



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Vliv přerušení procesu DMLS technologie tisku na strukturu materiálu

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. Aneta Kirschová

VEDOUcí PRÁCE: Ing. Jan Šimota

STUDIJNÍ PROGRAM: VÝROBNÍ INŽENÝRSTVÍ

STUDIJNÍ OBOR: BEZ SPECIALIZACE

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kirschová** Jméno: **Aneta** Osobní číslo: **474810**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv přerušení procesu DMLS technologie tisku na strukturu materiálu

Název diplomové práce anglicky:

Effect of DMLS printing technology process interruption on material structure

Pokyny pro vypracování:

Rešerše současného stavu kovového tisku s ohledem na přerušení stavby.
Vliv procesních parametrů na strukturu materiálu.
Návrh a vyhodnocení experimentu.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Šimota ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **31.03.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2023**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jan Šimota
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Jana Šimoty, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat svému vedoucímu práce panu Ing. Janu Šimotovi za veškeré poskytnuté odborné konzultace během vypracovávání práce, věcné připomínky, dobré rady a vstřícnost a Ing. Zdeňku Pitrmucovi za jeho pomoc a ochotu při výrobě metalografických vzorků.

Anotace

Název diplomové práce: Vliv přerušení procesu DMLS technologie tisku na strukturu materiálu

Autor práce: Bc. Aneta Kirschová

Vedoucí práce: Ing. Jan Šimota

Akademický rok: 2022/2023

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: 12134 – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Vedoucí ústavu: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Rozsah práce: 67 stránek, 10 tabulek, 46 obrázků

Klíčová slova: kovový 3D tisk, DMLS, PBF, struktura, přerušení

Abstrakt: Tato diplomová práce se zabývá analýzou struktury materiálu dílů, u kterých došlo k přerušení DMLS technologie tisku. Teoretická část obsahuje popis technologie DMLS, spolu s používanými materiály. Dále popisuje vliv procesních parametrů a nedostatky této technologie. Praktická část práce se zaměřuje na analýzu struktury vzorků, ve kterých došlo k přerušení procesu tisku. Cílem této analýzy je získat ucelený přehled o struktuře materiálu v takovýchto dílech a identifikovat případné změny.

Annotation

Title of the final thesis: Effect of DMLS printing technology process interruption on material structure

Author: Bc. Aneta Kirschová

Supervisor: Ing. Jan Šimota

Academic year: 2022/2023

University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: 12134 – Department of machining, process planning and metrology

Head of department: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Extent: 67 pages, 10 tables, 46 pictures

Keywords: 3D metal printing, DMLS, PBF, structure, process interruption

Abstract: This thesis focuses on the analysis of the material structure of parts where the DMLS printing technology has been interrupted. The theoretical part contains a description of the DMLS technology, together with the materials used. It also describes the influence of process parameters and the shortcomings of this technology. The practical part of the thesis focuses on the analysis of the structure of samples in which the printing process was interrupted. The aim of this analysis is to obtain a comprehensive overview of the material structure in such parts and to identify any changes.

Obsah

Úvod.....	10
1 Technologie kovového tisku.....	11
1.1 Direct metal laser sintering.....	11
1.2 Electron beam melting.....	14
2 Materiály pro kovový tisk.....	15
2.1 AlSi10Mg.....	15
2.2 Oceli.....	17
2.3 316 L.....	17
2.4 Titanové slitiny.....	18
2.5 Ti6Al4V.....	18
2.6 Recyklace prášku.....	19
3 Parametry tisku	20
3.1 Beam Offset	20
3.2 Strategie tisku	20
3.3 Hustota energie	22
3.3.1 Výkon laseru a princip tavení.....	23
3.3.2 Šrafovací vzdálenost	24
3.3.3 Rychlost skenování	25
3.4 Výška vrstvy	25
3.5 Vliv parametrů.....	25
3.6 Předpokládaná mikrostruktura.....	27
4 Nedostatky technologie PBF.....	28
4.1 Vznik pórů.....	28
4.1.1 Plynové póry.....	28
4.1.2 Pórovitost vlivem nízké hustoty energie	29

4.2	Přerušení procesu tisku.....	30
4.3	Vlastnosti výtisku s přerušením procesu.....	31
5	Návrh experimentu	33
5.1	Příprava tisku	34
5.2	Parametry tisku.....	34
5.3	Post processing.....	35
5.4	Výpočetní tomografie–CT.....	36
6	Vzorky 1.....	37
6.1	Vyhodnocení CT skenů.....	38
6.1.1	Vzorek 18 B	38
6.1.2	Vzorek 25 C	41
6.1.3	Vzorky 30 C, 31 D, 42 D, 43 E	42
6.2	Analýza metalografických vzorků.....	43
6.2.1	Analýza pórovitosti	45
7	Vzorky 2.....	48
7.1	Vyhodnocení CT skenů.....	50
7.1.1	Váleček 25.....	50
7.1.2	Váleček 13.....	51
7.1.3	Váleček 1	52
7.2	Analýza mikrostruktury	52
7.2.1	Porozita vzorků.....	53
7.2.2	Mikrostruktura vzorků	55
8	Závěr	59
9	Bibliografie.....	60
	Seznam tabulek	65
	Seznam obrázků	66

Seznam zkratek a jednotek

DMLS	Direct metal laser sintering
SLA	Stereolitografie
PBF	Powder bed fusion
EBM	Electron beam melting
BO	Beam Offset
CAD	Computer Aided Design
HEA	Hot Extraction Analysis (extrakční analýza za tepla)
STL	univerzální datový formát
SW	software
CT	výpočetní tomografie
AB	as build
μm	mikrometr
J/mm	hustota lineární energie
J/mm ²	hustota plošné energie
J/mm ³	hustota objemové energie
W	watt, jednotka výkonu
mm/s	jednotka rychlosti skenování

Úvod

Aditivní technologie jsou v posledních letech velmi oblíbené v oblasti průmyslové výroby. Tento způsob výroby umožňuje efektivně a rychle vytvářet složitou geometrii výrobků, a to s vysokou kvalitou a přesností. Proti konvenčním technologiím, kdy dochází k úběru materiálu, aditivní technologie pracují na principu postupného přidávání materiálu. Díky tomu se snižují náklady na výrobu a zmenšuje se množství odpadu.

Aditivní technologie pracují s různými materiály, včetně kovů, polymerů, keramiky a dalších materiálů. Tato práce se zaměřila na aditivní technologie využívající kov při výrobě. Ty lze rozdělit do několika kategorií podle formy přídavného materiálu. Mezi nejvýznamnější z nich se řadí Powder bed fusion, Direct energy deposition a stejně jako u polymerů Material extrusion. Powder bed fusion neboli PBF, lze dále rozdělit podle typu zdroje na laserový a elektronový paprsek.

Tato práce se zabývala problematikou přerušného tisku technologií PBF, se zaměřením na princip výroby pomocí Direct metal laser sintering neboli DMLS. Byla zkoumána vnitřní struktura vytvořených dílů a bylo posuzováno, zda je možné tyto díly dokončit a zda byly schopné plnit své funkce. Dále se práce zaměřila na analýzu mikrostruktury materiálu a zhodnotila případné nedostatky vzniklé při přerušení tisku, stejně jako nedostatky související s touto technologií.

Cílem této práce bylo tedy poskytnout ucelený pohled na problematiku přerušného tisku technologií PBF. V práci byla představena teoretická část zaměřující se na princip těchto technologií, používaných materiálů a parametrů ovlivňující kvalitu vytvořených součástí. V praktické části se tato práce věnovala analýze vytvořených vzorků. Výsledky této práce mohou být použity jako základ pro další výzkum tohoto problému.

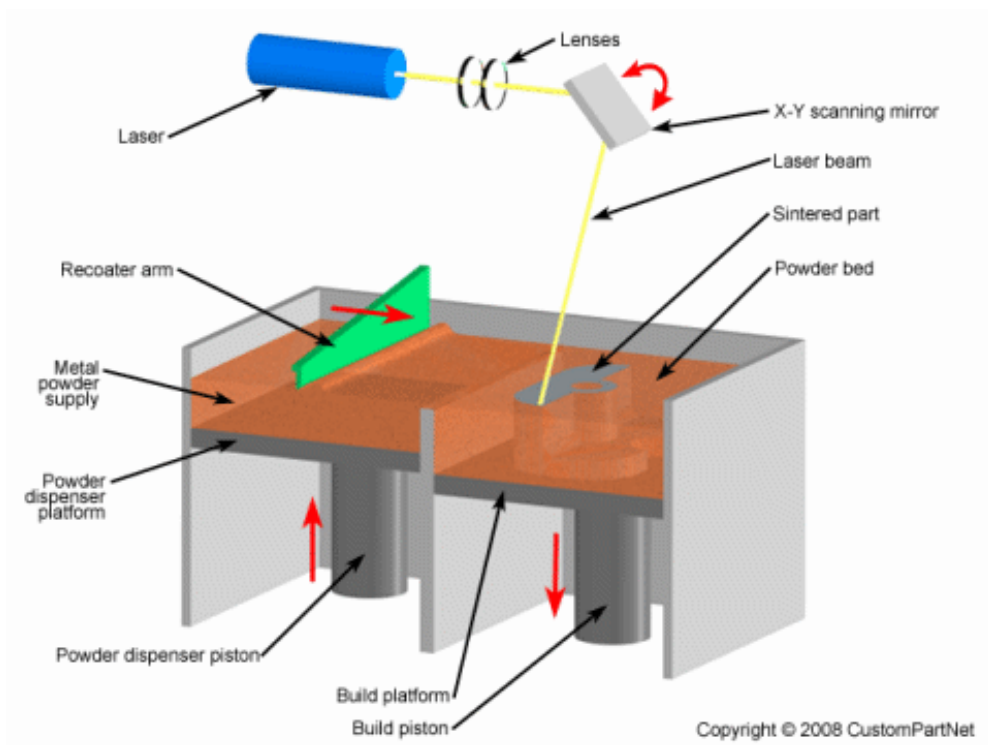
1 Technologie kovového tisku

Za vznik aditivních technologií v dnešní podobě je považován objev Charlesem Hullem. Své objevy si v roce 1984 nechává patentovat pod názvem „Zařízení pro výrobu trojrozměrných objektů pomocí stereolitografie“. V tomto patentu je poprvé definována technologie stereolitografie (SLA). V průběhu 80. a 90. let 20. století se na trh přidávají i další technologie, které ovlivní průmysl. Za další milník lze považovat rok 1997, kdy společnost EOS získala výhradní právo v oblasti laserového spékání [1].

Tato část práce se věnovala technologiím založeným na principu Powder bed fusion. Výhodnou PBF je rozsáhlé pole působnosti. Díly vyrobené kovovým tiskem mohou být značně lehčí, mít slabší stěny a mají další výhody oproti obráběným dílům.

1.1 Direct metal laser sintering

Direct metal laser sintering neboli DMLS, je jednou z velmi využívaných technologií kovového tisku. DMLS pracuje na principu postupného vytvrzování jednotlivých vrstev nanášeného kovového prášku.



Obrázek 1 Princip DMLS [2]

Princip procesu DMLS je ukázán na obrázku 1. Tisk je založen na současné funkci dvou komor. Jedna komora se využívá jako zásobník prášku. Ve druhé komoře je uložena přišroubovaná stavěcí deska. Jednotlivé vrstvy prášku jsou pomocí recoateru neboli nanašeče přesouvány z komory se zásobou prášku do komory se stavební paletou. Každá vrstva je lokálně roztavena pomocí výkonného laseru. Komora s práškem o jednu vrstvu stoupne a pomocí pístu klesne deska v komoře druhé a takto se proces opakuje [2].

Pro DMLS se doporučuje používat vrstvu o výšce 20–40 μm [2]. Optimální volba výšky vrstvy u procesu aditivní výroby má zásadní vliv na dosaženou přesnost a rozlišení výsledného dílu. Nicméně, tento faktor úzce souvisí s celkovým výrobním časem, protože čím vyšší je požadovaná přesnost a rozlišení, tím delší dobu trvá výrobní proces.

Technologie DMLS ve svém počátku používala převážně CO_2 laser, ten však může tavit pouze omezený počet materiálů. S vývojem laserových technologií se stále častěji v komerčních systémech DMLS používají ytterbiové či pevnolátková Nd-YAG vlákna laserů s výkonem od 200 W do 1000 W [3].

Pro výrobu dílu pomocí metody DMLS se využívá kovový prášek, který je specifický dle použitého materiálu. Přestože se z prášku odstraňuje co největší obsah vlhkosti ještě před vložením do stroje, není možné ji odstranit zcela, a tak se během procesu může měnit na vodní páru a následně docházet k oxidaci při styku s povrchem tisknutého dílu. V některých případech mohou být prášky kontaminovány jinými prvky, což může zvýšit jejich hořlavost nebo dokonce výbušnost. V důsledku toho se tisková komora často napouští inertním plynem, jako je například dusík, který brání oxidaci dílu.

Dokončený díl se neobejde bez následného zpracování. Před odstraněním dílů z tiskové podložky je nejprve potřeba odstranit zbylý prášek z komory. Dalším krokem je demontování tiskové podložky z tiskárny a následné odstranění dílu, které se provádí nejčastěji odřezáním z tiskové podložky. Poté je potřeba odstranit podpůrné struktury od samotného dílu. Jako každý kovový díl je možné vytisknuté díly tryskat, tepelně zpracovávat a obrábět konvenčním způsobem [4]. Následující tabulka 1 zobrazuje hlavní výhody a nevýhody technologie DMLS [5].

Tabulka 1 Výhody a nevýhody technologie DMLS

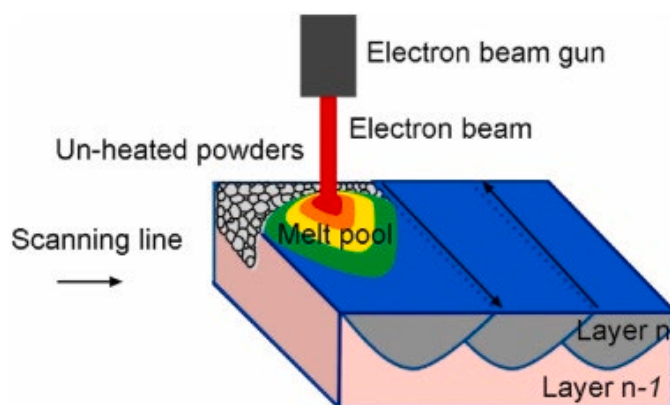
Výhody technologie DMLS	Nevýhody technologie DMLS
vysoká pevnost a houževnatost dílů	vysoká energetická náročnost strojů
snížení nákladů a časů výroby	vysoké vstupní náklady na zařízení
automatická činnost stroje po spuštění	potřeba následného post processingu dílů
možnost tisku dat přímo od zákazníka	omezený tiskový prostor s ohledem na velikost zařízení
nízká spotřeba materiálu, nepoužitý prášek lze znovu použít	

K dalším výhodám této technologie patří možnost navrhnout vnitřní prvky či průchody, které by nebylo možné odlít nebo jinak zpracovat. Proces DMLS nevyžaduje speciální nástroje jako například odlévání, proto je výhodný pro krátké výrobní série. DMLS se používá k výrobě odlehčených struktur, které jsou inspirované přírodními systémy. Díky tomu mají vytvořené díly nízkou hustotu a vysokou pevnost [6].

Při práci s kovovými prášky v aditivní výrobě je nezbytné striktně dodržovat zásady bezpečnosti. Některé typy kovových prášků mohou být extrémně reaktivní vůči okolní atmosféře a mohou explodovat. Proto je klíčové používat vhodné ochranné pomůcky a minimalizovat výskyt kovového prachu v laboratorním prostředí. Kvůli riziku expozice těžkým kovům, které se v prášcích nacházejí i v malých koncentracích, hrozí vážné ohrožení zdraví při neodpovídajícím způsobu manipulace s těmito materiály. [7].

1.2 Electron beam melting

Technologie Electron beam melting neboli EBM pracuje na principu natavení kovového prášku pomocí elektronů ve vakuu. Podmínka pro fungování tohoto principu je elektrická vodivost materiálu. Výhodou této technologie je její přesnost a skvělé vlastnosti výrobků. Tato technologie se nejčastěji používá v leteckém či automobilovém průmyslu, ale i v medicíně. Nevýhodou je malé množství použitelných materiálů a velmi vysoké náklady na pořízení. Nejčastěji se používá pro titanové slitiny [8].



Obrázek 2 EBM technologie [8]

V tabulce 2 jsou zaznamenány rozdíly mezi EBM a DMLS. Před rozhodnutím, kterou technologií použít je důležité si uvědomit, že každá technologie má své výhody a nevýhody. Volba pak závisí na konkrétních požadavcích na výrobek.

Tabulka 2 Porovnání technologií EBM a DMLS

Parametr	Electron beam melting	Direct metal laser sintering
Princip	elektronový paprsek je použit k tavení práškového materiálu a vytváření objektů vrstvu po vrstvě	tenká vrstva prášku je rovnoměrně nanášena na podložku, poté je lokálně slinována laserem
Zdroj energie	elektronový paprsek	laser
Práškový materiál	kovy	kovy, plasty, kompozity...
Požadavky na podpory	bez podpor	s podporami
Post processing	méně potřebný	často vyžadovaný
Využití	letecký a vesmírný průmysl	lékařství, automobilový průmysl

2 Materiály pro kovový tisk

Technologie PBF jsou založené na principu spékání kovového prášku. Z tohoto důvodu je možné používat hlavně svařitelné kovy. Nejčastěji se jedná o hliník, nerezové oceli či titanové slitiny. Každý materiál se využívá v jiném odvětví.

