísle části a všechny parametry výroby např. výkon laseru, rychlost a strategie šrafování laseru, tloušťka vrstvy materiálu. Tím jsou data výroby připravena a exportována do výrobního zařízení. U některých systémů probíhá část nastavení výroby až na stroji.

Technologie SLM spočívá ve výrobě 3D součásti ve vrstvách, schéma je zobrazeno na Obr. 2-1. Proces začíná nanesením úzké vrstvy kovového prášku na základní desku (cyklus vrstvení). Výkonný laser je směřován na povrch prášku tak, aby spečení odpovídalo tvaru průřezu součásti v dané vrstvě (cyklus spékání laserem). Při tuhnutí taveniny dochází ke spojení s předchozí vrstvou materiálu. Po dokončení vrstvy celá pracovní plocha klesne o tloušťku vrstvy materiálu a je nanesen další prášek. Tímto způsobem, vrstvu po vrstvě, odspoda nahoru, se vytvoří celková součást. Poté se očistí od nepoužitého prášku a oddělí se od podkladu. Hotový výrobek může být ještě podroben pískování, broušení, omílání nebo obrábění pro zlepšení kvality povrchu.



Obr. 2-1 Schéma procesu SLM [4]

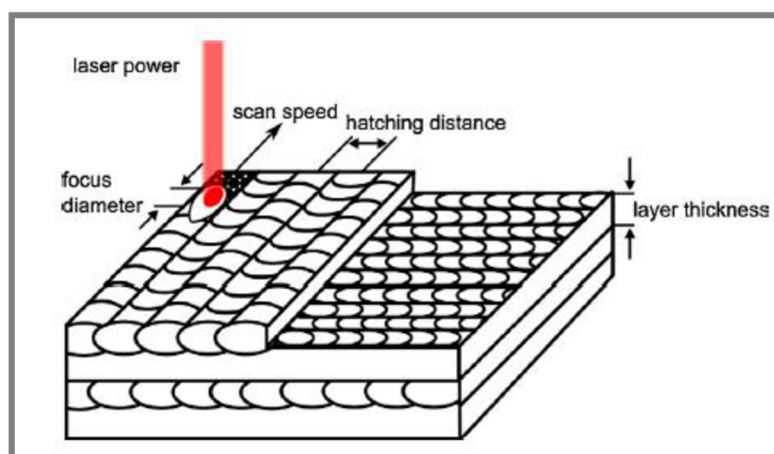
Největší výhodou SLM a celkově Aditivních technologií je možnost výroby komplexních geometrií, kterých by jinak bylo obtížné nebo nemožné dosáhnout pomocí konvenčních procesů výroby. Je to díky všestrannosti procesu, ale i přesnosti a malé cílové oblasti laserového paprsku. Výroba pomocí SLM má na druhou stranu i mnoho obtížností. Vysoká teplota například často způsobuje nárůst pórovitosti materiálu nebo cákání taveniny v průběhu procesu [4]. Dalším problémem je, že během procesu prášek přilne na vyráběnou součást a vytvoří drsný povrch [5].

2.2.2 Základní parametry

2.2.2

V softwaru pro přípravu výroby můžeme nastavovat parametry, a tím měnit strategii výroby. Tyto parametry mohou značně ovlivnit mechanické vlastnosti součásti, kvalitu povrchu a čas výroby. Významné parametry jsou dále uvedeny:

- Výkon laseru (laser power)
- Rychlost pohybu laseru (scan speed)
- Průměr laserového paprsku (focus diameter/laser beam spot size)
- Tloušťka vrstvy (layer thickness/slice thickness)
- Šrafovací vzdálenost (hatching distance/scan spacing)
- Míra překrytí (overlap rate)
- Strategie šrafování (scanning strategy)
- Orientace součásti (building direction)



Obr. 2-2 Parametry výroby SLM [6]

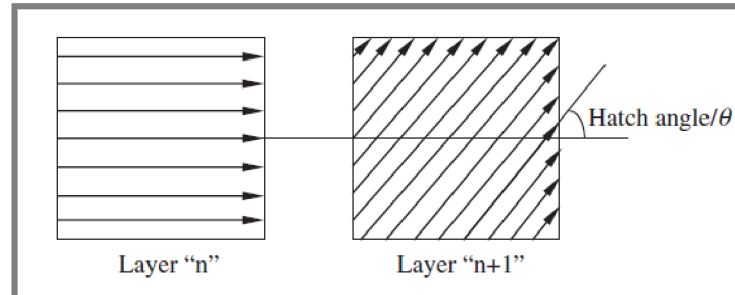
Míra překrytí

Je procentuální vyjádření překrytí dvou sousedících návarů. Je závislá na šrafovací vzdálenosti a šířce laserem roztaveného návaru.

Strategie šrafování

Pro tisk může být zvolen více stylů strategií šrafování. Vždy záleží, jaké možnosti nastavení dovoluje dané SLM zařízení. Nejznámější a nejjednodušší je kontinuální šrafování, kde jednotlivé směry jsou rovnoběžné. Vektory mohou mít stejný směr,

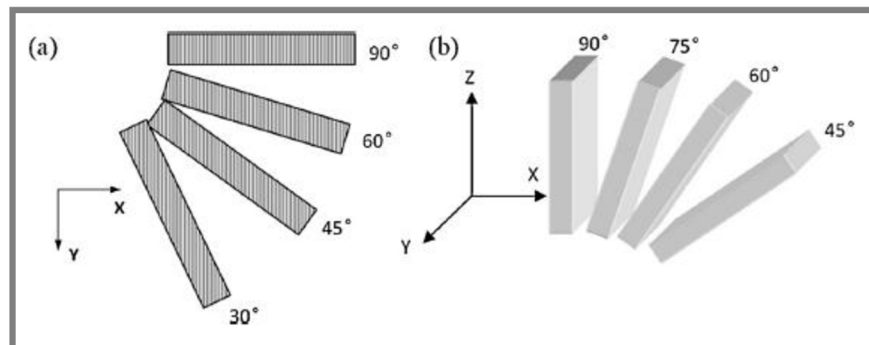
nebo vždy sousedící vektory mají směr opačný. To se nazývá „Bidirectional“ nebo tzv. „Zigzag“ princip [7], nebo také „Meander“, záleží na výrobci zařízení. Když následující vrstva má pootočený směr šrafování vůči předchozí, tak se jedná o tzv. úhel šrafování (hatch angle), jak zobrazuje Obr. 2-3.



Obr. 2-3 Úhel šrafování [8]

Orientace součásti

Je určena natočením součásti vůči směru tvoření vrstev.



Obr. 2-4 Orientace součásti v rovině XY (a), v rovině XZ (b) [9]

Hustota energie laseru

Je v mnoha studiích považována za klíčový faktor, který ovlivňuje vlastnosti vyrobených součástí pomocí SLM. Udává průměrnou užitou energii na objem materiálu během pohybu laseru: [7]

$$E = \frac{LP}{LS \cdot h \cdot t}, [J \cdot mm^{-3}] \quad (1)$$

,kde LP je výkon laseru [W], LS je rychlost pohybu laseru [$mm \cdot s^{-1}$], h je šrafovací vzdálenost [mm] a t je tloušťka vrstvy [mm].

Při pulzním módu laseru lze rychlost pohybu vyjádřit jako podíl vzdálenosti dvou po sobě jdoucích zásahů laseru (point distance) a době působení laseru (exposure time) [10].

Ve studii [22] použili výpočet hustoty energie laseru jednoho návaru, kde místo se šrafovací vzdáleností počítali s průměrem laserového paprsku.

$$E = \frac{LP}{LS \cdot d}, [J \cdot mm^{-2}] \quad (2)$$

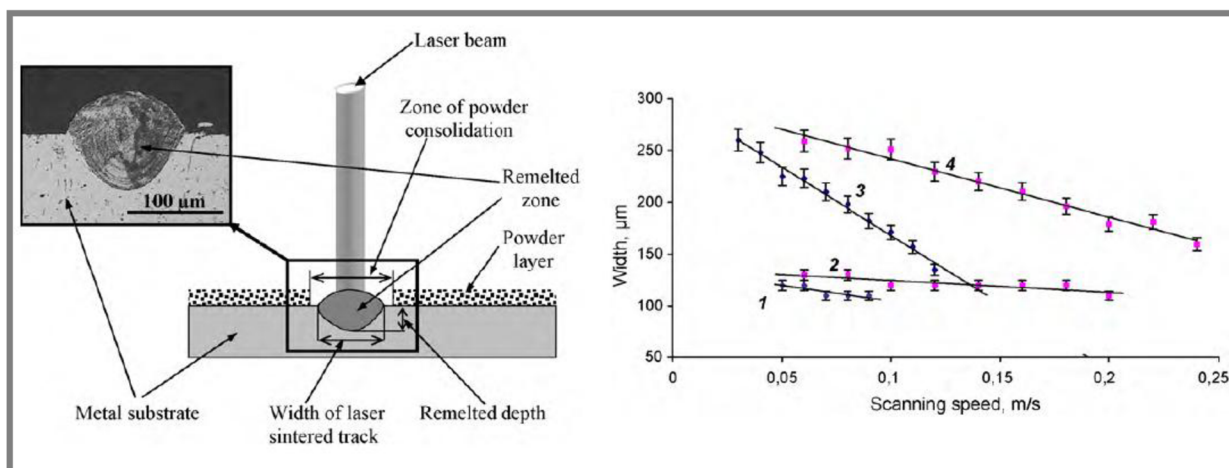
Další vlivy na výrobu

Značný vliv na SLM proces mají vlastnosti kovového prášku. Jeho chemické složení, mikrostruktura, velikost a tvar částic, tekutost a chování prášku při nanášení [1]. Dále ovlivňuje druh atmosféry v komoře, předehřátí nebo pomalé ochlazování součásti, případně typ podpor, a jejich správné umístění.

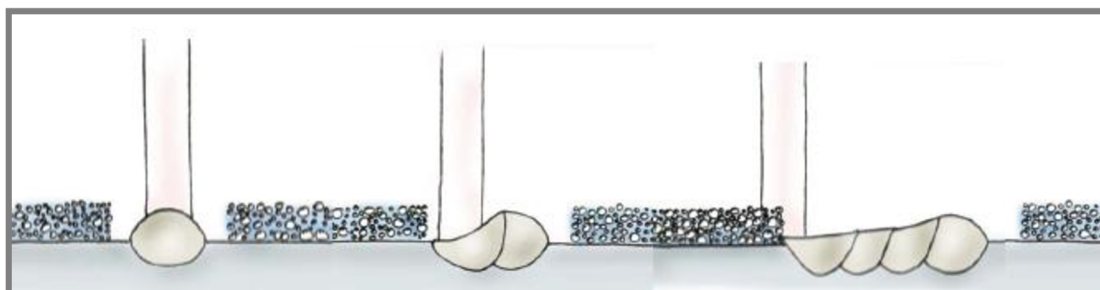
2.3 Studie procesních parametrů

Základem procesu SLM je tavení materiálu laserem buď na podkladu, nebo na předchozí vrstvě. Tato operace se opakuje dokola, celým procesem výroby součásti, a proto je kvalita samostatného návaru velice důležitá. Kvalitou návaru se myslí, jaký tvar bude mít jeho průřez a jak moc bude přichycen k předchozí vrstvě. Toto závisí převážně na hustotě energie, kterou dodáme do materiálu, tzn. na výkonu laseru a rychlosti pohybu laseru. Na Obr. 2-5 je zobrazen průřez návaru a porovnání šířek návaru a zóny zpracovaného prášku v závislosti na rychlosti pohybu laseru [11].

2.3

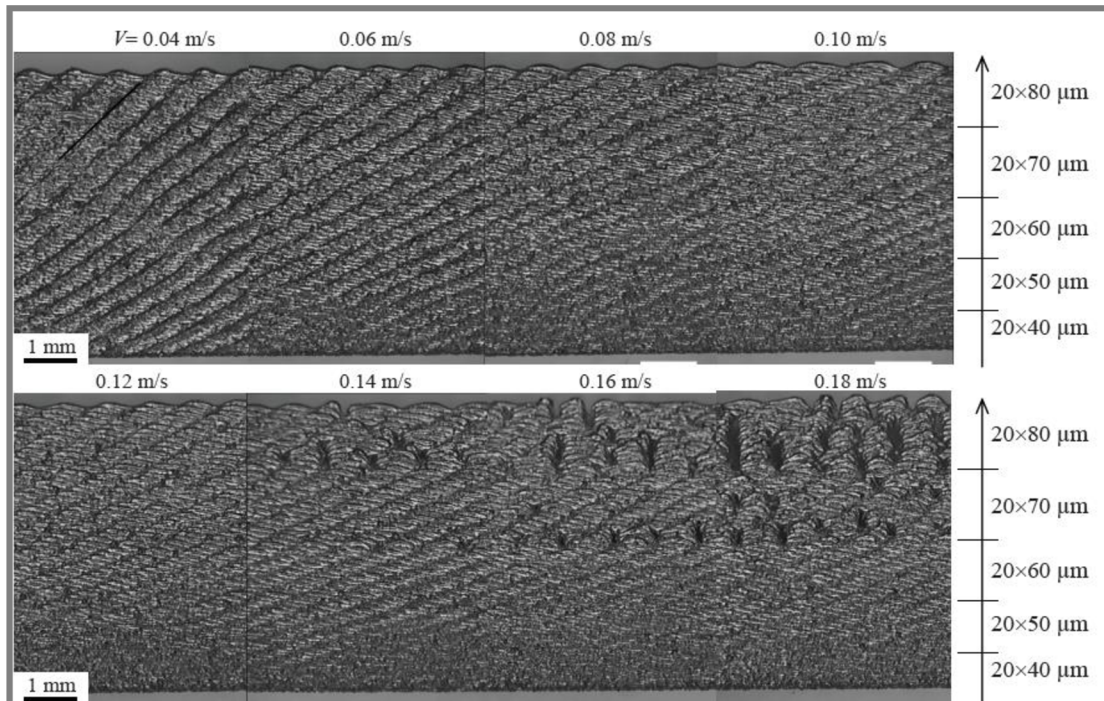


Obr. 2-5 Průřez návaru (vlevo), Porovnání šířek samostatného návaru (1-2) a zóny zpracovaného prášku (3-4), tloušťka vrstvy je 50 μm, výkon laseru je 25W (1 a 3) a 50W (2 a 4) [11]



Obr. 2-6 Schéma redukce zóny zpracovaného prášku při SLM [12]

Při prvním přejezdu, laser reaguje přímo s práškem. Následující návar je ovlivněn redukcí zóny zpracovaného prášku a také reakcí s předchozím návarem (Obr. 2-6). Tvorbou plochy se v jedné ze svých studií zabýval **Yadroitsev a kol.** [12]. V této studii také testoval vliv tloušťky vrstev a rychlosti pohybu laseru na povrch stěny, tato stěna měla tloušťku jednoho návaru. S výkonem laseru 50 W zkoušel osm rychlostí laseru, u každé rychlosti navyšoval po dvaceti vrstvách tloušťku, Obr. 2-7.



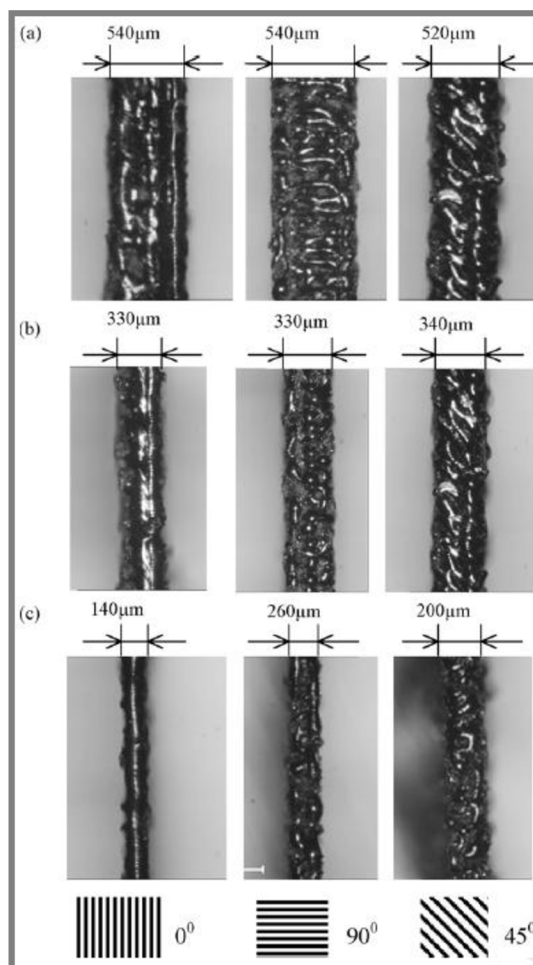
Obr. 2-7 Tenké stěny z nerezové oceli 316L [12]

U stěn vyrobených rychlostí 0,04 – 0,06 m/s je povrch drsný. Tyto nepřesnosti jsou výsledkem nepravidelnosti a nepřesnosti jednotlivých návarů, z důvodu přebytku energie. Při rychlosti 0,14 m/s a tloušťce 70 μm a výš, se začínají objevovat nepravidelné póry. Při zvyšující se rychlosti se póry stávají častější, větší a začínají se objevovat i v nižších vrstvách.

V jiné práci **Yadroitsev a kol.** [13] zjistil, že v prvních vrstvách, při stejných parametrech, se samostatný návar formuje hůře než ve vyšších vrstvách. Vysvětlením je, že tepelná vodivost plného materiálu podložky je vyšší než prášku a s rostoucí vzdáleností se snižuje jeho vliv.

Také se v této studii věnoval strategii při stavbě tenkých stěn. Byly aplikovány tři strategie šrafování na stěnách s tloušťkami 400 μm , 200 μm , 100 μm , dlouhých 20 mm a vysokých 5 mm. Materiálem byl prášek nerezové oceli 904L, kde částice měly z 95% menší velikost než 20 μm . Dalšími parametry jsou: výkon laseru 50 W, rychlost pohybu laseru 0,14 m/s, tloušťka vrstvy 50 μm a šrafovací vzdálenost 60 μm . Stěny se strategiemi a tloušťkami jsou zobrazeny na Obr. 2-8.

Jak je vidět, nejmenší dosáhnutá tloušťka stěny je 140 μm (CAD data 100 μm), která je dána šířkou jednoho návaru. Ze studie vyplývá, že optimální strategie pro tvoření takto tenkých stěn je podélná. Přesnost stěn je velmi závislá na šířce návaru a šrafovací vzdálenosti. U příčné a šikmé strategii mohou hrát roli další nastavení laseru.



Obr. 2-8 Pohled ze shora na tenké stěny vyrobené pomocí strategie: podélné (0°), příčné (90°) a šikmé (45°) s tloušťkami: a) $400 \mu\text{m}$, b) $200 \mu\text{m}$, c) $100 \mu\text{m}$ [13]

Spierings a kol. (2010) [14] porovnávali 3 nerezové prášky s rozdílnou distribucí velikostí částic. U každého z nich použili dvě tloušťky vrstev, $30 \mu\text{m}$ pro optimalizování kvality povrchu a $45 \mu\text{m}$, která může být použita pro zlepšení produktivity. V jedné části hledali maximální vhodnou rychlost pohybu laseru, a proto bylo použito maximálního výkonu (104 W). U těchto vzorků poté hodnotili kvalitu povrchu a hustotu materiálu. Vyrobili také vzorky pro mechanické testování, kde zkoušeli orientaci vzorku vůči stavěcí ploše ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$).

