

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2023

**SAMUEL
PAVLÍK**



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Pavlík Jméno: Samuel Osobní číslo: 473456
 Fakulta/ústav: Fakulta strojní
 Zadávající katedra/ústav: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
 Studijní program: Výrobní inženýrství
 Specializace: Bez specializace

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Technologie aditivní výroby pro zpracování kovových materiálů

Název diplomové práce anglicky:

Additive manufacturing technologies for metals

Pokyny pro vypracování:

Základní funkční principy dostupných technologií 3D tisku kovů.
 Srovnání jednotlivých technologií a oblastí využití.
 Technicko-ekonomické srovnání vybraných metod.
 "Vliv technologie LSP na porozitu".

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Libor Beránek, Ph.D. 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. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práceIng. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedrydoc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen 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 studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s tématem „Technologie aditivní výroby pro zpracování kovových materiálů“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Libora Beránka, Ph.D. a uvedl v seznamu literatury veškerou použitou literaturu a další zdroje.

Souhlasím s publikováním dosažených výsledků za předpokladu, že budu uveden jako spoluautor.

V Praze dne

Poděkování

Rád bych věnoval poděkování pánu Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za vedení při psaní diplomové práce a za jeho cenné rady. Též děkuji rodině a přátelům za podporu a motivaci ve studiu.

NÁZEV:

Technologie aditivní výroby pro zpracování kovových materiálů

AUTOR:

Bc. Samuel Pavlík

ÚSTAV:

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE:

Ing. Libor Beránek Ph.D.

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na popsání problematiky 3D tisku. V úvodní rešerši práce popisuje historii jejich vzniku, rozdělení a popis používaných metod včetně nově se objevujících trendů. Detailněji jsou rozebrány metody tisku kovu a následně jejich použití v designu, strojírenství a medicíně. V práci je i diskutován vliv technologie LSP na vnitřní porozitu dílu tištěných na 3D tiskárnách pro tisk kovu. V další části práce přecházíme na vlastní laboratorní práci, kde najdeme podrobně zdokumentovaný postup, výběr materiálů a výsledek měření. Měření proběhlo na vzorcích z nerezové oceli a byli měřeny pomocí počítačové tomografie. Vzorky byli vytisknuty pomocí tří různých technologií a práce je zakončena porovnáním a zhodnocením výsledků z naměřených hodnot jednotlivých technologií.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aditivní technologie, 3D tisk kovu, Selective Laser Melting, Binder Jetting, Atomic Diffusion Additive Manufacturing, porozita, přesnost rozměrů

TITLE:

Additive manufacturing technologies for metals

AUTHOR:

Bc. Samuel Pavlík

DEPARTMENT:

Department of machining, process planning and metrology

SUPERVISOR:

Ing. Libor Beránek, Ph.D.

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on describing the issue of 3D printing. In the introductory research, the thesis describes the history of their creation, distribution and description of the methods used, including newly emerging trends. Metal printing methods and their uses in design, mechanical engineering and medicine are described in more detail. Discussion about the influence of LSP technology on inner porosity of metal printed samples is included in the work. In the next part of the work, we move on to our own laboratory work, where we find a detailed documented procedure, the selection of materials and the result of the measurement. Measuring was undertaken on samples made out of stainless steel and scanned using computer tomography. The samples were made using three different printing technologies and thus the work is concluded by comparing and evaluating the measured values of individual methods.

KEY WORDS

Additive technologies, 3D metal printing, Selective Laser Melting, Binder Jetting, Atomic Diffusion Additive Manufacturing, porosity, dimensional accuracy

Obsah

1.	Úvod	8
1.1	Historie	9
2.	Technologie 3D tisku kovu	11
2.1	Powder Bed	11
2.1.1	Powder Bed Fusion.....	13
2.1.1.1	Selective Laser Melting a Direct Metal Laser Sintering.....	13
2.1.1.2	Electron Beam Melting.....	14
2.1.2	Powder Bed Binder Jetting.....	15
2.2	Direct Energy Deposition	17
2.2.1	Powder DED	17
2.2.2	Wire DED	18
2.3	Material Extrusion.....	19
2.4	Zacházení s práškem	21
2.4.1	Požadavky na dávkovací systém	23
2.4.2	Bezpečnostní rizika zacházení s práškem.....	23
2.5	Úpravy povrchu po tisku	24
2.5.1	Vliv Laser Shock Peening na porozitu.....	25
3.	Oblasti použití	31
3.1	Vizualizace	32
3.2	Rychlé prototypování, funkční výrobky a plánování.....	32
3.2.1	Analýza obtékání těles	32
3.2.2	Zkoušky mechanických vlastností	33
3.2.3	Konformní chlazení	33
3.2.4	Snižování hmotnosti.....	36
3.2.5	Medicínské aplikace	39
3.2.5.1	Plánování a simulace složitých operací.....	39
3.2.5.2	Implantáty a protézy vyrobené na zakázku	40
3.2.5.3	Zubní lékařství	41
3.3	Výroba a tvorba nástrojů	42
3.3.1	Direct Soft Tooling.....	42
3.3.2	Indirect Soft Tooling.....	42

DIPLOMOVÁ PRÁCE

3.3.3	Direct Hard Tooling	43
3.3.4	Indirect Hard Tooling.....	43
4.	Představení použitých tiskáren	44
4.1	SLM – Renishaw AM400.....	44
4.1.1	Optický systém tiskárny Renishaw	45
4.1.2	Spotřeba inertního plynu AM 400.....	46
4.2	BJ - ExOne DesktopMetal X160 Pro	46
4.3	BPE – Markforged Metal X Gen 2.....	47
4.4	Srovnání použitých tiskáren	49
5.	Zkoumané vzorky	50
5.1	Materiál vzorků	51
5.1.1	Chemické složení.....	51
5.1.2	Rozdíl mezi ocelí 316L a 316H.....	52
5.1.3	Fyzikální vlastnosti nerezové oceli 316	52
5.1.4	Mechanické vlastnosti.....	53
6.	Experimentální srovnání technologií	55
6.1	Použité měřicí zařízení	55
6.1.1	Zeiss Metrotom 1500.....	55
6.1.2	Marsurf LD 120.....	56
6.2	Nastavení parametrů měření na CT	57
6.3	Naměřené hodnoty na CT	60
6.3.1	Měření porozity.....	60
6.3.2	Měření průměru a válcovitosti.....	65
6.3.3	Měření základního profilu povrchu.....	66
7.	Závěr.....	73
	Seznamy	75
	Zdroje	80

1. Úvod

Aditivní technologie jsou moderní oblastí výrobních procesů, označují se tak technologie pracující na základě postupného skládání materiálu vrstvu po vrstvě, řádek po řádku, kus po kusu nebo povrch po povrchu a produkující trojrozměrné (3D) fyzické objekty. Definice aditivní technologie by se dala formulovat jako „proces spojování materiálů za účelem výroby dílů z dat 3D modelu, obvykle vrstva po vrstvě, na rozdíl od subtraktivních výrobních a formovacích výrobních metodologií“. Další označení pro aditivní technologie používané v praxi i v literatuře jej označuje jako rychlé prototypování (rapid prototyping), 3D tisk, výroba bez formy (freeform fabrication), vrstvená výroba (layer manufacturing). Tyto technologie byli z počátku využívány pro výrobu prototypů, ale rychle se vyvinuli do všestranné technologie používané pro malosériovou výrobu. Tento rychlý vývoj je důsledkem mnoha faktorů, kterými se aditivní technologie liší od dosud známých, běžně používaných výrobních technologií. Největším faktorem je bezpochyby volnost v tvaru vytvářeného objektu, jelikož aditivní technologie jsou schopny vyrobit i velmi komplexní konstrukční prvky jinými technologiemi nedosažitelné. Dalším faktorem je, že výroba má obvykle velmi málo kroků ve srovnání s tradičními metodami, nevyžaduje žádné speciální nástroje, což jí dělá extrémně jednoduchou. Aditivní technologie jsou také snadno spravovatelné s vysoce automatizovaným hlavním procesem, který vyžaduje mnohem menší nastavování a následnou montáž. Díky nízkému množství odpadních materiálů a vysoké energetické účinnosti jsou aditivní technologie perfektní pro malé a střední výroby. Tradiční výroba je zřídka tak efektivní jako aditivní, zejména pro menší produkce, které nestojí za čas, který potřebují na optimalizaci, zatímco efektivita aditivní výroby je nezávislá na počtu vyráběných kusů. [1]

1.1 Historie

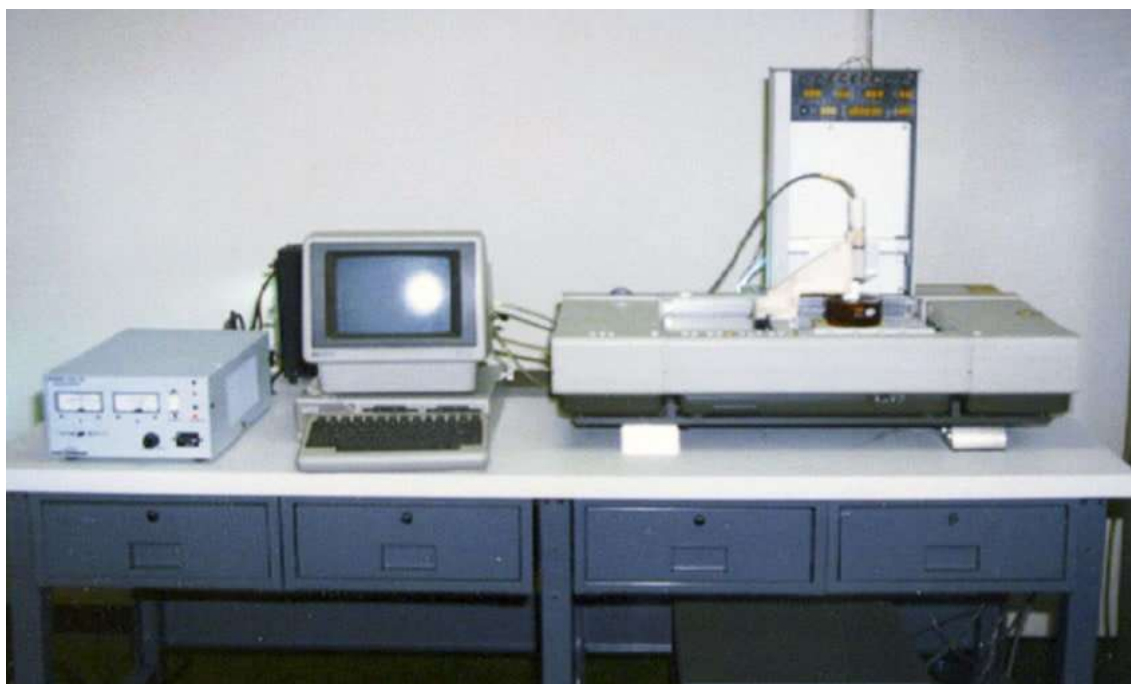
Počátky 3D tisku lze vysledovat až do 80. let minulého století. V roce 1981 Hideo Kodama, japonský vědecký pracovník, vyvinul metodu pro výrobu trojrozměrného plastového modelu pomocí fotopolymerních materiálů. Za zakladatele oblasti 3D tisku je ovšem spíše považován Charles Hull, zakladatel společnosti 3D Systems, který si zaregistroval svůj první patent v roce 1984, v němž uvedl vynález stereolitografie pro vytváření prototypů, která používá UV světlo pro vytvrzení fotopolymerní pryskyřice v kádi. V raných osmdesátých letech byl však problém s tím, že CAD byl ještě ve svých počátcích, a rozdělit 3D CAD model na jednotlivé tisknutelné vrstvy byl problém. Hull za pomoci partnerské společnosti vyvinul formát STL, který bylo možné použít na jakoukoliv 3D tiskárnu. V roce 1989 spatřilo světlo světa FDM (fused deposition modeling), tisk pomocí extruderu. Crump zároveň vyvinul Akrylonitril Butadien Styren (ABS), velmi odolný plast dnes široce používaný v technologii FDM.