2.1 AISi10Mg

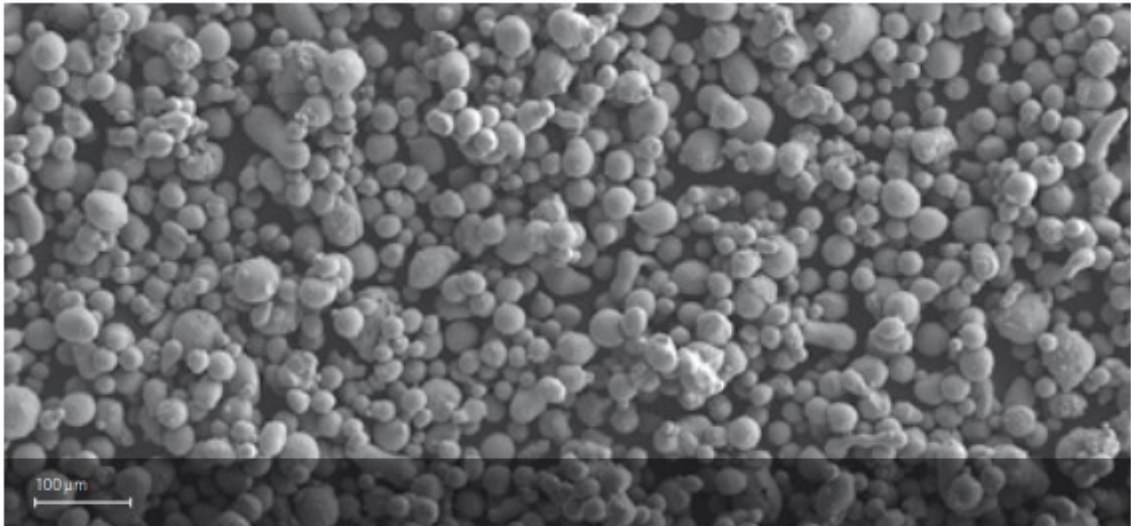
AISI10Mg patří mezi významné zástupce hliníkových siluminových slitin, které jsou charakterizovány vynikajícími tepelnými a elektrickými vlastnostmi, jakož i vysokou odolností vůči korozi. Díky své nízké hustotě a příznivým mechanickým vlastnostem je tato slitina uplatnitelná v široké škále průmyslových odvětví [9].

Vzhledem k variabilitě chemického složení (viz tabulka 3) kovového prášku různých výrobců se v materiálových listech vždy uvádí rozmezí velikosti částic prášku. Pro AISi10Mg od společnosti EOS byla stanovena velikostní hranice částic mezi 25-70 μm , jak je vidět na snímku prášku zobrazeném na obrázku 3, který byl pořízen skenovacím elektronovým mikroskopem (SEM) [10].

V tabulce 4 se pak objevují mechanické vlastnosti. Mechanické vlastnosti se mění v závislosti na směru spékání, výšce vrstvy a následném tepelném zpracování (TZ).

Tabulka 3 Chemické složení AISi10Mg [10]

Prvek	Minimum podílu [%]	Maximum podílu [%]
Hořčík (Mg)	0,25	0,45
Křemík (Si)	9	11
Železo (Fe)	-	0,55
Měď (Cu)	-	0,05
Mangan (Mn)	-	0,45
Nikl (Ni)	-	0,05
Zinek (Zn)	-	0,1
Olovo (Pb)	-	0,05
Cín (Sn)	-	0,05
Titan (Ti)	-	0,15
Hliník (Al)	zbytek	zbytek



Obrázek 3 Snímek ze SEM prášku AlSi10Mg společnosti EOS [10]

Tabulka 4 Mechanické vlastnosti AlSi10Mg [11]

Mechanické vlastnosti AlSi10Mg			
		Bez TZ	s TZ*
Mez pevnosti v tahu	Horizontálně	302±50 MPa	257±18 MPa
	Vertikálně	302±20 MPa	257±18 MPa
Mez kluzu Rp 0,2	Horizontálně	177±50 MPa	154±21 MPa
	Vertikálně	177±50 MPa	154±21 MPa
Tažnost	Horizontálně	4,5±2,1 %	11,6±6,5%
	Vertikálně	4,5±2,1 %	11,6±6,5 %
Modul pružnosti	Horizontálně	65±8,5 GPa	70±14 GPa
	Vertikálně	65±8,5 GPa	70±14 GPa
Tvrдость		120±5 HBW	-
Únavová pevnost**		97±7 MPa	-

*Žihání ke snížení pnutí 2 hodiny při 300 °C

**Test únavy s frekvencí 50 Hz, měření ukončeno po 5·10⁶ cyklů bez trhliny

2.2 Oceli

Oceli jsou stále nejběžněji používaným materiálem ve strojírenství, proto mají své místo i ve výrobě pomocí aditivních technologií. Pro tyto účely se nejvíce používají austenitické nerezové a vysokopevnostní oceli.

Výtisky z nerezové oceli dosahují velmi dobrých mechanických vlastností a jsou použitelné v různých průmyslových aplikacích. Jejich výhodou je vysoká pevnost a odolnost vůči korozi i vysokým teplotám. Lze je využívat pro tvorbu forem a nástrojů, a to díky jejich schopnosti tvořit komplexní geometrie. Nevýhodou je především vyšší cena ocelového prášku [12].

2.3 316 L

Ocel 316L patří mezi austenitické nerezové oceli jinak známé jako chirurgické oceli. Tato ocel má vysokou korozní odolnost vůči mnoha chemickým látkám a vysokou odolnost vůči nárazům. Díky těmto vlastnostem je tato ocel hojně využívána v široké škále průmyslových aplikací, jako je například zdravotnický, potravinářský a letecký průmysl.

Složení oceli 316L se liší od jiných nerezových ocelí. Obsahuje 16–18 % chromu, 10–14 % niklu a 2–3 % molybdenu. Molybden zvyšuje odolnost proti korozi, zejména v prostředí obsahujícím chloridy. Ocel 316L obsahuje také nízké množství uhlíku, což zlepšuje svařitelnost a zabraňuje tvorbě karbidových fází, které by mohly snížit korozní odolnost. Mezi další prvky v oceli 316L patří mangan, křemík, fosfor, síra a dusík.

Ocel 316L má také vynikající mechanické vlastnosti. Je to pevná ocel s vysokou únavovou pevností, vynikající tvářitelností a dobrou svařitelností. Díky těmto vlastnostem je ocel 316L oblíbenou volbou pro výrobu průmyslových komponent a dílů, které musí vydržet vysoké namáhání a vystavení korozivnímu prostředí.

Celkově lze tedy říct, že ocel 316L je ideální materiál pro mnoho průmyslových aplikací, zejména tam, kde je vyžadována vysoká korozní odolnost a pevnost.

2.4 Titanové slitiny

Titan a jeho slitiny jsou stále více využívány v aditivní výrobě pro své unikátní vlastnosti, jako je vynikající pevnost, nízká hustota, vysoká odolnost proti korozi a biokompatibilita. To znamená, že není tělem odmítána a nezpůsobuje alergické reakce, proto je vhodná pro výrobu implantátů a jiných lékařských potřeb. Protože je titan nákladný a složitý na zpracování, aditivní výroba poskytuje efektivní a hospodárnou alternativu k tradičním výrobním metodám. Titanové slitiny mají široké využití v leteckém a automobilovém průmyslu a lékařství [12].

2.5 Ti6Al4V

Ti6Al4V je slitina titanu nejvíce používaná v aditivní výrobě. Tato slitina má vynikající mechanické vlastnosti, dobrou korozní a únavovou odolnost, zároveň je biokompatibilní [12].



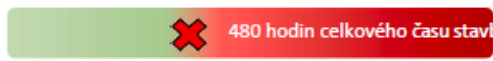








Obrázek 4 DMLS díl z Ti6Al4V [31]

2.6 Recyklace prášku

Jednou z předností technologie DMLS je recyklace použitého prášku. Z hlediska finanční náročnosti tisku, pomáhá recyklace kovového prášku snižovat náklady. I přes to, že při recyklaci dochází ke změnám v materiálu, tak významně neovlivňují vlastnosti prášku. Na základě několika výzkumů bylo zjištěno, že běžně lze prášek u laserových technologií použít až pro 21 cyklů [13].

Moghiminan [14] a spol. ve výzkumu uvádějí, že vždy záleží i na výrobním procesu výroby práškového kovu. Obrázek 5 ukazuje niklové, titanové a hliníkové slitiny a jejich opětovné využití bez výraznější změny vlastností.

	Typ	PSD	Počet cyklů opakovaného použití					Ref.	
			0	10	20	30	40		
Slitina niklu 718									
E-PBF	-	45-106						Počáteční dávka 100 kg prášku [59]	
L-PBF	GA	15-45	~ 768 cm ³ stavebního objemu prášku					25 kg počáteční dávky [51]	
	GA	~15-63	Celkem 7 kg vytištěných dílů z 80 kg počátečního množství prášku.					[36]	
Ti-6Al-4V									
E-PBF	-	45-106						90 kg počáteční dávky prášku	Třída 23 [54]
	PA	45-106						480 hodin celkového času stavění	Třída 5 [62]
	PA	45-106							Třída 5 [60]
	-	45-106						Počáteční dávka 100 kg prášku	Třída 5 [59]
L-PBF	GA	~15-63							Třída - [74]
	GA	~25-53	653 hodin kumulované doby činnosti laseru						Třída 23 [73]
	GA	15-45							Třída 23 [47]
Al-Si10-Mg									
L-PBF	GA	~15-63							[58]
	GA	~20-63						5 kg celkem vytištěných dílů z 20 kg počátečního vloženého prášku	[36]

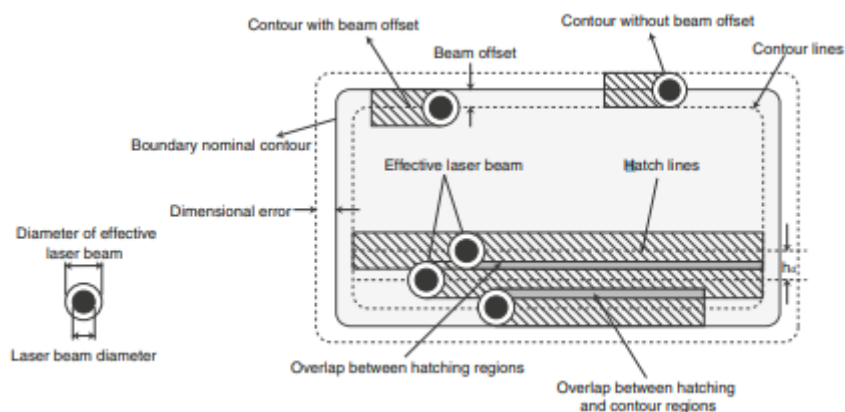
Obrázek 5 Přehled výzkumů opětovného použití práškových materiálů [14]

3 Parametry tisku

Pro každý výrobek je nutné nastavit požadované parametry tisku. Tyto parametry určují výsledné vlastnosti dílů. Jedním z nejdůležitějších parametrů je kompenzace rozměrové chyby neboli Beam Offset. Mezi další parametry se řadí výkon laseru, rychlost tisku, výška vrstvy a strategie tisku.

3.1 Beam Offset

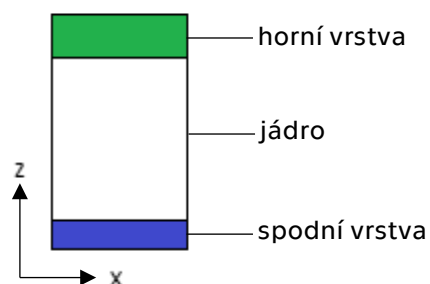
Beam offset, dále jen BO, je rozměr, který kompenzuje průměr roztavené vrstvy a průměr laseru. To zajistí, aby se výsledný rozměr shodoval s podkladovými CAD daty. Jak naznačuje obrázek 6, průměr tepelně ovlivněné oblasti je větší než průměr laserového paprsku. Aby došlo k zachování rozměrů, měl by být laserový paprsek posunut o polovinu šířky vytvrzování od obrysu směrem dovnitř. V případě, že by se nevyužilo kompenzace, dochází u dílů ke změně rozměrů, což je pro jejich použití nepřijatelné [15].



Obrázek 6 Strategie expozice a parametry procesu [15]

3.2 Strategie tisku

Strategie tisku je klíčovým faktorem při 3D tisku a zahrnuje postup, jakým způsobem budou jednotlivé vrstvy vytvořeny. Tisknuté díly lze rozdělit do tří částí, jak je ilustrováno na obrázku 7. Spodní vrstvu vytváří první dvě vrstvy, které jsou vytvořeny na základně dílu. Horní vrstva je složena z posledních tří vrstev, které se vytvoří na vrchu dílu. Mezi spodní a horní vrstvou se nachází jádro [16].



Obrázek 7 Ilustrace spodní vrstvy, horní vrstvy a jádra v dílu

Je nutné pečlivě zvolit strategii tisku, aby bylo dosaženo optimálních výsledků. Existuje mnoho různých strategií ve směru os X a Y, do kterých spadá šachovnice, meandr, pruhy apod. (Obrázek 8) [17]

Scan Strategy	Layout
Meander	<p>The Meander layout shows a square area filled with diagonal orange lines. A black path starts at point A in the bottom-left corner and zigzags across the area, ending at point B in the top-right corner. Arrows indicate the direction of the scan.</p>
Stripes	<p>The Stripes layout shows a square area with vertical orange stripes. A black path starts at the bottom-left corner and moves vertically up and down across the stripes, ending with a horizontal segment on the right side. Arrows indicate the direction of the scan.</p>
Chessboard	<p>The Chessboard layout shows a square area with a checkerboard pattern of orange stripes. A black path starts at the bottom-left corner and moves in a complex, non-linear path across the area, ending with a vertical segment on the right side. Arrows indicate the direction of the scan.</p>

Obrázek 8 Skenovací strategie [17]

Pro tisk hliníkových slitin využívá společnost General Electric (GE) strategii Skin-core. Tato strategie využívá skenování vnějších perimetrů (skin) v každé vrstvě, zatímco pro výplň (core) využívá větší energii a skenuje se každá druhá vrstva.

Správná strategie tisku může mít vliv na pevnost, přesnost a celkovou kvalitu tisknutého dílu. Proto je důležité zvolit strategii tisku s ohledem na požadované vlastnosti výsledného dílu a podmínky tisku.

3.3 Hustota energie

Hustota energie je kombinovaný procesní parametr, který složený ze základních vstupních parametrů. Aby došlo ke správnému spečení vrstev, je důležité použití správné energie. Zvyšování hustoty energie zvyšuje nárůst hloubky spékání a také kvalitu povrchu laserem spékaných dílů. Pro porovnání jednotlivých procesů lze použít tři druhy energie [18]. Lineární energie (E) je dána rovnicí 1:

$$E = \frac{P}{v} \left[\frac{J}{mm} \right] \quad (1)$$

P... výkon laseru [W]

v ... skenovací rychlost [mm/s]

Plošná energie (E_p) se využívá ke sledování energie při vytváření jednotlivých single tracků, tedy osamocených návarů. Kromě stejných parametrů, jako u lineární energie, má zde vliv i výška vrstvy. Výsledná rovnice 2:

$$E_p = \frac{P}{v \cdot t} \left[\frac{J}{mm^2} \right] \quad (2)$$

P... výkon laseru [W]

v ... skenovací rychlost [mm/s]

t ... tloušťka (výška) vrstvy [mm]

Třetím druhem je objemová energie. Lze ji využít pro porovnání použitých energií při výrobě objemových těles. Do této energie vstupuje další parametr a tím je šrafovací vzdálenost. Díky tomu se jedná o relevantnější porovnání jednotlivých procesů. Rovnice 3:

$$E_o = \frac{P}{v \cdot t \cdot h} \left[\frac{J}{mm^3} \right] \quad (3)$$

P... výkon laseru [W]

v ... skenovací rychlost [mm/s]

t ... tloušťka (výška) vrstvy [mm]

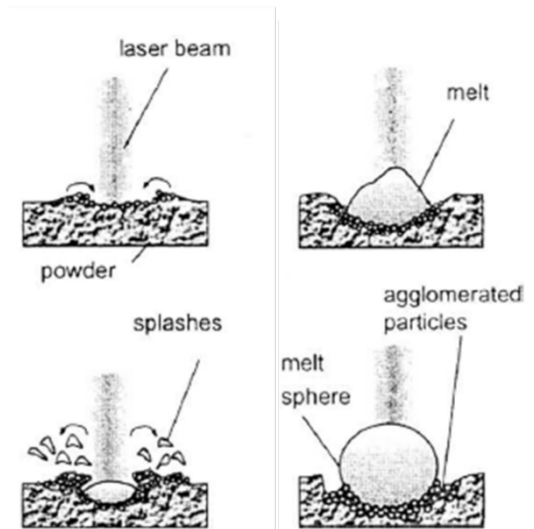
h ... šrafovací vzdálenost [mm]

I přesto, že existují výpočty pro získání optimální hustoty energie, nelze s přesností určit tuto hodnotu. Každá společnost si tento parametr určuje podle svých zkušeností a nastavených parametrů. Těmito hodnotami je možné se řídit, avšak pokud je potřeba dosáhnout lepších výsledků, než jaké nabízí výchozí nastavení od výrobce, nezbyvá nic jiného, než nastavení parametrů testovat, dokud neodpovídají zvýšeným požadavkům.

3.3.1 Výkon laseru a princip tavení

Výkon laseru označuje hodnotu vyzařované energie ze zdroje laseru. Běžně se výkony pohybují od 50 W do 500 W [18]. Výkon laseru je závislý nejen na možnostech tiskárny, ale také na požadavcích materiálu. Každý materiál potřebuje jinak velkou energii k tomu, aby se dokázal roztavit. Princip tavení je na obrázku 9.

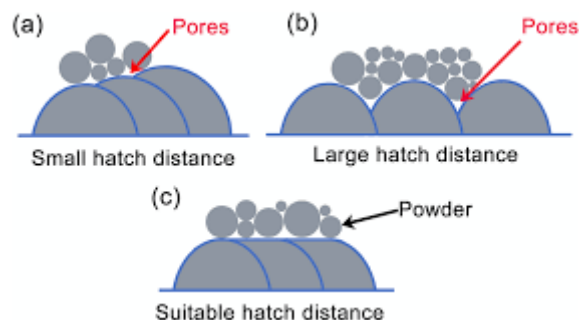
Při dopadu laserového paprsku na částice prášku v jednom bodě se částice na povrchu začnou tavit. V první fázi roztavený prášek na povrchu přitahuje ostatní částice. Postupná absorpce energie způsobuje další tavení a vznikají rozstříky. Ve třetí a čtvrté fázi začnou roztavené částice prášku vlivem povrchového napětí vytvářet koule [19].