Obecně platí, že menší částice se lehčeji roztaví, a tím lze zlepšit hustotu součásti, produktivitu a kvalitu povrchu. V důsledku můžeme očekávat lepší mechanické vlastnosti. Na druhou stranu, při použití větších částic lze získat větší tažnost.

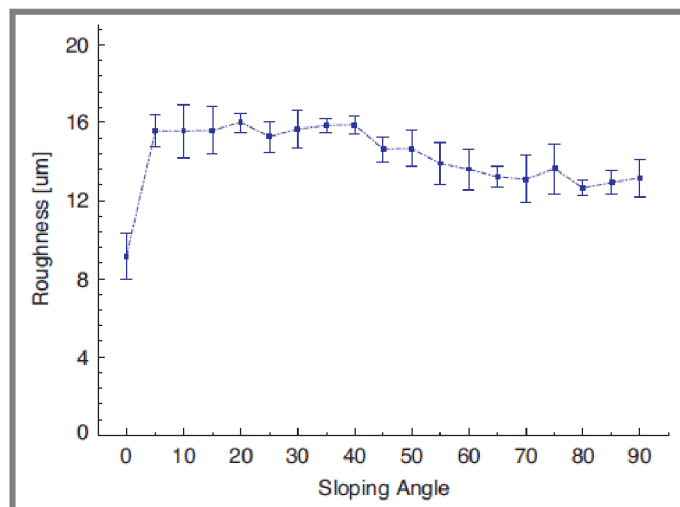
Částice materiálu po tavení tvoří dendritická zrna. Testovací vzorek, který byl tvořen vleže a zrna měl kolmo na nositelku síly při mechanickém testu, vykazoval lepší výsledky. U vzorku tvořeného nastojato byly zrna rovnoběžně a vykazovaly výsledky větších zrn, tzn. slabší výsledky. Pro $30 \mu\text{m}$ vrstvu je pokles hodnot $9.6 - 22.2\%$ ($R_{p0.2}$) a $5.8 - 25\%$ (R_m).

Strano G. a kol. (2012) [15] analyzovali drsnost nakloněných ploch součásti. Vyrobili testovací součást (Obr. 2-9) a vytvořili model výpočtu pro predikci drsnosti povrchu. Model byl úspěšně potvrzen měřením drsnosti na testovací součásti.



Obr. 2-9 Součást pro testování drsnosti nakloněných ploch [15]

Na Obr. 2-9 je zobrazena závislost naměřené drsnosti na úhlu naklonění plochy. Ve studii jsou popsány příčiny drsnosti. Kdy u nižších úhlů je hlavní příčinou schodovitý efekt. Tento efekt se postupem k vertikální poloze ztrácí, na druhou stranu se zvyšuje hustota částečně přichycených částic.



Obr. 2-10 Závislost naměřených hodnot drsnosti na úhlu naklonění [15]

Guan a kol. (2012) [8] při konstantním výkonu laseru (200 W) a rychlosti pohybu laseru (250 mm/s) testovali procesní parametry jako: tloušťka vrstvy, míra překrytí, úhel šrafování a směr stavění vrstev.

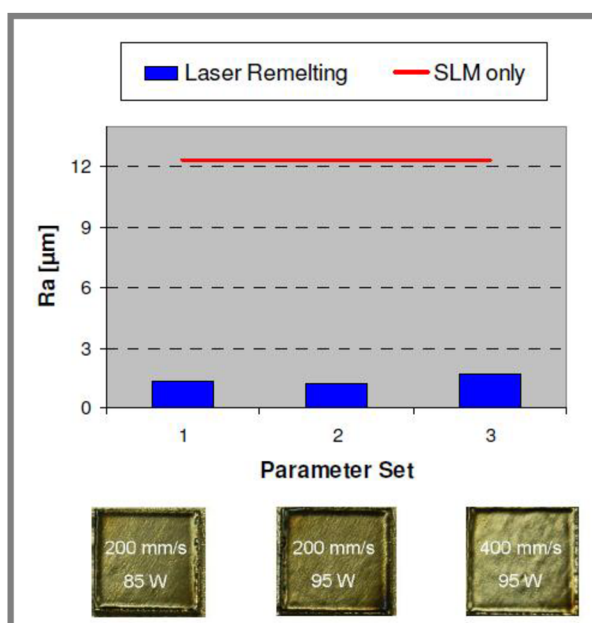
Zjistili, že tloušťka vrstvy má velký vliv na kvalitu povrchu, ale mechanické vlastnosti vzorků, s tloušťkami vrstev 20, 30 a 40 μm, byly téměř bez rozdílu.

Tahové zkoušky vzorků s odlišnou orientací součásti dokazují anizotropii, která byla zmíněna i ve studii Spieringse [14], avšak výsledky se navzájem plně nepotvrzují.

Nebyl nalezen žádný vztah mezi tahovými vlastnostmi a mírou překrytí. Výsledky měly podobné mikrostruktury bez defektů.

Vzorek s úhlem šrafování 105° vykazoval nejlepší tahové vlatnosti. Tento úhel měl z použitých možností největší interval opakování vrstev, pro 105° se bude opakovat každá 25. vrstva. To zlepšilo izotropii mikrostruktury a snížilo koncentraci napětí.

Kruth a kol. (2010) [16] ve své studii mimo jiné zkoumali i vliv re-meltingu (opakované vyšrafování laserem, před nanesením další vrstvy prášku) na drsnost povrchu vrchní vrstvy. V grafu jsou zobrazeny zlepšení drsnosti pro tři druhy výrobních parametrů. Použitým materiálem byla nerezová ocel 316L. Nejpříznivější výsledky byly dosaženy s použitím malé skenovací vzdálenosti ($20\ \mu\text{m}$) společně s parametry uvedených v popisu grafu, které byly použity pro re-melting.



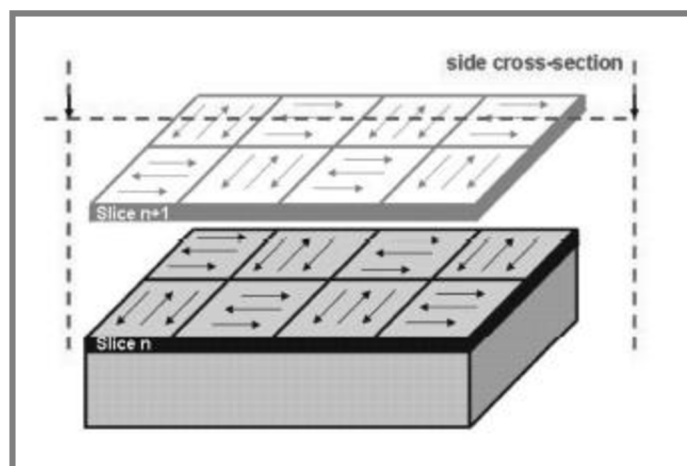
Obr. 2-11 Zobrazení zlepšení drsnosti povrchu po re-meltingu [16]

Po použití re-meltingu na povrch vzorku se hodnota Ra zmenšila z $12\ \mu\text{m}$ na cca $1,5\ \mu\text{m}$. Vliv na tuto změnu má i velmi malá skenovací vzdálenost. Studie se zabývá pouze re-meltingem na vrchní ploše vzorku, která pro tuto práci není tak zásadní jako boční plocha. Drsnost boční plochy není tak ovlivněna skenovací vzdáleností, jako tloušťkou vrstvy, kterou nelze tak jednoduše měnit. Výsledky drsnosti boční plochy by byly značně horší, převážně díky přichycování částic okolního materiálu.

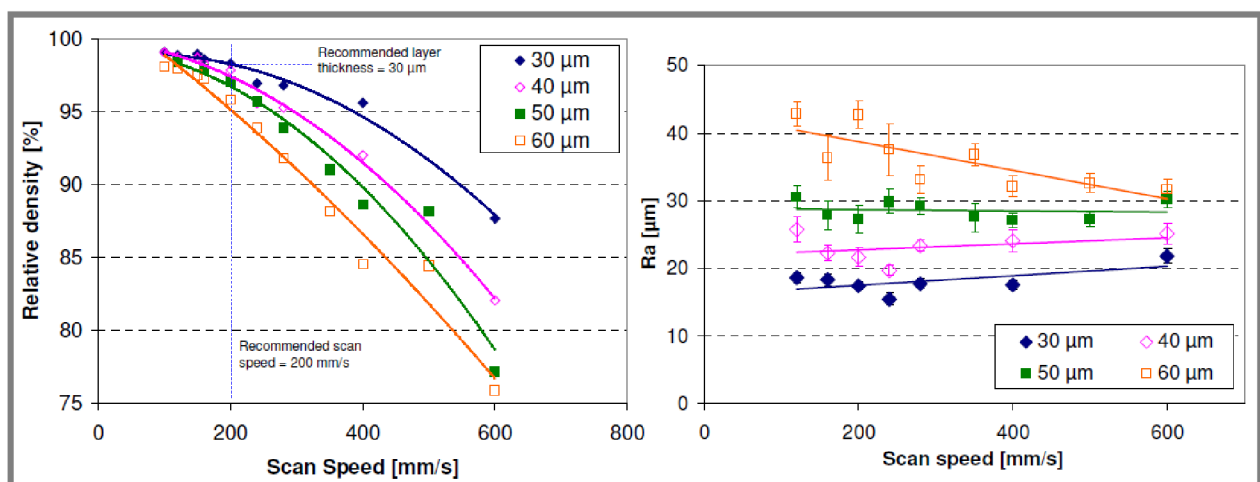
2.4 Studie procesních parametrů k danému materiálu

Kruth a kol. (2005) [17] publikoval první studii, která se zabývala zpracováním 18Ni maraging oceli. Porovnávali kvalitu výroby několika SLM zařízení s různými materiály. Daný materiál byl vyráběn na zařízení od firmy Concept laser, všechny podrobnosti ale o výrobním procesu neuvědli. Na výsledcích je vidět, že v době publikace zpracování daného materiálu ještě nebylo plně zvládnuto. Při testování rozměrové přesnosti se nepovedlo postavit stěnu o tloušťce 0,5 mm a 1mm stěna měla reálnou tloušťku 1,23 mm.

Yasa a kol. (2010) [18] zkoumali vliv SLM parametrů na dosaženou hustotu, kvalitu povrchu a mechanických vlastností u 18Ni maraging oceli. Experiment byl vykonán při použití maximálního výkonu laseru (~105 W), šrafovací vzdálenost byla zvolena tak, aby se rovnala 70% průměru paprsku laseru. Aby byly minimalizovány teplotní gradienty a teplotně indukované napětí, jednotlivé vrstvy byly rozděleny na sektory $5 \times 5 \text{ mm}^2$, které byly taveny v náhodných sekvencích. Směry laseru v sousedících sektorech byly vůči sobě v pravém úhlu. Tato „ostrůvková“ tavící strategie je zobrazena na Obr. 2-12. Část výsledků ze studie je zobrazena na Obr. 2-13.



Obr. 2-12 Schéma „Ostrůvkové“ šrafovací strategie [19]

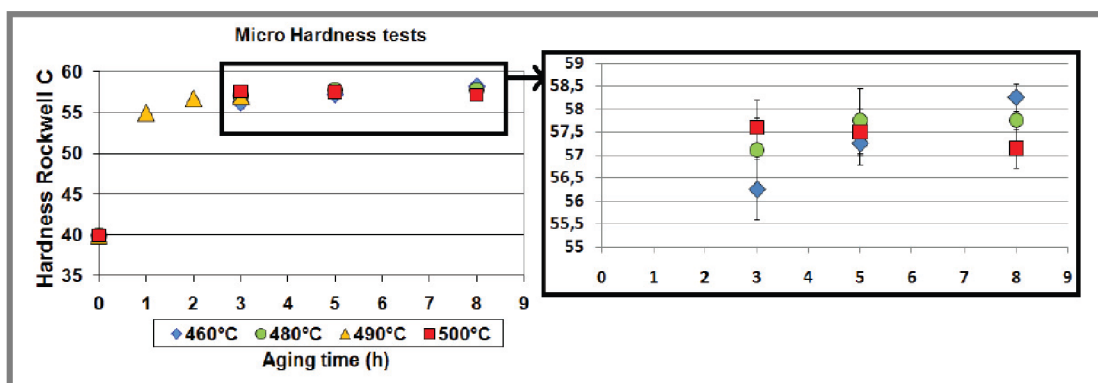


Obr. 2-13 Závislost relativní hustoty a drsnosti povrchu na rychlosti skenování a tloušťce vrstvy [18]

Je vidět, že hustota je velmi závislá na rychlosti pohybu laseru, zatímco drsnost povrchu je závislá spíše na tloušťce vrstev.

Ve studii také porovnávali vliv re-meltingu na relativní hustotu, mikro-tvrdotu a čas. Kde zjistili určité zlepšení za cenu značného zvýšení času výroby. Například pro „Ostrůvkový“ re-melting se zvýšila relativní hustota z 99.15 na 99.41%, ale čas se zdvojnásobil.

V další studii **Yasa a kol.** (2011) [20] ukázali, že rychlost pohybu laseru a tloušťka vrstvy nemá značný vliv na mikro-tvrdotu. Dále byly vyrobeny vzorky pro tepelné zpracování. Parametry výroby byly zvoleny takové, aby vzorky měly maximální hustotu. Tloušťka vrstvy byla zvolena 30 μm , rychlost laseru 150 mm/s a šrafovací vzdálenost 112 μm (62% průměru paprsku laseru). Vzorky byly zahřívány v peci s N_2 atmosférou a chlazeny vzduchem. S cílem získat maximální hustotu materiálu u vzorků pro mechanické testy, byla každá vrstva tavena dvakrát (re-melting).



Obr. 2-14 Mikro-tvrdotu podle Rockwella v závislosti na teplotě a době vytvrzování [20]

Optimální hodnoty pro vytvrzování byly zvoleny 5 hodin při teplotě 480 °C.

Při porovnání mechanických vlastností kovaného vzorku a vzorku, vyrobeného pomocí SLM (Obr. 2-15) je vidět, že samostatný SLM proces poskytuje vyšší pevnost a tvrdost na úkor pružnosti. To je způsobeno přirozeným vytvrzováním při procesu, kdy u materiálu dochází k rychlému zahřátí na vysokou teplotu, a poté k rychlému ochlazení. SLM vyprodukované vzorky po vytvrzování vykazují nízké hodnoty tažnosti a velmi křehké chování.

$\bar{x} \pm s$	E	$R_{p0.2}$	R_m	$\varepsilon_{\text{break}}$	HRC
	GPa	MPa	MPa	%	
SLM-produced	163 ± 4.5	1214 ± 99	1290 ± 114	13.3 ± 1.9	39.9 ± 0.1
SLM + aging (5h, 480°C)	189 ± 2.9	1998 ± 32	2217 ± 73	1.6 ± 0.26	58 ± 0.1
Wrought	180	760-895	1000-1170	6-15	35
Wrought + aged	190	1910-2020	1951-2041	11	54

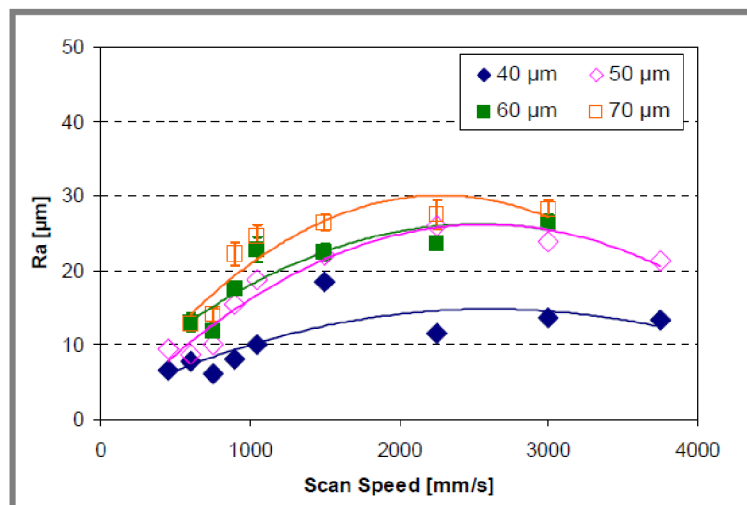
Obr. 2-15 Mechanické vlastnosti 18Ni maraging oceli, kované nebo vyrobené pomocí SLM [20]

V další studii **Yasa a kol.** (2012) [21] srovnávali výsledky hustoty a drsnosti povrchu z předchozí studie [18], ve které byly vzorky vyrobeny na zařízení M3 Linear od

Concept laser (100 W Nd:YAG laser), s výsledky vzorků vyrobených na EOSINT M270 (195 W vláknový laser).

Se stejnou šrafovací strategií EOSINT M270 dosáhl maximální relativní hustoty při nižší hustotě energie než M3 Linear. Jako možné vysvětlení uvedli menší průměr a vyšší kvalitu paprsku vláknového laseru.

Na Obr. 2-16 jsou zobrazeny výsledky drsnosti povrchu vrchní plochy v závislosti na tloušťce vrstvy a rychlosti pohybu laseru. Výkon laseru byl nastaven maximální 195 W. V porovnání s výsledky zařízení M3 Linear (Obr. 2-13) jsou tyto výsledky značně lepší. Je zde vidět trend, kdy vyšší hustota energie laseru vede k lepší struktuře povrchu.



Obr. 2-16 Závislost drsnosti povrchu na rychlosti pohybu laseru u zařízení EOSINT M270 [21]

V předchozích studiích byly pozorovány vměstky oxidů, jejíž negativní vliv na mechanické vlastnosti dal důvod k další práci **Yasa a kol.** [19]. V této práci se zaměřili na vysvětlení tvorby velkých oxidových vměstků hliníku a titanu ve vzorcích z 18Ni maraging oceli. Experiment proběhl se stejnými parametry jako v předchozí studii [20], buď s čistě dusíkatou atmosférou, nebo kyslíkem obohacenou dusíkatou atmosférou.

Zjistili, že atmosféra při zpracování daného materiálu má významnou roli a s větším obsahem kyslíku v N_2 atmosféře se zvyšuje množství oxidační vrstvy na vrchní vrstvě součásti. Vrstva je tvořena oxidy Al_2O_3 a převážně Ti_3O_5 , které tvoří i velké vměstky nepravidelného tvaru v součásti. Ty mohou také obsahovat částice prášku, plynové bubliny a malé žluté TiN částice, které se objevují i v oxidační vrstvě na vrchní vrstvě součásti. Oxidy jsou nepravidelného tvaru (velikosti 10–100 μm) a koncentrují se blízko hranic tavenin.

Podobně jako Yasa a kol. [18, 20] vykonali experiment **Campanelli a kol.** [22]. Použili stejnou šrafovací strategii, kde komora byla naplněna dusíkem a počáteční hodnota kyslíku se zredukovala na 0.8%. Experiment dopadl se stejnými závěry jako předchozí, s mírně nižšími hodnotami. Rozdíl ve výsledcích může být způsoben mnoha vstupními podmínkami SLM procesu. Velký vliv na lepší výsledky ve studii [20] může mít použití re-meltingu při výrobě vzorků. Případně trochu odlišné tepelné zpracování. V této studii bylo použito vytvrzování při teplotě 490 °C po dobu 6 hodin.

V jiném článku se **Campanelli a kol.** [23] věnovali zjišťování možností SLM procesu s použitím 18Ni maraging oceli. Zkušební vzorek (Obr. 2-17) byl navrhnout tak, aby otestoval rozměrovou přesnost SLM procesu při nastavení parametrů k dosažení co největší hustoty. Při rychlosti pohybu laseru 180 mm/s a výkonu laseru 100 W je dosaženo hustoty 8,0 g/cm³, přičemž porozita dosahuje přibližně 0,01%.