Obrázek 1: Carl Deckard vynálezce prvního SLS stroje [5]

Dr. Carl Decker a Dr. Joe Beaman byli prvními, kteří vyvinuli SLS (selected laser sintering – selektivní spékání laserem) technologii na Texaské Univerzitě v osmdesátých letech, nezávisle na procesech SLA a FDM. Zatímco SLA a FDM úspěšně vytvářeli výrobky z plastu, v dané době nebyli schopni touto technologií dosáhnout výrobku z kovu. Technologie SLS byla v době svého vzniku jedinou, která byla schopna vytvářet prototypy z kovu. V raných devadesátých letech na Massachusettské Technické Univerzitě vynalezli inkoustový 3D tisk. Průmysl 3D tisku se však rozjel až na počátku 21. století, kdy se technologie stala dostupnější díky

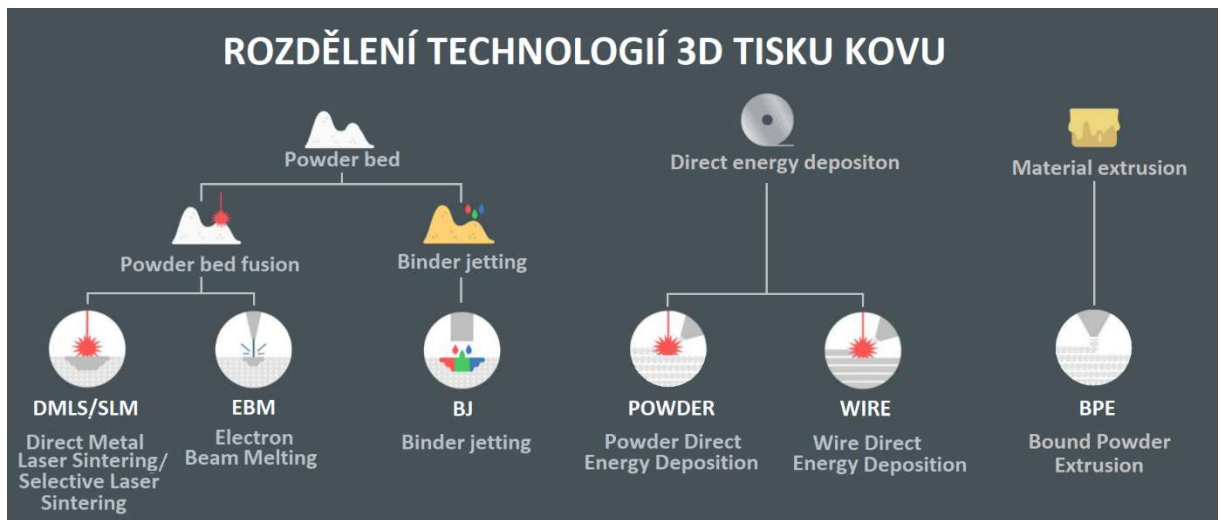
vypršení platnosti patentů a vývoji softwaru s otevřeným zdrojovým kódem (open source). V roce 2005 přišla revoluce v 3D tisku díky projektu RepRap, jehož cílem bylo vytvořit stroj, který je schopný reprodukovat sám sebe. V průběhu let se 3D tisk vyvinul tak, aby zahrnoval nové aplikace v průmyslových odvětvích, jako je letectví, automobilový průmysl, lékařství a architektura. Technologie se také stala cenově dostupnější, což umožňuje více lidem její použití k osobním a profesionálním účelům. Dnes se 3D tisk používá pro prototypování, výrobu, a dokonce i pro umělecké a vzdělávací účely. [2]



Obrázek 2: SLA-1, první 3D tiskárna na světě [2]

2. Technologie 3D tisku kovu

Technologie 3D tisku mohou být klasifikovány různými způsoby v závislosti na fyzikální podstatě procesu, zdroji energie, typu materiálu nebo velikosti objektů. Nejrozšířenějším druhem kategorizace 3D tiskových procesů v průmyslu je jejich rozřazení dle počáteční formy výchozího materiálu. V souladu s tím lze všechny systémy rozdělit na systémy s pevným materiálem, kapalným nebo práškovým. Protože kapalně materiály jsou především určeny pro termoplastické polymery, budeme se dále zabývat hlavně procesy s práškovým materiálem. Kovový prášek je základním kamenem kovového 3D tisku. Navzdory tomu, že je obtížné a nebezpečné s ním manipulovat v surovém stavu, jeho jedinečné vlastnosti z něj činí preferovaný typ kovového materiálu. V důsledku toho se hlavní rozdíly mezi typy kovových tiskáren týkají způsobu, jakým prášek taví do kovových součástí. Tyto metody se velmi liší, od použití vysokoenergetických laserů k tavení sypkého prášku až po vytlačování vázaného kovového práškového vlákna. [3]



Obrázek 3: Rozdělení technologií 3D tisku kovu

2.1 Powder Bed

Powder Bed (v českém překladu možno najít jako práškové lože) je jedním z nejdůležitějších odvětví technologií aditivní výroby. Jejím základem je nanášení po sobě jdoucích vrstev práškového materiálu. Každá vrstva bude částečně fixována polymerním pojivem nebo usměrněnou fúzí (a ztuhnutím), čímž se vytvoří finální řez

vytvářeného objektu tak, že součtem všech řezů ve všech vrstvách vznikne požadovaný tvar.

Technologii Powder Bed lze rozdělit do dvou hlavních kategorií: Powder Bed Fusion a non-Fusion (s použitím fúze a bez použití fúze). Powder Bed Fusion (PBF) je nejstudovanější a zahrnuje mnoho dobře známých technologií, jakými jsou Selective Laser Melting (selektivní laserové tavení (SLM)), Direct Metal Laser Sintering (přímé sintrování kovu laserem (DMLS)) a Electron Beam Melting (tavení elektronovým paprskem (EBM)). Tyto technologie jsou zaměřeny především na modelování kovu pomocí koncentrovaného zdroje energie pro přesné spojení specifických bodů práškové vrstvy pomocí jeho lokálního roztavení. Vzhledem k malým rozměrům vzniklých oblastí taveniny a velkému objemu chladné hmoty, která je obklopuje, dochází k tuhnutí extrémně rychle. Tato skutečnost a velké množství tepla rozptýleného v blízkém okolí taveniny produkuje nerovnovážnou strukturu, která má za následek zbytková napětí nebo praskání. Kromě toho, oxidační produkty vzniklé při natavování mohou tvořit částice, které se objeví jako inkluze v mikrostruktuře ztuhlého materiálu. Tyto křehké částice zvyšují napětí v hotovém výrobku a jsou škodlivé pro mechanické vlastnosti. Výhodou v oblasti mikrostruktury však je, že tyto technologie mají malou finální porozitu v porovnání s technologiemi bez použití fúze. Technologie s fúzí vytváří téměř plně husté objekty, což jí dává lepší mechanické vlastnosti a tím i více možností pro její aplikace. Porozitou a porovnáním technologií fúze a bez-fúze se práce zabývá v dalších kapitolách.

Technologie bez použití fúze se nazývá Binder Jetting (tryskání pojiva (BJ)) a je to jedinou technologií kovového 3D tisku s práškovým lože, která nespoleská na fúzi pro vytvoření finálního objektu. Principem je nanášení vrstev prášku slepených dohromady pomocí polymerního pojiva, které je nanášeno ve tvaru půdorysného řezu finálního objektu. Stejně jako u technologie s fúzí, spojením všech řezů ve všech vrstvách vzniká finální výrobek, který ale musí ještě projít tepelným zpracováním.

2.1.1 Powder Bed Fusion

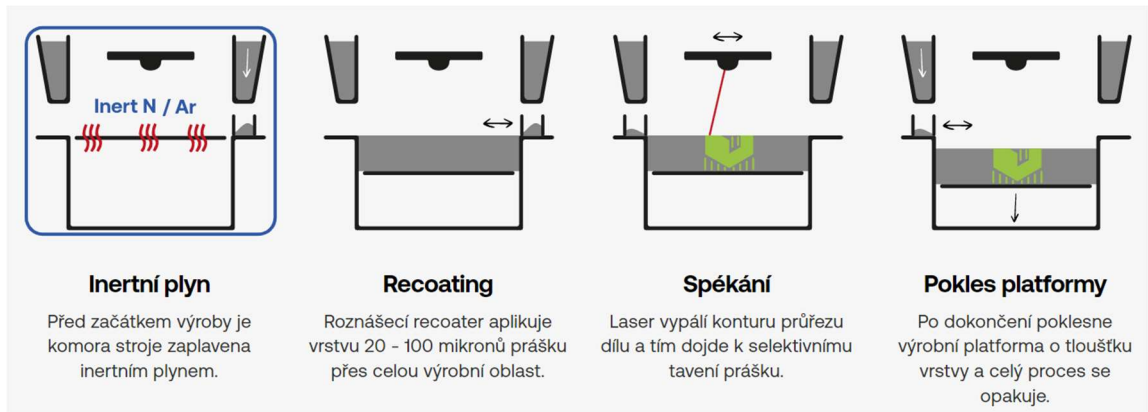
Jak už bylo zmíněno, PBF je momentálně nejspíše nejpoužívanější technologií kovového 3D tisku. Tyto stroje rozprostřou tenkou vrstvu kovového prášku na stavební plochu a selektivně taví půdorysný řez vytvářené součásti. [3]

2.1.1.1 Selective Laser Melting a Direct Metal Laser Sintering

Většina strojů pro technologii PBF jsou stroje pro selektivní laserové tavení (SLM). Stroje SLM používají vysoce výkonné lasery ke spojování kovových vrstev do součástí. V tomto procesu je tenká vrstva prášku rozprostřena pomocí válečku na konstrukční desku, která je umístěna na pístu. Po roztavení požadovaného řezu v jedné vrstvě se píst spustí o úroveň jedné vrstvy, váleček rozprostře další vrstvu prášku a proces se opakuje, dokud není vytvářená součást hotová. Jak zařízení staví vrstvu po vrstvě, dosud neslinutý prášek slouží jako podpora pro součást ve výstavbě. Po tisku operátor odstraní díl (nebo díly) z práškového lože, odřízne díl od konstrukční desky a následně díl zpracuje.

SLM tištěné díly jsou skvělé pro přesné, geometricky složité díly, které by jinak nebyly běžnými technologiemi vyrobitelné. Hodí se do široké škály aplikací: od zubní/zdravotní péče přes automobilový až po letecký průmysl. Objemy pracovního prostoru se pohybují od velmi malých (100 mm krychle) po velké (800 mm x 500 mm x 400 mm), rychlost tisku je střední. Přesnost těchto strojů je dána šířkou laserového paprsku a výškou vrstvy. Drsnost povrchu a přesnost vůči modelu nejsou tak dobré jako u jiných technologií, na druhou stranu materiálové vlastnosti jsou velmi blízké k teoretickým hodnotám.