Obrázek 9 Princip tavení laserem [19]

3.3.2 Šrafovací vzdálenost

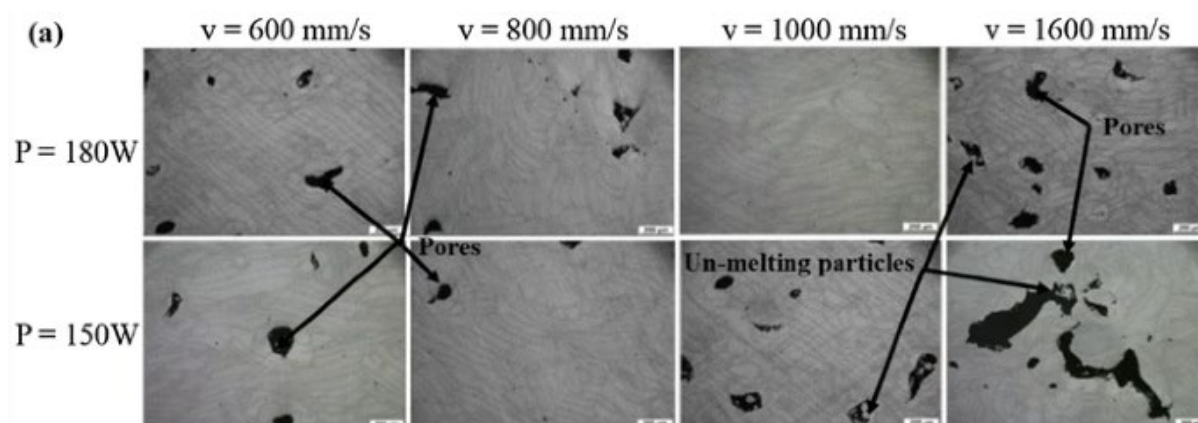
Šrafovací vzdálenost udává vzdálenost mezi dvěma po sobě jdoucími řádky. Pokud je tato vzdálenost příliš veliká, nedojde ke správnému spojení po sobě jdoucích řádků. To podporuje vznik nežádoucích pórů. Se snižující se vzdáleností jsou skenované řádky těsněji propojeny. Nicméně při výrazném snížení této vzdálenosti může docházet ke značné neefektivnosti výroby. Šrafovací vzdálenost má vliv na tvrdost a hustotu dílů [18].



Obrázek 10 Šrafovací vzdálenost a vliv na vznik pórů [32]

3.3.3 Rychlost skenování

Rychlost skenování udává posuv tiskové hlavy v osách X a Y. Pro technologie PBF se pohybuje v rozmezí stovek až tisíců mm/s, obvykle 600–1000 mm/s. Rychlost skenování závisí na použitém nastavení stroje. Většina tiskáren má v závislosti na nastavení výkonu laseru nastavenou optimální rychlost skenování. Při zvýšení rychlosti skenování dojde k zrychlení tisku, nicméně to může vést ke snížení celkové hustoty energie a k nedokonalostem v tisku [18] [20].



Obrázek 11 Vliv rychlosti skenování a výkonu laseru na mikrostrukturu [20]

3.4 Výška vrstvy

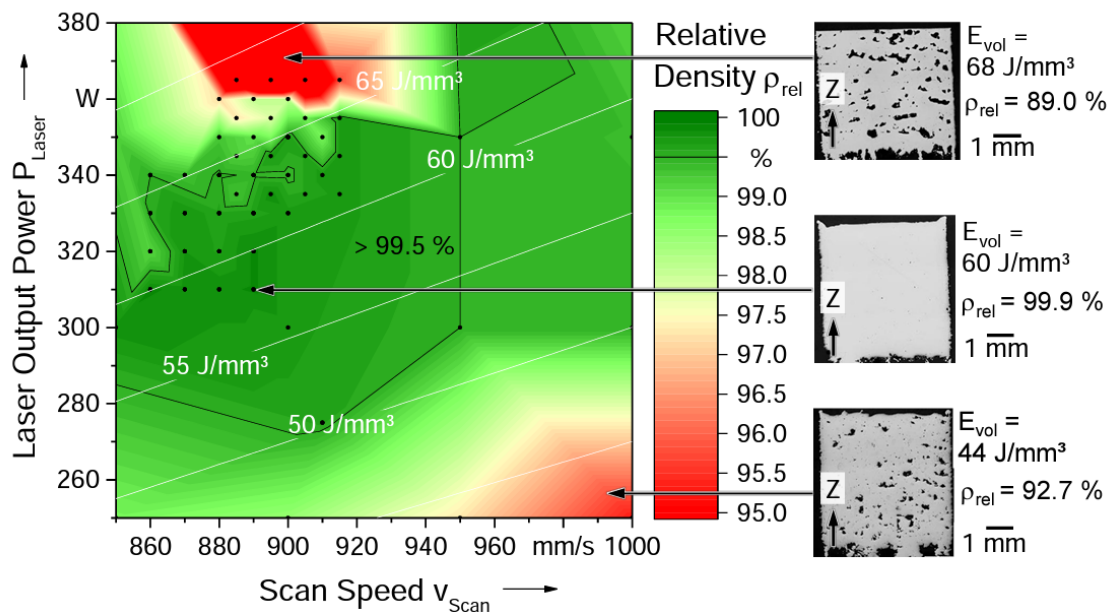
Výška vrstvy představuje nanesení jedné vrstvy ve směru pohybu osy Z. U technologií PBF se běžně používá výška vrstva v rozmezí 20-50 μm . Avšak s ohledem na optimalizaci doby tisku, je žádoucí toto rozmezí zvýšit. Zvýšení výšky vrstvy má přitom zjevné výhody. Pokud dojde k jejímu zdvojnásobení, ubude počet vrstev nutných pro tisk stejné součásti na polovinu, což vede ke snížení výrobního času. Avšak je třeba mít na paměti, že zvyšování výšky vrstvy přináší rizika spojená s horší kvalitou výsledného povrchu či celkově neúspěšným tiskem [18].

3.5 Vliv parametrů

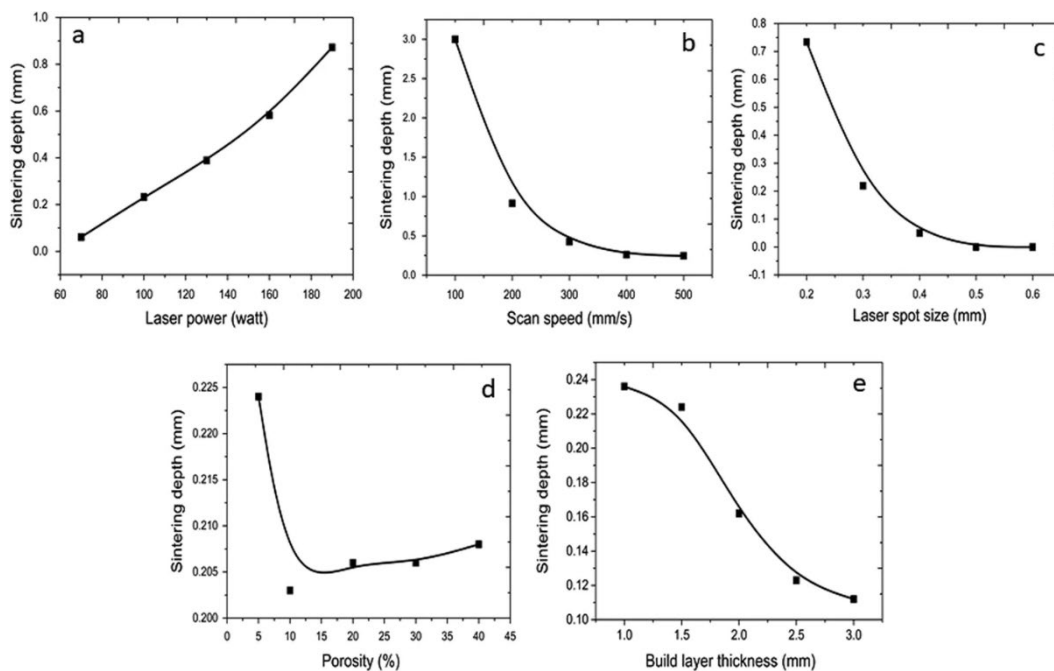
Všechny výše zmíněné parametry v konečném důsledku ovlivňují kvalitu daných součástí. Mezi kvalitativní požadavky patří homogenita materiálu, mechanické vlastnosti nebo vysoká relativní hustota. Poslední zmíněná relativní hustota vyjadřuje objem pórovitosti dílu. Čím je větší, tím méně porů daná

struktura obsahuje. Většinou se jedná o požadavek na 99% relativní hustoty. Na obrázku 12 je zobrazena závislost výkonu laseru a skenovací vzdálenosti na relativní hustotu dílu. Tato mapa je získána z 83 vzorků o různých parametrech [21].

V závislosti na použitých parametrech se mění i hloubka slinování. Na následujících grafech (obrázek 13) je znázorněna hloubka slinování v závislosti na ostatních parametrech [22].



Obrázek 12 Závislost relativní hustoty na výkonu laseru a skenovací rychlosti [21]



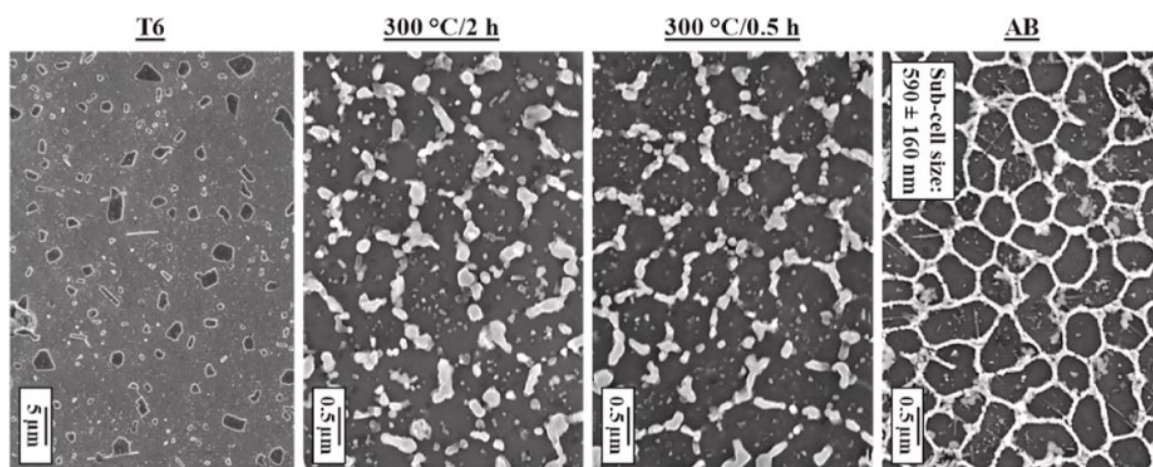
Obrázek 13 Závislost hloubky slinování na ostatních parametrech [22]

3.6 Předpokládaná mikrostruktura

Mikrostruktura slitiny AlSi10Mg je tvořena hliníkovými krystaly s vysokou hustotou dislokací a krystaly hořčíku a křemíku, které jsou distribuovány nerovnoměrně v hliníkové matici. Tyto krystaly mají typicky velikost v rozmezí 10-50 μm .

Při procesu PBF se mikrostruktura slitiny AlSi10Mg může lišit od mikrostruktury vytvořené klasickými metodami, jako je například slévání. Proces PBF může vést k různým defektům, jako jsou póry nebo neroztavené části v materiálu, které mohou ovlivnit jeho mikrostrukturu a mechanické vlastnosti. Výzkumy [23] [24] ukazují, že mikrostruktura slitiny AlSi10Mg vyrobené pomocí PBF může být charakterizována velmi jemnou strukturou s velikostí zrna menší než 1 μm . Tato jemná mikrostruktura může být dosažena díky rychlému ochlazení materiálu během procesu PBF. Tento proces také může vést k tvorbě nerovnoměrné distribuce složek v mikrostrukturu, což může ovlivnit mechanické vlastnosti slitiny.

Na mikrostrukturu má vliv i tepelné zpracování. Slitinu AlSi10Mg je možné zpracovávat různými způsoby. Jedním z nich je žíhání pro snížení pnutí, kdy se teplota v peci pohybuje mezi 200–300 $^{\circ}\text{C}$. Dále se jedná o tepelné zpracování T6, tedy rozpouštěcí žíhání + kalení + umělé stárnutí. Na obrázku 14 je ukázána mikrostruktura po různých tepelných zpracováních a bez tepelného zpracování, as build (AB), tedy tak jak byla stavba dokončena.



Obrázek 14 Mikrostruktura AlSi10Mg bez tepelného zpracování (AB) a s tepelným zpracováním [24]

4 Nedostatky technologie PBF

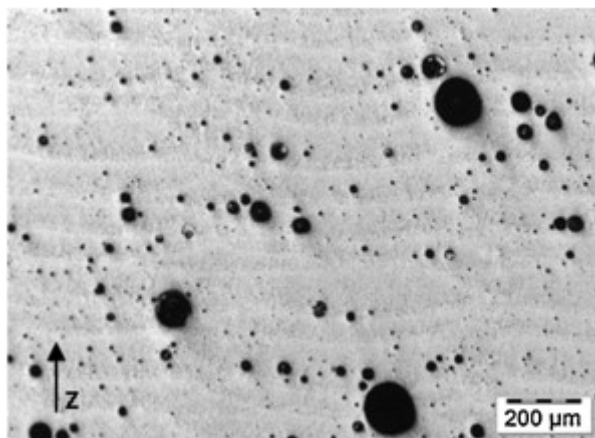
Technologie práškového tisku mají velké množství výhod, ale stále se nejedná o bezchybný proces. Tato část práce se zaměřuje na problémy, ke kterým může během procesu dojít.

4.1 Vznik pórů

Vznik pórů v materiálové struktuře může být způsoben několika faktory, kterými může být nesprávná volba procesních parametrů, nevhodná strategie tisku a nadměrná vlhkost použitého prášku. Tyto faktory mohou vést k nežádoucím vlastnostem tisknutého výrobku a snížení jeho celkové kvality. Pro dosažení optimálního výsledku je tedy důležité pečlivě vybírat procesní parametry a zvolit vhodnou strategii tisku, která minimalizuje riziko vzniku porézní struktury.

4.1.1 Plynové póry

Plynové póry mohou vznikat působením dvou faktorů. A to z plynové atmosféry v tiskové komoře nebo z plynů zachycených v prášku. Tyto póry mají typicky kulatý tvar a mohou být snadno identifikovány.



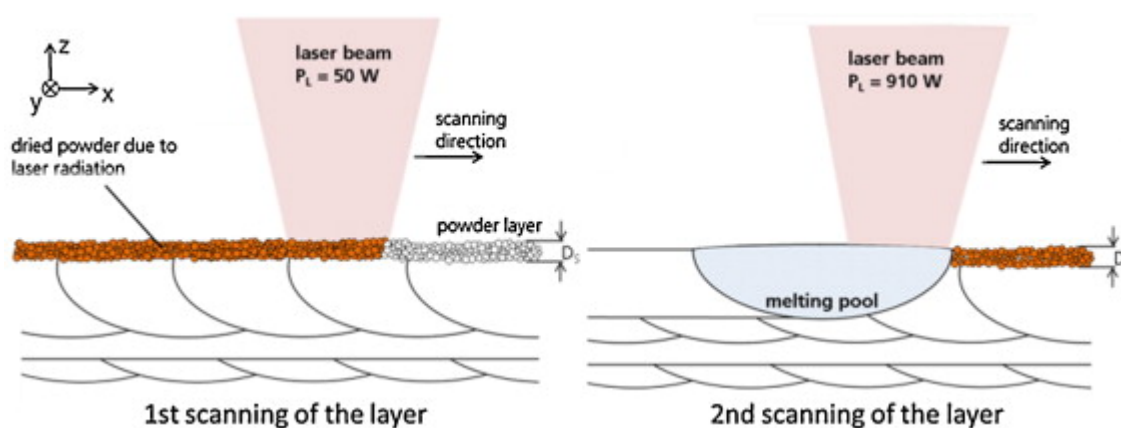
Obrázek 15 Plynové póry [18]

V případě slitině AlSi10Mg jsou tyto plynové póry tvořeny vodíkem, jak ukázal výzkum Weingartena a spol. [25]. V rámci této studie bylo zjištěno, že až 96 % plynových pórů v této slitině je tvořeno vodíkem.

Pro určení původu vodíku, byly použity dvě metody měření. Z měření obsahu vodíku ve vlhkosti na povrchu částic prášku vyšlo, že dávka prášku

obsahuje 0,015 hmotnostních procent H_2O , což je 18,8 ml vody na 100 g prášku. Druhou metodou byla extrakční analýza za tepla (HEA), ta odhalila obsah vodíku 33,6 ml/100 g. Celkové množství zachyceného vodíku představuje rozdíl mezi těmito dvěma měřeními, tedy 14,8 ml/100 g. Množství zachyceného prášku závisí na procesu atomizace prášku.

Pro snížení vlhkosti na povrchu prášku existují dvě technologie. První možností je vnější sušení prášku před jeho použitím, zatímco druhou možností je interní sušení pomocí laseru, viz obrázek 16. Tato varianta sušení nicméně prodlužuje pracovní proces, jelikož je nutné každou vrstvu skenovat dvakrát. Obě technologie mohou být účinné pro minimalizaci obsahu vlhkosti v kovovém prášku.

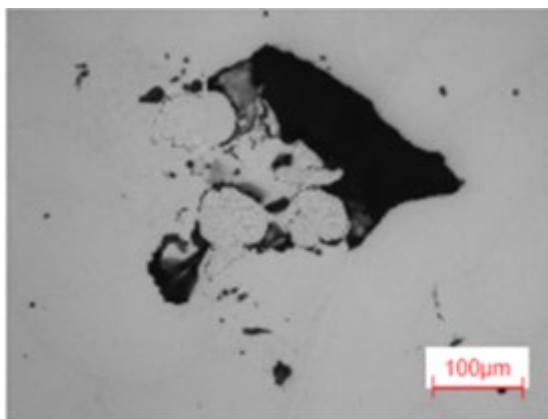


Obrázek 16 Schéma vnitřního laserového sušení [18]

4.1.2 Pórovitost vlivem nízké hustoty energie

Vznik pórů ve výsledném výtisku je ovlivněn i parametry procesu. Hlavním zdrojem je nedostatečná hustota energie a špatné překrytí jednotlivých šrafů. Nedostatečná lineární hustota energie může vést ke vzniku netaveného materiálu, což může mít za následek vznik kuličkových poruch v důsledku krátké životnosti kapaliny v roztaveném bazénu materiálu. Pokud kapalná fáze nedokáže vyplnit celou plochu během ozařování, mohou se vytvořit velkorozměrové póry, což výrazně snižuje kvalitu výsledné vrstvy prášku.