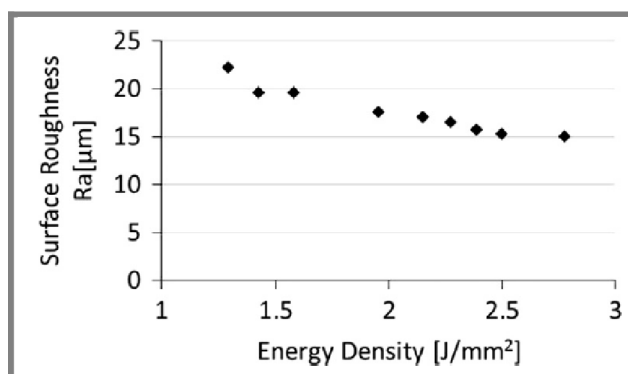


Obr. 2-17 Zkušební vzorek pro testování rozměrové přesnosti [23]

Maximální rozměrová chyba u stěn postavených na ploše byla 20% pro tloušťku 0,2 mm a minimální 1,33% pro tloušťku 6 mm. U stěn postavených uvnitř prvku byla max. chyba 15% u stěny 0,2 mm a min. chyba 1,17% u stěny s tloušťkou 6 mm.

Casalino a kol. [24] zkoumali vliv hustoty energie laseru na relativní hustotu, mechanické vlastnosti a drsnost povrchu vzorků vyrobených technologií SLM z 18Ni maraging oceli. Geometrií vzorků byl kvádr o rozměrech 15x15x10 mm³. Byla použita ostrůvková strategie šrafování s tím, že u nové vrstvy byla šablona šrafování posunuta o 1 mm v obou směrech roviny xy a celá byla pootočena o 45° vůči pracovní ploše, aby byla snížena možnost střetu břitu nanášedce (recoater blade) s hranicemi jednotlivých sektorů.

S rostoucí hustotou energie se zvyšuje relativní hustota vzorků nad 99% a snižuje drsnost povrchu (viz Obr. 2-18). Studie potvrdila, že tvrdost, pevnost a prodloužení se zvyšuje společně s relativní hustotou materiálu.



Obr. 2-18 Drsnost povrchu v závislosti na hustotě energie laseru [24]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1

3.1 Smysl a přínos práce

Výrobce pneumatik Continental začíná výrobu komplexních lamel pomocí technologie SLM.

Hlavní částí této práce je srovnání kvality výroby lamel na dvou SLM strojích, a to PXL (Phenix systems) a M2 Cusing (Concept laser). V práci budou zvoleny vzorky pro porovnání, ty poté projdou stejným výrobním procesem, až na SLM výrobu, ve které budou na obou zařízeních vzorky vyrobeny s doporučenými parametry od výrobců. Výsledná kvalita bude porovnávána na základě rozměrové přesnosti, struktury povrchu a materiálových vlastností.

Lamely jsou specifické tím, že výkresová dokumentace obsahuje jen základní rozměry jako délku, tloušťky a výšky. Ostatní rozměry, jako třeba poloměry zakřivení, nejsou zakótovány a nemají ani stanoveny výrobní tolerance. Přesnost geometrie kotvící části lamely (část určena pro zalití) je zkoušena manuálním vkládáním do drážky dřevěného modelu. Geometrie dezénové části lamely (funkční část ve formě) je při kontrole hodnocena pouze vizuálně.

V této práci bude rozměrová přesnost lamel měřena pomocí 3D optické digitalizace a z výše uvedených důvodů bude nutné navrhnout metodiku hodnocení geometrie lamel.

Lamely vyrobené technologií SLM mají dva hlavní nedostatky, a tím je rozměrová přesnost nedostatečné kvality a vysoká drsnost povrchu. Čím větší je drsnost lamel, tak tím větší tangenciální síly vznikají při vyjímání pneumatiky z formy.

Concept Laser, výrobce zařízení M2 Cusing, podniká testy procesních parametrů, s cílem zlepšit kvalitu SLM výroby lamel. Problém je, že jimi poskytnuté šablony pro výrobu nejsou transparentní. Continental má zájem dělat vlastní vývoj, aby získal vlastní „know-how“ a nebyl závislý na dodavateli zařízení. Z tohoto důvodu bude další částí této práce analýza vlivu stavěcích parametrů na strukturu povrchu.

3.2

3.2 Rozbor studií

Výroba pomocí technologie SLM je velice komplexní proces, který je lehkou ovlivnitelný mnoha vstupními parametry a podmínkami. Vhodnost výrobních parametrů závisí na použitém materiálu, SLM stroji a také na tvaru výsledné součásti.

Materiál

Jak uvádí studie [14], distribuce velikosti částic prášku má velký vliv na výslednou hustotu součásti, kvalitu povrchu a produktivitu. Kromě velikosti zrn prášku má na výsledné vlastnosti výrobku vliv i např. chemické složení, tvar zrn nebo tekutost pro spolehlivější nanášení [1]. Výroba probíhala s použitím kovového prášku martenzitické vytvrditelné oceli 1.2709 od dvou dodavatelů. Ze studií je zřejmé, že materiál má podstatný vliv na výsledný produkt, a proto byly provedeny analýzy materiálů, pro zjištění kvality jednotlivých prášků, případně možnosti jejich zaměnitelnosti.

Rychlost pohybu a výkon laseru

Vhodně zvolená kombinace rychlosti pohybu a výkonu laseru, resp. hustoty energie laseru, má základní vliv na kvalitu vyráběné součásti. Ovlivňuje nejen pórovitost, ale má i zásadní vliv na kvalitu povrchu [12, 18, 24].

Ve studiích s daným materiálem [18, 21, 24] se věnovali testování rychlosti a výkonu laseru za účelem zlepšení struktury povrchu. Výsledky studií naznačují, že vyšší hustota energie, tedy lepší protavení materiálu, vede k lepší struktuře povrchu. Ve studii [21] s použitím výkonného vláknového laseru dosahují i relativně uspokojivých výsledků. Ve všech studiích je ale drsnost měřena na vrchní ploše vzorku. Pro tuto práci jsou důležité drsnosti bočních ploch, které mají oproti vrchním trochu odlišný mechanismus tvoření. Vysoká hustota energie laseru může vést k nekonzistentnímu návaru a také k částečnému navařování okolního práškového materiálu.

Tloušťka vrstvy

Podle studií [8, 12, 18, 21] platí, čím menší tloušťka vrstvy, tím lepší kvalita povrchu. Na druhou stranu má tento parametr velký vliv na produktivitu. Např. při změně tloušťky vrstvy z 30 na 40 μm , se stejnými podmínkami, je čas pohybů laseru a nanášení o 25% nižší, bez významného snížení hustoty [18]. Hodnota tloušťky vrstvy pro tento materiál byla použita 40 μm , doporučená od výrobce. Menší tloušťka vrstvy by znamenala nežádoucí zvýšení výrobního času, a také by to znamenalo velkou změnu v nastaveních výrobního procesu.

Strategie šrafování

Ve studiích [18–23] se pro daný materiál používá „ostrůvková“ strategie šrafování.

Ve studiích neřešili drsnost povrchu bočních stran, a tak nijak nepracovali s použitím kontury ve šrafování. Ta bude mít zásadní vliv na strukturu povrchu. Vezmeme-li v úvahu, že lamely jsou malé a tenkostěnné, tak použití „ostrůvkové“ strategie šrafování, jako výplně plochy, je zbytečné a mohlo by působit spíše negativně na kvalitu povrchu. Metoda je výhodná převážně u větších součástí ke snížení vnitřního pnutí a dosažení vysoké hustoty materiálu.

U tenkých stěn dochází k velkým rozměrovým chybám [13, 23]. Na tloušťku stěny má velký vliv šířka jednoho návaru, daná hustotou energie, a míra překrytí, resp. vzdálenost vektorů šrafování.

Podobný problém, jako se snížením tloušťky vrstvy, je s použitím re-meltingu, který sice zlepšuje mechanické vlastnosti, ale zdatelně zvyšuje čas výroby [18]. Ve studii [16] zjistili, že re-melting může zdatelně zlepšit drsnost vrchní plochy součásti. Jak bylo zmíněno výše, tak boční a vrchní plochy mají odlišný přístup tvoření. Avšak, použití re-meltingu pouze u kontury s nižší hustotou energie, by mohlo vést k užšímu návaru s nižší drsností povrchu a za minimálního zvýšení výrobního času.

Orientace součásti

Orientace součásti při stavění má značný vliv na mechanické vlastnosti [8, 14], ty ale nejsou hlavním předmětem této práce. Podle studie [15], jakékoli natočení lamely z vertikálního postavení by znamenalo vyšší drsnost povrchu, proto budou vzorky stavěny klasicky kolmo na základní desku.

Tepelné zpracování (TZ)

Doporučené TZ od výrobců pro daný práškový materiál je precipitační vytvrzování. CL doporučuje zahřátí rychlostí 100 °C/hod na 540 °C. Udržet teplotu 6–10 hodin a poté ochlazovat rychlostí 100°C/hod. Výrobce PS doporučuje teplotu 490 °C po dobu 6 hodin. Podobné TZ doporučují i ve studii [20], kde jako optimální kombinace času a teploty byla zvolena 5 hod 480 °C.

3.3

3.3 Cíl diplomové práce

Cílem práce je experimentální studium přesnosti výroby lamel pro formy pneumatik vyráběných technologií SLM užitím optické digitalizace. Výstupem práce bude srovnání přesnosti výroby lamel dvou výrobních zařízení a analýza vlivu stavěcích parametrů na strukturu povrchu.

Výstupem práce je také koncept publikace, která se bude zabývat srovnáním zpracování daného materiálu na dvou konkurenčních strojích.

Dílčí úkoly (3 fáze DP):

- 1. Návrh metodiky hodnocení geometrie lamel**
- která bude použita v hodnocení kvality
- 2. Srovnání kvality výroby SLM zařízení PXL a M2 Cusing**
- Vytvořit zprávu pro Continental
- 3. Testování procesních parametrů**
- s cílem zlepšení kvality povrchu lamel

4 MATERIÁL A METODY

4

4.1 SLM zařízení

4.1

V této práci byly použity tři zařízení SLM.

4.1.1 PXL

4.1.1

PXL od firmy Phenix Systems (dále jen PS) je prvním ze zařízení, u kterého bude porovnávána kvalita výroby. Společnost PS byla odkoupena firmou 3D Systems, pod níž má zařízení název ProX 300.



Obr. 4-1 Phenix PXL [25]

PXL je zařízení pro výrobu trojrozměrných dílů pomocí tavení práškového materiálu laserem. Disponuje vláknovým laserem o maximálním výkonu 500 W a vlnové délce 1070 nm. Průměr laserového paprsku je 70–80 μm . Rozsah tloušťky vrstvy je 10–50 μm a stavební prostor má rozměry 250 x 250 x 300 mm. Zařízení je schopno vyrábět díly z velkého množství kovových i keramických materiálů. [25]

4.1.2 M2 Cusing

4.1.2

M2 Cusing od firmy Concept Laser (dále jen CL) je druhé zařízení pro porovnání kvality výroby. Podobně jako PXL, M2 Cusing používá vláknový laser s vlnovou délkou 1070 nm, avšak s menším maximálním výkonem 400 W. Průměr laserového paprsku bez vertikálního posunu bodu zaostření (focus move 0) je cca 80 μm . Rozsah tloušťky vrstvy je 20–80 μm a stavební prostor má rozměry 250 x 250 x 280 mm [26]. I když je M2 Cusing stejného typu jako PXL, tak mají velmi odlišně řešené funkce, např. nanášení materiálu, recyklace prášku, jinak řešeny pracovní komory, atd.



Obr. 4-2 M2 Cusing [26]

4.1.3

4.1.3 SLM[®] 280^{HL}

Z důvodu nedostatku výrobních kapacit v Continentalu, proběhlo počáteční testování výrobních parametrů na univerzitním zařízení SLM[®] 280^{HL} od firmy SLM Solutions.



Obr. 4-3 SLM 280HL [27]

Zařízení disponuje YLR-vláknovým laser s výkonem 400 W. Rozsah tloušťky vrstvy je 20–75 μm . Průměr laserového paprsku bez vertikálního posunu bodu zaostření (focus offset 0) je přibližně 80 μm . Stavební prostor má rozměry 280 x 280 x 365 mm [27]. Zařízení je stejného typu jako předchozí s odlišně řešenými funkcemi.

4.2

4.2 Proces výroby lamel pro porovnání strojů

Utajeno...

4.2.1

4.2.1 SLM výroba

Utajeno...

4.2.2

4.2.2 Tepelné zpracování - Žihání

Utajeno...

4.2.3 Řezání

Utajeno...

4.2.3

4.2.4 Omílání

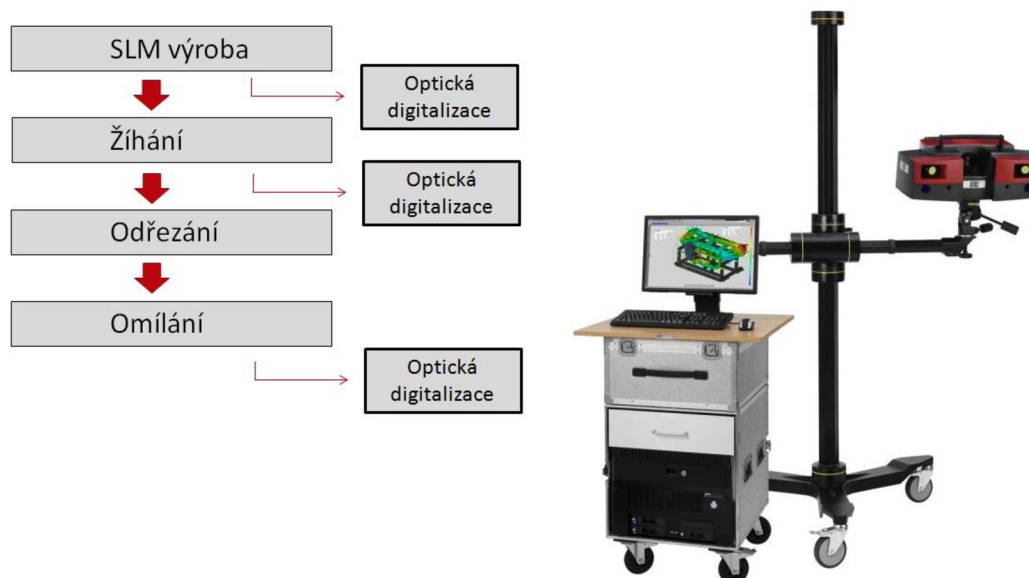
Utajeno...

4.2.4

4.3 Digitalizace a rozměrová přesnost lamel

4.3

Pro kvantitativní posouzení odchylek geometrie lamel vyráběných SLM procesem a srovnání kvality výroby zařízení PXL a M2 byly lamely digitalizovány pomocí optického skeneru ATOS (viz Obr. 4-4). S cílem identifikovat vliv jednotlivých výrobních kroků, probíhalo skenování 3x. Po SLM výrobě, po tepelném zpracování a po omílání. Před omíláním byly vzorky odřezány od základní desky na elektroerozivní drátové řezačce. Každý typ vzorku byl vyroben v počtu deseti kusů, aby bylo možné provést statistické hodnocení.



Obr. 4-4 Přehled zařazení analýzy odchylek tvaru ve výrobním procesu
Měřicí systém ATOS Triple Scan od firmy GOM [30]

4.3.1 Měřicí systém ATOS Triple Scan

4.3.1

ATOS je bezdotykový optický 3D skener firmy GOM určený pro nejrůznější aplikace. Vysoká výkonnost, velké rozlišení a široká flexibilita měřících objemů umožňují přesnou a efektivní kontrolu kvality výroby (Quality Control) [30]. Měřicí systém umožňuje přesné zachycení vnějšího povrchu součástí již od velikosti několika milimetrů s popisností 12 bodů/mm (pro použitý měřicí objem MV170). Přesnost skenovacího systému se pohybuje v řádu jednotek mikrometrů.

4.3.2 Optická digitalizace vzorků

4.3.2

Pro metodu optického skenování bylo třeba povrch vzorků zmatnit, aby se o něj neodrážely světelné paprsky. Pro zmatnění byl zvolen nástřik roztokem oxidu titaničitého, který oproti např. křídovému nástřiku vytváří tenčí vrstvu na povrchu, tedy méně ovlivňuje naměřená data. Tloušťka nanesené titanové vrstvy je přibližně 5 μm [31]. Nástřik byl u všech vzorků prováděn stejným způsobem, pro docelení

stejných tloušťek, aby chyba vnesena nástřikem byla na jednotlivých vzorcích stejná a nebyla by mezi nimi ovlivněna porovnatelnost.

Měření proběhlo s rozlišením 2 x 8 Mpx, se senzory MV170 (Měřený objem je 170 x 130 x 130 mm) a kalibrováním SO (small objects). S tímto uspořádáním je minimální měřená vzdálenost bodů 0,055 mm.

Vzorky před odřezáním byly skenovány se základní deskou na rotačním stole. Po odřezání mohly být vzorky skenovány samostatně na menším stolku s dvěma osami rotace, na kterém měřicí proces mohl probíhat víceméně automaticky. Pro skenování jednotlivých lamel byl pomocí 3D tisku vyroben podstavec (obrázek utajen). Při umístění referenčních bodů na zkosené hrany bylo možné skenovat vzorky pod větším úhlem pro lepší zachycení převislých hran. V podstavci byl uložen ocelový hranol s magnety, díky čemu bylo možné lamely jednoduše ustavit.

(obrázek utajen)

Po naskenování vzorku byla provedena polygonizace naměřených dat („point-cloud“) s nastavenou kvalitou *standard*. Vzniklá polygonální síť byla exportována ve formátu STL a vyhodnocení naskenovaných dat probíhalo v programu GOM Inspect V8. U všech dat byly pouze vymazány přebytečné oblasti, jinak na nich neprobíhal žádný další „post-processing“.

4.3.3

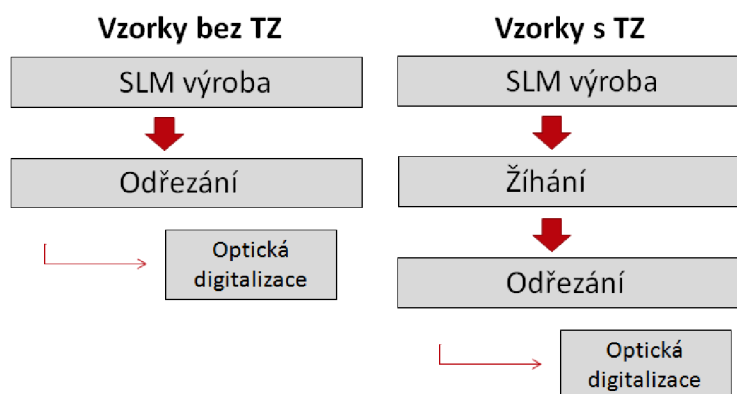
4.3.3 Vybrané vzorky pro porovnání strojů

Utajeno...