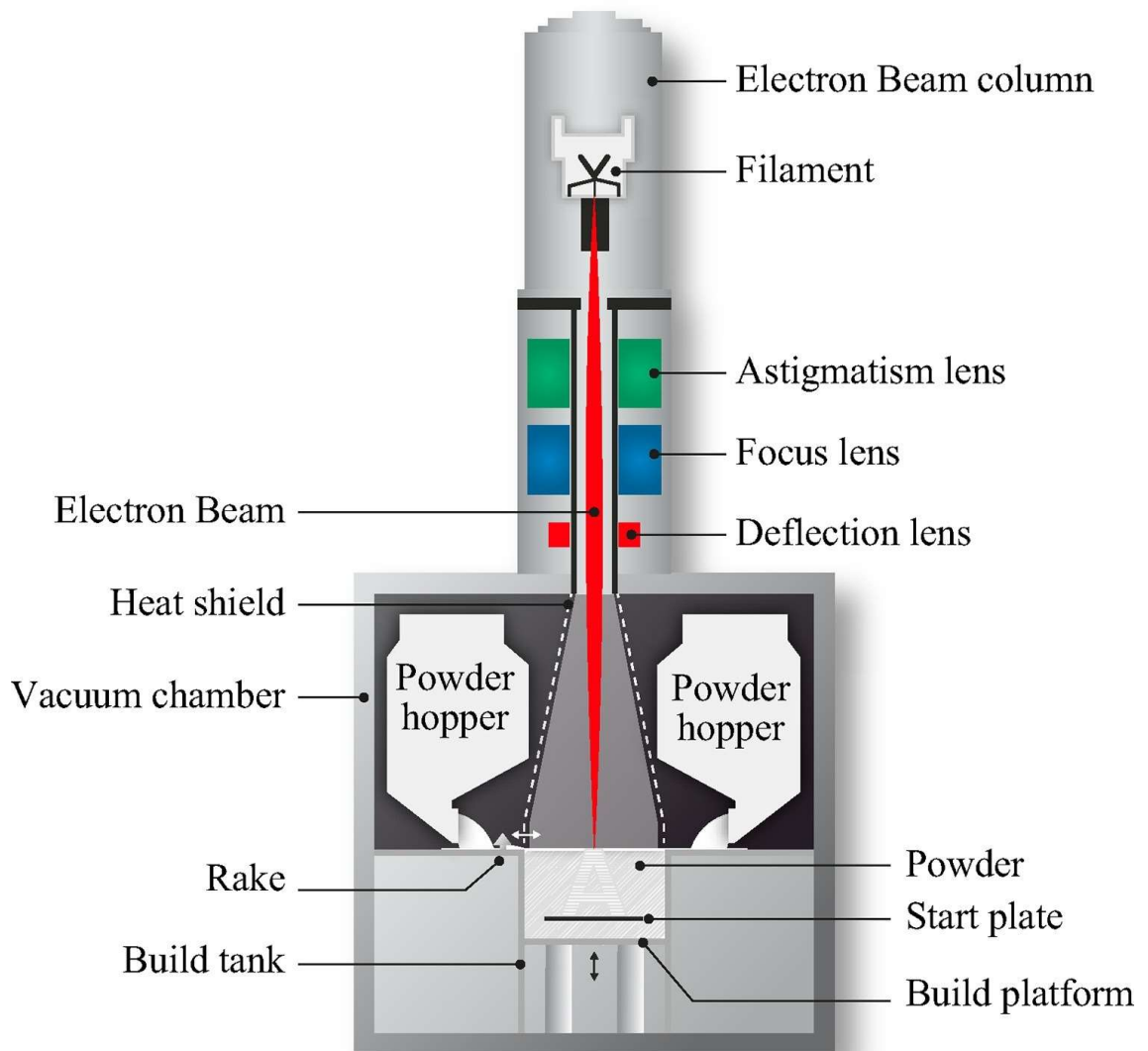
I když jsou tyto stroje průkopnické, široká škála požadavků na zařízení a následné zpracování omezuje tyto stroje na průmyslové uživatele. Stroje SLM vyžadují k obsluze vyškolené odborníky. Kvůli jeho složitému procesu je třeba mnoho dílů vytisknout a několikrát upravit, aby se dosáhlo požadovaných výsledků. Po tisku většina dílů vyžaduje dodatečné opracování a tepelné zpracování. Kromě toho je kovový prášek, který tyto stroje používají, extrémně nebezpečný a nákladný na manipulaci, a provoz takového stroje vyžaduje specializovaného technika. [2][3]



Obrázek 4: Princip technologie DMLS [6]

2.1.1.2 Electron Beam Melting

Stroje EBM se od SLM/DMLS strojů liší tím, že používají k výrobě dílů elektronový paprsek místo laseru. Jde o patentem chráněnou technologii 3D tisku vlastněnou společností GE Additive, která je tak jedinou společností vyrábějící tyto stroje a prodávající je pod značkou Arcam. Materiál – kovový prášek nebo drát je umístěn do vakua, kde je pomocí elektronového paprsku roztaven na teplotu až 2 000°C a spojen. Narozdíl od technologie SLM zde dochází k úplnému roztavení materiálu. Takto postupně vzniká celý výrobek, jedna vrstva za druhou. Celý proces probíhá ve vakuu a proto je vhodný pro výrobu součástek z reaktivních materiálů jako je například titan. Použití je hlavně v leteckém průmyslu a v lékařství. Očekává se, že společnost GE Additive se bude snažit o rozšíření těchto tiskáren do jiných oborů průmyslu, ovšem neočekává se jeho rozšíření směrem k poloprofesionálnímu a už vůbec ne k hobby tisku. [2] [4]



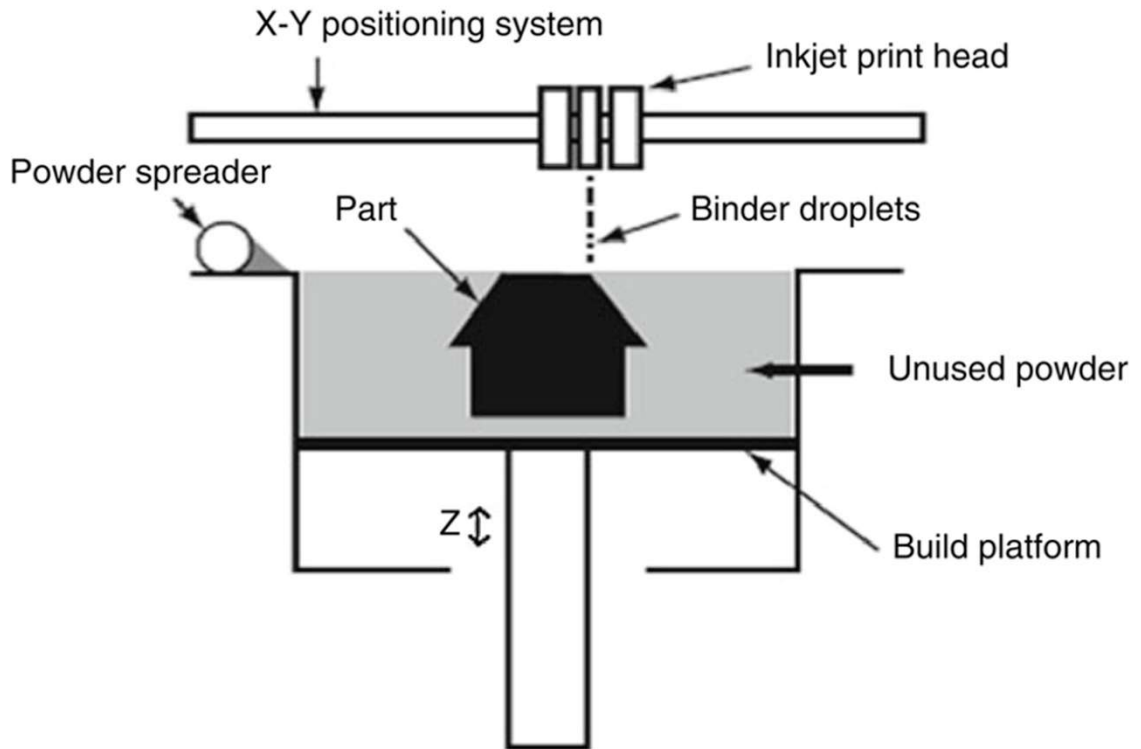
Obrázek 5: Schéma stroje pro technologii EBM [8]

2.1.2 Powder Bed Binder Jetting

Binder Jetting je rozsáhlá, vysoce přesná metoda kovového 3D tisku, která může nahradit SLM jako přední metodu 3D tisku na bázi sypkého prášku. Díky své rychlosti a škálovatelnosti to může být technologie, která posune výrobu kovovým 3D tiskem do sériové výroby. BJ je však velmi odlišná od ostatních technologií Powder Bed. Má stejnou geometrickou výhodu jako ostatní technologie Powder Bed, kde nepoužitý prášek slouží jako částečná nosná struktura, ale zároveň má spoustu exkluzivních funkcí tím, že se nespolehá na fúzi. Zásadním rozdílem je práce při pokojové teplotě, která umožňuje větší volnost ve výběru materiálu, kde můžeme vybírat ze široké škály materiálů i jiných než kovy, jako keramika nebo polymery. Tím, že je proces tisku pro všechny materiály téměř totožný, může stejný stroj pracovat s různými

druhy surovin. I přes tento široký záběr, kovové materiály jsou v praxi nejběžnější. Hlavním cílem pokroku, na který se výzkumníci v oblasti BJ zaměřují, je spíše než na proces tisku na zpracování po tisku, zejména slinování. Hlavní výhodou absence fúze je, že se během procesu nemění základní kovová fáze/struktura. To zabraňuje mnoha nežádoucím vedlejším účinkům, jako jsou zbytková napětí, tepelně ovlivněné zóny, oxidace, segregace a fázové změny. Proces bez vneseného tepla má mnoho dalších výhod, jako je absence ochranné atmosféry, která vede k možnosti větších konstrukčních prostorů stroje, a tudíž umožňuje vytváření větších součástí. Nepoužitý prášek je zároveň plně recyklovatelný a lze jej znovu použít. Proces je také rychlejší a nepotřebuje podpurný materiál pro začátek tisku, tím že je prášek schopný se sám udržet. Pro dosažení hustoty srovnatelné se sypkým materiálem se používá infiltrace kovem s menší hustotou. Pro nerezové ocelové materiály se používá jako infiltrant bronz (slitina s nízkou teplotou tání), který vyplní otevřené póry po tištění prášku ke zlepšení konečné struktury. [3] [7]

Před slinováním je relativní hustota kovových dílů vytvořených BJ typicky kolem 50–60 % teoretické hustoty, což je znatelně nižší než u syrových výlisků lisovaných v procesu práškové metalurgie (PM). Póry působí jako oblasti s vysokou koncentrací napětí, které podporují šíření trhlin. Snížení pórovitosti v tištěném dílu tedy může výrazně zlepšit mechanické vlastnosti. Po tisku je nutné vytvrzení pojiva pro zlepšení pevnosti surového dílu. K odstranění dílu z práškového lůžka a přebytečného okolního prášku se obecně používá měkký štěteček. Slinování je nejdůležitějším krokem následného zpracování, který zlepšuje hustotu a pevnost součásti, v tomto kroku se vypaluje pojivo a zhušťuje součást. Během slinování dochází ke snížení pórovitosti a rozměrovému smrštění, které významně ovlivní rozměrovou přesnost a kvalitu dílu. Kovové díly vyrobené prostřednictvím BJ lze použít jako funkční prototypy nebo pro malosériovou výrobu. Některé stroje BJ, které používají jako prášek oxid křemičitý nebo slévárenský písek, mohou vyrábět formy a jádra pro odlévání do písku. BJ má také značné uplatnění v automobilovém průmyslu a průmyslu těžké techniky [7]