Velkorozměrové póry mají nepravidelný tvar s částicemi neroztaveného prášku. Tyto póry mají preferovanou orientaci, která může být kolmá nebo rovnoběžná se směrem stavby. Jejich velikost často překračuje 50 μm [26] [27].



Obrázek 17 Velkorozměrový pór [18]

4.2 Přerušení procesu tisku

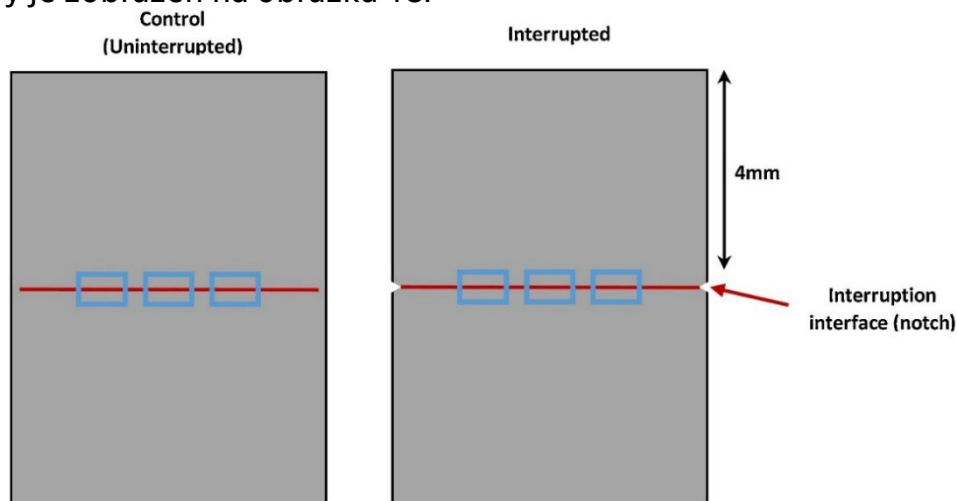
Aditivní výroba je považována za vysoce efektivní proces, ale během jejího provádění může z různých důvodů dojít k přerušení. Mezi nejčastější příčiny přerušení patří nedostatek materiálu pro výrobu, selhání softwaru nebo stroje. Kromě těchto náhodných přerušení existují studie, kdy dochází k plánovaným přerušením konstrukce hybridních součástí za účelem umístění požadovaného prvku do probíhajícího tisku.

Poruchy strojů jsou obvykle způsobeny problémy, které mohou být důsledkem nedostatečné údržby nebo zcela náhodných jevů, které nelze kontrolovat. Problémy způsobené zanedbanou údržbou mohou zahrnovat poruchy laseru nebo nesprávné nastavení ochranných atmosfér. Mezi zcela náhodné příčiny patří přerušení dodávky elektrické energie do stroje. K dalším příčinám přerušení procesu tisku dojde v případě, kdy se v prostoru tiskárny přestane tvořit ochranná atmosféra. K tomu může dojít v případě, že v tlakové nádobě dojde požadovaný plyn nebo v případě dusíkového generátoru dojde k jeho poruše.

Přerušení tisku z důvodu nedostatku materiálu vyžaduje doplnění chybějící dávky prášku. Je však nezbytné zajistit, aby obě dávky měly stejné chemické složení, a tím nedocházelo k rozdílům ve vlastnostech výrobku [28].

4.3 Vlastnosti výtisku s přerušáním procesu

Po přerušení tisku dochází ve většině případů k jeho dokončení. Avšak přerušeni je ve výrobku zřejmé. Jedním znakem přerušeni je například typický vrub, který je zobrazen na obrázku 18.



Obrázek 18 Porovnání vnější stěny přerušného a nepřerušného tisku [33]

Vlivu přerušeni na mechanické vlastnosti se věnovalo více studií, a to vždy s ohledem na zkoušený materiál. V jedné ze studií [29] byl zkoumán vliv přerušeni procesu na mikrotvrdotost a pevnost tahu vzorků AlSi10Mg. Z této studie vyplývá, že vzorky tisknuté kontinuálně měly o 10 % vyšší hodnoty mikrotvrdotosti a pevnosti v tahu než přerušené vzorky. Při průběhu tohoto experimentu byly vzorky vyjmuté během procesu z komory. Z tohoto důvodu je vysoká pravděpodobnost, že kromě vlivu přerušeni, je možný vliv i kontaminace součástí.

V rámci procesu Powder bed fusion dochází ke změnám výšky vrstvy s ohledem na hustotu vrstvy použitého prášku. Tím se zabývali Spierings a kol. [30]. V rámci této studie zjistili, že s předpokladem hustoty prášku 60 % v první vytvořené vrstvě o tloušťce 30 μm vede skenování na hustotu materiálu 99 % smršťováním ve vertikálním směru k tloušťce skenované vrstvy 18,2 μm . Při opětovném snížení stavební plošiny o 30 μm je výsledná tloušťka další vrstvy prášku 41,8 μm . Po vybudování cca 10 vrstev dosáhla skutečnou depozičním systémem vytvořená tloušťka vrstvy prášku stabilní hodnoty 49,5 μm .

K dalším aspektům, které mohou mít vliv na vlastnosti výsledných dílů je teplota. Ve studii M. Bindera [28] rozšiřuje výsledky práce Spieringse [30] o změny teplot během přerušeni procesu. Svůj výzkum rozdělil na tři oblasti viz tabulka 5.

Tabulka 5 Parametry výzkumu

Krok	1	2	přerušení	3 a	3 b	3 b-i	3 b-ii	restart	4	
$T_{set} [^{\circ}C]$	200	200		200	0	200	200		200	200
$T_p [^{\circ}C]$	111	130		117	54	104	60		130	
$d [min]$	35	113		-	41	80	3		113	
$\Delta T_p [^{\circ}C]$	86	19		13	76	50	6		*	
$\Delta T_i [^{\circ}C]$			13		26	70				

* a) +13 °C, b-i) +26 °C, b-ii) +70 °C

Krok 1 označuje zahájení procesu, kdy byla teplota stavební palety nastavená z pokojové teploty na $T_{set} = 200$ °C. Po 35 minutách dosáhla stavební paleta rovnovážné teploty $T_p = 111$ °C. Poté se spustil tisk, který trval 113 minut do přerušení. Teplota palety byla $T_p = 130$ °C. Následně se zvažovaly tři případy. V prvním případě 3a zůstal nastavený ohřev palety na 200 °C, takže se stavební paleta ochladila pouze o $\Delta T_i = 13$ °C. V případě 3b došlo k vypnutí vytápění, to vedlo ke snížení teploty v průběhu 41 minut na 54 °C, tedy $\Delta T_i = 76$ °C. Při opětovném zapnutí vytápění se výzkum rozdělil na dva případy. V případě 3b-i, se počkalo 80 minut, aby se projevit ohřev palety se stavbou na 200 °C, což odpovídalo ochlazení o $\Delta T_i = 26$ °C ve srovnání s hodnotou před přerušením. Pokud se však proces obnovil okamžitě, případ 3b-ii, (cca 3 min) po obnovení vytápění na 200 °C, je teplotní rozdíl $\Delta T_i = 70$ °C.

Na základě provedených měření teploty bylo zjištěno, že teplotní rovnováha 130 °C se obnoví přibližně po 15 minutách. Provedenými výpočty došli k závěru, že po přerušení procesu dochází při daných parametrech k nárůstu tloušťky vrstvy o 20 μm [28].

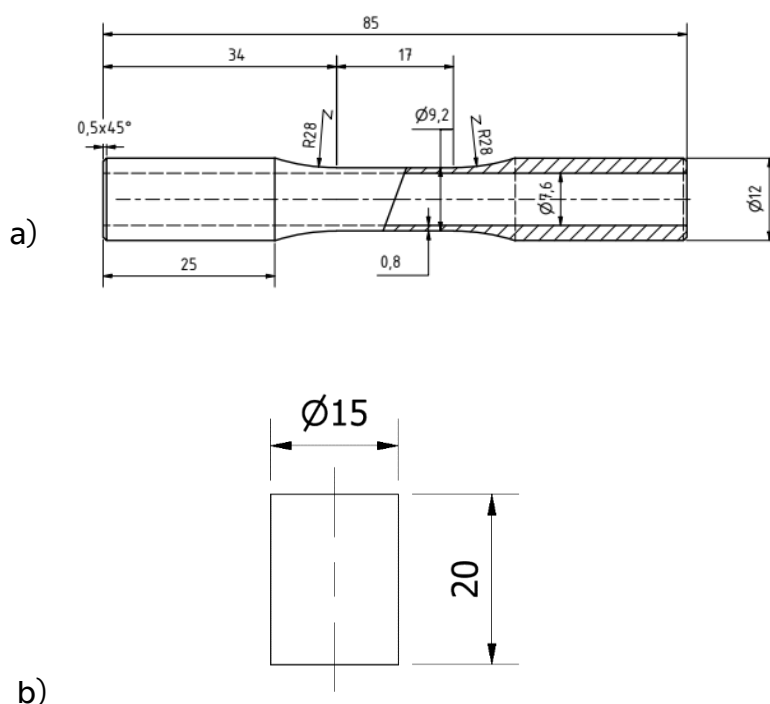
Všechny studie, které se zabývají přerušením procesu Powder bed fusion, konstatují, že kombinace přerušení s přetavením vrstvy, má významný vliv na mechanické vlastnosti výrobků. Pokud by byla nalezena strategie, která by minimalizovala negativní dopady na výrobky, lze očekávat snížení množství vadných výrobků a s tím spojených nákladů na personál, čas a finance.

5 Návrh experimentu

Cílem praktické části této diplomové práce bylo provést analýzu struktury dílů, u kterých došlo během jejich výroby k přerušení procesu. Pro tuto analýzu byly použity vzorky z hliníkové slitiny AlSi10Mg. Pro zahrnutí co nejrůznějších typů vzorků, byly vytvořeny dvě sady vzorků s různými tvary.

První sada obsahovala tenkostěnné vzorky, které byly určeny pro cyklické zatěžování, obrázek 19 a. Tato sada byla následně přerušena neúmyslně, kvůli přerušení dodávky elektrické energie do stroje.

Druhá sada vzorků viz obrázek 19 b, byla vytvořena s cílem rozšířit spektrum analyzovaných vzorků. Tato sada byla úmyslně přerušena ve třech místech s různými parametry během přerušování.



Obrázek 19 Rozměry vzorků: a) tenkostěnné vzorky, b) válečky

Pro určení struktury vzorku se následně použila výpočtová tomografie (CT), která pomohla určit porozitu dílů. K určení struktury vzorků bylo třeba připravit a analyzovat metalografické výbrusy.

5.1 Příprava tisku

Pro aditivní technologie se běžně využívá formát STL jako vstupní data, která jsou obvykle vytvořena v softwaru pro počítačovou asistovanou konstrukci (CAD). Tento formát má výhodu v univerzálnosti, což umožňuje snadný přenos dat mezi různými softwarovými aplikacemi. Nicméně, pro zpracování dat na samotné tiskárně je třeba použít specializovaný software, neboť tiskárna není schopna s formátem STL pracovat přímo. Existuje mnoho softwarů, které lze použít, včetně Build Processoru od společnosti Materialise.

Pro výrobu vzorků, které jsou použity v této diplomové práci, byl použit celý produkt od společnosti Materialise, konkrétně program Materialise Magics. Tento software umožňuje nastavení všech potřebných parametrů pro tisk. Během přípravy tisku byla STL data nahrána do softwaru Magics a modely vzorků byly umístěny na stavební paletu dle požadavků. Pro usnadnění odstranění vzorků ze stavební palety byly vytvořeny podpory na paletě. Poté byla pomocí Build Processoru vygenerována data pro tiskárnu.

Tisk vzorků byl proveden na tiskárně společnosti Concept Laser M2, která je určena pro prototypovou výrobu. Stavební prostor této tiskárny má půdorys o velikosti 250x250 mm a umožňuje tisknout díly vysoké až 350 mm. Tiskárna je vybavena procesní komorou s řízenou cirkulací dusíkové nebo argonové atmosféry. Laser v tiskárně má výkon 400 W.

5.2 Parametry tisku

V tabulce 6 jsou zapsány parametry tisku pro obě sady vzorků.

Tabulka 6 Parametry tisku

	Parametr		
	Výkon laseru [W]	Velikost spotu [μm]	Rychlost skenování [mm/s]
Podpory	200	50	1600
Kontura	200	100	1250
Výplň	370	190	1400

Jak je z parametrů zřejmé, na slinování kontury a výplně je použit jiný výkon. Zvolená strategie tisku skin-core slinuje výplň každou druhou vrstvou. Z tohoto

důvodu je potřeba vyšší hodnota hustoty energie. Toho se dosahuje zvýšením výkonu laseru.

5.3 Post processing

Po vytištění vzorků se z tiskány odstranil přebytečný prášek na stavební paletě. Poté bylo možné odšroubovat stavební paletu. Aby nedošlo k pomíchání vzorků, došlo k jejich označení ještě před odstraněním z palety, jak je vidět na obrázku 20 . Vzorky se značily jednotlivými čísly od 1–50. Pro větší přehlednost se vzorky označily i písmeny A–E, to označovalo, z jaké byly řady, značeno zprava od nanašeče. Následně došlo k odstranění vzorků z palety.



Obrázek 20 Umístění vzorků na stavební paletě

5.4 Výpočetní tomografie–CT

Princip CT spočívá v tom, že se díl, který je zobrazován, umístí do rotujícího zařízení a postupně se skenuje rentgenovým zářením z různých úhlů. Získaná data se následně zpracovávají pomocí matematických algoritmů, které umožňují rekonstrukci třírozměrného obrazu. Pro zlepšení kvality lze mezi zdroj rentgenového záření a skenovaný díl vkládat různé filtry.

Výhodou CT oproti jiným technologiím je, že umožňuje získat přesné a detailní informace o vnitřní struktuře materiálu bez nutnosti jeho poškození. Avšak CT má i svá omezení. Například je omezeno velikostí dílu, který lze skenovat. Další nevýhodou je jeho cena oproti jiným technologiím, jako je například ultrazvukové testování.

V případě této diplomové práce bylo použito zařízení Metrotom 1500 od společnosti Zeiss s 225 kV zdrojem a 2k detektorem.

6 Vzorky 1

Zařízení Metrotom 1500 disponuje otočným stolem, proto bylo možné všechny vzorky skenovat při stejných parametrech. Pro zajištění stejné polohy vzorků se na otočný stůl přidělalo sklíčidlo vyložené kusem polystyrenu, jak je zobrazeno na obrázku 21 . Polystyren se zvolil z důvodu velmi nízké hustoty, aby ve snímcích nedocházelo ke kolizi zobrazeného vzorku a této podložky.



Obrázek 21 Poloha vzorku při skenování

U první sady vzorků proběhla dvě skenování s odlišnými parametry. Pro určení celkové porozity v dílech se skenoval celý objekt při parametrech v tabulce 7, sloupec pro všechny vzorky.

Toto skenování nebylo dostatečně přesné pro určení porozity, jelikož mělo malou rozlišovací schopnost a některé póry ani nezaznamenalo. Posloužilo tedy k určení užšího počtu vzorků pro druhé skenování. Jednalo se o vzorky, u kterých došlo k masivním změnám materiálu v přerušené vrstvě. U druhého skenování proto byla určena oblast 10 mm v okolí přerušení. Druhé skenování probíhalo s nastavenými parametry zapsanými ve sloupci pro vybrané vzorky.

Tabulka 7 Parametry skenování na CT pro sadu vzorků 1

Parametr	AlSi10Mg (všechny vzorky)	AlSi10Mg (vybrané vzorky)
Nominální napětí [kV]	180	180
Nominální proud [μ A]	330	86
Materiál filtru	měď	měď
Tloušťka filmu [mm]	0,25	0,25
Integrační čas [ms]	267	2000

6.1 Vyhodnocení CT skenů

Pro vyhodnocení vzorků se použil SW VGStudio Max od společnosti Volume Graphics. Data získaná z CT se vložila do programu, který umožňuje zpětně vytvořený 3D díl ze 2D snímků z CT prohlédnout vrstvu po vrstvě, a to ve všech třech osách. Následně lze v programu provést automatickou analýzu pórovitosti.

K následnému skenování bylo vybráno 6 vzorků: **18 B, 30 C, 31 D, 42 D, 43 E** a **25 C** označené červenými kroužky na obrázku 20.

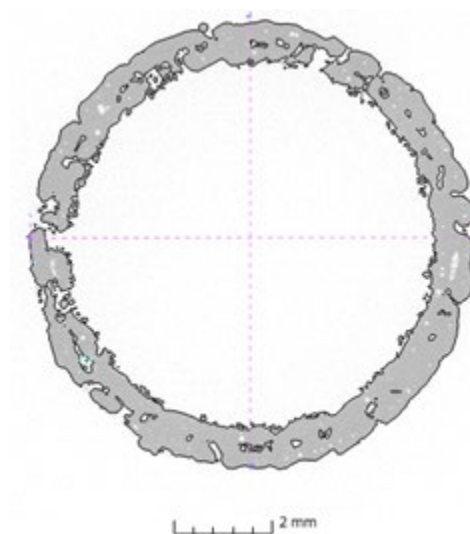
6.1.1 Vzorek 18 B

Vzorek 18 B byl vybrán kvůli velkému množství chybějícího prášku v přerušené vrstvě. Po analýze výsledků prvního skenování tohoto vzorku se ukázalo, že výstupní snímky nemají dostatečnou kvalitu pro přesné určení pórovitosti. Vzhledem k rozměrům vzorku, tedy výšce 61,5 mm a zúženému průměru 9,2 mm, byl vypočten objem materiálu 2788 mm³. Při této hodnotě objemu zabíraly všechny póry 0,45 mm³ celkového objemu. Přestože se tato hodnota zdá být malá, existovala vysoká pravděpodobnost, že vzhledem ke snížené kvalitě snímků nebyly všechny defekty řádně zohledněny.