4.3.4

4.3.4 Vliv tepelného zpracování na rozměrovou přesnost

Vzorky v porovnání SLM zařízení jsou vždy před odřezáním tepelně zpracovány. Jelikož se vliv vnitřního pnutí na geometrii vzorku plně projeví až po odřezání, tak lze těžko od sebe rozlišit vliv SLM procesu a tepelného zpracování. Z toho důvodu byla uskutečněna vedlejší zkouška, kde byly na PXL vyrobeny vzorky pro stanovení vlivu tepelného zpracování (TZ) na rozměrovou přesnost lamel.



Obr. 4-5 Schéma postupu ve zkoušce vlivu TZ na rozměrovou přesnost

Na Obr. 4-5 je zobrazeno schéma této zkoušky. Pro stanovení vlivu TZ na rozměrovou přesnost byl jeden vzorek odřezán ihned po vyrobení bez tepelného zpracování. Stejný vzorek byl poté vyroben ještě jednou a byl odřezán až po TZ. U obou vzorků byly sledovány odchylky geometrie.

Utajeno...

4.3.5 Hodnocení geometrie lamel

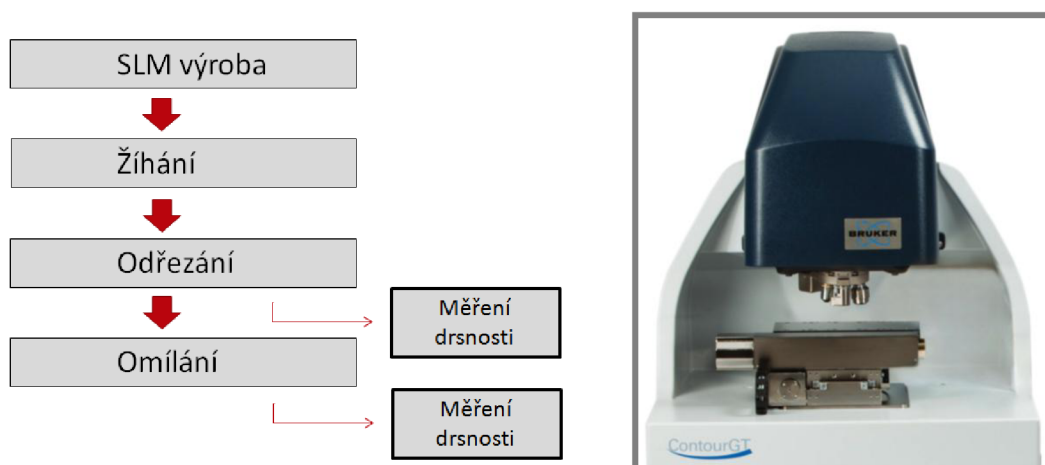
4.3.5

Utajeno...

4.4 Měření struktury povrchu lamel

4.4

Struktura povrchu lamel byla měřena pomocí 3D optického interferometru Bruker ContourGT-X8 (Obr. 4-6 vpravo). Cílem bylo srovnat kvalitu povrchů lamel z jednotlivých SLM zařízení a analyzovat vliv omílání na povrch lamel, proto byly vzorky naměřeny ve stavu bez omílání a po omílání.

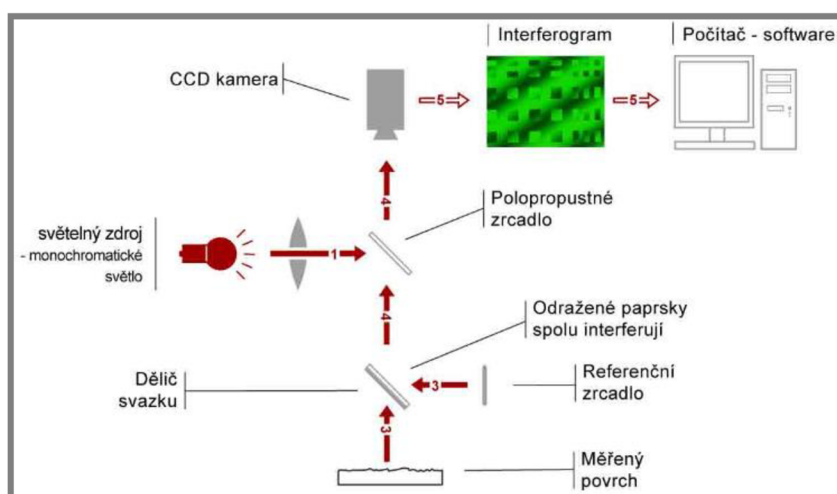


Obr. 4-6 Přehled zařazení analýzy struktury povrchu ve výrobním procesu 3D optický interferometr ContourGT-8X firmy Bruker [32]

4.4.1 Optický interferometr

4.4.1

Toto zařízení měří povrch pomocí interferometrie s řízenou změnou fáze. Využívá toho, že jednotlivé vlny světla se mohou sčítat a odečítat (interferovat). Zařízení používá monochromatické světlo, což znamená, že má jednu vlnovou délku. Princip je zobrazen na Obr. 4-7. Svazek světla se v děliči rozdělí na dva. Jeden se odrazí nazpět od měřeného povrchu, druhý od referenčního zrcadla a setkají se opět v děliči, kde interferují. Když se paprsky sečtou a vytvoří původní vlnu, tak víme



Obr. 4-7 Princip optické interferometrie [33]

v jaké výšce je daný bod povrchu. Výsledné paprsky z celého povrchu jsou zaznamenávány kamerou a vyhodnoceny softwarem jako interferogram. Při opakování s fázovým posuvem, tzn. změnou vzdálenosti referenčního zrcadla nebo měřeného povrchu, můžeme získat 3D strukturu povrchu.

4.4.2

4.4.2 Způsob měření na vzorcích

Měření probíhalo s objektivem se zvětšením 5x, s použitím zdroje světla *Green (narrow band)* a *treshold* byl nastaven na 5%.

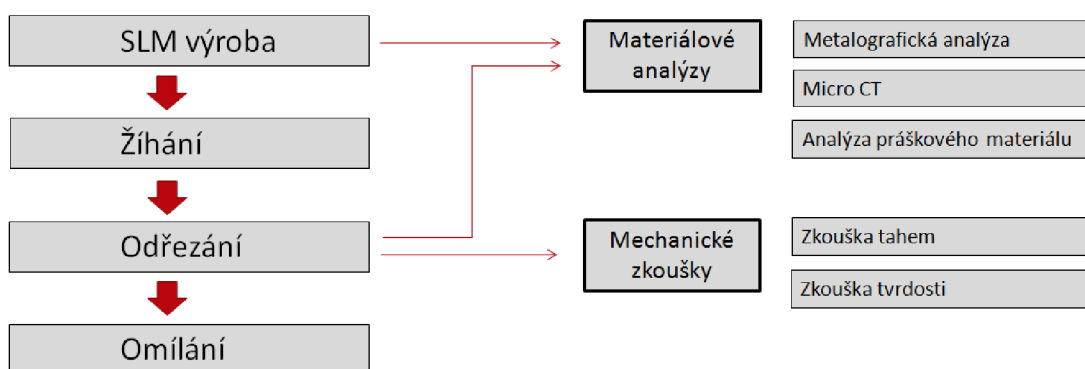
Naměřená plocha byla nejdříve v softwaru srovnána pomocí „*Terms removal*“. U většiny měření bylo použito nastavení *Tilt only*, jelikož se jednalo o rovinné plochy. U měření středních ploch na vzorku typu 2 bylo použito *Curvature and tilt*. Naměřené data málokdy pokrývají kompletně celou měřenou plochu, a proto pro grafické zobrazení byl použit „*Data restore*“ k dopočítání chybějících dat. S optimální intenzitou použitého světla měření dosahovalo 80–90% dat měřené plochy. Dále byl použit „*Gaussian regression filter*“ s nastavením „*Short wavelength Cutoff*“ na 2,5 mm pro drsnost $R_a < 10 \mu\text{m}$ a 8 mm pro $R_a > 10 \mu\text{m}$.

Utajeno...

4.5

4.5 Materiálové a mechanické analýzy

Pro komplexnější posouzení kvality výroby byla zvolena řada testů, které by v případě problému měly odhalit jeho možnou příčinu. Koncepce zkoušek je naznačena na Obr. 4-8. Analýza vstupního práškového materiálu dává základní představu o výsledném dílu a stabilitě SLM procesu. V případě odlišného chemického složení prášku je možné očekávat jiné mechanické vlastnosti nebo nutnost změny procesních parametrů. Nevhodné rozložení velikosti částic může vést ke špatnému nanášení prášku nebo zvýšené porositě dílů. Metalografická analýza dává základní představu o mikrostruktuře materiálu a v kombinaci s výsledky z mechanických zkoušek mohou ukázat na nevhodně zvolené tepelné zpracování nebo příčiny porušení materiálu.



Obr. 4-8 Přehled zařazení materiálových analýz ve výrobním procesu

4.5.1

4.5.1 Metalografická analýza

Pro metalografickou analýzu byly vybrány tři vzorky lamely typu 3. Od obou strojů byl vzat jeden vzorek přímo po SLM výrobě. A třetí vzorek byl vyroben na M2 Cusing a byl až z konce výrobního procesu, tedy tepelně zpracován.

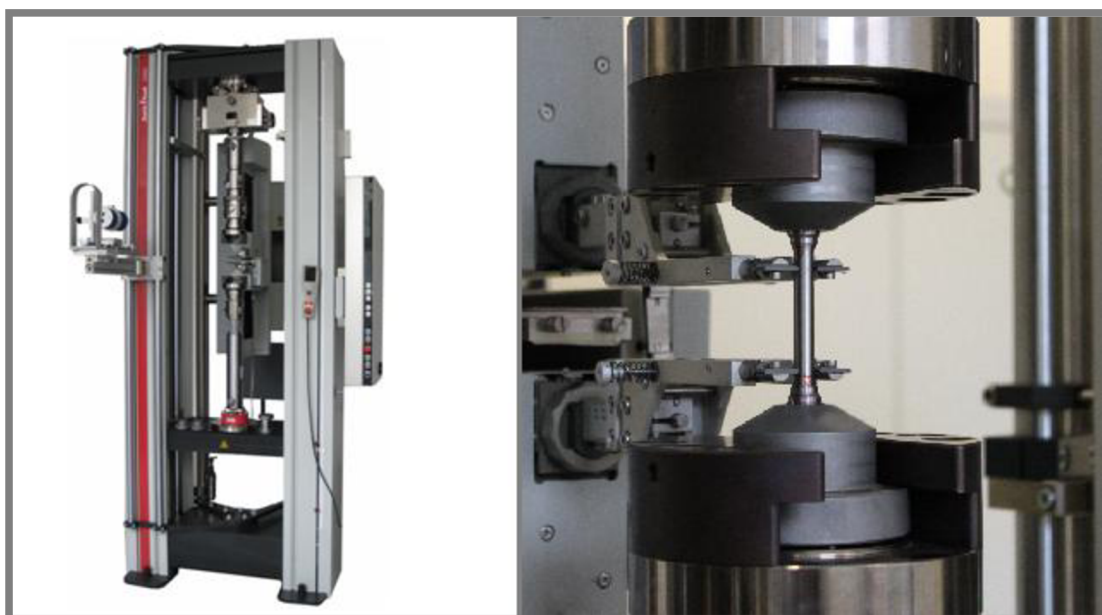
4.5.2 μ CT analýza

Pro určení relativní pórovitosti a identifikaci případných trhlin a dutin byla provedena mikrotomografická (μ CT) analýza 5 vzorků lamel. Jednalo se o 3 vzorky lamel typu 2 a dva vzorky lamel typu 1, přičemž jeden vzorek lamely typu 2 byl od konkurenčního dodavatele a ostatní vzorky reprezentovaly lamely vyrobené na zařízeních PXL a M2 Cusing. μ CT analýza byla provedena za použití laboratorního systému GE Phoenix μ CT L240, který je vybaven „mikroohniskovou“ (microfocus) rentgenovou trubicí s maximálním výkonem 300 kV/500W a vysoce kontrastním plochým detektorem DXR 250 s rozlišením 2048 x 2048 pixelů (velikost pixelů 200 x 200 μ m). Doba expozice byla 250 ms v každé z 2200 pozic. μ CT skenování bylo provedeno při urychlovacím napětí 130 kV a proudu 100 μ A na rentgence. Velikost voxelu u získaných objemů byla 25 μ m. Tomografická rekonstrukce byla provedena pomocí tomografického softwaru GE phoenix DATOS 2.0 3D. Vizualizace vzorků a analýza pórovitosti byly provedeny pomocí programu VG Studio MAX 2.2. Segmentace pórů je založena na proceduře využívající jednoduchého principu prahování pomocí automatického nástroje VG Studio. Tento nástroj určuje vrchol pozadí a materiální vrchol v histogramu a následně vypočítá hodnotu šedé odpovídající hranici hmotného materiálu.

4.5.3 Mechanické vlastnosti

Na obou SLM zařízeních byly vyrobeny tři válcové vzorky pro tahovou zkoušku, které poté byly tepelně zpracovány a obrobeny. Dále byly vyhotoveny výbrusy, na kterých byla provedena zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení ($F \approx 3$ N). Měření probíhalo na mikrotvrdoměru LECO LM 274 AT.

Zkouška tahem probíhala na trhacím stroji Zwick Z250 řady AllroundLine. Deformace byla během zkoušky snímána pomocí extenzometru MultiXtens (viz Obr. 4-9 vpravo). Testy byly vykonány dle normy ČSN EN ISO 6892-1 s předpětím 2 MPa. Rychlost tažení byla 1 mm/min, po překročení meze kluzu se zdvojnásobila.



Obr. 4-9 Trhací stroj ZwickZ250
Extenzometr MultiXtens

4.6

4.6 Použitý materiál

Pro výrobu vzorků v této práci byly použity dva typy práškového materiálu. Pro výrobu na PXL se používá materiál s označením ST2709B a pro M2 Cusing materiál s označením CL50WS. Oba materiály jsou obdobou jakostí 1.2709, DIN X3NiCoMoTi18-9-5, 18Ni maraging (300). Jedná se o vysoce pevnou, martenziticky vytvrditelnou ocel. Řadí se také mezi oceli pro práci za tepla.

4.6.1

4.6.1 Chemické složení

Analýza chemického složení byla provedena pomocí spektrometru ICP-OES Thermo iCAP 6500. Spektrometr využívá principu emise a následné detekce světelného záření ionizovaných prvků přítomných ve vzorku. Zdrojem iontů je argonová plazma. Jedná se o roztokovou metodu, pro kterou je nutné nejprve pevné vzorky převést do roztoku. Spektrometrie patří mezi běžně používané a přesné metody.

V Tab. 1 jsou zobrazeny chemické složení definované výrobcí a výsledky chemické analýzy nového prášku ST2709B.

Tab. 1 Chemická složení materiálů, uvedené výrobcí a naměřené

[%]	CL 50WS	ST2709B	ICP analýza
Fe	Balance	Balance	Balance
Ni	17,0 - 19,0	17,0 - 19,0	18,75
Co	8,5 - 10,0	9,0 - 11,0	9,70
Mo	4,5 - 5,2	4,0 - 6,0	4,99
Ti	0,8 - 1,2	0,9 - 1,1	0,99
Si	≤ 0,1	≤ 1	0,46
Mn	≤ 0,15	≤ 1	0,56
C	≤ 0,03	≤ 0,03	< LOD
Cr	≤ 0,25	-	0,21
Al	-	-	0,27
S	≤ 0,01	-	< LOD
P	≤ 0,01	-	< LOD

Z výsledků je zřejmé, že materiál odpovídá deklarovanému chemickému složení, ovšem obsahuje stopové prvky nečistot chromu a hliníku. Dle následujících výsledků lze usuzovat, že tyto nečistoty nemají žádný vliv na výsledné mechanické vlastnosti materiálu.

4.6.2

4.6.2 Rozložení velikosti částic

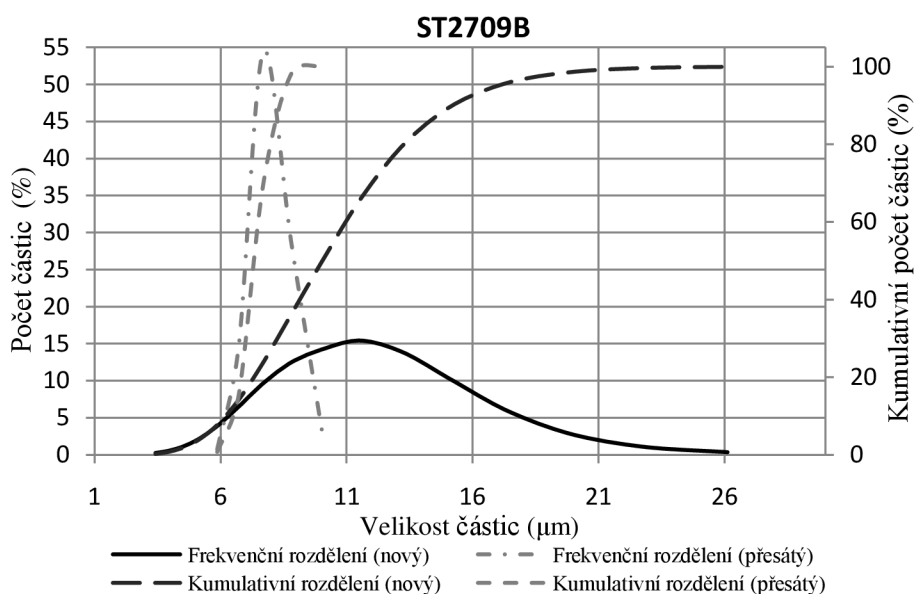
Analýza rozložení velikosti částic práškových vzorků byla provedena pomocí analyzátoru Horiba LA-950. Analýza je založena na principu laserové difrakce, kdy částice rozptylují světlo v úhlu dle velikosti dané částičky. Větší částice rozptýlí světlo v malých úhlech, a menší částice rozptylují světlo v širokých úhlech. Soustava částic vytvoří vzor rozptýleného světla s definovanou intenzitou a úhlem, který může být přepočten na rozložení velikosti částic.

Pro analýzu rozložení velikosti částic byl použit prášek od obou výrobců, a to jak v nepoužitém stavu (přímo od výrobce), tak po použití a přesátí prášku standardními

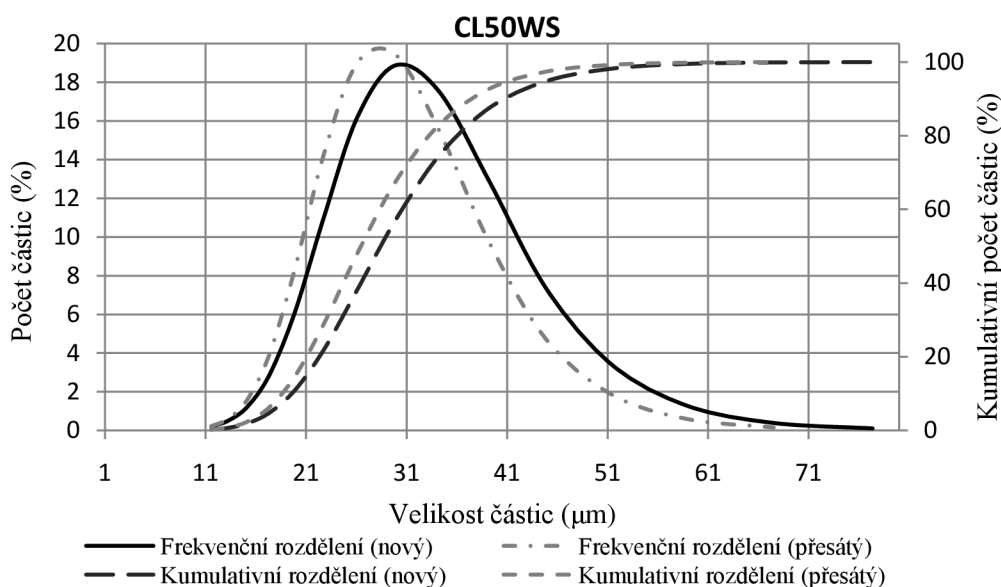
prostředky používanými ve výrobním procesu. Základní statistické hodnoty velikosti částic analyzovaných prášků jsou uvedeny v Tab. 2 a na Obr. 4-10 a Obr. 4-11.