Obrázek 6: Schéma procesu tisku technologií Binder Jetting [7]

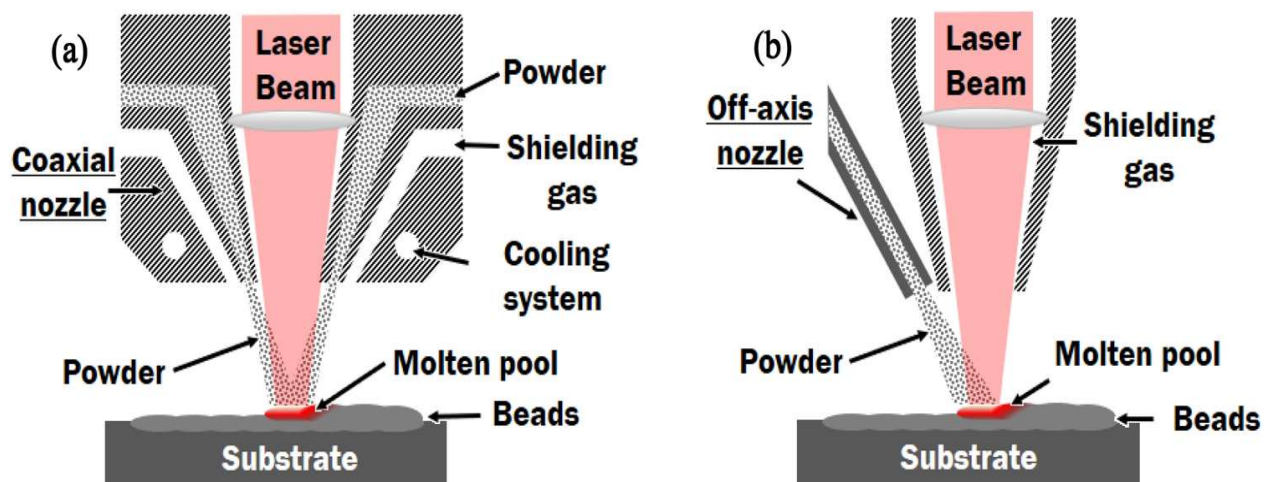
2.2 Direct Energy Deposition

Proces Direct Energy Deposition (Přímé nanášení energie (DED)) je podle normy ISO/ASTM 52900 definován jako „proces aditivní výroby, ve kterém se využívá soustředěná tepelná energie k tavení materiálů tavením při jejich ukládání“. DED využívá k výrobě dílů podavač kovu a laser. Procesy DED se dělí na dva typy podle podávaného materiálu, podávání prášku a podávání drátu. Na rozdíl od PBF, podavač a laser jsou součástí jedné (stejně) tiskové hlavy, která nanáší a taví materiál souběžně. Součást vzniká vytvářením lázně taveniny skládající se z předchozí nanesené vrstvy a nově podávaného materiálu v místě soustředěné tepelné energie a v blízkosti kolem něho. [1][3]

2.2.1 Powder DED

Sourozence Selective Laser Melting, Powder DED také používá laser a kovový prášek k výrobě kovových dílů. Namísto nanášení prášku na lože a jeho roztavení laserem, stroje DED přesně vyfouknou prášek z tiskové hlavy na součást a pomocí laseru na hlavě jej přitaví k součásti ve výrobě. Následně se do roztavené oblasti přivádí kovový prášek, který je současně taven laserem a teplem z natavené oblasti. Tento proces

se opakuje vrstvu po vrstvě, dokud není součást hotová. Natavená oblast je tvořena substrátem a dříve nanesenou vrstvou. Natavená oblast je u práškového typu DED chráněna inertním plynem. Pro vytvoření ochranné atmosféry se využívá argonu, hélia a dusíku. Powder DED má uvnitř tiskové hlavy systém podávání prášku, který může být koaxiální nebo mimoosový (zobrazeno na obrázku 5). Tento systém podávání umožňuje technologii DED podávání prášku po libovolné trajektorii, čímž je technologie DED vhodná pro opravy a repasování dílů, stejně tak pro výrobu heterogenních struktur. Obecně se DED vyznačuje velmi nízkou porozitou vyrobených součástí. [1][3][9]



Obrázek 7: Koaxiální a mimoosový podavač prášku technologie DED [1]

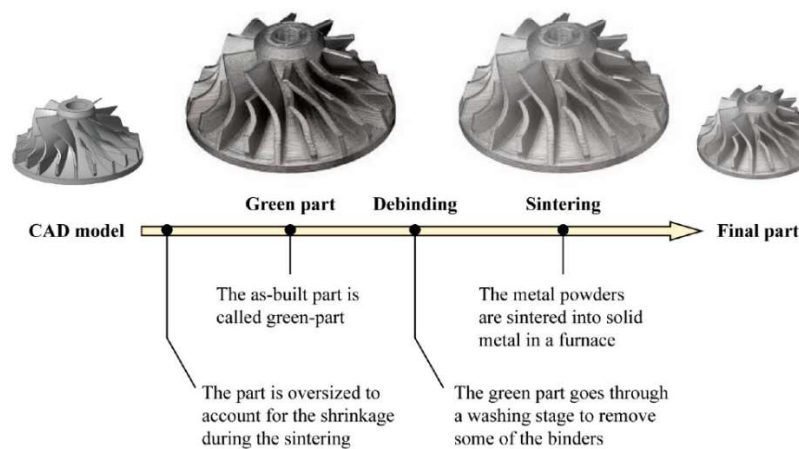
2.2.2 Wire DED

Drátové DED stroje používají laser k tavení suroviny velmi podobným způsobem jako jejich práškový DED příbuzní – jejich surovinou je však kovový drát místo podávaného prášku. Kromě laseru se k natavení surového materiálu používá i oblouků a elektronových svazků, tyto procesy se pak nazývají Wire and arc based additive manufacturing (WAAM), Wire and laser based additive manufacturing (WLAM) and Electron beam freeform fabrication (EBF). Tloušťka vrstvy a rychlost nanášení jednotlivých vrstev je u technologie Wire DED jednoznačně větší než 1 mm respektive 10g/min. Rozměrová přesnost a drsnost povrchu je tím pádem horší než u Powder DED, zatímco rychlost procesu je výrazně lepší. Větší rychlost vytváření dílu a jednodušší princip (jde v podstatě o řízené navařování) znamená, že technologie Wire DED umožňuje vytvářet součásti mnohem větší než ostatní technologie aditivní výroby, a to až do velikosti 5m x 1m x 1m. [3][9]

2.3 Material Extrusion

Material Extrusion (extruze materiálu) je nejběžnější forma 3D tisku na světě, která našla uplatnění hlavně v oblasti plastového 3D tisku, v oblasti kovového tisku tuto technologii reprezentuje Bound Powder Extrusion (extruze spojeného prášku (BPE)) také známá pod názvem Atomic Diffusion Additive Manufacturing (aditivní výroba atomovou difúzí (ADAM)), která je zajímavým nováčkem na poli technologií aditivní výroby. Jedná se o proces skládání vrstev založený na vytlačování materiálu, pro kovy patentovaný společností Markforged. Na rozdíl od téměř všech ostatních technologií 3D tisku kovu, stroje pracující na principu technologie BPE nepoužívají jako stavební materiál volně ložený prášek. Namísto toho je prášek vázán dohromady ve voskových polymerech stejným způsobem, jakým se vytváří kov pro vstřikování. Výsledkem je materiál, který je mnohem bezpečnější a snáze se používá než sypký prášek. S vázaným práškovým vytlačovacím materiálem lze manipulovat ručně a nevyžaduje bezpečnostní opatření jako stroje na sypký prášek, odpadá tak nebezpečí výbuchu, nebezpečí rozvíření prášku a poranění očí, plic a kůže nebo karcinogenní efekty, které některé práškové materiály mají. BPE filament je vytlačován z trysky způsobem velmi podobným standardnímu FDM 3D tisku. Tato technologie se označuje jako nepřímá aditivní výroba, jelikož po tisku samotném nám stroj vytvoří tkz. „green part“ obsahující kovový prášek rovnoměrně rozložený ve voskovém polymeru. Před tiskem je důležité tiskovou podložku a tiskovou komoru nahřát, stejně tak jako filament, který je při pokojové teplotě křehký. Pod dílem i podporami je vhodné vytvořit základovou desku (tkz. Raft). Tím je zajištěno, že se díl během tisku nezkroutí a při slinování se řádně smrští. (viz. obr. 6) Výhodou, kterou proces ADAM nabízí, je možnost vložit keramický materiál mezi podpory a tištěný díl, čímž se usnadní pozdější odlamování podpor, které je často možné odebrat už při procesu praní výtisku. Pro tuto výhodu je samozřejmě potřeba mít tiskárnu s možností tisku více různých materiálů. (viz. obr. 6) Po tisku má BPE dva kroky následného zpracování: zaprvé se polymer většinou rozpustí v „pracím“ stroji, poté se promytá část slinuje v peci (podobně jako u technologie Binder Jetting). Mytí je nejjednodušší část procesu 3D tisku BPE. Používá se k němu vyhřívaný systém odstraňování pojiva, který cirkuluje roztok (např. Opeteon SF-79) kolem dílu tak, aby co nejlépe rozložil polymerní pojivový materiál. Rozpouštěcí roztok rozpouští většinu pojivového