Po druhém skenování a bližší analýze byly určeny rozměry skenované oblasti na výšku 9,4 mm a průměr válcové části 9,2 mm. Z těchto hodnot byl získán objem materiálu 180,8 mm³, ze kterého bylo 26,07 mm³, tedy přibližně 12,6 %, tvořila pórovitost. Srovnání této skutečnosti je uvedeno na obrázcích 22 a 23.



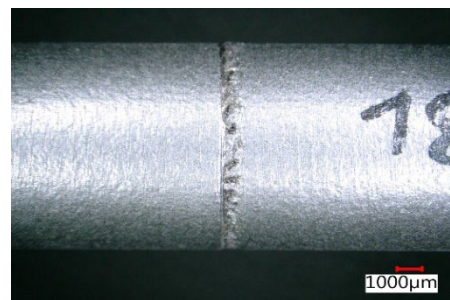
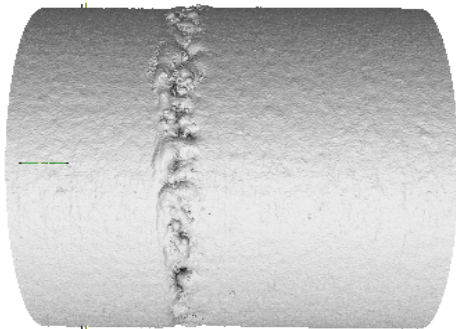
Obrázek 22 Vzorek 18 B první sken



Obrázek 23 Vzorek 18 B druhý sken

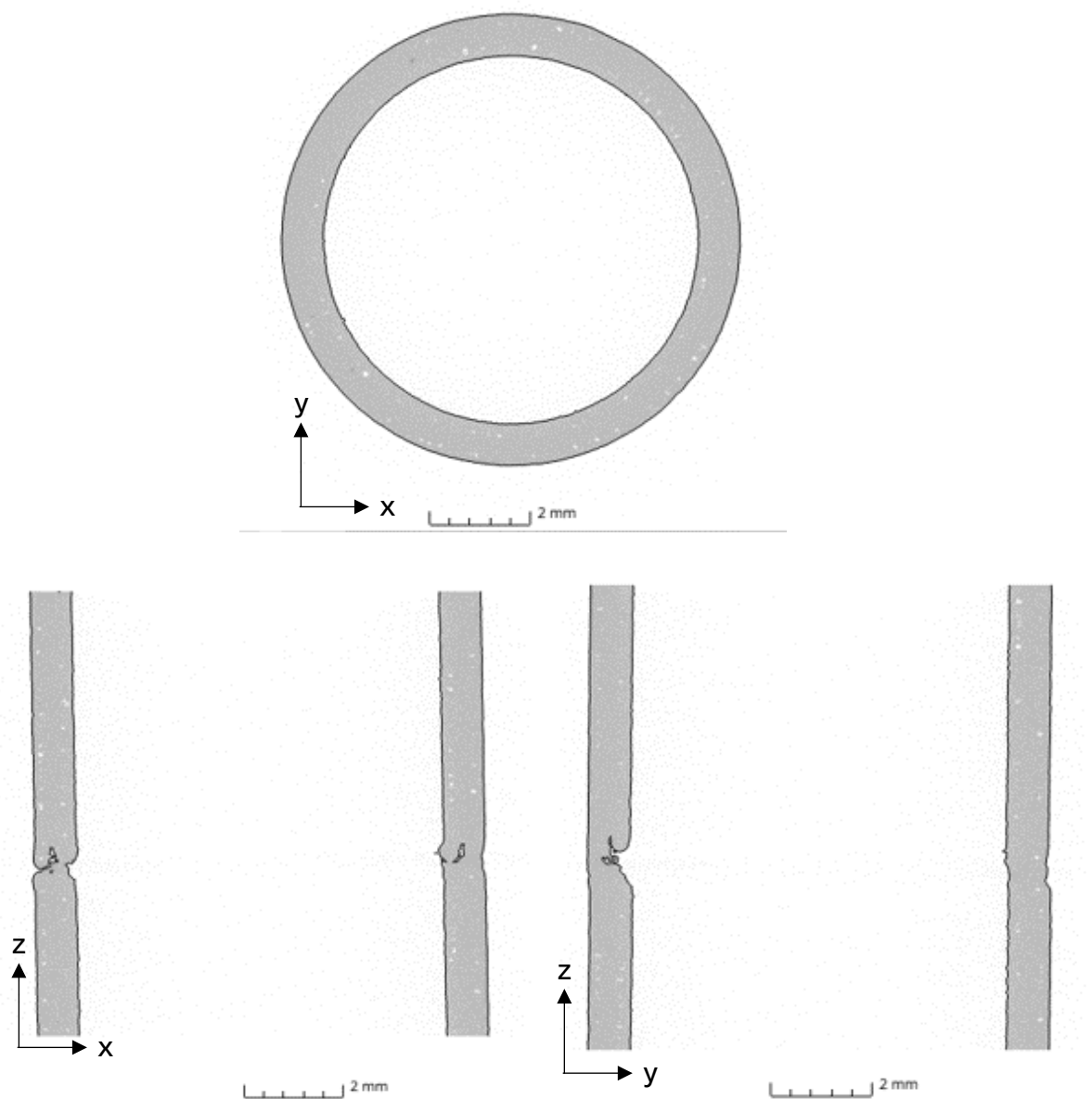
Takto chybějící materiál může být způsoben například umístěním na stavební paletě. Jelikož se tento vzorek nacházel u okrajů stavební palety, je možné, že při obnovení přerušného procesu došlo k rozvíření prášku vlivem zapnutí ventilátoru pro rozhánění ochranné atmosféry. Dalším možným vysvětlením je špatné nanesení prášku vlivem měkkého nanašeče použitého během stavby. Měkký, gumový nanašeč během přípravy nové vrstvy mohl narazit do již pevného materiálu, čímž došlo k jeho rozkmitání, jehož důsledkem je nepřesně nanesená vrstva.

Jak je zmíněno v kapitole 4.3, dochází během přerušení procesu tisku k vytvoření vrubu. Na obrázku 24 je vidět rozhraní mezi stabilními vrstvami a mezi přerušenu částí. Je zde dobře patrné, že docházelo ke špatnému natavování materiálu na povrch dílu.



Obrázek 24 Vytvoření vrubu na rozhraní vrstev (CT vlevo, skutečnost vpravo)

Pórovitost dílů je způsobena různými principy. Na snímcích (viz obrázek 25) z CT je velmi dobře rozpoznatelná pórovitost, která vznikla v důsledku použití strategie „skin–core“. Jedná se o pravidelné póry v přechodové vrstvě mezi vnější obálkou vzorku a jeho výplní. Tento jev se bude následně dále pozorovat i na metalografických výbrusech.



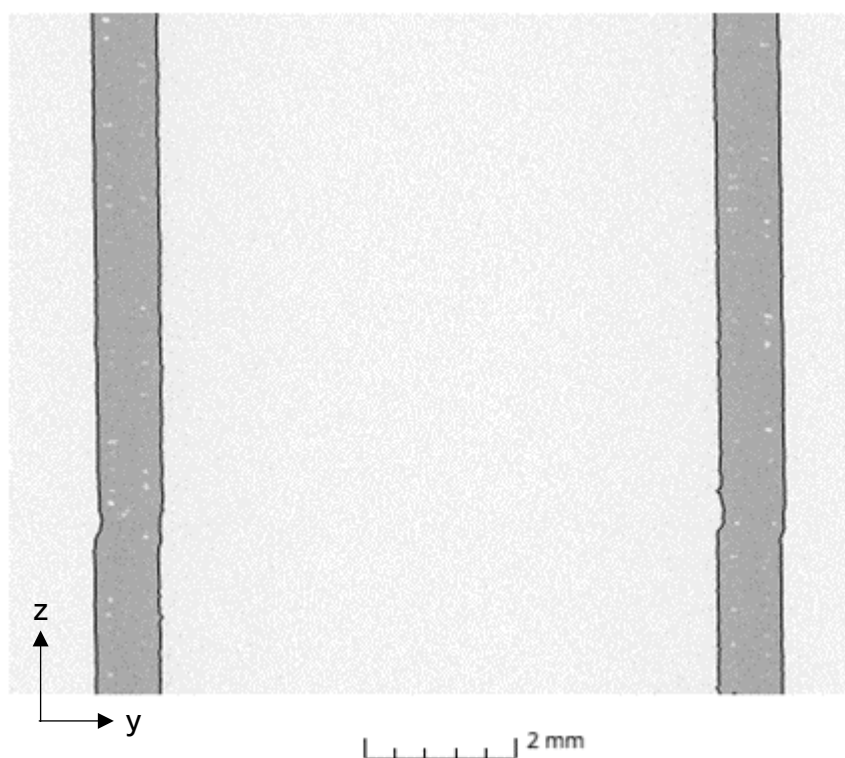
Obrázek 25 Pohled na pórovitost na rozhraní ve všech řezech

6.1.2 Vzorek 25 C

Pro porovnání struktury byl zvolen vzorek 25 C. Už při prvním skenu bylo zřejmé, že přerušení procesu nemělo na vzorek významný vliv. Jeho pórovitost byla pro vypočtený objem 2794 mm^3 spočtena na objem pórů $0,23 \text{ mm}^3$. Avšak při druhém skenování a výpočtu pórovitosti byla při objemu 201 mm^3 , pouhých $0,07 \text{ mm}^3$.

Možných vysvětlení je několik, například, že na pórovitost měla vliv poloha vzorku na stavební paletě. Vzorek 25 C (označen modře na obrázku 20) se nacházel blíže ke středu stavební plochy, je proto možné, že spolu se sousedními vzorky udržovaly vyšší teplotu, proto při opětovném spuštění procesu nedošlo k tak významným ovlivněním materiálu.

Na obrázku 26 při pohledu do roviny YZ je viditelné posunutí stěn před a po přerušení. To mohlo být způsobeno drobným pohybem celé stavební palety.



Obrázek 26 Posunutí stěn před a po přerušení vzorku 25 C

Vrub, který se vytvoří po přerušení tisku je patrný i u vzorku 25 C. V tomto případě je zde dostatečné množství materiálu. V pravé části obrázku 27 je patrné drobné přesazení vrchní vrstvy vůči původní stavbě. Také zde došlo k mnohem lepšímu napojení po sobě jdoucích vrstev.



Obrázek 27 Vrub u vzorku 25 C

6.1.3 Vzorky 30 C, 31 D, 42 D, 43 E

U zbylých vzorků se dá konstatovat stabilní pórovitost, která odpovídá údajům v tabulce 8. Jelikož se jedná o velmi podobné hodnoty, lze předpokládat, že vzorky umístěné na okrajích podložky (zelené kroužky na obrázku 20) budou mít po přerušení stejnou pórovitost. Tyto hodnoty jsou určeny z druhého skenování. Dá se tedy říci, že se tyto hodnoty budou opakovat podél všech okrajů stavební palety.

Tabulka 8 Hodnoty pórovitosti

Vzorek	Pórovitost [%]
30 C	12,5
31 D	12,7
42 D	12,54
43 E	12,7

6.2 Analýza metalografických vzorků

Z důvodu bližší analýzy mikrostruktury bylo nutné rozhodnout o metodě hodnocení. Pro tento účel bylo rozhodnuto o vytvoření metalografických výbrusů. Při přípravě bylo zapotřebí určit vhodný způsob výroby výbrusů pro vzorky z první sady, které byly tenkostěnné a při výrobě výbrusů se s nimi vyskytly problémy. Vytisknuté vzorky byly rozřezány na 20 mm vysoké válečky, aby bylo možné určit směr stavby vzorku, byl řez proveden pod přerušením o něco níže než nad přerušením.

Existují dvě metody přípravy metalografických vzorků. Pro určení vhodnější metody byl připraven testovací vzorek ve tvaru válce, který byl podélně rozříznut.

První metodou je lisování za tepla, při které se vzorek umístí do formy a zasype se pryskyřicí, která se zahřívá a lisuje pod tlakem do podoby puku. V tomto experimentu však tato metoda nebyla možná, neboť se vzorek zdeformoval vlivem tlaku.

Proto bylo rozhodnuto o použití druhé metody, kterou je příprava za studena. V tomto případě se připravené vzorky zalijí epoxidovou či akrylovou pryskyřicí a nechají vytvrdnout po určený čas. V experimentu byla použita akrylová pryskyřice od společnosti Struers, pro přípravu bylo použito 50 g prášku a 30 g tekuté pryskyřice. Směs byla následně zalita do připravených montážních misek pro výrobu puků viz obrázek 28.



Obrázek 28 Montážní misky pro výrobu metalografických vzorků za studena [34]

Za účelem pozdějšího rozpoznání vzorků byly jednotlivé montážní misky označeny číslem odpovídajícím vzorku. Aby bylo zaručeno, že se vzorky během procesu zalévání nepohnou, byly do montážních misek umístěny zarážky, které bránily pohybu vzorků uvnitř misek. Po dokončení zalévání bylo nezbytné počkat minimálně 30 minut, což je doba nutná k vytvrzení pryskyřice udávaná výrobcem. Následně, po dostatečném vytvrzení metalografických puků, bylo nutné odstranit montážní misky, aby bylo možné vzorky vybrousit a vyleštit. Každý vzorek byl správně označen při odstraňování montážních misek, aby nedošlo k záměně.

Pro snížení množství materiálu, který musí být odstraněn během broušení, byly vzorky soustruženy tak, aby broušení a leštění bylo prováděno v ose vzorku. Po soustružení se vzorky před broušením omyly a odmastily. Základní výška vzorku byla 15,4 mm a cílová výška byla stanovena na 13,8 mm. Pro zbroušení prvního milimetru byl použit brusný papír se zrnitostí 320 po dobu 50 sekund s přitlakem 25 N na vzorek a 300 otáček za sekundu. Následně byl použit papír se zrnitostí 1000 po dobu 20 sekund. Poté bylo provedeno leštění, které bylo rozděleno do tří fází. V první fázi byla použita diamantová suspenze se zrnitostí 9 μm a přitlakem 30 N, ve druhé fázi byla použita suspenze se zrnitostí 3 μm a přitlakem 30 N. V poslední fázi byl použit koloidní roztok s plaveným SiC a přitlakem 15 N. Všechny tři fáze trvaly 3 minuty při 150 otáčkách za minutu. Vzorky připravené tímto způsobem jsou na obrázku 29.

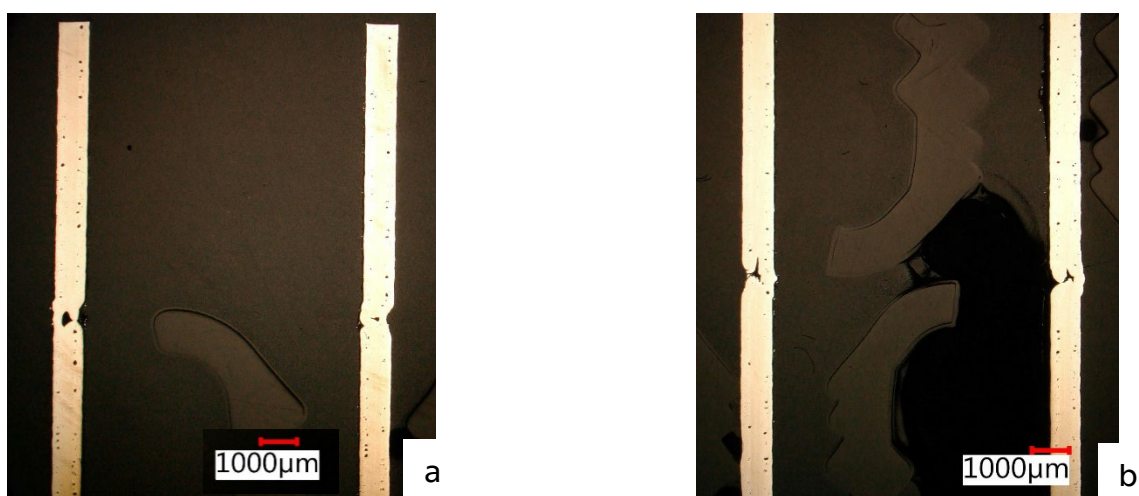


Obrázek 29 Vyleštěné vzorky

6.2.1 Analýza pórovitosti

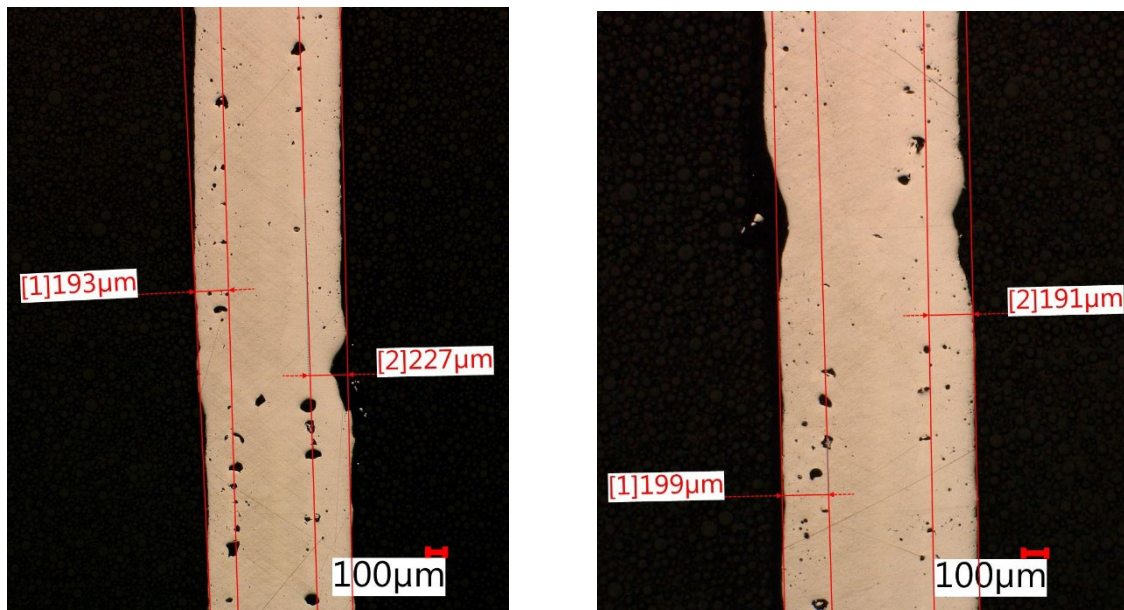
K analýze pórovitosti byl použit digitální mikroskop Keyence VHX-6000. K pozorování pórovitosti na digitálním mikroskopu je doporučeno používat koaxiální osvit. Jedná se o technologii, která umožňuje, aby světlo procházelo optickým systémem současně s pozorovaným obrazem, což umožňuje velmi detailní pozorování. Díky tomu eliminuje stínění a na pozorovaném obrazu tak nejsou žádné stíny, tím pádem lze provádět lepší analýzu pozorovaného objektu.