Tab. 2 Statistické parametry velikosti částic vstupního práškového materiálu, [μm]

Statistické parametry	CL50WS		ST2709B	
	nový prášek	přesátý prášek	nový prášek	přesátý prášek
Střední hodnota	29,498	27,430	10,438	7,383
Směrodatná odchylka	8,657	7,689	3,595	0,712
Modus	28,075	27,602	10,782	7,317
d10	19,470	18,422	6,150	6,394
d50	28,402	26,453	10,031	7,326
d90	41,047	37,751	15,193	8,476



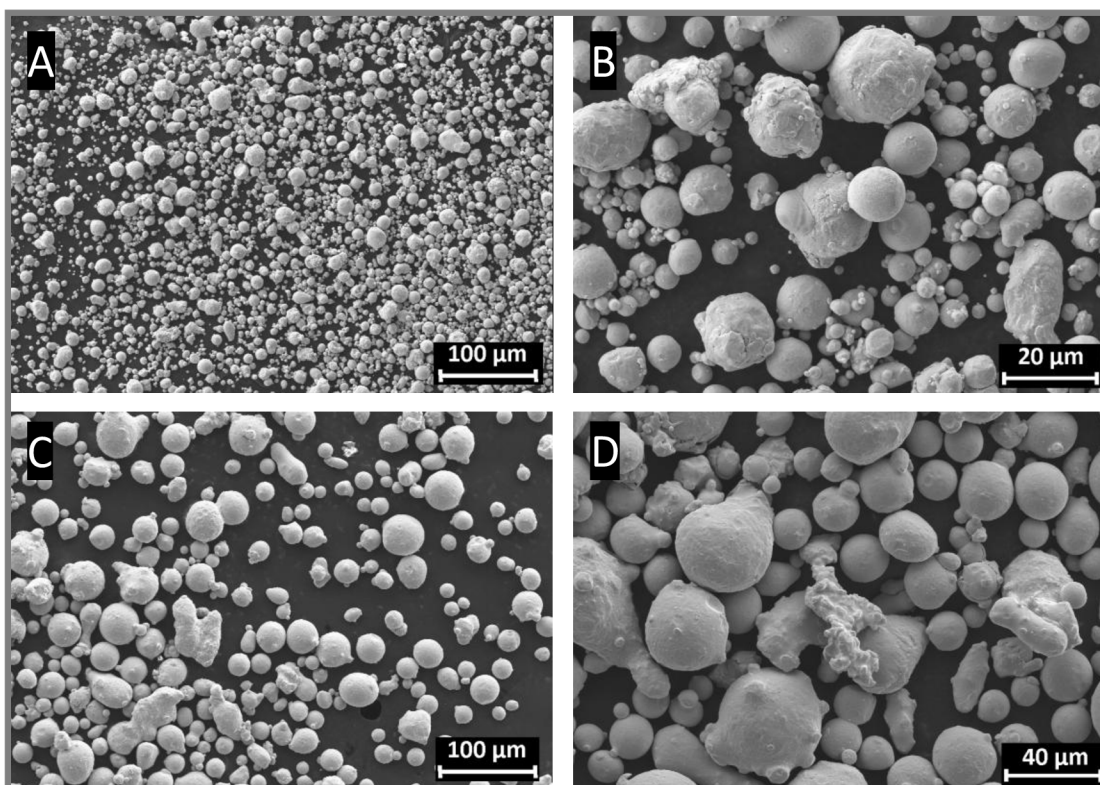
Obr. 4-10 Rozložení velikosti částic materiálu ST2709B (Phenix Systems)



Obr. 4-11 Rozložení velikosti částic materiálu CL50WS (Concept Laser)

Z dosažených výsledků je zřejmé, že charakteristiky prášku se významně liší. Prášek ST2709B od Phenix Systems (PS) má výrazně menší částice. Nový prášek ST2709B má navíc oproti přesátému mnohem širší distribuci velikosti částic. Použité síto je zřejmě zvoleno s velmi malou velikostí ok (cca 10 μm). Dá se předpokládat, že to má za následek velký odpad materiálu. Malý rozptyl velikosti částic obvykle způsobuje vyšší porositu dílů, což by ale při takto malých velikostech částic neměl být problém. Prášek CL50WS od Concept Laseru (CL) má širší distribuci velikosti částic s průměrnou velikostí značně vyšší než má prášek od PS. Je zřejmé, že prášky jsou primárně určeny pro výrobu s jinou tloušťkou vrstvy. Přičemž prášek od ST2709B je možné využít již od tloušťek vrstvy 15 mikrometrů. Prášek CL50WS je vhodný pro výrobu s tloušťkou vrstvy od 40 mikrometrů. Z Obr. 4-11 je zřejmé, že přesívání prášku CL50WS nemá na rozložení velikosti částic takový významný dopad jako v případě prášku ST2709B. Charakteristika CL50WS je přesto přesátím mírně změněna. Zřejmě je použito síto s mírně odlišnou charakteristikou než při výrobě prášku. Běžně, při opakovaném používání prášku, dochází vlivem SLM procesu k postupnému mírnému zvětšování částic (spojením, mírným natavením) a tím k posouvání distribuce velikosti částic k vyšším hodnotám, případně k rozšiřování distribuce.

Na Obr. 4-12 jsou zobrazeny snímky materiálů z elektronového mikroskopu. Je zde vidět velikostní rozdíl mezi oběma materiály, zjištěný při analýze velikosti částic. V materiálu CL50WS se objevují částice nekulovitého tvaru a velké spojené částice.



Obr. 4-12 SEM snímky práškového materiálu a), b) recyklovaný ST2709B se zvětšením 200x a 1000x c), d) CL50WS se zvětšením 200x a 500x

4.7 Testování procesních parametrů

4.7

Utajeno...

4.7.1 Princip testování

4.7.1

Utajeno...

4.7.2 Zvolené parametry pro testování

4.7.2

Utajeno...

4.7.3 Nastavení navržených strategií šrafování na M2 Cusing

4.7.3

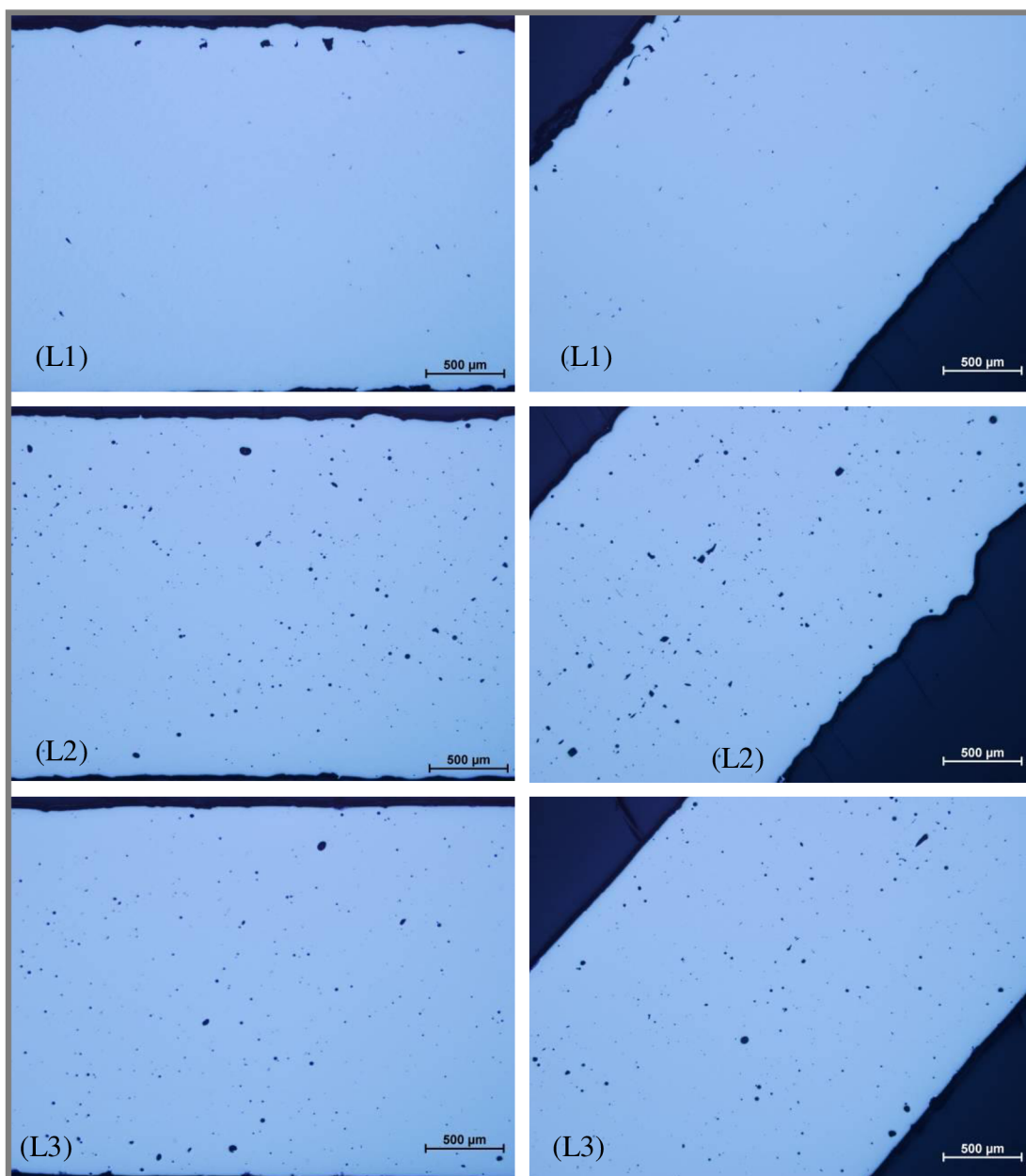
Utajeno...

5 VÝSLEDKY

5.1 Materiálové analýzy

5.1.1 Metalografická analýza

Pro vyhodnocení vnitřní struktury materiálu byly použity vzorky lamel typu 3. První vzorek, dále označovaný jako L1 byl vyrobený na zařízení PXL. Dva další byly vyrobeny na zařízení M2 Cusing. Vzorek L1 a L2 reprezentuje začátek výrobního procesu, jsou tedy ve stavu bez TZ přímo po SLM výrobě. Vzorek L3 prošel kompletním procesem výroby, je tedy ve stavu s tepelným zpracováním a omíláním. Řez lamelou, ve kterém byl vytvořen metalografický výbrus byl u všech vzorků veden rovnoběžně s platformou. Na Obr. 5-1 jsou zobrazeny neleptané výbrusy lamel.



Obr. 5-1 Neleptané výbrusy lamely typu 3; (L1) - vyrobená na PXL; (L2) + (L3) – vyrobeny na M2 Cusing.

Výsledky metalografické analýzy neleptaných vzorků (viz Obr. 5-1) ukazují na značný rozdíl v porozitě materiálu u jednotlivých výrobních zařízení. U lamely L1 se vyskytují póry ve vlastním objemu lamely jen minimálně, ovšem na rozhraní vlastního šrafování a kontury, tedy těsně pod povrchem lamely se objevuje vyšší porozita s póry dosahující velikosti cca 0,1 mm. Porozita u Lamel L2 a L3 je ovšem výrazná i v samotném objemu materiálu lamely. Větší póry se vyskytují v celém řezu, nejen těsně pod povrchem.

Pro vyčíslení porozity metalografických výbrusů byl použit program ImageJ. Snímek výbrusu byl nejdříve převeden na 8-bitový formát a pomocí funkce *Threshold (Auto)* byly všechny stupně šedi, kromě černých pórů, nahrazeny bílou. Poté bylo možné v dané oblasti spočítat procentuální množství černé, resp. porozity (*Analyze Particles*). Výsledná porozita v Tab. 3 je dána průměrem ze tří oblastí vzorku. Vybrané oblasti měly podobu obdélníků přes celou tloušťku lamely a u všech třech vzorků měly stejnou velikost a polohu.

Tab. 3 Porozita metalografických výbrusů

[%]	L1	L2	L3	L1 bez
Porozita	0,17	0,85	0,47	0,06
σ	0,07	0,22	0,16	0,02

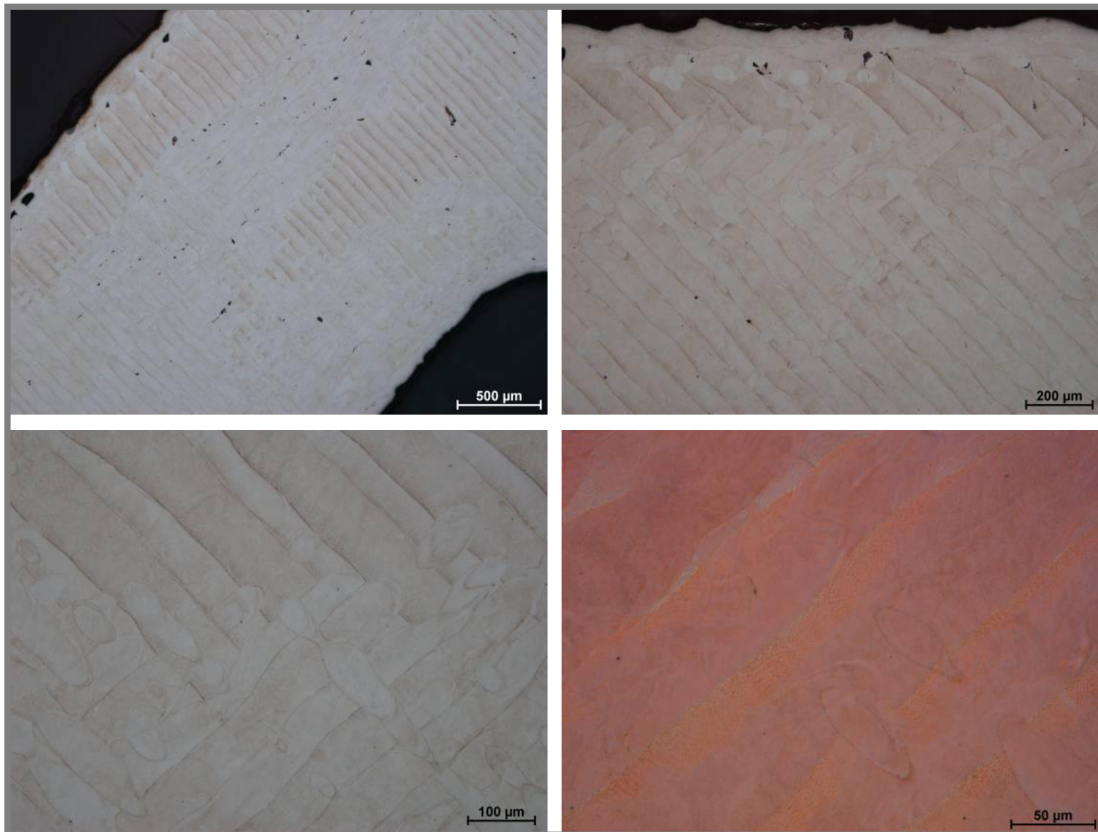
V Tab. 3 je, mimo hodnot pro porovnání, uvedena porozita lamely L1 měřená bez podpovrchových pórů. Tato hodnota charakterizuje porozitu vzorků pro tahovou zkoušku, u kterých byla povrchová vrstva obráběna. Výsledky z M2 Cusing dokazují zvýšenou porozitu, která je vidět i na obrázcích. Na hodnotu rozdílu porozity tepelně nezpracovaného (L2) a žíhaného vzorku (L3) by mohl mít vliv i typ použité podpory při výrobě. Vzorky L1 a L2 byly vyráběny se strukturovanou podporou, aby mohly být odejmuty ze základní desky před TZ. Tato podpora, oproti plné podpoře, odvádí menší podíl tepla ze vzorku, což mohlo mít vliv na výslednou vnitřní strukturu materiálu.

Porozita u SLM zpracovaných materiálů je ovlivněna širokou škálou parametrů, obvykle nejvýznamnější vliv má kombinace výkonu laseru, rychlosti laseru a skenovací strategie (tedy šrafovací vzdálenosti a typ šrafování). V tomto případě je i značný rozdíl v distribuci velikosti částic práškového materiálu, což by také mohlo mít značný vliv.

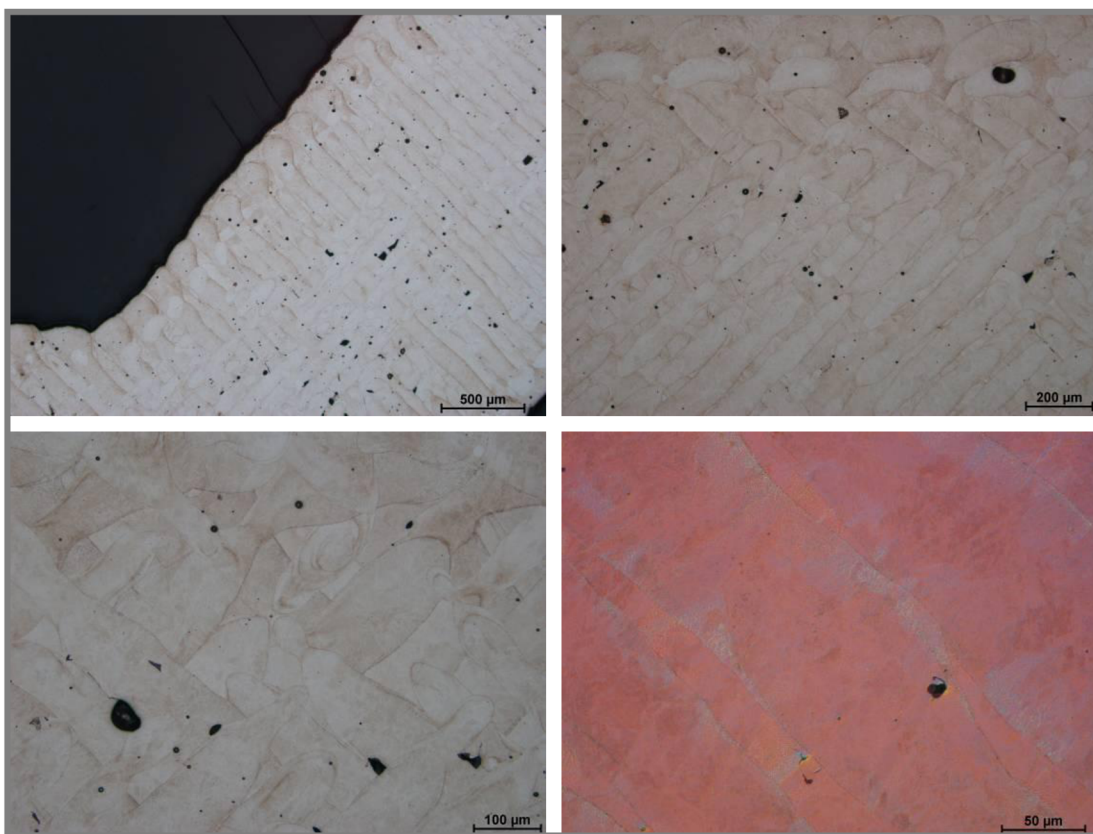
Na obrázcích (Obr. 5-2, Obr. 5-3, Obr. 5-4) jsou vidět leptané výbrusy jednotlivých vzorků lamel s různým zvětšením. Je zřejmé, že kovový prášek byl kompletně protavený a utváří liniové oblasti odpovídající trajektorii pohybu laseru při šrafování. Je viditelné, že jednotlivé návary se postupně překrývají dle použité strategie šrafování. Na hranicích návarů se vyskytují defekty vzniklé s největší pravděpodobností díky nedokonalému protavení a nedostatečnému spojení s okolními návary. Při zvětšení 500x (Obr. 5-2 s měřítkem 50 μm) je možné pozorovat jemnozrnnou strukturu orientovanou od hranice návaru směrem k jeho středu, tedy ve směru největšího teplotního spádu. Mikrostrukturu materiálu nelze dobře popsat ani při použití maximálního zvětšení optického mikroskopu, proto byl k detailnější analýze použit rastrovací elektronový mikroskop viz Obr. 5-5 až 5-7. Je zřejmé, že struktura je velmi jemnozrnná a je složená z protáhlých tenkých zrn

o tloušťce cca 0,5 mikrometru. Struktura připomíná velmi jemnou strukturu popuštěného austenitu.