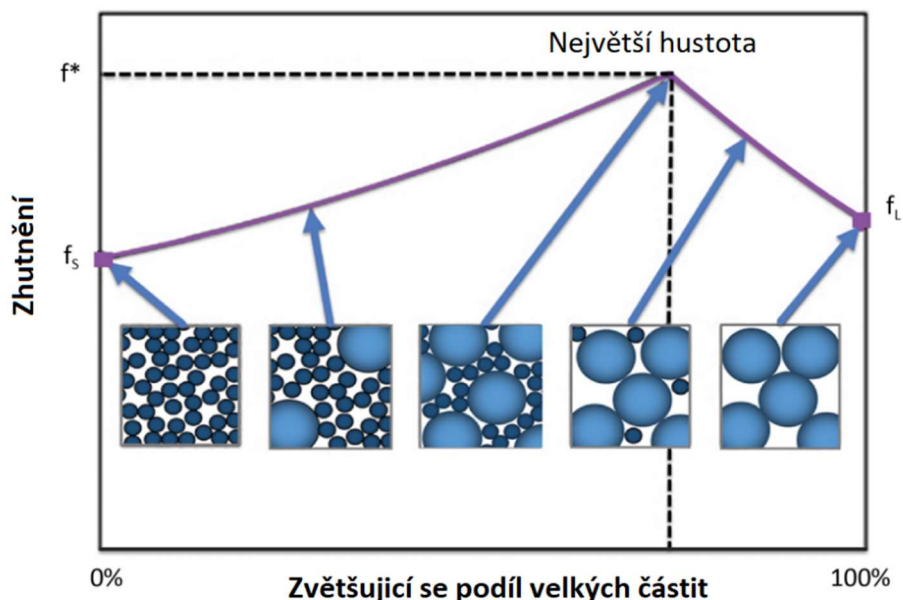
materiálu v celém dílu tím, že čím více polymeru je rozpuštěno, tím hlouběji do dílu roztok proniká. Doba mytí je vypočítávána softwarem a díly lze prát v dávkách nebo postupně, zároveň je možné díly vkládat a vyjímat v různých časech. Doba mytí závisí na velikosti dílu a tloušťce stěny. Součásti není možné přeprat, takže je v pořádku nechat roztok působit déle, než je minimální vypočtená doba. Po umytí dílů se přenesou do sušicí nádoby, kde se suší na vzduchu, aby se před slinováním zbavily zbytků rozpouštědla. Po umytí je součást ve formě „hnědé“ (tzv. brown part), křehčí než zelená (green part), ale stále spojena zbytkem polymeru. Následuje slinování, které přemění součást z lehce vázaného kovového prášku na celokovovou součást. Díl se zahřeje z pokojové teploty na přibližně 85 % bodu tání kovu ve směsi inertního a smíšeného plynu a poté se pomalu ochladí. V raných fázích teplotního náběhu pec spálí zbývající pojivo prostřednictvím malých kanálek vytvořených pracím procesem. Jakmile teplota dosáhne svého vrcholu, součást se smrští asi o 17 % na konečnou velikost, zatímco keramické nosiče podpor se změní z vláknů na prach. Stroj se pomalu ochlazuje ze své maximální teploty, dokud nelze součásti bezpečně vyjmout z pece. Jeden cyklus trvá o něco déle než jeden den (~25 hodin) a liší se v závislosti na slinovaném materiálu. Po slinování jsou díly připraveny k použití, jakmile proces skončí. Po slinování dílu je možné odstranit podpěry a základní desku. V závislosti na geometrii součásti to může vyžadovat použití síly nebo ručních nástrojů. Slinuté díly jsou plně kovové a připravené k použití, ale mohou být také dodatečně zpracovány pro zlepšení mechanických vlastností, drsnosti povrchu nebo přesnosti dílu. [3][9]



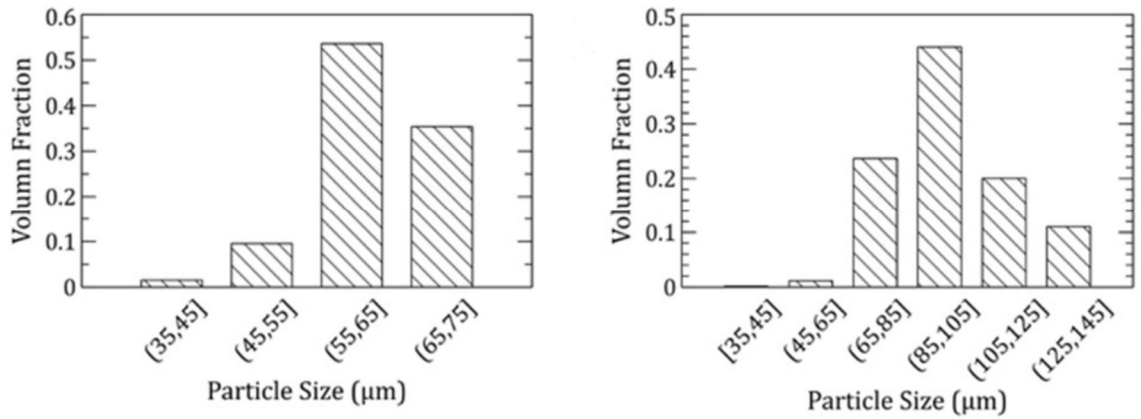
Obrázek 8: Proces výroby metodou Atomic Diffusion Additive Manufacturing [11]

2.4 Zacházení s práškem

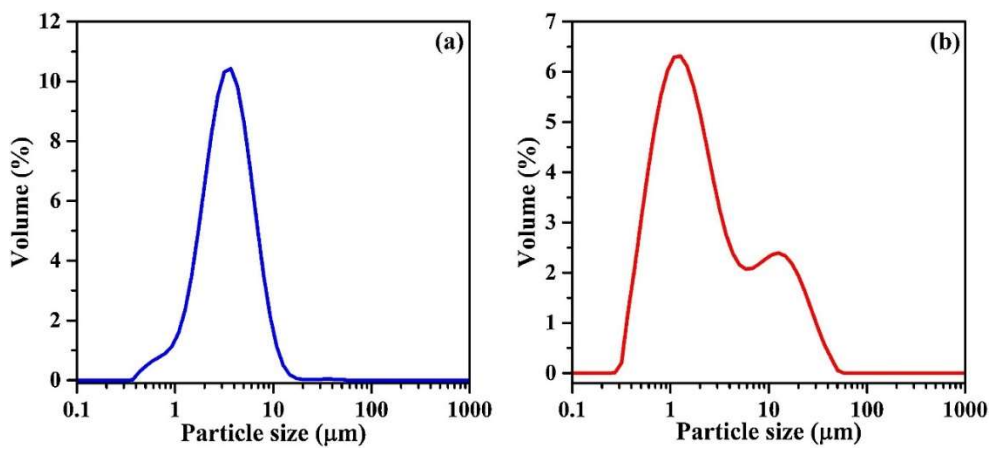
V posledních letech bylo vynaloženo velké úsilí na vývoj prášků, které jsou optimalizovány pro AM procesy. Výsledkem je, že nyní existuje mnohem lepší pochopení složitých požadavků na prášky. Velikost částic je široce uznávána jako klíčová vlastnost, pohybuje se v rozmezí typicky 20-60 μm . Naneštěstí velikost částic není jedinou vlastností, která ovlivňuje sypkost prášku. Mezi další parametry, které mají vliv, patří pórovitost, struktura povrchu, hustota, elektrostatický náboj a tvar částic. Částice, které jsou hladké a/nebo pravidelně tvarované, obecně proudí snadněji než částice analogické velikosti, které jsou hrubší a/nebo nepravidelnější. Prášek také není složen z částic stejné velikosti, jedná se o kombinaci větších a menších částic. Taková kombinace je výhodná, jelikož menší částice vyplňují mezery mezi většími částicemi a zlepšují tak zhutňování vrstvy prášku. [30]



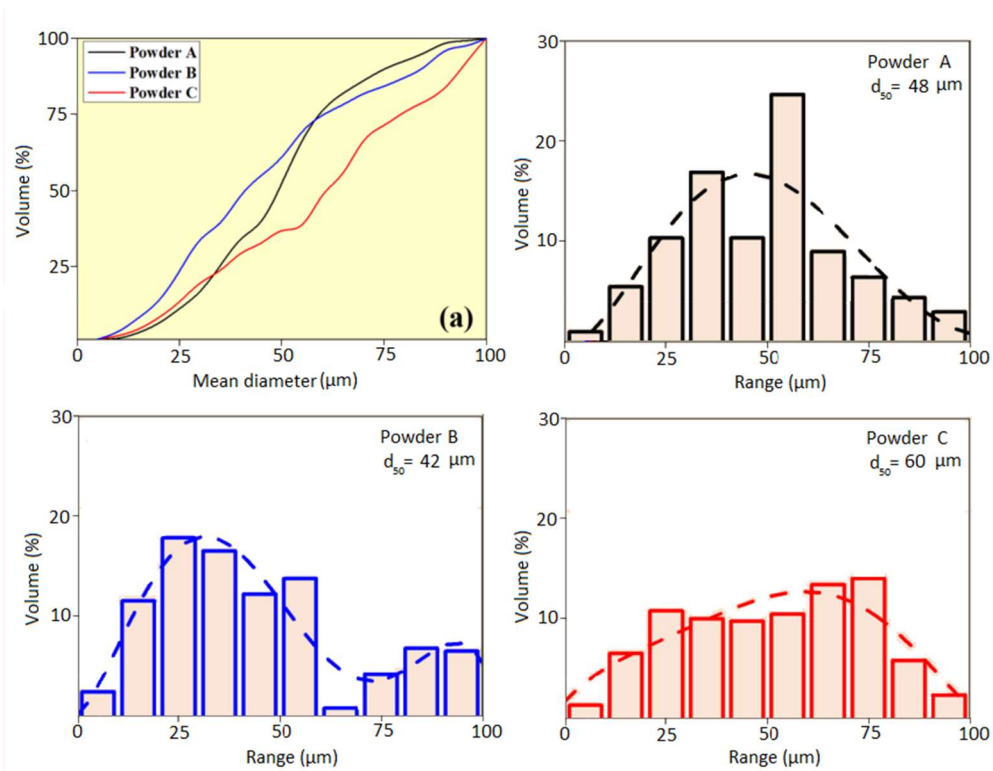
Obrázek 9: Vliv rozložení velkých a malých částic prášku v celku [30]



Obrázek 10: Procentuální rozložení různých velikostí částic v jemném a hrubém prášku pro technologii DED [41]



Obrázek 11: Procentuální zastoupení různě velkých částic v jemném a hrubém prášku pro technologii BJ [42]



Obrázek 12: Různé rozložení velikosti částic u tří prášků se stejným rozpětím velikosti částic pro technologii SLM [43]

2.4.1 Požadavky na dávkovací systém

V aktuální době je na trhu mnoho systémů dodávky práškového materiálu do procesu 3D tisku, ovšem i tak se systém dodávky musí potýkat s bezpečnostními i fyzikálními problémy. Jakýkoli systém dodávky prášku by měl splňovat alespoň následující požadavky:

- a) Musí mít zásobník o dostatečném objemu, aby zajistil dostatečné množství prášku pro tisk do maximálního možného tisknutelného objemu bez potřeby přerušovat proces pro doplnění.
- b) Přesné množství prášku musí být ze zásobníku dopraveno do tiskové komory tak, aby bylo zajištěno dostatečné pokrytí předchozí vrstvy a zároveň, aby nebyl distribuován přebytný prášek, který by skončil jako odpad.
- c) Prášek musí být rozprostřen tak, aby tvořil hladkou, tenkou a opakovatelnou vrstvu.
- d) Rozprostření prášku nesmí vyvolávat přílišné smykové napětí, které by mohlo narušovat předchozí položené vrstvy. [19]

2.4.2 Bezpečnostní rizika zacházení s práškem

Jakýkoliv systém dodávky prášku se musí vypořádat s následujícími riziky:

- a) Se snižující se velikostí částic prášku vzrůstá mezi částicové tření a elektrostatické síly. V takovém případě může prášek snadno ztratit svoji sypatelnost. Pro ilustraci si uvedeme příklad na běžném kuchyňském cukru. V případě, že na polévkovou lžici nabereme cukr krystal, a na tutéž stejnou lžici cukr moučku, můžeme si jednoduše vyzkoušet, že cukr krystal, který má větší velikost částic, bude ze lžice padat pod daleko menším úhlem náklonu, nežli moučka. Zároveň se můžeme setkat s tím, že moučka bude na lžici držet až do velkého úhlu náklonu, a poté se oddělí jako jeden velký shluk. Takže aby byl jakýkoliv systém dodávky prášku efektivní, musí zajistit dobrou sypatelnost prášku pro jeho spolehlivou dodávku. [19]
- b) Když dojde ke zvětšení poměru volné plochy částic k objemu částic, jejich povrchová energie vzroste a stává se více reaktivní. Pro některé materiály to

znamená, že prášek se stává v přítomnosti kyslíku výbušný, nebo při zažehnutí hořlavý. Z toho vyplývá, že prášky z materiálů vykazujících toto chování musí být uchovávány v inertní atmosféře a při zacházení by se mělo dbát zvýšené opatrnosti pro riziko zažehnutí. [19]