Při provádění analýzy se nejprve na mikroskopu vytvořily snímky vzorků. Pro každý vzorek byl nejprve vytvořený celkový snímek, poté se prováděla analýza jednotlivých částí. Důležitým bodem při této analýze je zjistit, jaký je objem pórovitosti na rozhraní plného materiálu a obrysu. Na snímcích z digitálního mikroskopu lze velmi dobře pozorovat i chybějící části materiálu. Jednotlivé póry, které se ve vzorcích objevily lze rozdělit podle typu, jak je uvedeno v kapitole 4.1. Mezi typické zástupce pórů patří velkorozměrné, tedy póry, které vznikly nedostatečným natavením materiálu, nebo plynové póry, které jsou jednoduše rozeznatelné díky svému sférickému tvaru. Na obrázku 30 a je zobrazen vzorek 18 B, u něj je velmi dobře pozorovatelný pór, který vznikl nedostatkem materiálu. Obrázek 30 b znázorňuje vzorek 30 C, u kterého došlo k nedostatečnému natavení materiálu v místě přerušení. Na obou snímcích je patrné, že ve vrstvách, kde došlo k přerušení se následné vrstvy vychýlily od osy, a to buď směrem ven nebo dovnitř.



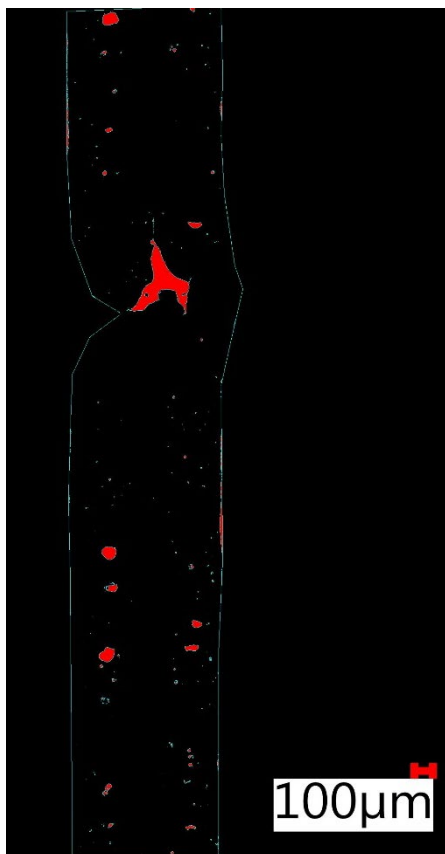
Obrázek 30 Pohled na digitálním mikroskopu na vzorky 18 B (a), 30 C (b)

Na obrázku 31 jsou snímky z mikroskopu pro části vzorku 31 D, u kterého je viditelná pórovitost na rozhraní mezi obrysem a plným materiálem. Jak je patrné z měření na snímcích, póry se vyskytují v podobné vzdálenosti od vnější stěny. Vzhledem k jejich tvaru je pravděpodobné, že se jedná o plynové póry. Další zajímavostí na tomto snímku je fakt, že i přes objevení větších pórů v místě přerušení pomocí CT, se tyto póry na metalografickém výbrusu nenacházejí. Nejpravděpodobněji je to způsobené natočením válcového vzorku vůči ose.



Obrázek 31 Porozita na rozhraní skin–core

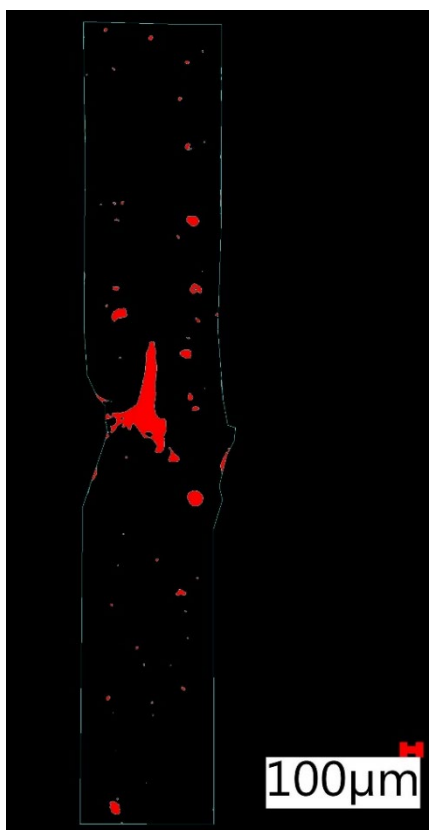
Software mikroskopu Keyence VHX-6000 umožňuje vyhodnocení porozity na základě rozdílné barvy, tedy světlé a tmavé. Aby bylo možné získat přesné výsledky vyhodnocování, je nutné ohraničit požadovanou oblast, ze které je potřeba vybírat. Toho lze dosáhnout pomocí funkcí a nástrojů poskytovaných softwarem Keyence VHX-6000. Analýza je schopna rozpoznat a vybrat pouze korektní objekty, čímž minimalizuje riziko chybné klasifikace materiálů. Pro vizualizaci výsledků se používá grafické zpracování, kde jsou oblasti tmavé barvy zobrazeny červeně. To umožňuje snadnou interpretaci a vizualizaci výsledků vyhodnocování a umožňuje efektivnější a rychlejší analýzu mikroskopických snímků. Výsledky vyhodnocení jsou dále shrnuty na obrázcích 32 a 33, které poskytují podrobnější informace o hodnotách pórovitosti a rozměrech největších pórů.



No.	Area	Max diameter	Perimeter	Min diameter
1	432μm ²	28μm	89μm	22μm
2	5μm ²	0μm	0μm	0μm
3	5μm ²	0μm	0μm	0μm
4	5038μm ²	91μm	286μm	70μm
5	66μm ²	10μm	30μm	7μm
6	5μm ²	0μm	0μm	0μm
7	28μm ²	5μm	13μm	2μm
8	5μm ²	0μm	0μm	0μm
Average	288μm ²	15μm	38μm	5μm
Standard Deviation	2397μm ²	52μm	136μm	19μm
Max	42038μm ²	699μm	1668μm	308μm
Min	5μm ²	0μm	0μm	0μm
Total	94408μm ²	4787μm	12447μm	1705μm

Count	Area
328 pcs	Total area
	Total region area
	Area ratio

Obrázek 32 Hodnocení pórovitosti pravé části vzorku 30 C



No.	Area	Max diameter	Perimeter	Min diameter
1	593μm ²	168μm	342μm	4μm
2	403μm ²	24μm	69μm	18μm
3	688μm ²	32μm	93μm	24μm
4	1148μm ²	399μm	803μm	2μm
5	147μm ²	14μm	38μm	11μm
6	455μm ²	25μm	74μm	20μm
7	218μm ²	22μm	54μm	11μm
8	05μm ²	11μm	20μm	9μm
Average	1619μm ²	51μm	129μm	18μm
Standard Deviation	8649μm ²	99μm	274μm	42μm
Max	80457μm ²	693μm	2251μm	370μm
Min	5μm ²	0μm	0μm	0μm
Total	139207μm ²	4375μm	11110μm	1587μm

Count	Area
86 pcs	Total area
	Total region area
	Area ratio

Obrázek 33 Hodnocení pórovitosti levé části vzorku 30 C

7 Vzorky 2

Pro rozšíření zkoumaných objektů byla navržena skupina druhých vzorků z plného materiálu s několika různými přerušeními, což by mělo dostatečně rozšířit změny struktury po přerušení.

Byl vytvořen plán přerušení tisku pro skupinu vzorků 2. V tabulce 9 jsou uvedeny veškeré parametry zastavení, jako je výška přerušení, vrstva přerušení a čas, po který byl tisk zastaven.

Tabulka 9 Plán přerušování tisku

	Počet zastavení	Počet vrstev mezi přerušením	Vzdálenost mezi přerušením [mm]	Výška stavby [mm]	Počet vrstev	Doba přerušení [min]	Počet nahřátí
Těleso		120	3	22	880		
	8	80	2	19	760	480	3x
	7	80	2	17	680	180	3x
	6	80	2	15	600	180	1x
	5	80	2	13	520	90	1x
	4	80	2	11	440	60	0x
	3	80	2	9	360	180	0x
	2	80	2	7	280	480	1x
	1	120	3	5	200	20	1x
Podpory		80	2	2	80		
Paleta		0	0	0	0		

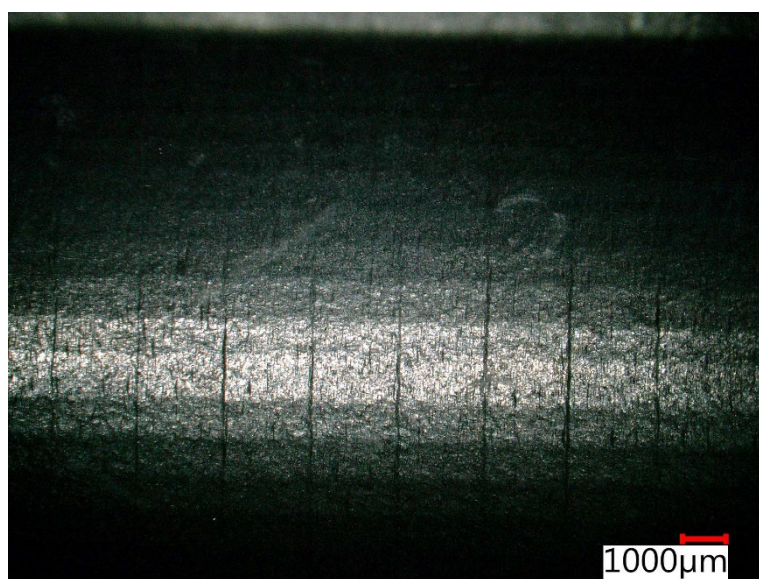
Jak je zaznamenáno v tabulce výše, při tisku bylo použito u některých vrstev nahřátí. Jedná se o napálení předcházející vrstvy po zastavení tisku, z důvodu zvýšení teploty již vytisknuté součásti. Důvodem zvýšení teploty tímto způsobem je to, že tiskárna Concept Laser M2 nemá vyhřívanou komoru, která by udržovala stabilní teplotu. Aby bylo možné porovnat vliv nahřátí, byly provedeny různé počty nahřátí. Tyto počty jsou uvedené v tabulce.

Po vytištění dílů se nejprve odstranil zbývající prášek ze stavby. Po vyjmutí celé stavby ze stroje bylo nutné odstranit zbývající prášek, který zůstal v podporách. Podpory byly vytvořené pro lepší odstranění vzorků ze stavební palety. Než došlo k jejich odstranění, bylo nutné vzorky označit, aby nedošlo k jejich záměně. Po označení se provedla fotodokumentace, viz obrázek 34, pro pozdější přehled.



Obrázek 34 Označení vzorků před odstraněním ze stavební palety

Přerušení vzorků mělo vliv i na vzhled. Na povrchu válečku se vytvořily pruhy v místech, kde došlo k přerušení, což je viditelné na snímku 35 pořízeném na digitálním mikroskopu.



Obrázek 35 Povrch přerušného vzorku

7.1 Vyhodnocení CT skenů

U válečků z druhé skupiny vzorků se také pozorovala porozita pomocí CT, avšak na rozdíl od předchozích vzorků muselo dojít k úpravě nastavení hodnot, aby byly výsledné snímky jasnější a lépe analyzovatelné. Tabulka 10 zobrazuje parametry skenování. Oproti prvním vzorkům došlo při skenování k odstranění filtru, což zajistilo lepší prozáření vzorků.

Tabulka 10 Parametry skenování CT válečků

Parametr	AlSi10Mg–válečky
Nominální napětí [kV]	180
Nominální proud [μ A]	120
Integrační čas [ms]	2000
Gain	1

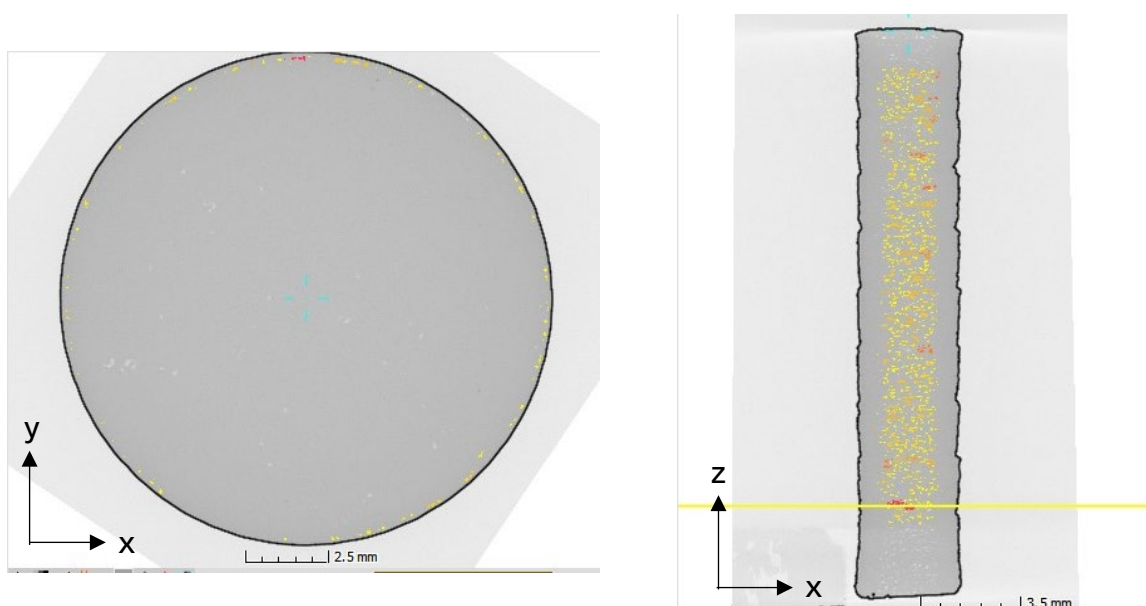
Při vyhodnocování snímků z CT se provedla analýza pórovitosti. Faktorem pro hodnocení, zda se jedná o pór či nikoliv, se jako filtrovací parametr použil objem vady a pravděpodobnost výskytu. Tyto hodnoty jsou uvedeny u jednotlivých vzorků.

Takto nastavená analýza dokázala dostatečně vyfiltrovat šумы, které se ve skenu objevily a byly by považovány za póry. Vzhledem k postupu tisku se předpokládal nárůst pórovitosti v místech přerušování tisku. Nicméně na skenech se tato skutečnost neprokázala. Zvětšený podíl pórovitosti lze sledovat v místech přechodu strategie, stejně jako u vzorků z první skupiny.

7.1.1 Váleček 25

U válečku 25 (modře označený na obrázku 34) se během rekonstrukce naskenovaných dat projevila vysoká porozita. Analýza porozity ukázala přítomnost rozměrově větších vad a pravidelných pórů na rozhraní. K přesnějším výsledkům porozity se u analýzy nastavily filtrovací parametry, a to objem vady od 0,0003 mm³ do 0,9 mm³ a pravděpodobnost rozhraní na 1,3. V tomto případě se vypočtený objem materiálu ze snímků z CT rovnal 3601,9 mm³, z tohoto celku se podíl defektů rovnal objemu 1,85 mm³ což představuje 0,05 %.

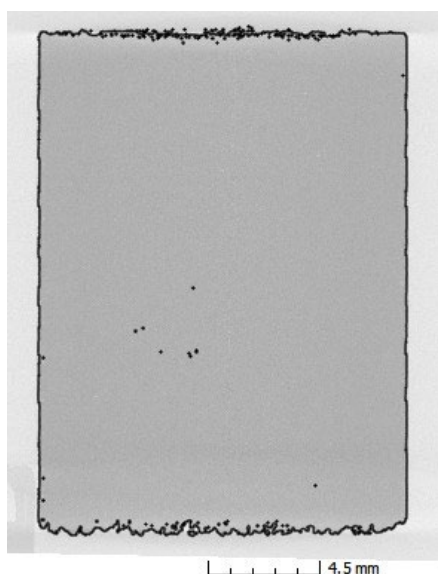
Při použití filtru se sníženou velikostí objemu vad se podařila vyfiltrovat porozita na rozhraní strategie. Její podíl v celkovém objemu 3595 mm^3 byl roven $8,58 \text{ mm}^3$, tedy 0,2 %. Takto vyfiltrované póry jsou zobrazené na obrázku 36.



Obrázek 36 Váleček 25 – pórovitost na rozhraní

7.1.2 Váleček 13

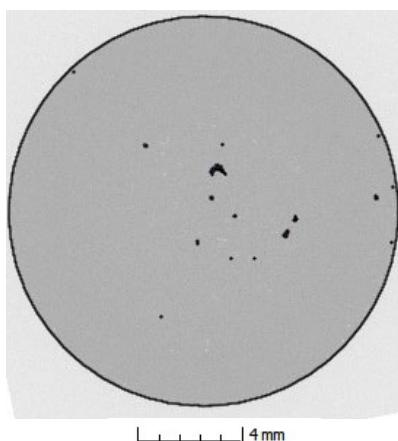
Váleček 13, který je na obrázku 34 označen červeně, při vypočteném objemu materiálu $3574,7 \text{ mm}^3$ obsahoval $0,41 \text{ mm}^3$ objemu vad. Parametry analýzy byly nastaveny pro objem vad v rozmezí $0,0005 - 0,7 \text{ mm}^3$. Kromě toho se u tohoto válečku dalo pozorovat přerušování vrstev. Velmi dobře byl pozorovatelný jev odsazení jednotlivých přerušovaných vrstev, což je zobrazeno na obrázku 37.