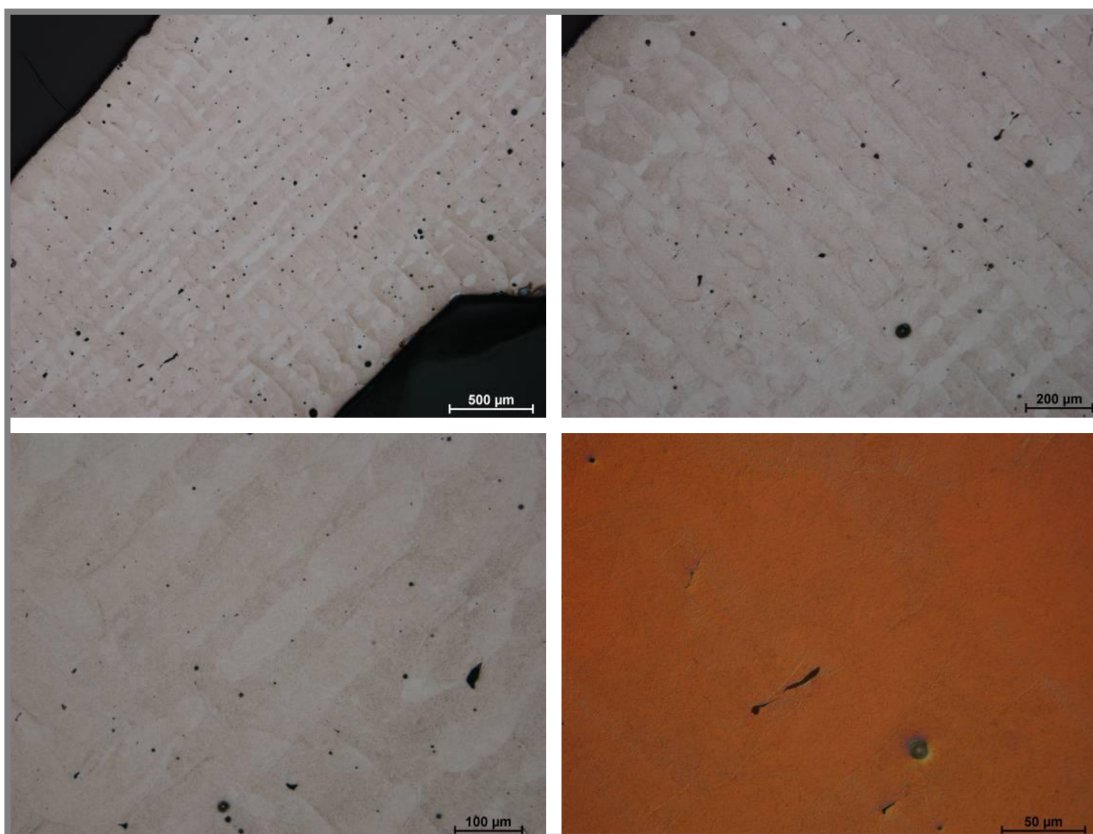
Z obrázků Obr. 5-3, Obr. 5-4 je zřejmé, že tepelné zpracování lamel se projevuje i ve struktuře materiálu. U vzorku po tepelném zpracování již oblasti jednotlivých návarů nejsou tak výrazné. Dochází nejspíše k postupné homogenizaci materiálu, jak je zřejmé z Obr. 5-7.



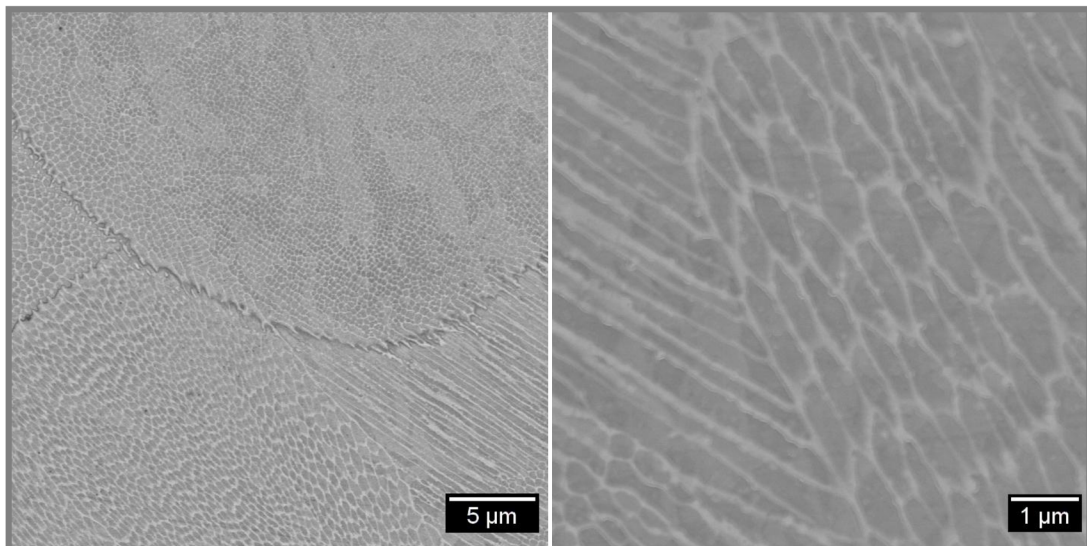
Obr. 5-2 Leptaný výbrus lamely L1 s různým zvětšením mikrostruktury



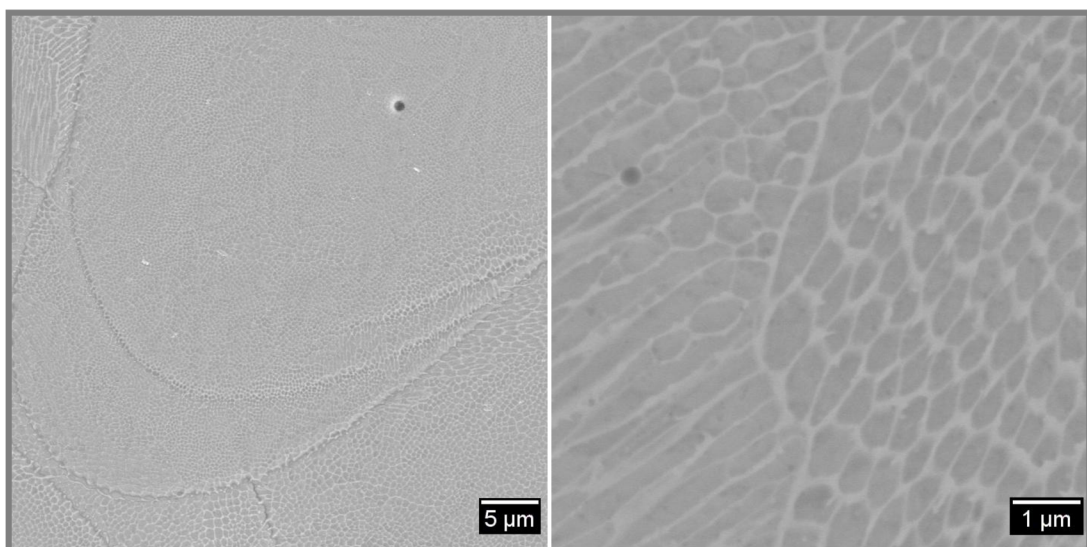
Obr. 5-3 Leptaný výbrus lamely L2 s různým zvětšením mikrostruktury



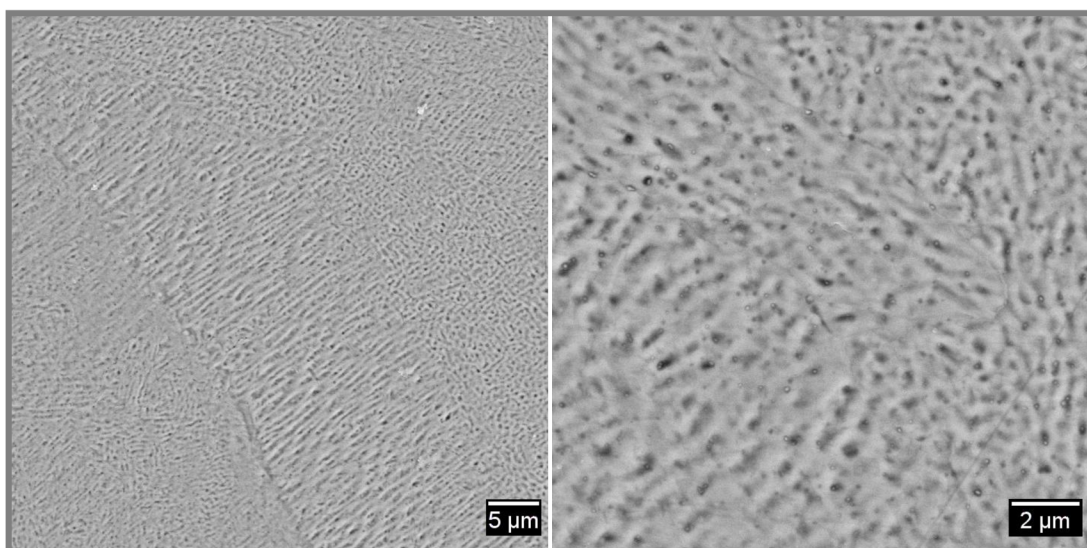
Obr. 5-4 Leptaný výbrus lamely L3 s různým zvětšením mikrostruktury



Obr. 5-5 SEM snímky výbrusu lamely L1 s různým zvětšením mikrostruktury



Obr. 5-6 SEM snímky výbrusu lamely L2 s různým zvětšením mikrostruktury



Obr. 5-7 SEM snímky výbrusu lamely L3 s různým zvětšením mikrostruktury

5.1.2 μ CT analýza

5.1.2

Utajeno...

5.1.3 Mechanické vlastnosti

5.1.3

Válcové vzorky vyrobené na obou SLM strojích byly po tepelném zpracování obrobena do požadovaného tvaru. Vzorky z M2 byly vyrobeny se závitovými hlavami. Kvůli obtížnému opracování závitové části byly vzorky z PXL vyrobeny s válcovými hlavami pro upnutí pomocí kroužků (viz Obr. 5-8).



Obr. 5-8 Kroužkové upnutí válcové hlavy vzorku PXL

U obou typů byl třetí vzorek tahové zkoušky kratší než ostatní, z důvodu odřezání části pro zkoušku tvrdosti. Všechny vzorky odpovídají normě DIN 50125, přičemž měřená oblast $D_0 \times L_0$ je 8 x 40 mm.



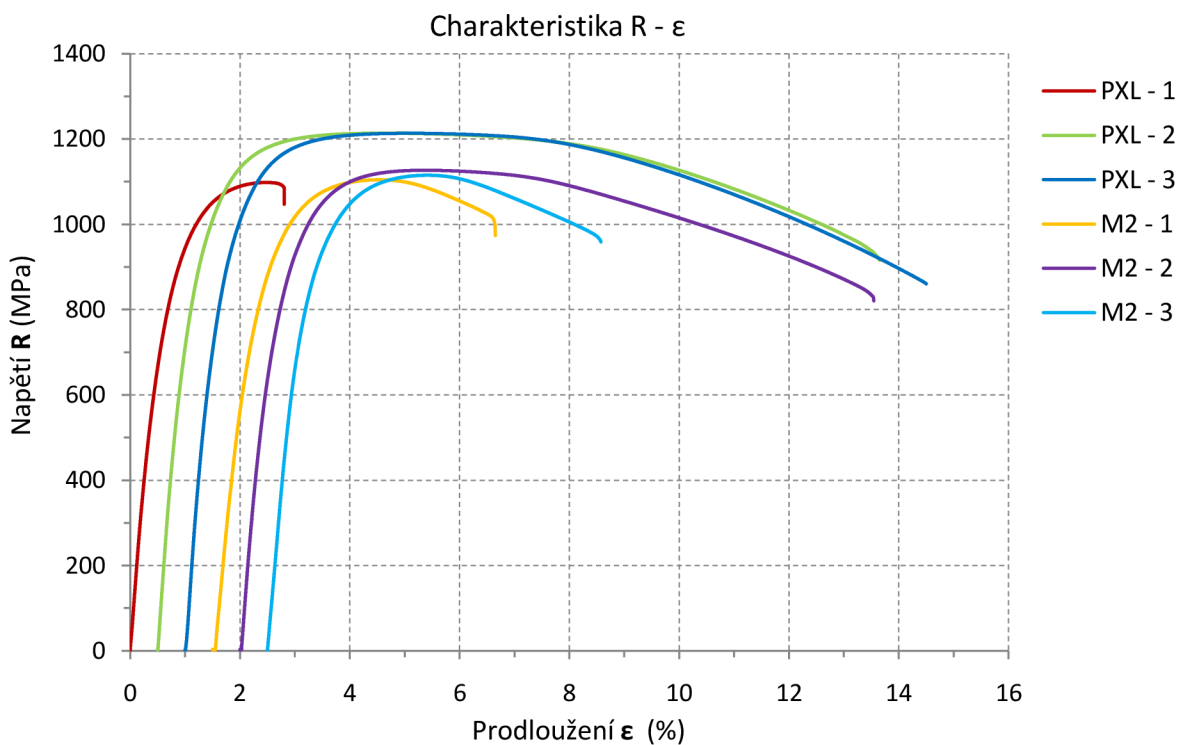
Obr. 5-9 Vzorky pro tahovou zkoušku, vyrobené na M2 (vlevo) a PXL (vpravo)

Na výbrusech obou typů materiálů (Obr. 5-10) byla provedena zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení. Hodnota tvrdosti byla určena na základě pěti měření. Výsledky tvrdostí spolu s výsledky tahových zkoušek jsou zobrazeny v Tab. 4.



Obr. 5-10 Výbrusy obou typů materiálů pro zkoušku tvrdosti

Na Obr. 5-11 jsou zobrazeny smluvní tahové diagramy jednotlivých vzorků. V Tab. 4 jsou uvedeny základní mechanické vlastnosti obou typů vzorků. Vzorky z PXL obecně vykazují trochu vyšší hodnoty pevnosti a tvrdosti, což bude způsobeno jejich vyšší relativní hustotou. Podle studií [20, 21] na mikro-tvrdość nemá vliv porozita, ale především tepelné zpracování. V této práci byla měřena tvrdost při nízkém zatížení ($F \approx 3 \text{ N}$), která má k mikro-tvrdości velmi blízko, a proto by na vyšší tvrdost materiálu z PXL mohl mít vliv spíše rozdíl v ochlazování materiálu při tepelném zpracování.

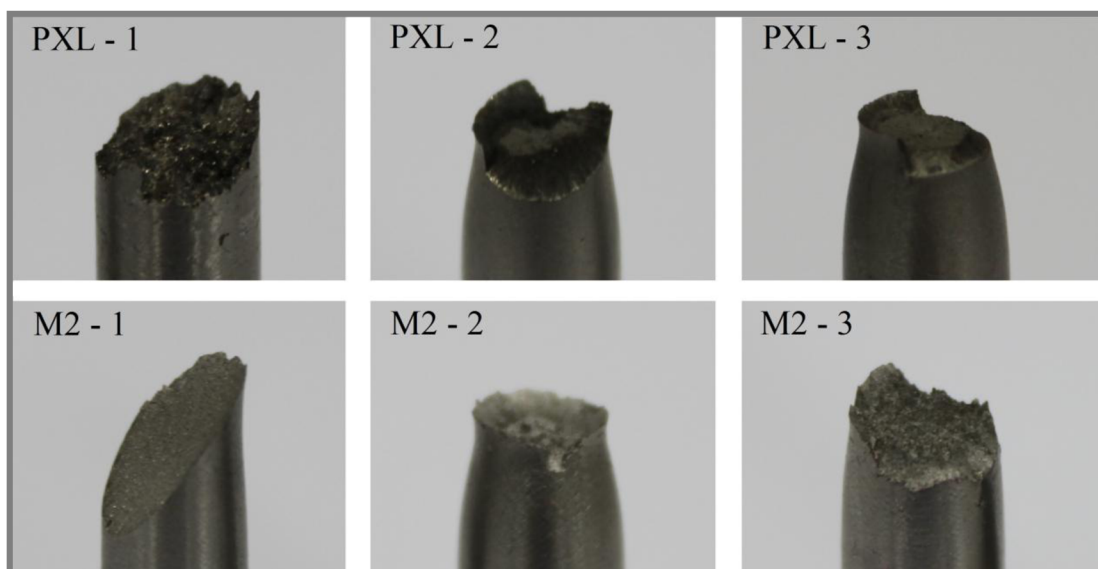


Obr. 5-11 Charakteristika R- ϵ tahových zkoušek

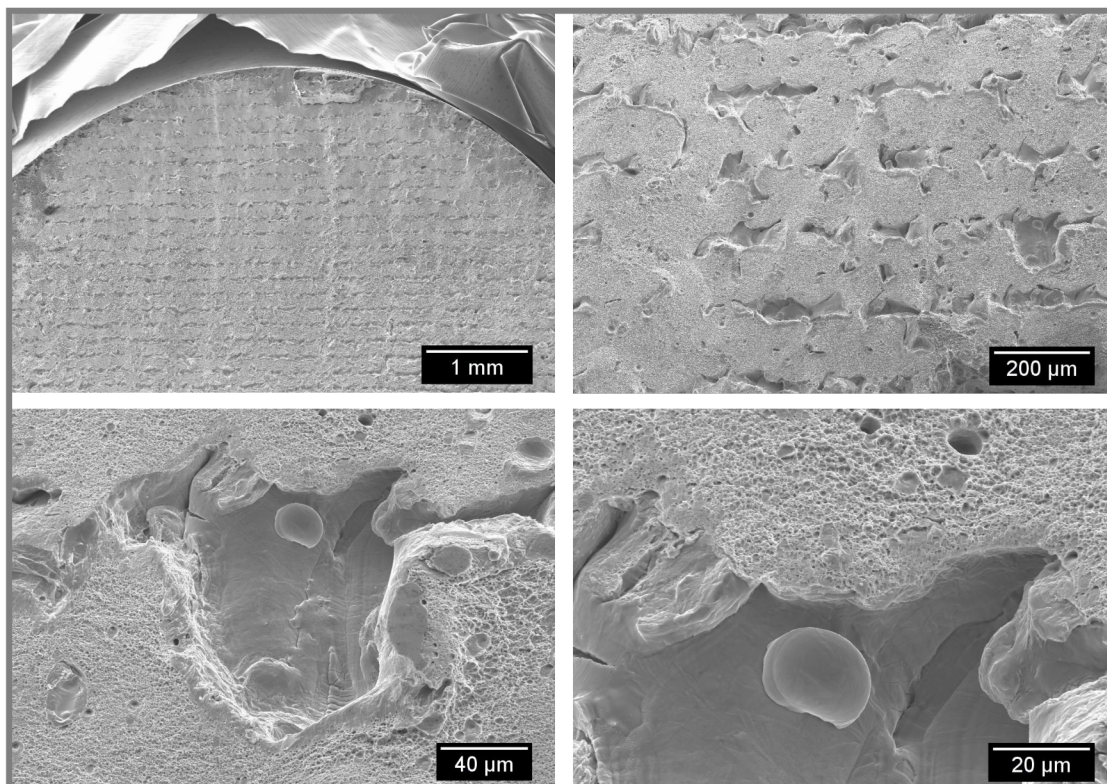
Tab. 4 Výsledky mechanických zkoušek

Vzorek	E [GPa]	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]	HV 0,3 (HRC)
PXL - 1	171	786	1098	2,2	4,7	353 (36,0)
PXL - 2	180	847	1214	12,6	43,1	
PXL - 3	190	831	1213	13	44,2	
Průměr	180	821	1175	9,3	30,7	
σ	8	26	54	5,0	18,4	
M2 - 1	138	793	1105	4,4	14,5	335 (33,3)
M2 - 2	169	770	1127	11,0	44,4	
M2 - 3	149	837	1115	5,4	27,4	
Průměr	152	800	1116	6,9	28,8	
σ	13	28	9	2,9	12,2	