- c) Při zacházení vzniká další riziko, kdy mají malé částičky prášku tendenci vzlétnout (rozvířit se) a pohybovat se vzduchem jako oblak částic. Tento problém se vyskytuje speciálně u technologií PBF, kde se rozvířené částice mohou usazovat na okolních površích a tím stínit optická zařízení, snížit citlivost senzorů, odstínit laserové paprsky nebo poškodit pohyblivé části stroje. Rozvíření částic také úzce souvisí s předchozím bodem, jelikož částice volně letící vzduchem v oblaku částic mají mnohem větší plochu povrchu než ložený prášek, čímž se zvyšuje riziko vznícení nebo výbuchu. Částice některých prášku dosahují dostatečně malých rozměrů, že mohou být vdechnuty nebo poškodit zrak. Osobní ochranné prostředky, obzvláště dýchací zařízení a ochrana zraku jsou tedy nedílnou součástí manipulace s práškem. Ve finále by tedy měl systém dodávky prášku být designován tak, aby co nejvíce minimalizoval riziko rozvíření prášku. [19]
- d) Čím jsou práškové částice menší, tím dovolují vytvářet hladší strukturu povrchu, větší přesnost a tenčí vrstvy, ovšem zároveň s tím zvyšují rizika zmíněná v předchozích bodech. Každý design dávkovacího systému je tak individuálně řešený, a měl by nabídnout adekvátní výkon při zachování maximální bezpečnosti. [19]

2.5 Úpravy povrchu po tisku

V této kapitole se podíváme na metody dokončování povrchu a blíže se zaměříme na metodu Laser Shock Peening (LSP). Tyto metody se obecně používají pro úpravu vlastností a překonání nedostatků 3D tisku, jimiž jsou například přesnost rozměrů, mechanické a fyzikální vlastnosti, geometrie povrchu anebo vzhled povrchu. Dělíme je na metody dokončování povrchu bez úběru materiálu, které jsou založené na indukování zbytkových tlakových napětí do materiálu, a na metody dokončování povrchu s úběrem materiálu, u kterých dochází k úběru ponechaného přídatku na dokončení, čímž se z povrchu odebere nežádoucí zbytkové napětí, tvarové a

rozměrové nepřesnosti nebo deformace po tepelném zpracování. Širší rozdělení nabízí v grafickém přehledu obrázek 13.

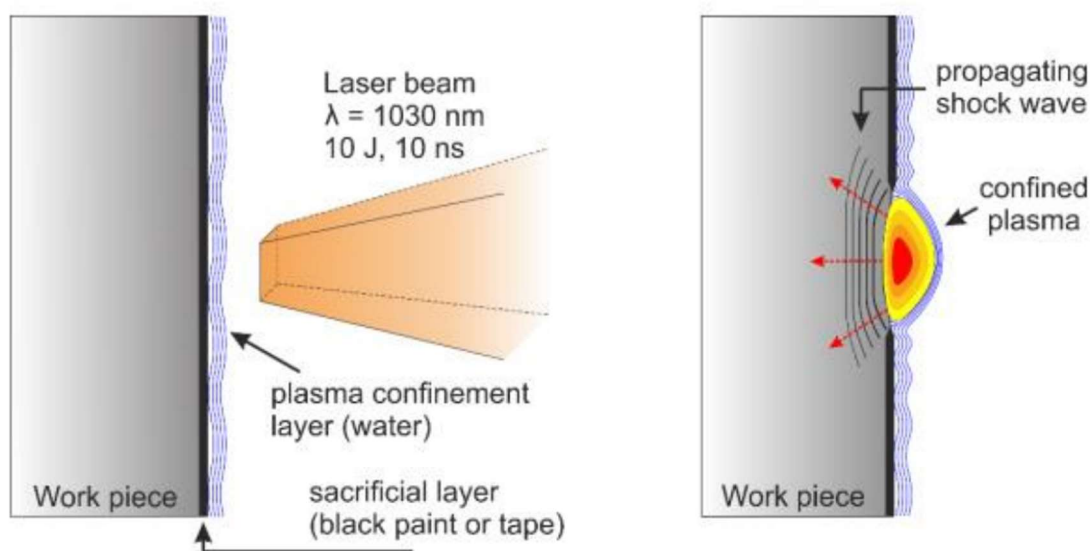


Obrázek 13: Rozdělení dokončovacích metod úprav povrchu [21]

2.5.1 Vliv Laser Shock Peening na porozitu

Aditivní výroba má mnoho výhod oproti tradičním metodám (např. obrábění), ale stále má některé nevýhody. AT sice dospěli do fáze, kde je možné vytvářet vysoce homogenní výrobky s výbornými mechanickými vlastnostmi použitelnými pro funkční výrobky. I přes tento posun v technologii se může v součástech vyskytovat mikro porozita, která může iniciovat vznik trhlin, speciálně při cyklickém namáhání. Průzkumy zabývající se cyklickými zkouškami 3D tištěných ocelových vzorků zjistili, že většina selhání výrobku nastala v důsledku vnitřních pórů, které se nacházeli v oblasti do 0,1 mm pod povrchem, a to navzdory tomu, že se ve vzorcích nacházeli mnohem větší póry hlouběji uvnitř vzorku. Pro potlačení efektu porozity se běžně užívá proces zvaný kuličkování, což je proces úpravy povrchu za studena, při kterém je vzorek kontrolovaně otryskáván kuličkami ze skla, kovu nebo keramiky. Tento proces způsobí v materiálu plastickou deformaci a zanechá pole zbytkového tlakového napětí. Negativní vlastností je ovšem zvětšení drsnosti povrchu a praskání podpovrchových precipitátů v měkké a deformovatelné matici, což do určité míry zastiňuje pozitivní vlastnosti. LSP má potenciál napodobit pozitivní vlastnosti

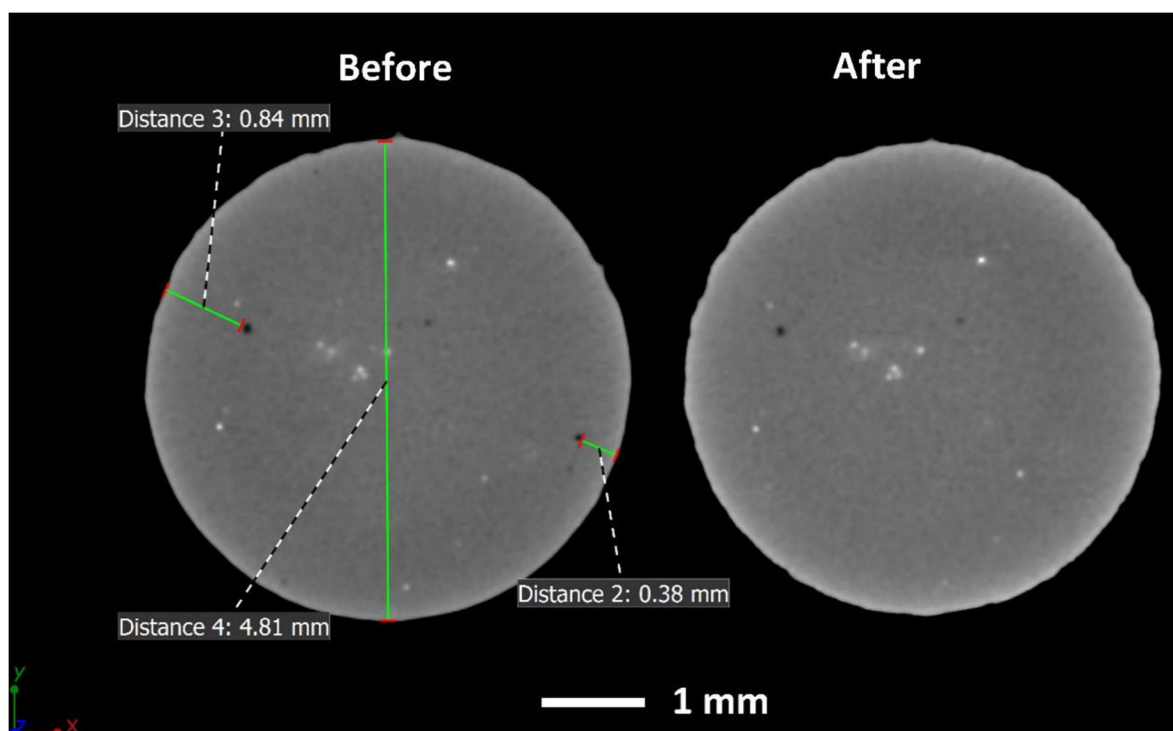
kuličkování tím, že snižuje porozitu a vytváří pole zbytkového tahového napětí, a to bez negativního zvětšení drsnosti povrchu a praskání podpovrchových precipitátů. Laser Shock Peening se řadí mezi úpravy povrchu bez úběru materiálu a je to proces tváření za studena. Místo mechanického tryskání kulovitých objektů, jako je tomu u kuličkování, využívá ke generování rázových vln pulsní lasery. Výhodou použití laseru je kontrolovatelnost a opakovatelnost procesu. Pro zvýšení účinnosti se na povrch cílového objektu aplikují absorpční povlaky. Ty jsou po dopadu laseru zničeny, odpaří se a vznikne plasma, se kterou jsou zároveň generovány tlakové vlny, ty plasticky deformují povrch a způsobují v materiálu zbytková tlaková napětí. [40]



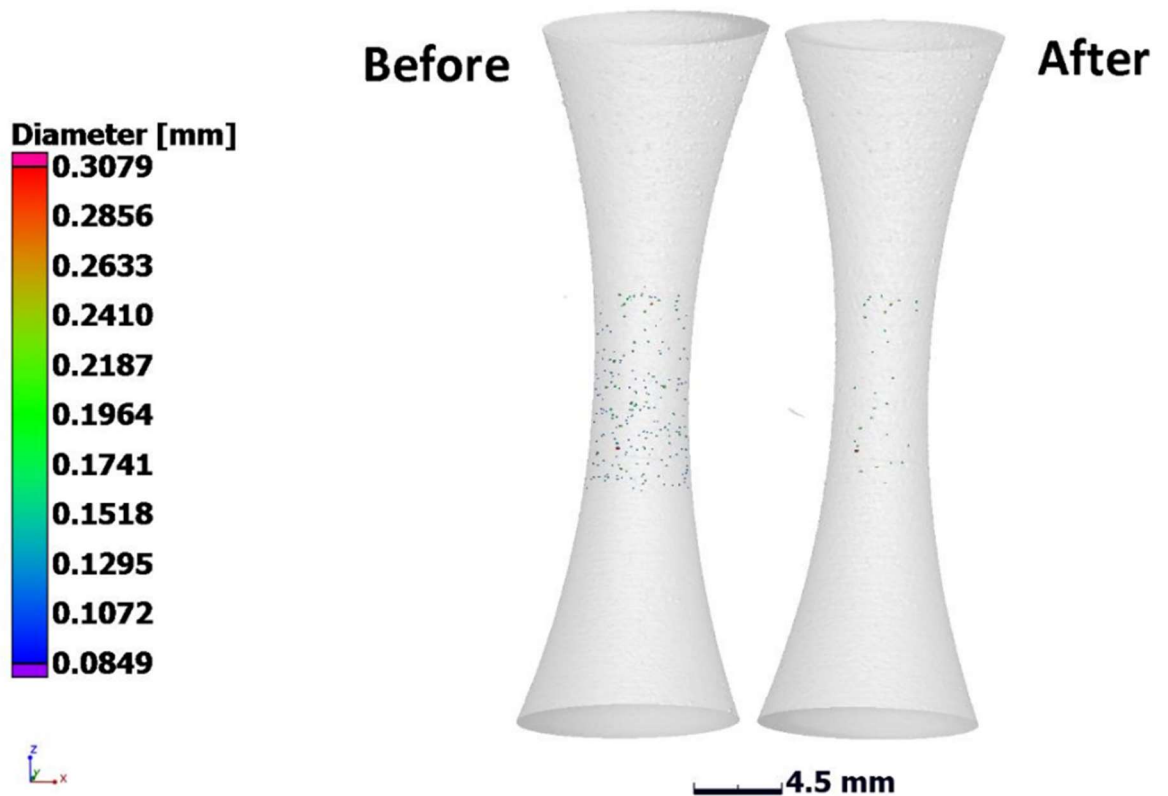
Obrázek 14: Princip procesu Laser Shock Peening [39]