Obrázek 37 Viditelná odsazení na hranách přerušování tisku

7.1.3 Váleček 1

Zeleně označený váleček 1 na obrázku 34 obsahoval velmi malé množství porozity. Celkový objem materiálu byl vypočtený na 3587 mm^3 a objem vad byl pouze $0,36 \text{ mm}^3$. Stejně jako ostatní vzorky byla převážná pórovitost na rozhraní strategie tisku. Nicméně větší podíl vad se objevil v milimetrovém okolí posledního zastavení, tedy ve výšce 19 mm od stavební palety.



Obrázek 38 Porozita ve výšce 19 mm od stavební palety

7.2 Analýza mikrostruktury

Po analýze pórovitosti na CT se vybrané vzorky připravily pro metalografické výbrusy. Příprava zahrnovala nařezání vzorků s přídavkem 1 mm na broušení a leštění. Na rozdíl od vzorků z první skupiny jsou válečky plné, proto může být použita výroba metalografických puků za tepla. Pro výrobu vzorků se použila černá pryskyřice Multifast od společnosti Struers. Vzorky se vložily do stroje Citopress 10 a zasypaly se pryskyřicí. Pro výrobu vzorků se použila teplota $180 \text{ }^\circ\text{C}$ a 250 barů po dobu 2 minut a následně proces obsahoval i zchlazení vodou.

Následovalo broušení vzorků. Nejprve se použil brusný papír o zrnitosti 320 s nastavenými 150 ot. / min a přítlakem 25 N po dobu 50 vteřin. Následoval brusný papír o zrnitosti 1000 se stejným nastavením. Po tomto kroku se vzorky očistily a následovalo leštění na nebrusném kotouči spolu s diamantovou suspenzí o zrnitosti 9 μm . Následně se použila podložka MD Pad a suspenze se zrnitostí 3 μm . V posledním kroku se použil koloidní roztok s plaveným SiC s přítlakem 15 N po dobu 3 minut.



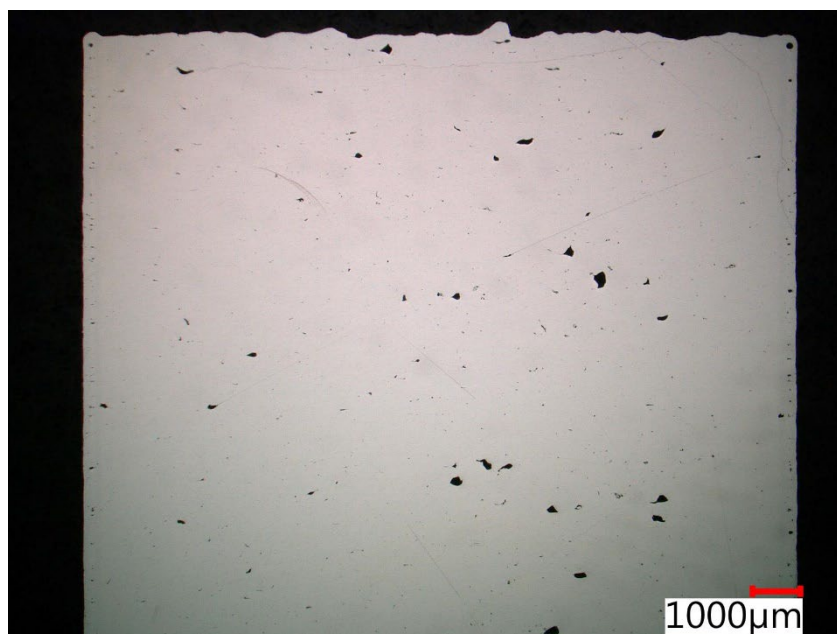
Obrázek 39 Připravené metalografické vzorky pro pozorování na optickém mikroskopu

Na připravených vzorcích bylo možné pozorovat póry, které byly viditelné pouhým okem. Při pohledu pod mikroskopem byly patrné póry, které se vyskytly na rozhraní mezi strategiemi. Dále se objevovaly větší shluky pórů ve stejných místech. Tento jev se objevuje především v místech, kde došlo k nedokonalému nanesení vrstvy.

7.2.1 Porozita vzorků

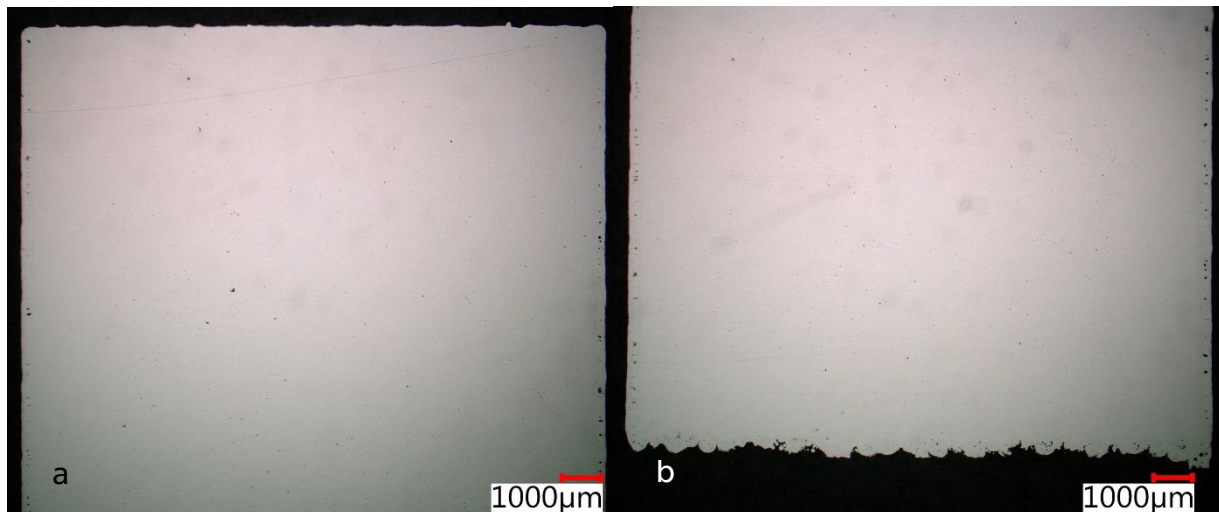
K pozorování se jako v případě prvních vzorků použil mikroskop Keyence VHX 6000. Pro porozitu byl zvolen koaxiální osvit a 20násobné zvětšení.

Na obrázku 40 je zobrazena horní část vzorku 23. U tohoto vzorku je velmi dobře viditelná porozita v různých místech stavby. Většina rozměrnějších pórů je způsobena nedostatkem materiálu v místě tavení.



Obrázek 40 Horní polovina válečku 23

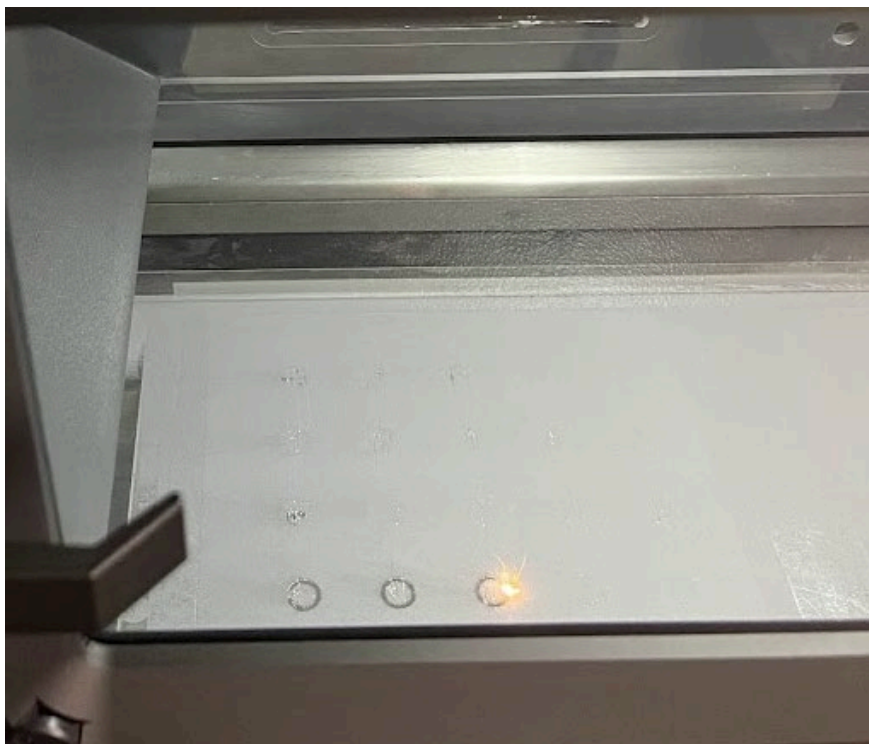
Zatímco váleček 23 vykazuje vyšší porozitu v celém svém objemu, váleček 1 obsahoval pouze velmi jemné póry. Jak již ukázaly snímky z CT, nevyšší pórovitost se vyskytovala pod povrchovou vrstvou, tedy na rozhraní strategií. Na obrázku 41 je zobrazena horní a dolní polovina válečku 1.



Obrázek 41 Horní (a) a spodní (b) polovina válečku 1

Rozdíl mezi oběma vzorky byl dle pozorování způsobem vlivem rozkmitání nanašeče. Jelikož se váleček 1 nacházel v první řadě od směru nanášení, nedocházelo k rozkmitání nanašeče při pohybu. Proto v tomto místě byla vrstva jednotná, což přispělo k nižší porozitě všech válečku v prvních řadách. U vzorků

z poslední řady nebyla vrstva dokonalá, viz obrázek 42, proto je zde vyšší pórovitost.



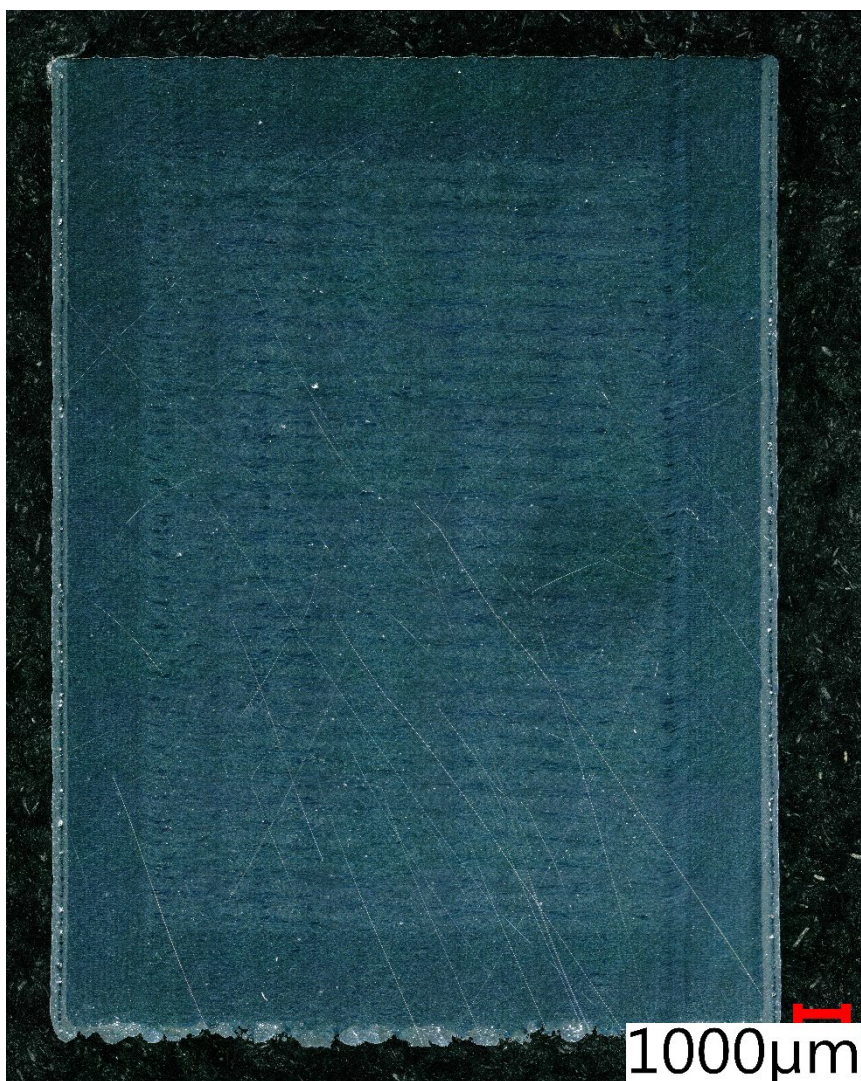
Obrázek 42 Pohled na stavební paletu s chybně nanesenou vrstvou

7.2.2 Mikrostruktura vzorků

Pro pozorování mikrostruktury jakýchkoli vzorů je podstatné leptání. V tomto případě se vyleštěné vzorky naleptaly modifikovaným Dix–Kellerovým leptadlem. Roztok obsahoval směs destilované vody a kyseliny fluorovodíkové (200 ml destilované vody + 3 ml kyseliny fluorovodíkové o koncentraci 38 %).

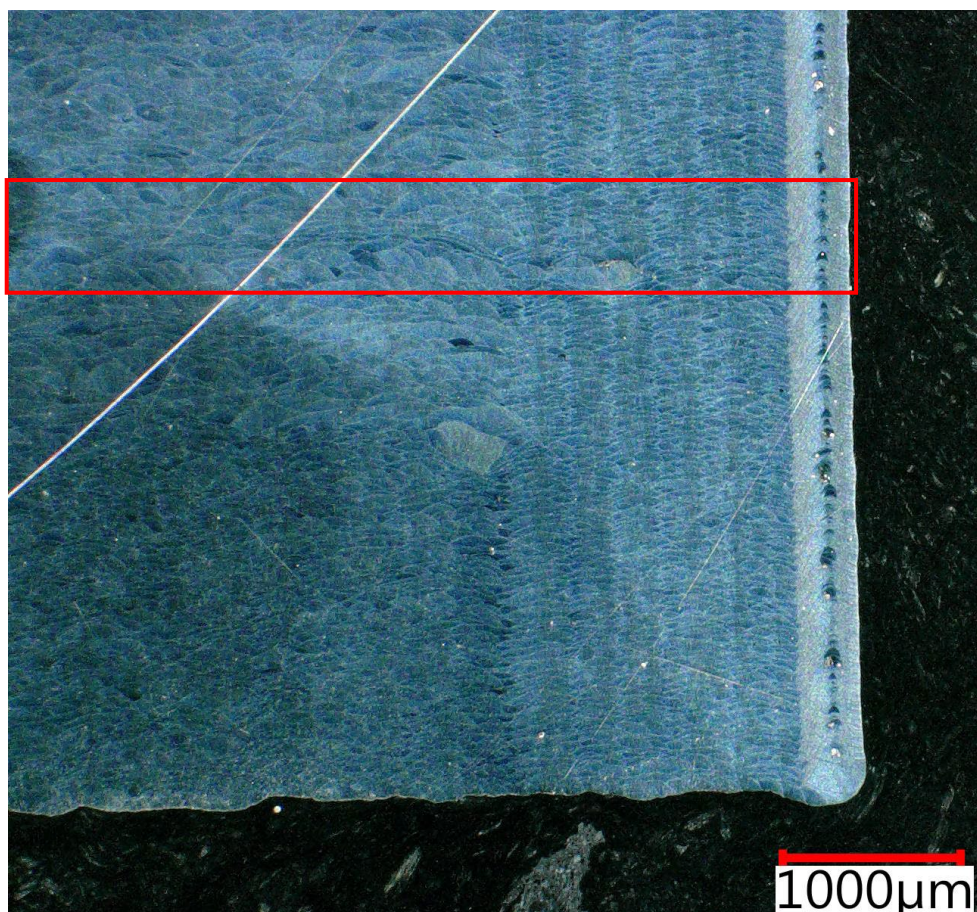
Postup leptání byl následovný, vzorky se nejprve na 5 vteřin ponořily do roztoku, poté se opláchly proudem vody a následně se opláchly acetonem. Po tomto kroku se vysušily a byly připravené pro pozorování na mikroskopu. V případě, že by mikrostruktura vzorků nebyla dostatečně viditelná, je možné tento postup opakovat.

Vzorky vyrobené technologií DMLS mají specifickou mikrostrukturu. Jedná se o takzvané „melting pools“, tedy oblasti roztaveného materiálu, jejichž rozměr se liší s velikostí bodu laserového paprsku. Tento rozdíl lze vidět na obrázku 43, kde je možné rozpoznat vnější konturu, která se tiskne každou vrstvou. A následně výplň, která se tiskne ob vrstvou.



Obrázek 43 Mikrostruktura válečku 25 po naleptání

Bližší pohled na strukturu je ukázán na obrázku 44. Jedná se o snímek z digitálního mikroskopu se 100násobným zvětšením. V místě označeném červeným rámeček došlo k přerušení tisku. V tomto místě je vidět, že při pokračování stavby došlo k přetavení původní vrstvy.