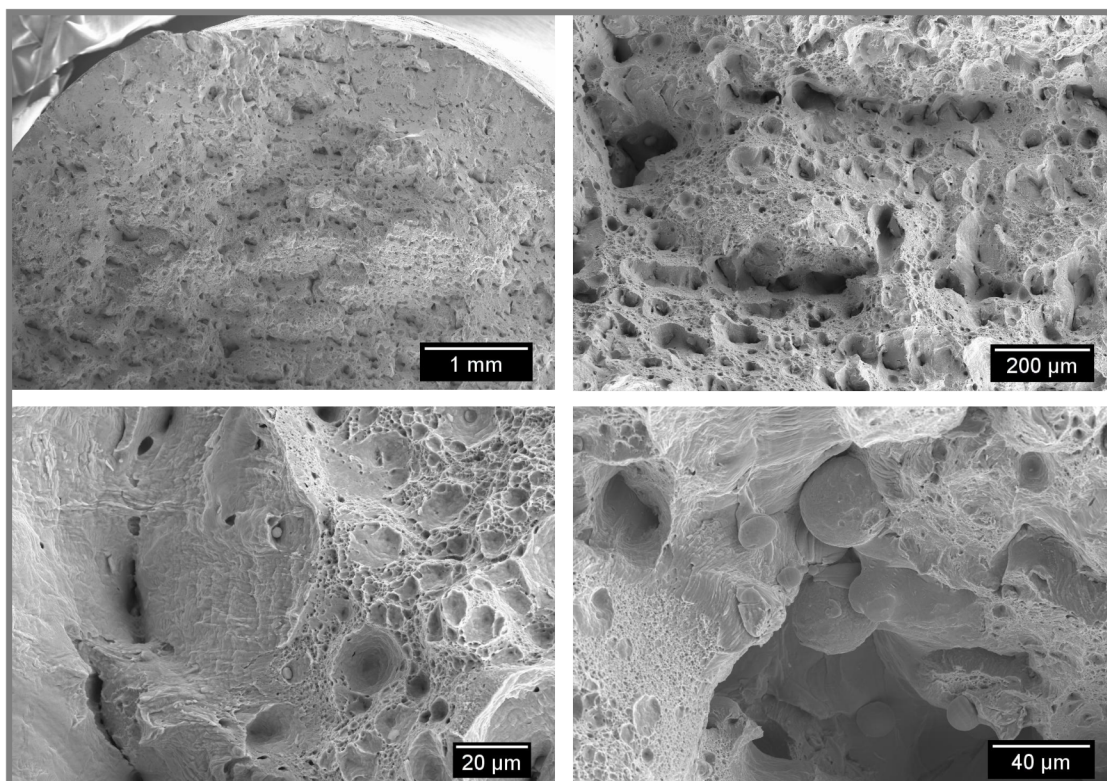
Je zajímavé, že vzorky vyrobené na jednom zařízení vykazují značně odlišné mechanické vlastnosti. Například vzorek PXL-1 dosahuje cca o 10% nižší hodnotu meze pevnosti, přičemž charakter lomu je výrazně odlišný od zbývajících dvou vzorků PXL, viz Obr. 5-12. V lomu tohoto vzorku jsou okem viditelné lesklé částice. U druhého a třetího vzorku se objevuje houževnatý lom, který je možné vidět i u M2-2. Jedná se o lom číškový. U vzorků z PXL má číškový lom menší stejnorodost. První vzorek vyrobený na M2 má atypický, smykový lom. Ten se obvykle vyskytuje např. u hliníkových slitin nebo austenitických ocelí. Vzorek M2-3 má lom smíšený. Pro další charakteristiku lomových ploch byl použit rastrovací elektronový mikroskop.



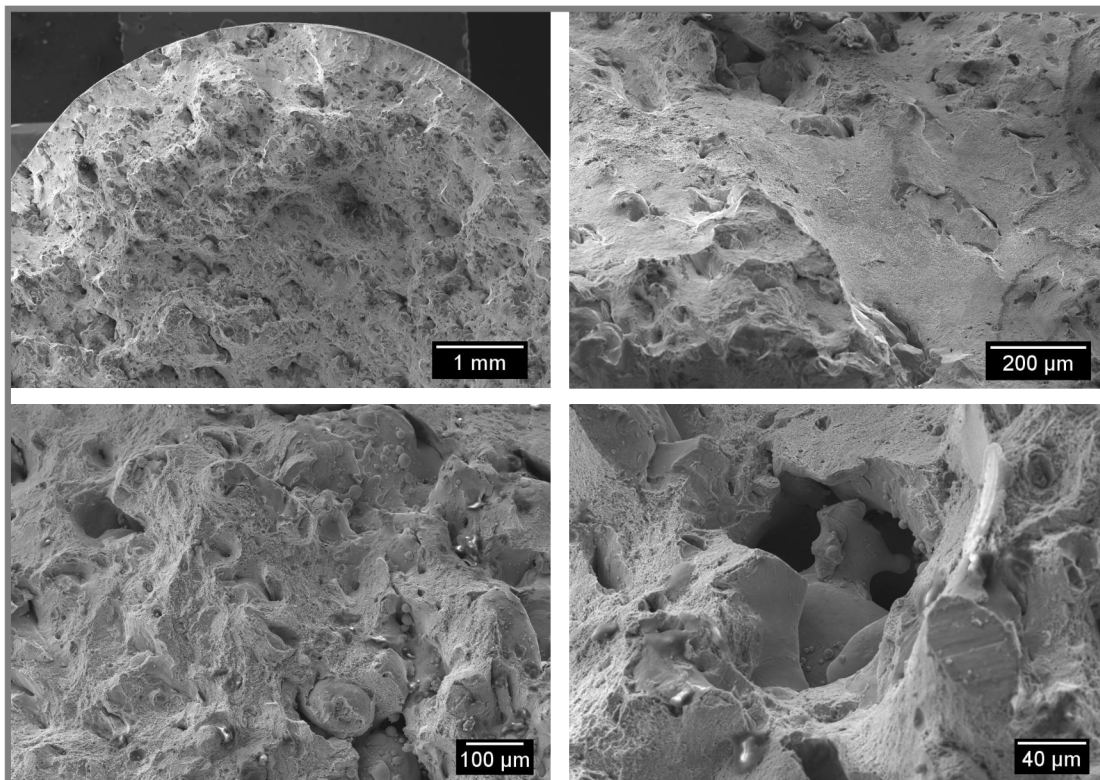
Obr. 5-12 Lomy jednotlivých vzorků po tahové zkoušce



Obr. 5-13 SEM snímky lomu vzorku M2-1



Obr. 5-14 SEM snímky lomu vzorku M2-3



Obr. 5-15 SEM snímky lomu vzorku PXL-1

Z obrázků 5-18, 5-19 a 5-20 je zřejmé pravidelné opakování mikro-defektů, které mají vliv i na charakter porušení. Obr 5-18 vlevo dole ukazuje dutinu vzniklou nedostatečným protavením materiálu. V případě vzorku M2-1 bylo zřejmé uspořádání defektů výrazně ovlivněno skenovací strategií, která se zřejmě v jednotlivých vrstvách inkrementálně posouvala v jednom směru. Pravidelné rozmístění defektů je zřejmé i u dalšího vzorku (Obr. 5-19). V tomto případě zřejmě došlo k iniciaci trhliny na jiném místě, ta se pak šířila v jiném směru. Při posouzení lomových ploch všech vzorků, lze říci, že charakter porušení je velmi podobný, v lokálních oblastech je porušení tvárné, ovšem toto je přerušováno řadou mikro-defektů rozmístěných přes průřez vzorku. Na první pohled odlišná plasticita vzorků je způsobena nejspíše různým počtem mikro-defektů v rovině porušení, kde převážně u vzorků z M2 byl počet defektů vyšší a k porušení došlo dříve než k výraznější plastické deformaci v lomové oblasti. Odlišnost od ostatních je vidět u vzorku PXL-1 na Obr. 5-20, kde se v lomové ploše objevují zatavené částice. Ty se na rozdíl od tvárných ploch lesknou, jelikož došlo k lomu hladce po jejich hranicích. Velké množství těchto cizích částic je spolu s dalšími mikro-defekty pravděpodobnou příčinou snížené pevnosti a tažnosti vzorku.

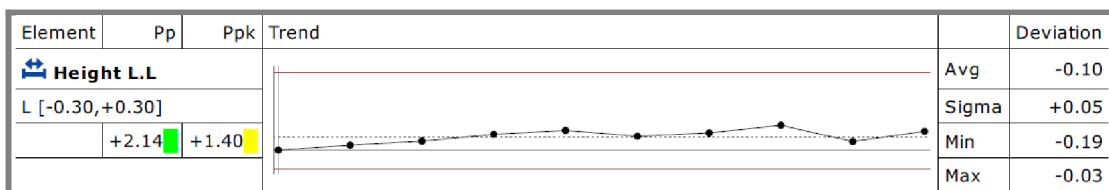
Z výsledků fraktografie je zřejmé, že použitá skenovací strategie a další procesní parametry jsou optimalizované na výrobu tenkostěnných dílů typu lamel a není tedy zcela vhodná pro výrobu objemových typů součástí (tahových vzorků) u kterých dochází ke vzniku výraznější porozity.

5.2 Hodnocení rozměrové přesnosti lamel

Vzorky po digitalizaci byly zpracovávány jednotlivě. Hodnoceny však byly jako celá série deseti lamel. K tomu sloužila navržená metodika hodnocení v programu GOM Inspect V8. Pro každý typ lamely byla navržena řada měření, uzpůsobena geometrii daného typu. Všechny měření jsou založeny na porovnávání digitalizovaného vzorku s nominálními daty (CAD). Výsledky měření jsou vyjádřeny odchylkou od nominální hodnoty.

V této kapitole jsou popsány jednotlivé měření a shrnutí jejich výsledků. Většinou vynesení průměrných hodnot do grafu. Je použito barevného odlišení výsledků vzorků z PXL (modrá) a M2 Cusing (žlutá). Reporty výsledků z programu GOM byly poskytnuty firmě Continental. Z důvodu obsáhlosti nebyly přiloženy k této práci.

Na Obr. 5-16 jsou jako příklad zobrazeny výsledky z měření výšky na sérii lamel typu 3. Jedná se o vzorky vyrobené na zařízení PXL, které byly ve stavu po odřezání a omílání, tedy na konci výrobního procesu. V kolonce *Trend* je porovnání výsledků všech vzorků série, a jejich pozice vůči tolerančnímu poli. To je popsáno indexy výkonnosti procesu P_p a P_{pk} , nebo klasicky průměrem Avg a směrodatnou odchylkou $Sigma$.



Obr. 5-16 Výsledky měření výšky levé části lamel typu 3, po omílání, vyrobených na PXL

Směrodatná odchylka - sigma

Je míra statistické disperze. Jedná se o kvadratický průměr odchylek hodnot znaku od jejich aritmetického průměru. Vypovídá o tom, jak moc se od sebe navzájem liší jednotlivé hodnoty. Je-li malá, jsou si hodnoty většinou navzájem podobné, a naopak velká směrodatná odchylka signalizuje velké vzájemné odlišnosti.

Ukazatele výkonnosti procesu - P_p , P_{pk}

Jsou to bezrozměrná čísla, která popisují chování sledovaného znaku jakosti. Definice těchto ukazatelů je:

$$P_p = \frac{USL - LSL}{6 \times \sigma} \quad P_{pk} = \min \left[\frac{USL - \mu}{3 \times \sigma}, \frac{\mu - LSL}{3 \times \sigma} \right]$$

Kde, USL a LSL jsou horní a dolní mezní hodnoty, v našem případě jsou to hranice tvořeny tolerancemi. Sigma σ je směrodatná odchylka hodnot a μ je parametr polohy tzn. střední hodnota. Ukazatel P_p nemá v definici parametr polohy, a proto se interpretuje jako výkonnost procesu, pokud by cílová hodnota byla vycentrována. [34]

Je možné říci, že P_p hodnotí statistické zvládnutí procesu, vztahující se k rozpětí limitních hodnot. Zatímco P_{pk} signalizuje schopnost procesu produkovat výstup v žádaných limitech. Na základě těchto parametrů lze sledovat změny výkonnosti procesu, ale i vhodnost daných tolerancí. [34, 35]

5.2.1 Vzorek lamely typu 2	5.2.1
Utajeno...	
5.2.2 Vzorek lamely typu 2	5.2.2
Utajeno...	
5.2.3 Vzorek lamely typu 3	5.2.3
Utajeno...	
5.2.4 Vzorek lamely typu 4	5.2.4
Utajeno...	
5.2.5 Analýza vlivu TZ - vzorek lamely typu 5	5.2.5
Utajeno...	
5.2.6 Analýza vlivu TZ - vzorek lamely typu 6	5.2.6
Utajeno...	
5.2.7 Analýza vlivu TZ - vzorky lamel typu 1, typu 2	5.2.7
Utajeno...	
5.2.8 Shrnutí poznatků a zhodnocení rozměrové přesnosti	5.2.8
Utajeno...	
5.3 Srovnání kvality povrchu lamel	5.3
Pro vzorky obou strojů proběhlo 12 měření na každém ze tří typů lamel, před i po omílání. Výsledky jsou popisovány střední aritmetickou úchylkou profilu Ra , která slouží jako obecný parametr pro porovnání drsnosti povrchu. Ta se vztahuje k celé měřené oblasti, a proto dosahuje obdobných výsledků jako Sa , střední aritmetická úchylka měřené plochy (např. $Ra = 4,995$, $Sa = 4,992$). Dále byla pro popis použita průměrná maximální výška profilu Rz . Jako míra statistické disperze je použita směrodatná odchylka σ , která vypovídá o tom, jak moc se od sebe navzájem liší jednotlivé hodnoty.	
Utajeno...	
5.3.1 Výsledky měření na lamele typu 3	5.3.1
Utajeno...	

5.3.2 **5.3.2 Výsledky měření na lamely typu 1 a 2**

Utajeno...

5.3.3 **5.3.3 Zhodnocení kvality povrchů**

Utajeno...

5.4 **5.4 Testování výrobních parametrů**

Testování probíhalo na redukované základní desce s relativně malým počtem vzorků (max. 68). Klasicky se lamely vyrábí ve velkém počtu. Na desce jich může být umístěno až tisíc. Při výrobě menšího počtu vzorků, lamely nestíhají chladnout a přebytečné teplo může značně ovlivnit výslednou kvalitu. Aby výroba testovacích vzorků měla podmínky co nejbližší reálné výrobě, tak bylo nastaveno čekání ve vrstvách. Nanášení a tavení jedné vrstvy trvalo přibližně 90 s.

Utajeno...

5.4.1 **5.4.1 Test výkonu a rychlosti pohybu laseru**

Utajeno...

5.4.2 **5.4.2 Další testy**

Utajeno...

5.4.3 **5.4.3 Test přenositelnosti parametrů**

Utajeno...

5.4.4 **5.4.4 Test přenositelnosti parametrů 2**

Utajeno...

Metodika hodnocení geometrie lamel

Pro porovnání kvality výroby strojů byla vytvořena metodika digitálního hodnocení geometrie lamel. Do této doby byly lamely hodnoceny jen manuálně, případně vizuálně. Výsledek hodnocení složitější geometrie nabýval pouze binárních hodnot, vyhovuje nebo nevyhovuje. Navržená digitální metodika umožňuje odchylku kvantifikovat, a tím i porovnávat vyrobené lamely mezi sebou.

Srovnání kvality výroby PXL a M2 Cusing

Díky navržené metodice hodnocení byly zjištěny rozměrové odlišnosti mezi vzorky a jejich změny v průběhu výrobního procesu. Odchylky rozměrů a změny nelze plně zobecnit, jelikož jsou závislé i na geometrii vyráběného typu lamely.

V průběhu hodnocení byly u obou zařízení zjištěny problémy ve výrobě vzorků. Ty měly znatelný vliv na výslednou kvalitu. Není možné ale určit, které části hodnocení byly těmito chybami postiženy, a které už nebyly. Je zřejmé, že měly vliv na hlavní rozdíly ve srovnání, jako jsou např. velké odchylky tloušťek vzorků lamel typu 3 nebo zakřivení u PXL.

Ve vedlejší zkoušce vlivu tepelného zpracování na rozměrovou přesnost lamel, vykonanou na PXL, byly zjištěny velké rozdíly v délkových odchylkách, které vykazovaly určitou závislost na umístění vzorku na základní desce. Také u vzorků lamel typu 3 a 2 do porovnání strojů byl zaznamenán trend odchylek rozměrů po délce desky. To vše naznačovalo na špatnou kalibraci optiky laseru, která byla posléze potvrzena technikem Phenix Systems. Díky tomu, nebylo možné z této zkoušky jednoznačně kvantifikovat vliv tepelného zpracování na rozměrovou přesnost lamel, případně určit jeho vhodnost. Tento problém tedy ovlivňoval i rozměrovou přesnost vzorků do porovnání strojů.

Za zmínku také stojí rozměrové změny lamel po daném TZ, kdy dochází zpravidla k nárůstu délek a tloušťek, a k poklesu výšek. Nejspíše z důvodu změny krystalické mřížky při rekrystalizaci. Změny v průběhu výrobního procesu jsou u vzorků PXL většinou znatelnější, než u M2 Cusing.