Efektem LSP na porozitu 3D tištěných dílů se zabýval ve svojí práci výzkumník Anton Du Plessis a jeho tým. V jeho práci *Pore Closure Effect of Laser Shock Peening of Additively Manufactured AlSi10Mg* zkoušel, jakého efektu na porozitu hliníkového dílu bude mít LSP při různých nastaveních laseru. Pro experiment využil vzorky z technologie SLM ve tvaru hyperboloidu, jeden tištěný ve vertikální a druhý v horizontální poloze. Na obou vzorcích bylo provedeno žihání ke snížení vnitřního pnutí ještě před oddělením od tiskové palety. Pro LSP proces využil YAG laser pracující na vlnové délce 532 nm a délkou pulzu 5,1 ns. Laser působil v bodě o průměru 1,5 mm a na cílovém objektu byl aplikován absorpční povlak ve formě tenké vrstvy vody. Energie laseru byla nastavena na 5 a 10 GW/cm² a hustota bodů na 5 bodů na mm², což odpovídá překrytí bodů 70,2%. Vzorky skenoval na CT zařízení

s velikostí voxelu 20 μm , napětím 150 kV a proudem 130 μA . Skenování provedl před a po LSP při stejných podmínkách. K vyhodnocení použil software VGStudio MAX 3.2. Výsledky jeho výzkumu ukázali, že při aplikaci energie LSP 5 GW/cm^2 na vertikálně tisknutý vzorek, se téměř všechny póry do hloubky 0,38 mm od povrchu uzavřeli (nebo zmenšili pod hranici, kterou je sken schopen zaznamenat), zatímco póry hlouběji ve vzorku, jmenovitě už v hloubce 0,84 mm od povrchu, zůstali neovlivněny. [40]

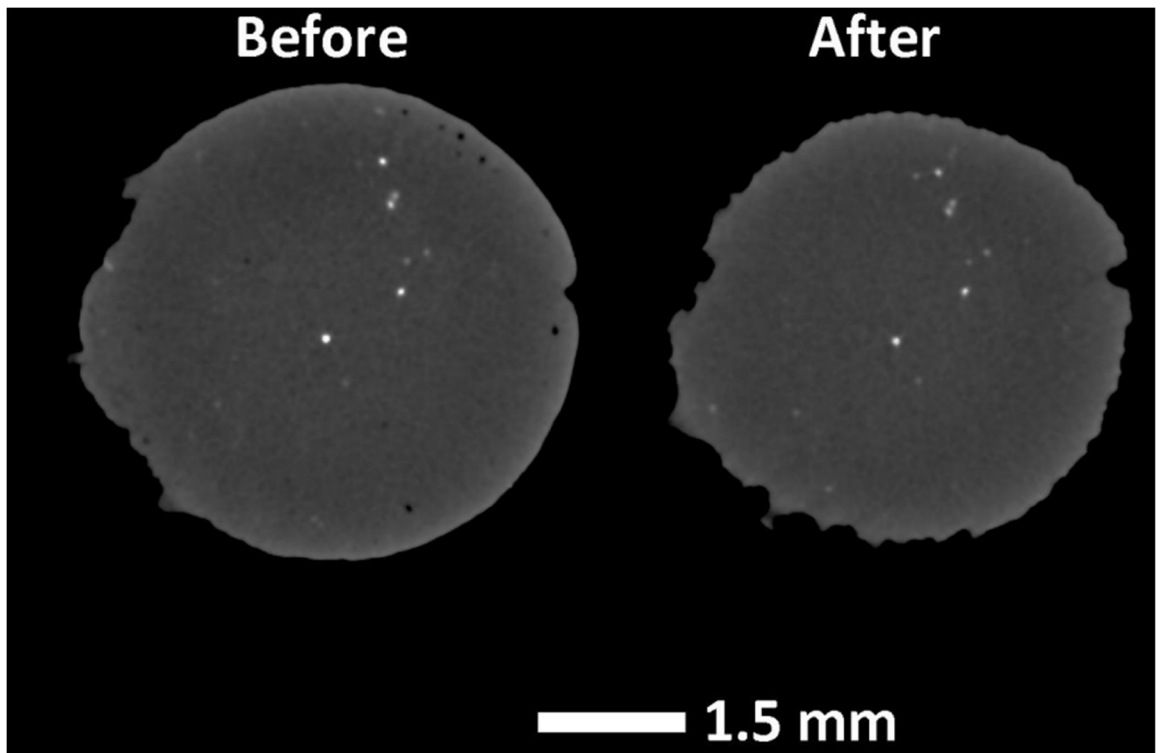


Obrázek 15: Ukázka vlivu technologie LSP na porozitu [40]

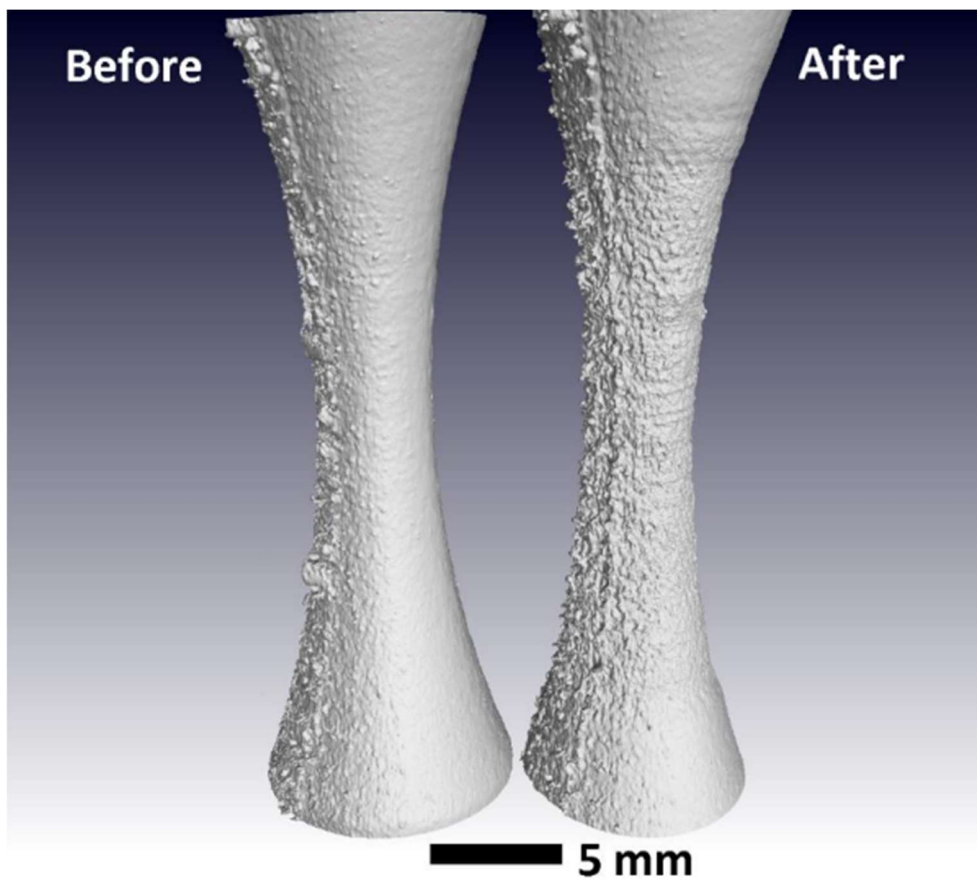


Obrázek 16: 3D reprezentace redukce porozity před a po použití LSP na 3D tištěný vzorek [40]

Pro použití na hliníkové slitiny je obvyklé nepoužívat energii větší než 5 GW/cm^2 . Tento parametr, který byl použit na vertikálně tisknutý vzorek, by se tedy dal považovat za poměrně vysoký, i přesto však vzorky po aplikaci LSP nevykazovali žádné poškození povrchu a znatelně nižší porozitu. Pro vzorek tisknutý horizontálně použili energii 10 GW/cm^2 , a dle očekávání byla takováto energie nadbytečná a může způsobit poškození povrchu. Vzorek tisknutý horizontálně měl od počátku kvůli poloze tisku větší drsnost povrchu, což by v některých případech mohlo vést ke komplikacím při aplikaci LSP, ale v tomto případě proběhl proces bez problémů. Podle očekávání měl vzorek po aplikaci větší energie viditelné poškození povrchu, avšak redukce porozity byla pozorována i u tohoto vzorku. [40]



Obrázek 17: Vertikální řez CT skenu horizontálně tištěného vzorku před a po aplikaci LSP [40]



Obrázek 18: 3D reprezentace horizontálně tištěného vzorku s viditelným rozdílem v drsnosti povrchu před a po aplikaci LSP [40]

Z výzkumu pana Du Plessis tedy jasně vychází, že technologie LSP má pozitivní efekt na zmenšování porozity u 3D tištěných dílů. Krom toho zlepšuje i únavové vlastnosti, jelikož póry nacházející se těsně pod povrchem jsou v častých případech iniciátory trhlin, jak prokázali testy cyklického namáhání. Kvůli schopnostem použitého měřicího zařízení, kterým byla počítačová tomografie, a jejím limitům v rozlišení nelze přesně určit, zda-li LSP póry odstranilo v blízkosti pod povrchem úplně, nebo je jen zmenšila pod hranici rozlišitelnou na CT. V každém případě je pozitivní dopad LSP nezanedbatelný.