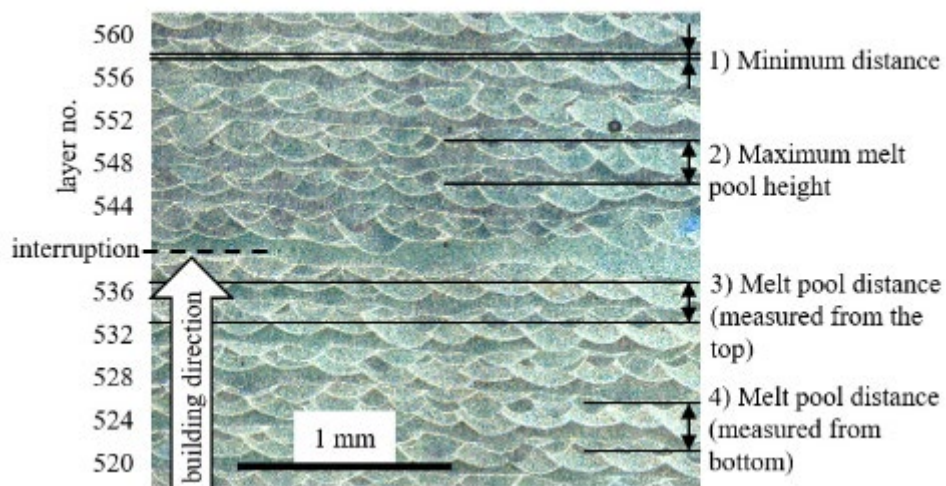
Obrázek 44 Přerušené místo s přetavenou vrstvou

Další prvek, který bylo možné pozorovat na leptaných metalografických vzorcích, jsou zdeformované taveninové lázně v místech pórů a jiných vměstků v tištěné vrstvě. V označeném místě, viz obrázek 45, se nachází velkorozměrový pór s neroztaveným práškem.



Obrázek 45 Zdeformované taveninové lázně v místě velkorozměrového póru

Dle výzkumu M. Bindera [28] by se v místě přerušení měla nacházet souvislá vrstva roztaveného materiálu, jak je patrné z obrázku 46. Kromě místa přerušení se v tomto výzkumu pro porovnání měřily rozmezí mezi jednotlivými taveninovými lázněmi.



Obrázek 46 Důkaz přerušení procesu v leptané části [28]

Vzhledem k nastaveným podmínkám předkládaného experimentu, je možné očekávat různé vlastnosti dílů. Při tisku druhé sady vzorků se stavba přerušovala po dokončení předcházející vrstvy. Tedy nedocházelo k přímému zastavení stavby během jedné vrstvy. Z tohoto důvodu není možné s přesností určit dopad výpadku ochranné atmosféry, ale lze pouze přibližně odhadnout dopad na strukturu.

8 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo podat komplexní pohled na problematiku přerušného tisku v procesu DMLS. V teoretické části byly popsány používané technologie ze skupiny Powder bed fusion, konkrétně DMLS a EBM. Dále byly v předkládané práci popsány materiály, které se využívají pro kovový tisk. Dalším bodem teoretické části byl vliv parametrů na výslednou strukturu dílů. Poslední část se zaměřila na rešerši problematiky přerušného tisku.

V praktické části byl navržen experiment pro zkoumání struktury materiálu při přerušení stavby. Definovala se metodika pro vyhodnocení pomocí výpočtové tomografie a metalografických výbrusů. Vedle tiskových a skenujících parametrů, mohlo mít vliv na výsledky i nastavení experimentu.

U prvních vzorků došlo k neočekávanému zastavení procesu z důvodu výpadku elektrické energie. Vzhledem k výsledkům z CT došlo k úbytku materiálu vlivem přerušení. Pokud by se tyto vzorky následně zatěžovaly mechanicky, lze konstatovat, že by došlo k porušení vzorků právě vlivem přerušení. Z toho vyplývá, že přerušení tisku především u tenkostěnných vzorků, může to mít vliv na výslednou strukturu i vlastnosti dílu.

U druhých vzorků ve tvaru plných válečků došlo k zastavení v několika místech dle přiloženého plánu na různě dlouhou dobu. Nicméně ani v tomto případě se neprokázal výraznější vliv přerušení tisku, jako vliv použitých parametrů. Z toho vyplývá, že v případě nutnosti doplnění prášku, lze tisk bez větších dopadů přerušit. Software tiskárny při doplnění prášku dokončí rozestavěnou vrstvu a následně přeruší proces před začátkem nové vrstvy.

Na základě výsledků z experimentu lze konstatovat, že pokud nevedí vizuální poškození v důsledku přerušení, je možné stavbu dokončit. Avšak je důležité zohlednit i potenciální vliv na mechanické vlastnosti dílů, což by mohlo být předmětem dalšího zkoumání. Nelze s jistotou říci, jak by se v případě přerušení tisku zachoval větší objem materiálu.

9 Bibliografie

- [1] The Complete History of 3D Printing: From 1980 to present. In: *3DSourced* [online]. 2023 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.3dsourced.com/3d-printers/history-of-3d-printing/>
- [2] Direct metal laser sintering. In: *Costumpart.net* [online]. [cit. 2022-11-13]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>
- [3] CAI, Chao a Kun ZHOU. Metal additive manufacturing. In: *Digital Manufacturing* [online]. Elsevier, 2022, s. 247-298 [cit. 2023-04-16]. ISBN 9780323950626. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-95062-6.00005-X
- [4] SEDLAK, Josef, Daniel RICAN, Miroslav PISKA a Lubos ROZKOSNY. Study of Materials Produced by Powder Metallurgy Using Classical and Modern Additive Laser Technology: Lecture Notes from the 2nd ERCOFTAC Summerschool held in Stockholm, 10-16 June, 1998. In: *Procedia Engineering* [online]. 2015, , s. 1232-1241 [cit. 2022-11-13]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2015.01.488
- [5] BADIRU, Adedeji, Vhance VALENCIA a David LIU. *Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industr.* 2017. Crc Press, 2017. ISBN 1-4822-6408-0.
- [6] MANFREDI, Diego, Flaviana CALIGNANO, Manickavasagam KRISHNAN et al. Additive Manufacturing of Al Alloys and Aluminium Matrix Composites (AMCs). In: *Light Metal Alloys Applications* [online]. 2014. Sao Paolo: InTech, 2014, s. 4-34 [cit. 2023-03-05]. ISBN 978-953-51-1588-5. Dostupné z: doi:10.5772/58534
- [7] Prašnost na pracovišti. In: *BOZP.cz* [online]. CRDR spol. s r.o, 2023 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: <https://www.bozp.cz/aktuality/prasnost-na-pracovisti/>
- [8] JIA, Yujun, Shashvat MEHTA, Ryan LI, Md RAHMAN CHOWDHURY, Timothy HORN a Chengying XU. Additive manufacturing of ZrB₂-ZrSi₂ ultra-high temperature ceramic composites using an electron beam melting process.

- In: *Ceramics International* [online]. 2021, , s. 2397-2405 [cit. 2022-11-13]. ISSN 02728842. Dostupné z: doi:10.1016/j.ceramint.2020.09.082
- [9] Slitina hliníku AlSi10Mg. In: *Www.one3d.cz* [online]. [cit. 2023-01-27]. Dostupné z: <https://www.one3d.cz/materialy/slitina-alsi10mg/>
- [10] Material Datasheet AlSi10Mg. In: *Eos.info* [online]. Munich, 2022 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/aluminium/material_datasheet_eos_aluminium_alsi10mg_en_web.pdf
- [11] Datasheet AlSi10Mg. In: *3t_am.com* [online]. Berkshire: 3t_am, 2023 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: https://www.3t-am.com/sites/threeT/files/Aluminium%20AlSi10Mg_Datasheet_0.pdf
- [12] DMLS. In: *Fs.cvut.cz* [online]. [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/rozdeleni-technologie-3dtisk/dmls-3dtisk/>
- [13] DUTTA, Bhaskar, Sudarsanam BABU a Bradley JARED. Raw materials for metal additive manufacturing. *Science, Technology and Applications of Metals in Additive Manufacturing* [online]. Elsevier, 2019, 77-91 [cit. 2023-03-21]. ISBN 9780128166345. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-816634-5.00004-2
- [14] MOGHIMIAN, Pouya, Thomas POIRIÉ, Mahdi HABIBNEJAD-KORAYEM, Javier Arreguin ZAVALA, Jens KROEGER, Frédéric MARION a Frédéric LAROUCHE. Metal powders in additive manufacturing: A review on reusability and recyclability of common titanium, nickel and aluminum alloys. *Additive Manufacturing* [online]. 2021, **2021**(43), 8-14 [cit. 2023-03-21]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2021.102017
- [15] CALIGNANO, F., D. MANFREDI, E. AMBROSIO, L. IULIANO a P. FINO. Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2013, **67**(9-12), 2743-2751 [cit. 2023-03-05]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-012-4688-9

- [16] KRISHNAN, Manickavasagam, Eleonora ATZENI, Riccardo CANALI, Flaviana CALIGNANO, Diego MANFREDI, Elisa Paola AMBROSIO a Luca IULIANO. On the effect of process parameters on properties of AlSi10Mg parts produced by DMLS. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2014, **20**(6), 449-458 [cit. 2023-03-11]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-03-2013-0028
- [17] MAGANA-CARRANZA, R., C.J. SUTCLIFFE a E.A. PATTERSON. The effect of processing parameters and material properties on residual forces induced in Laser Powder Bed Fusion (L-PBF). *Additive Manufacturing* [online]. 2021, **2021**(46) [cit. 2023-04-23]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2021.102192
- [18] SUN, S., M. BRANDT a M. EASTON. Powder bed fusion processes. In: *Laser Additive Manufacturing* [online]. 2017. Melbourne: Elsevier, 2017, s. 55-77 [cit. 2023-03-21]. ISBN 9780081004333. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-100433-3.00002-6
- [19] SONG, Yong-Ak a Wilfried KOENIG. Experimental Study of the Basic Process Mechanism for Direct Selective Laser Sintering of Low-Melting Metallic Powder. *CIRP Annals* [online]. 1997, **46**(1), 127-130 [cit. 2023-03-11]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)60790-2
- [20] PEI, Wei, Wei ZHENGYING, Chen ZHEN, Li JUNFENG, Zhang SHUZHE a Du JUN. Numerical simulation and parametric analysis of selective laser melting process of AlSi10Mg powder. *Applied Physics A* [online]. 2017, **123**(8) [cit. 2023-04-23]. ISSN 0947-8396. Dostupné z: doi:10.1007/s00339-017-1143-7
- [21] KARG, Michael, Oliver HENTSCHEL a Bhrigu AHUJA. *Comparison of process characteristics and resulting microstructures of maraging steel 1.2709 in Additive Manufacturing via Laser Metal Deposition and Laser Beam Melting in Powder Bed* [online]. In: . s. 11 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.33902.66881
- [22] SAMANTARAY, Mihir, Dharendra Nath THATOI a Seshadev SAHOO. Modeling and Optimization of Process Parameters for Laser Powder Bed Fusion of AlSi10Mg Alloy. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing* [online].

2019, **6**(4), 356-373 [cit. 2023-03-12]. ISSN 2196-7229. Dostupné z: doi:10.1007/s40516-019-00099-7

- [23] GHIO, Emanuele a Emanuela CERRI. Additive Manufacturing of AlSi10Mg and Ti6Al4V Lightweight Alloys via Laser Powder Bed Fusion: A Review of Heat Treatments Effects. *Materials* [online]. 2022, **15**(6) [cit. 2023-05-07]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma15062047
- [24] KEMPF, A. a K. HILGENBERG. Influence of heat treatments on AlSi10Mg specimens manufactured with different laser powder bed fusion machines. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2021, **818** [cit. 2023-05-07]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2021.141371
- [25] WEINGARTEN, Christian, Damien BUCHBINDER, Norbert PIRCH, Wilhelm MEINERS, Konrad WISSENBACH a Reinhart POPRAWE. Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2015, **221**(221), 112-120 [cit. 2023-03-25]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.02.013
- [26] YANG, Tao, Tingting LIU, Wenhe LIAO, Eric MACDONALD, Huiliang WEI, Changdong ZHANG, Xiangyuan CHEN a Kai ZHANG. Laser powder bed fusion of AlSi10Mg: Influence of energy intensities on spatter and porosity evolution, microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2020, **849**(849) [cit. 2023-03-25]. ISSN 09258388. Dostupné z: doi:10.1016/j.jallcom.2020.156300
- [27] ZHAO, Lv, Lubin SONG, Juan Guillermo SANTOS MACÍAS, Yaxin ZHU, Minsheng HUANG, Aude SIMAR a Zhenhuan LI. Review on the correlation between microstructure and mechanical performance for laser powder bed fusion AlSi10Mg. *Additive Manufacturing* [online]. 2022, **56**(56) [cit. 2023-03-25]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2022.102914
- [28] BINDER, Maximilian, Cheechau LEONG, Christine ANSTAETT, Georg SCHLICK, Christian SEIDEL a Gunther REINHART. Effects of process interruptions on the microstructure and tensile properties of AlSi10Mg parts manufactured by Laser-Based Powder Bed Fusion. *Procedia CIRP* [online]. 2020, **94**(94), 182-

187 [cit. 2023-04-08]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2020.09.035

- [29] HAMMOND, Vincent, Michael SCHUCH a Matthias BLECKMANN. The influence of a process interruption on tensile properties of AlSi10Mg samples produced by selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2019, **25**(8), 1442-1452 [cit. 2023-04-08]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-04-2018-0105
- [30] SPIERINGS, Adriaan B. a Gideon LEVY. *Comparsion of density of stainless steel 316l parts produced with selective laser melting using different powder grades* [online]. Texas, 2009 [cit. 2023-04-08]. International Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin.
- [31] DMLS Titanium. In: *Facfox.com* [online]. Hangzhou: ©2023 FACFOX, INC., 2023 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://facfox.com/materials/dmls-titanium/>
- [32] *Correlation between the productivity and mechanical performance of AISI 316L parts produced via Laser powder bed fusion process* [online]. Turín, 2021 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://webthesis.biblio.polito.it/20095/1/tesi.pdf>. Diplomová práce. Politecnico di Torino.
- [33] TERRAZAS-NAJERA, C.A., F.L. MAYORAL, O.F. GARCIA, M.S. HOSSAIN, D. ESPALIN, A. FERNANDEZ, L.E. MURR a R.B. WICKER. Effects of process interruptions on microstructure and mechanical properties of three face centered cubic alloys processed by laser powder bed fusion. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2021, **66**(66), 397-406 [cit. 2023-04-08]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2021.04.013
- [34] HOW TO COLD MOUNT. In: *Struers* [online]. US: Struers LLC, 2023 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.struers.com/en/Knowledge/Mounting/Cold-mounting#>

Seznam tabulek

Tabulka 1 Výhody a nevýhody technologie DMLS	13
Tabulka 2 Porovnání technologií EBM a DMLS.....	14
Tabulka 3 Chemické složení AlSi10Mg [10].....	15
Tabulka 4 Mechanické vlastnosti AlSi10Mg [11]	16
Tabulka 5 Parametry výzkumu	32
Tabulka 6 Parametry tisku	34
Tabulka 7 Parametry skenování na CT pro sadu vzorků 1	38
Tabulka 8 Hodnoty pórovitosti.....	42
Tabulka 9 Plán přerušování tisku.....	48
Tabulka 10 Parametry skenování CT válečků.....	50

Seznam obrázků

Obrázek 1 Princip DMLS [2]	11
Obrázek 2 EBM technologie [8].....	14
Obrázek 3 Snímek ze SEM prášku AlSi10Mg společnosti EOS [10].....	16
Obrázek 4 DMLS díl z Ti6Al4V [31].....	18
Obrázek 5 Přehled výzkumů opětovného použití práškových materiálů [14].....	19
Obrázek 6 Strategie expozice a parametry procesu [15].....	20
Obrázek 7 Ilustrace spodní vrstvy, horní vrstvy a jádra v dílu.....	21
Obrázek 8 Skenovací strategie [17]	21
Obrázek 9 Princip tavení laserem [19]	24
Obrázek 10 Šrafovací vzdálenost a vliv na vznik pórů [32]	24
Obrázek 11 Vliv rychlosti skenování a výkonu laseru na mikrostrukturu [20].....	25
Obrázek 12 Závislost relativní hustoty na výkonu laseru a skenovací rychlosti [21]	26
Obrázek 13 Závislost hloubky slinování na ostatních parametrech [22]	26
Obrázek 14 Mikrostruktura AlSi10Mg bez tepelného zpracování (AB) a s tepelným zpracováním [24]	27
Obrázek 15 Plynové póry [18].....	28
Obrázek 16 Schéma vnitřního laserového sušení [18].....	29
Obrázek 17 Velkorozměrový pór [18].....	30
Obrázek 18 Porovnání vnější stěny přerušného a nepřerušného tisku [33].....	31
Obrázek 19 Rozměry vzorků: a) tenkostěnné vzorky, b) válečky	33
Obrázek 20 Umístění vzorků na stavební paletě.....	35
Obrázek 21 Poloha vzorku při skenování.....	37
Obrázek 22 Vzorek 18 B první sken.....	39
Obrázek 23 Vzorek 18 B druhý sken	39
Obrázek 24 Vytvoření vrubu na rozhraní vrstev (CT vlevo, skutečnost vpravo) ..	39
Obrázek 25 Pohled na pórovitost na rozhraní ve všech řezech.....	40
Obrázek 26 Posunutí stěn před a po přerušení vzorku 25 C.....	41
Obrázek 27 Vrub u vzorku 25 C	42
Obrázek 28 Montážní misky pro výrobu metalografických vzorků za studena [34]	43

Obrázek 29 Vyleštěné vzorky	44
Obrázek 30 Pohled na digitálním mikroskopu na vzorky 18 B (a), 30 C (b).....	45
Obrázek 31 Porozita na rozhraní skin–core	46
Obrázek 32 Hodnocení pórovitosti pravé části vzorku 30 C	47
Obrázek 33 Hodnocení pórovitosti levé části vzorku 30 C	47
Obrázek 34 Označení vzorků před odstraněním ze stavební palety	49
Obrázek 35 Povrch přerušeno vzorku	49
Obrázek 36 Váleček 25–pórovitost na rozhraní	51
Obrázek 37 Viditelná odsazení na hranách přerušeno tisku	51
Obrázek 38 Porozita ve výšce 19 mm od stavební palety	52
Obrázek 39 Připravené metalografické vzorky pro pozorování na optickém mikroskopu.....	53
Obrázek 40 Horní polovina válečku 23	54
Obrázek 41 Horní (a) a spodní (b) polovina válečku 1	54
Obrázek 42 Pohled na stavební paletu s chybně nanesenou vrstvou.....	55
Obrázek 43 Mikrostruktura válečku 25 po naleptání	56
Obrázek 44 Přerušeno místo s přetavenou vrstvou	57
Obrázek 45 Zdeformované taveninové lázně v místě velkorozměrového póru .	57
Obrázek 46 Důkaz přerušeno procesu v leptané části [28]	58