Při analýze struktury povrchu, vzorky vyrobené na M2 dosahovaly vysokých hodnot drsností s velkým rozptylem měření. Bylo zjištěno, že důvodem je špatné nastavování šrafování při exportu výrobních dat z přípravného programu Magics do SLM stroje. Díky tomu byly vzorky vyráběny s odlišnou strategií šrafování a bez kontury. Tato chyba byla i hlavní příčinou výše zmíněných odchylek tloušťek. Vzorky měly také menší zlepšení drsnosti omíláním. Snížení střední aritmetické úchylky povrchu S_a bylo na vzorcích z PXL průměrně 40%, lepšího zlepšení 56% dosahovaly vzorky lamel typu 3. Ty mají oproti ostatním typům větší rovinné plochy, které jsou snadněji přístupné omílacím tělískům.

Na základě analýz vstupního práškového materiálu bylo zjištěno, že materiál PXL má mnohem menší částice, což by mohlo mít zásadní vliv na drsnost. Jak velký má vliv, se bohužel nepodařilo zjistit. Tento materiál nelze použít na stroji jiného typu s jiným nanášecím zařízením (M2 Cusing, SLM 280HL). Materiál je ale pouze jedním z faktorů, které zaručují dobrou kvalitu povrchu.

Vzorky z PXL dosahují znatelně nižší porozity, na což může mít vliv i výše zmíněný materiál s menšími částicemi, spolu s parametry laseru a vzdáleností šrafování. Je obecně známo, že menší porozita, resp. větší relativní hustota zvyšuje mechanické

vlastnosti materiálu. Relativní hustota uvnitř vzorku PXL byla naměřena 99,9%, což by mohl být důvod vyšších hodnot pevnosti a tvrdosti, oproti vzorkům z M2.

Při porovnání výsledků mechanických zkoušek s hodnotami v existující literatuře [20] je zřejmé, že zvolené tepelné zpracování má spíše negativní vliv na pevnost a tvrdost. Na mechanické vlastnosti má velký vliv i porozita, ta je ale například u vzorků z PXL téměř nulová. Na druhou stranu dané tepelné zpracování zajišťuje potřebnou houževnatost, zabraňující lámání tenkých lamel.

Testování procesních parametrů

Z důvodu nedostatku výrobních kapacit v Continentalu, probíhalo počáteční testování na univerzitním zařízení SLM 280HL. Na základě výsledků z VUT, bylo v plánu uskutečnit v Continentalu test většího měřítka. K čemuž ale nedošlo, jelikož v testu přenositelnosti parametrů se výsledky obou strojů neshodovaly, dokonce si jednotně protřečily. Z toho důvodu byl místo finálního testu podniknut druhý test přenositelnosti.

Výsledky vzorků z SLM 280HL se nejenže v tomto testu neshodovaly se vzorky z M2 Cusing, ale ani nepotvrdily předchozí testování. Výsledky jsou zjevně ovlivněny dalšími faktory, které se ovšem zatím nepodařilo objasnit. Výroba s jinými materiály nebyla v rámci této studie provedena, a ani dostupná literatura nepopisuje přímé srovnání specifických odlišností výroby na různých zařízeních. Rozdílné výsledky mohou být způsobeny odlišnou konstrukcí optické části stroje, nebo jinými laserovými zdroji. Například, ve studii [21] zaznamenali rozdílné chování v dosahování maximální relativní hustoty při použití odlišných laserových zdrojů.

Výsledky vzorků z M2 Cusing potvrdili předchozí trend, kdy se snižuje drsnost povrchu s navýšením hustoty energie laseru kontury. Drsnosti dosahují i velmi nízkých hodnot, což potvrdilo, že navržená strategie šrafování 3 je vhodná k dalšímu testování. S touto strategií byl také potvrzen předpoklad, že tavení kontury před šrafovanou plochou může vést k lepší struktuře povrchu. Vyrobené lamely dosahovaly $S_a \approx 7 \mu\text{m}$ a z vizuálního hlediska i dobré tvarové přesnosti.

Test parametru *Focus move* na zařízení M2 Cusing byl proveden s nastavením parametrů, které měly dobré výsledky na SLM 280HL. Na M2 Cusing měly ale jedny z nejhorších, proto by bylo vhodnější vykonat tento test znovu s lepším nastavením parametrů, i přesto že výsledky již vykonaného testu poukazují na hodnotu +4 mm.

Tato diplomová práce, řešená ve spolupráci s firmou Continental Barum s.r.o., se věnuje porovnání kvality výroby lamel formy pneumatiky na dvou SLM zařízeních, PXL a M2 Cusing. V další části se práce věnuje analýze vlivu stavěcích parametrů na strukturu povrchu.

Pro porovnání kvality výroby byly na zařízeních PXL a M2 Cusing vyrobeny vzorky lamel se základními procesními parametry doporučenými výrobcem stroje. Vzorky poté prošly stejným výrobním procesem jako lamely při klasické výrobě, během kterého byly opticky digitalizovány.

Pro porovnání geometrie jednotlivých lamel byla vytvořena metodika digitálního hodnocení. Aby naměřené hodnoty mohly být statisticky zhodnoceny, každý ze 4 typů lamely byl vyroben v počtu deseti kusů. Pomocí metodiky bylo tedy hodnoceno 40 lamel u obou zařízeních, ve třech fázích výrobního procesu. Rovněž bylo navrženo hodnocení pro dalších 5 typů lamel do vedlejší zkoušky vlivu tepelného zpracování na rozměrovou přesnost.

Na vzorcích byla dále měřena drsnost povrchu. Nejen s cílem porovnat kvalitu povrchů vyrobených lamel, ale i ke zhodnocení vlivu omílání. Pro další posouzení kvality výroby byly provedeny mechanické zkoušky, μ CT, metalografická analýza a materiálové analýzy vstupního práškového materiálu.

Prostřednictvím výše zmíněných analýz bylo v této práci provedeno srovnání kvality výroby na obou strojích. Během hodnocení byly u obou zařízeních zjištěny problémy ve výrobě vzorků, které značně ovlivňovaly výslednou kvalitu. U M2 Cusing byl zjištěn problém s nastavováním strategie šrafování, což mělo zásadní vliv na drsnost povrchu a zvýšené tloušťky vzorků. Na zařízení PXL byla zaznamenána špatná kalibrace optiky laseru, která měla negativní vliv na rozměrové přesnosti lamel.

V další části byl analyzován vliv procesních parametrů na strukturu povrchu lamel. Na základě rešerše byly navrženy 3 strategie šrafování a procesní parametry, které by mohly mít pozitivní vliv na drsnost bočních ploch.

Výsledky testů ukázaly obtížnou přenositelnost nastavení procesních parametrů mezi jednotlivými zařízením. Vyhodnocované charakteristiky si při použití stejných parametrů odporovaly.

Přesto byly na základě provedených testů identifikovány parametry ovlivňující strukturu povrchu. Během testování dosahovaly lamely vyrobené s nově navrženou strategií šrafování $Sa \approx 7 \mu\text{m}$ a z vizuálního hlediska i dobré tvarové přesnosti. Přičemž Sa lamel vyráběných s neaktuálnější šablonou od výrobce Concept Laser se pohybuje v rozmezí 5–7 μm .

Pro testování navazující na experimenty v této práci by bylo vhodné ověřit kombinace získaných procesních parametrů, které představují potenciál pro získání ještě nižších hodnot drsnosti povrchu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] YADROITSEV, Igor. *Selective laser melting: direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders*. Saarbrücken: LAP Lambert, c2009, iv, 266 s. ISBN 978-3-8383-1794-6.
- [2] Tire-mold. *Deshors Moulage* [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://www.deshors-tiremold.com/fr/products/tire-mold/>
- [3] KOLEKTIV AUTORŮ. *Gumárenská technologie*. Barum Continental spol. s r. o., 2008.
- [4] MUMTAZ, K.A. a N. HOPKINSON. Selective Laser Melting of thin wall parts using pulse shaping. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, vol. 210, issue 2, s. 279-287. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.09.011.
- [5] DENG, Qi Lin et al. Experimental Researches on Rapid Forming Full Compacted Metal Parts by Selective Laser Melting. *Materials Science Forum*. 2006, 532-533, s. 428-431. DOI: 10.4028/0-87849-421-9.428.
- [6] ABELE, Eberhard et al. Selective laser melting for manufacturing of thin-walled porous elements. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015, vol. 215, s. 114-122. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.07.017
- [7] THIJS, Lore et al. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Acta Materialia*. 2010, vol. 58, issue 9, s. 3303-3312. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.02.004.
- [8] GUAN, Kai et al. Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel. *Materials*. 2013, vol. 50, s. 581-586. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.03.056.
- [9] SHIFENG, Wen, et al. Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014, vol. 214, issue 11, s. 2660-2667. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.06.002.
- [10] CHERRY, J. A. et al. Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufaconsecutivecturing Technology*. 2014, vol. 76, 5-8, s. 869-879. DOI: 10.1007/s00170-014-6297-2.
- [11] YADROITSEV, I., et al. Single track formation in selective laser melting of metal powders. In: *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, s. 1624-1631. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.05.010.

- [12] YADROITSEV, I., et al. Surface Morphology in Selective Laser Melting of Metal Powders. In: *Physics Procedia*. 2011, s. 264-270. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.034.
- [13] YADROITSEV, I., et al. Parametric analysis of the selective laser melting process. In: *Applied Surface Science*. 2007, s. 8064-8069. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.02.088.
- [14] SPIERINGS, A.B., et al. Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts. In: *Rapid Prototyping Journal*. 2011, roč. 17, s. 195-202 [cit. 2015-05-16]. DOI: 10.1108/13552541111124770.
- [15] STRANO, Giovanni, et al. Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting. In: *Journal of Materials Processing Technology*. 2013, s. 589-597 [cit. 2015-05-16]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.11.011.
- [16] KRUTH, Jean-Pierre, et al. Part and material properties in selective laser melting of metals. In: *Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining*. 2010.
- [17] KRUTH, Jean-Pierre, et al. Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques. In: *Proceedings of International Conference Polymers & Moulds Innovations (PMI)*. Gent, Belgium, 2005.
- [18] YASA, Evren, et al. Microstructure and mechanical properties of Maraging Steel 300 after selective laser melting. In: *Proceedings of the 21st Annual International Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium, University of Texas, Austin*. 2010. p. 383.
- [19] YASA, Evren, et al. Investigation on the inclusions in maraging steel produced by Selective Laser Melting. In: *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping: Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 28 September-1 October, 2011*. CRC Press, 2011. p. 297.
- [20] YASA, Evren, et al. Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel. In: *Physics Procedia*. 2011, roč. 12, s. 255-263. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.033.
- [21] YASA, Evren, et al. Selective Laser Sintering/Melting and Selective Laser Erosion with Nd: YAG Lasers. *Journal of Optics Research*, 2012, 14.3/4: 211.
- [22] CAMPANELLI, S.L., et al. Manufacturing of 18 Ni Marage 300 Steel Samples by Selective Laser Melting. In: *Advanced Materials Research*. 2009 roč. 83-86, s. 850-857 [cit. 2015-05-16]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.83-86.850.

- [23] CAMPANELLI, Sabina Luisa, et al. *Capabilities and performances of the selective laser melting process*. INTECH Open Access Publisher, 2010.s
- [24] CASALINO, G., et al. Experimental investigation and statistical optimisation of the selective laser melting process of a maraging steel. *Optics & Laser Technology*, 2015, 65: 151-158.
- [25] Phenix Systems. *Phenix systems* [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.phenix-systems.com/en/phenix-systems>
- [26] Machine solutions for the automotive industry. *Concept Laser* [online]. [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://www.concept-laser.de/en/industry/automotive/machines.html>
- [27] SLM® 280 HL. *SLM Solutions* [online]. 2014 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: http://www.stage.slm-solutions.com/index.php?slm-280_en#
- [28] Pece kalící PK. *LAC* [online]. c2000-2016 [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://www.lac.cz/produkty/katalogove-pace-susarny/prumyslove-pace-susarny-tepelne-zpracovani-kovu-odlitku/pace-kalici-pk/>
- [29] Disková odstředivá zařízení: Výrobní řada CF Standard. *OTEC* [online]. [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://www.otec.de/cz/vyrobky/omilani/talirova-odstrediva-zarizeni/vyrobni-rada-cf-standard/>
- [30] ATOS Triple Scan. *MCAE: 3D digitální technologie* [online]. 2016 [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/atos>
- [31] PALOUSEK, David, et al. Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy. In: *Optical Materials*. 2015, s. 1-9. DOI: 10.1016/j.optmat.2014.11.020. ISSN 09253467. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925346714005606>
- [32] *ContourGT 3D Optical Microscopes* [online]. In: . [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: https://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF-Docs/Surface Analysis/3D-OpticalMicroscopy/Brochures/ContourGT_3D_Optical_Microscopes-Brochure-B514-RevC0.pdf
- [33] ŠPERKA, Petr. *Měření topografie povrchu interferometrickými metodami*. [online] Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. Dostupné z: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/vyuka/Bezkontaktni_3d_mereni_povrchu.pdf
- [34] MICHÁLEK, Jiří. *Vyhodnocování způsobilosti a výkonnosti výrobního procesu* [online]. Praha: CQR, 2009, 96 s. [cit. 2016-01-04]. ISBN 978-80-903834-2-5. Dostupné z: <http://library.utia.cas.cz/separaty/2009/SI/michalek-evaluation%20of%20process%20capability%20and%20performance-kniha.pdf>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

SLM		Selective laser melting
CAD		Computer aided design
STL		Stereolithography
Nd:YAG		Neodymium-doped yttrium aluminum garnet
PS		Phenix Systems
CL		Concept Laser
YLR		Ytterbium laser
TZ		Tepelné zpracování
CT		Computer tomography
E	[J·mm ⁻³]	hustota energie laseru
LP	[W]	výkon laseru
LS	[mm·s ⁻¹]	rychlost pohybu laseru
h	[mm]	šrafovací vzdálenost
t	[mm]	tloušťka vrstvy
d	[mm]	průměr laserového paprsku
R _{p0.2}	[MPa]	smluvní mez kluzu
R _m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
E	[GPa]	modul pružnosti
A	[%]	tažnost
Z	[%]	kontrakce
ε	[1]	poměrné prodloužení
R	[MPa]	napětí
HV	[1]	tvrdost podle Vickerse
HRC	[1]	tvrdost podle Rockwella
F	[N]	síla
T	[°C]	teplota
t	[s]	čas
D ₀	[mm]	průměr zkušební tyče tahové zkoušky
L ₀	[mm]	délka zkušební tyče tahové zkoušky
d ₁₀	[μm]	mezní velikost částic pro 10 obj. % nejmenších částic
d ₅₀	[μm]	mezní velikost částic pro 50 obj. % nejmenších částic
d ₉₀	[μm]	mezní velikost částic pro 90 obj. % nejmenších částic
σ	[1]	směrodatná odchylka
Ra	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu
Rz	[μm]	průměrná maximální výška profilu
Sa	[μm]	střední aritmetická úchylka měřené plochy

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 Segment formy pneumatiky [2].....	13
Obr. 2-1 Schéma procesu SLM [4].....	14
Obr. 2-2 Parametry výroby SLM [6].....	15
Obr. 2-3 Úhel šrafování [8].....	16
Obr. 2-4 Orientace součásti v rovině XY (a), v rovině XZ (b) [9].....	16
Obr. 2-5 Průřez návaru (vlevo), Porovnání šířek samostatného návaru [11].....	17
Obr. 2-6 Schéma redukce zóny zpracovaného prášku při SLM [12].....	17
Obr. 2-7 Tenké stěny z nerezové oceli 316L [12].....	18
Obr. 2-8 Pohled ze shora na tenké stěny vyrobené pomocí strategie.....	19
Obr. 2-9 Součást pro testování drsnosti nakloněných ploch [15].....	20
Obr. 2-10 Závislost naměřených hodnot drsnosti na úhlu naklonění [15].....	20
Obr. 2-11 Zobrazení zlepšení drsnosti povrchu po re-meltingu [16].....	21
Obr. 2-12 Schéma „Ostrůvkové“ šrafovací strategie [19].....	22
Obr. 2-13 Závislost relativní hustoty a drsnosti povrchu na rychlosti skenování a tloušťce vrstvy [18].....	22
Obr. 2-14 Mikro-tvrdost podle Rockwella v závislosti na teplotě a době vytvrzování [20].....	23
Obr. 2-15 Mechanické vlastností 18Ni maraging oceli, kované nebo vyrobené pomocí SLM [20].....	23
Obr. 2-16 Závislost drsnosti povrchu na rychlosti pohybu laseru u zařízení EOSINT M270 [21].....	24
Obr. 2-17 Zkušební vzorek pro testování rozměrové přesnosti [23].....	25
Obr. 2-18 Drsnost povrchu v závislosti na hustotě energie laseru [24].....	25
Obr. 4-1 Phenix PXL [25].....	29
Obr. 4-2 M2 Cusing [26].....	30
Obr. 4-3 SLM 280HL [27].....	30
Obr. 4-4 Přehled zařazení analýzy odchylek tvaru ve výrobním procesu, Měřicí systém ATOS Triple Scan od firmy GOM [30].....	31
Obr. 4-5 Schéma postupu ve zkoušce vlivu TZ na rozměrovou přesnost.....	32
Obr. 4-6 Přehled zařazení analýzy struktury povrchu ve výrobním procesu, 3D optický interferometr ContourGT-8X firmy Bruker [32].....	33
Obr. 4-7 Princip optické interferometrie [33].....	33
Obr. 4-8 Přehled zařazení materiálových analýz ve výrobním procesu.....	34
Obr. 4-9 Trhací stroj ZwickZ250 Extenzometr MultiXtens.....	35
Obr. 4-10 Rozložení velikosti částic materiálu ST2709B (Phenix Systems).....	37
Obr. 4-11 Rozložení velikosti částic materiálu CL50WS (Concept Laser).....	37
Obr. 4-12 SEM snímky práškového materiálu.....	38
Obr. 5-1 Neleptané výbrusy lamely typu 3.....	40
Obr. 5-2 Leptaný výbrus lamely L1 s různým zvětšením mikrostruktury.....	42
Obr. 5-3 Leptaný výbrus lamely L2 s různým zvětšením mikrostruktury.....	43
Obr. 5-4 Leptaný výbrus lamely L3 s různým zvětšením mikrostruktury.....	43
Obr. 5-5 SEM snímky výbrusu lamely L1 s různým zvětšením mikrostruktury.....	44
Obr. 5-6 SEM snímky výbrusu lamely L2 s různým zvětšením mikrostruktury.....	44
Obr. 5-7 SEM snímky výbrusu lamely L3 s různým zvětšením mikrostruktury.....	44
Obr. 5-8 Kroužkové upnutí válcové hlavy vzorku PXL.....	45
Obr. 5-9 Vzorky pro tahovou zkoušku, vyrobené na M2 a PXL.....	45

Obr. 5-10 Výbrusy obou typů materiálů pro zkoušku tvrdosti.....	46
Obr. 5-11 Charakteristika R-ε tahových zkoušek.....	46
Obr. 5-12 Lomy jednotlivých vzorků po tahové zkoušce	47
Obr. 5-13 SEM snímky lomu vzorku M2-1	48
Obr. 5-14 SEM snímky lomu vzorku M2-3	48
Obr. 5-15 SEM snímky lomu vzorku PXL-1	49
Obr. 5-16 Výsledky měření výšky levé části lamel typu 3, po omílání	50

11 **11 SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 Chemická složení materiálů, uvedené výrobcí a naměřené.....	36
Tab. 2 Statistické parametry velikosti částic vstupního práškového materiálu	37
Tab. 3 Porozita metalografických výbrusů	41
Tab. 4 Výsledky mechanických zkoušek.....	47