3. Oblasti použití

Oblasti použití jsou blízce spjaty s účelem použití, ať se jedná o vizualizaci, rychlé prototypování nebo výrobu funkčních výrobků a nástrojů, je důležitým faktorem nabídka tisknutelných materiálů. Klíčem k širšímu použití aditivních technologií by tak mohlo být rozšíření nabídky tisknutelných materiálů. V následující tabulce jsou zobrazeny typické oblasti použití kovového 3D tisku. [20]

Oblasti použití		
Vizualizace	Rychlé prototypování, Funkční výrobky a plánování	Nástroje
<ul style="list-style-type: none"> • Verifikace CAD modelu • Vizualizace objektu • Ověření konceptu • Marketing a prezentace modelu • Ověření komparability součástí 	<ul style="list-style-type: none"> • Analýzy obtékání tělesa • Zkoušky mechanických vlastností • Konformní chlazení • Snižování hmotnosti • Design a výroba protéz a implantátů na míru • Šperkařský průmysl 	<ul style="list-style-type: none"> • Výroba forem (soft tooling, hard tooling) • Slévání
Odvětví průmyslu		
Aerospace, Automotive, umění a architektura, zlatnictví, mincovnictví, zbraňový průmysl, zdravotnictví		

3.1 Vizualizace

Mnoho lidí i mezi inženýry si nedokáže objekt vizualizovat v hlavě pomocí výkresu nebo 3D modelu. Design výrobků navíc často schvalují výše postavení manažeři, marketingový specialisté anebo sami zákazníci, kteří nemusí nutně mít dostatečné technické znalosti, aby se vyznali ve výkresové dokumentaci nebo 3D modelu. Silnou stránkou aditivních technologií proto je verifikace modelu. Konstruktor občas potřebuje fyzický model, aby si ověřil jeho funkční charakteristiky, zda-li zapadá do konstrukčního celku a také jeho vzhledové vlastnosti. Fyzický model i pomáhá pro ověření ergonomičnosti součásti.

Pokud je výrobek ještě ve stádiu konceptu, je dobré si před samotnou produkcí výrobku ověřit jeho použitelnost a estetiku. Konceptů může být více a mohou se lišit, aditivní výroba tím, že vytváří hotové díly přímo, umožňuje snadno vyrobit fyzické modely, které je možné poté vyzkoušet a porovnat v reálném prostředí.

Využití nachází i marketingové oddělení, které v mnoha případech vyžaduje fyzický model součásti pro prezentaci, ať už před zákazníky nebo investory. Fyzický model navíc může sloužit pro tvorbu letáků, fotografií nebo reklam, které může oddělení marketingu zpracovávat ještě před tím, než bude skutečný výrobek dostupný. [20]

3.2 Rychlé prototypování, funkční výrobky a plánování

Kromě designerů využívají 3D tisku i konstruktéři. Ve strojírenství aditivní technologie získávají větší a větší pozornost, jelikož pomáhají zkrátit dobu vývoje součásti a zredukovat tak její cenu. Zkracování doby vývoje se nazývá rychlé prototypování, v anglickém jazyce často používané Rapid Prototyping. Aditivní technologie nám také umožňují vyrábět výrobky jinými způsoby nedosažitelné. [20]

3.2.1 Analýza obtékání těles

Návrh komponent, které budou ovlivňovány proudem vzduchu nebo kapaliny, ať už záměrně nebo ne, je někdy obtížné nebo nákladné vyrobit běžnými metodami. V aerodynamice je častým požadavkem testování na fyzickém modelu v aerodynamickém tunelu, tyto modely mohou být snadno vyrobeny technologií aditivní výroby. Po zpracování naměřených dat v počítačovém programu mohou být provedeny změny návrhu, v takovém případě je aditivní výroba velmi rychlou variantou pro výrobu nových modelů. Simulace tečení se provádějí i ve vnitřních

prostorech součástí, jakými jsou například různá potrubí, ventily nebo jiné součásti, které mají složitou vnitřní geometrii. V případě potřeby je možné aditivní technologií vyrobit i průhledné součásti pro vizualizaci vnitřního proudění. [20]

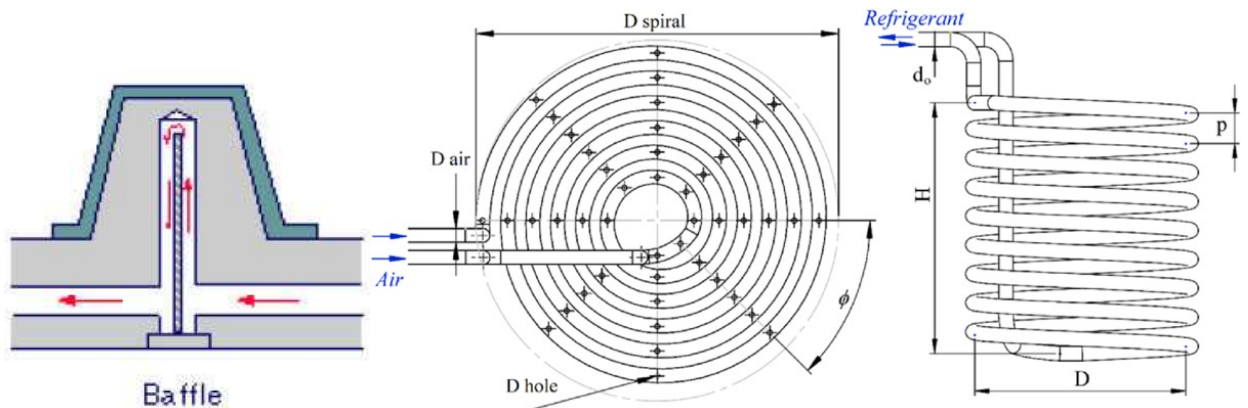
3.2.2 Zkoušky mechanických vlastností

Aditivní technologie dovolují vyrobit fyzický model pro testování mechanických vlastností, jejich rozložení ve výrobku, odhalení kritických míst a další. Aditivní technologie umožňují měnit tvar a rozměry součásti bez větších nákladů na výrobu, pomáhají tak zjistit optimální tvar a rozměr součásti před jeho uvedením do sériové výroby. [20]

3.2.3 Konformní chlazení

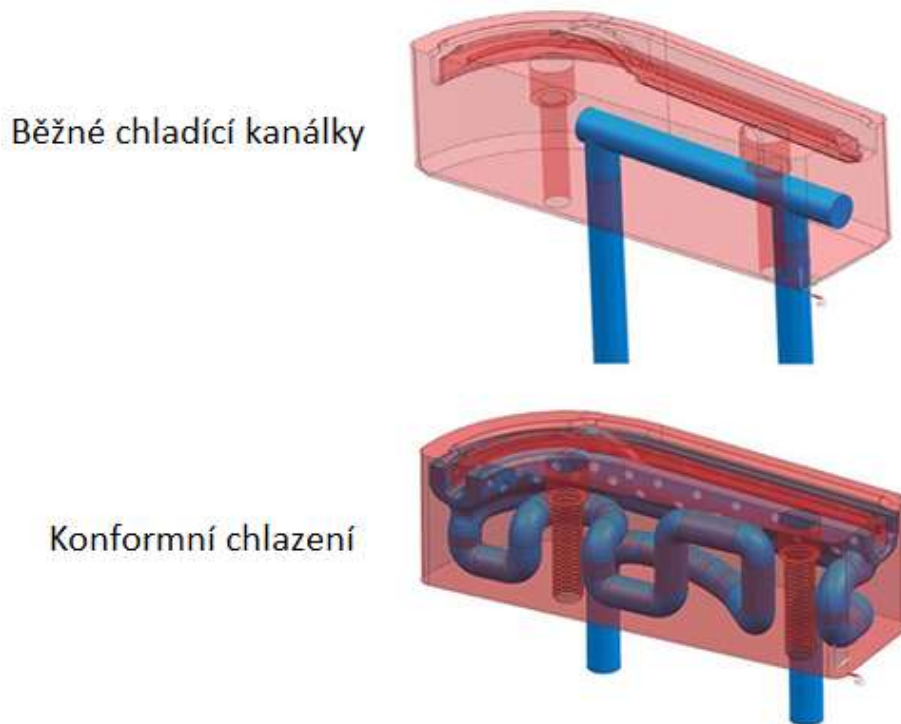
Konformní chlazení je chladicí okruh navržený tak, že v nejkratší možné vzdálenosti od stěny vylisku kopíruje jeho povrchový tvar. Tím je chladicí médium přesně tam, kde je v daný okamžik potřeba. Konformní chlazení se využívá asi nejvíce u vstřikovacích nástrojů a forem. Chlazení je velmi důležité z pohledu výkonu nástroje, ovlivňuje totiž jeho rychlost procesu i výslednou kvalitu vyráběných dílů. Konstrukce a výroba chladicích kanálků se doposud omezila na relativně jednoduché konfigurace, především kvůli limitům výrobních metod používaných k výrobě nástrojů, ale také kvůli nedostatku přesné metodiky návrhu vhodné pro návrh chladicích kanálků. Mnoho let se konstruktéři forem snažili zlepšit výkon chladicích kanálků, navzdory tomu, že složitost chladicího systému je fyzicky omezovala na schopnosti konvenčních metod obrábění. Byli tak vyvinuty různé metody chlazení, jako např.: spirálové kanálky, systém s přepážkami, systém spirálových zástrček a další. Někteří výrobci forem jako např. Innova, vytvořili nástroje s konformním

chladícím efektem naskládáním řezů nástroje na sebe vrstvu po vrstvě s chladicími kanály vyfrézovanými na každé vrstvě. [23]



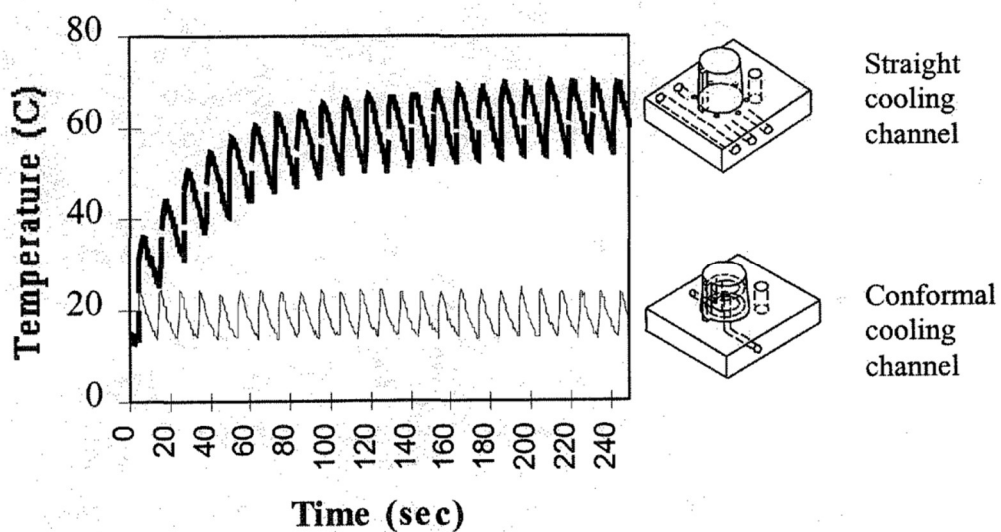
Obrázek 19: Systém s přepážkami a systém spirálových kanálků [21][22]

Zajištění optimálního chlazení dutiny formy je mnohdy velmi obtížné nejen s ohledem na tvarovou složitost dutiny formy, ale často se v prostoru potřebném pro vedení chladících kanálů nachází též vyhazovače a výsuvné vložky, kterým se musí dráha chladících kanálů vyhnout. Běžná chladicí soustava je tedy nejčastěji kombinací přímých vrtaných kanálů, kde často není možno sledovat tvarovou zakřivenost dutiny formy. Výsledné řešení tak často není zcela ideální. S příchodem aditivních technologií se konstruktérům nástrojů a forem nabízí nový stupeň volnosti v návrhu forem. Schopnost vyrábět 3D prvky s téměř libovolnou složitostí činí AT extrémně užitečnými pro výrobu dílů a nástrojů, které nelze prakticky vyrobit jinými technologiemi. K vytváření chladících kanálků se dříve využívala hlavně konstruktérova zkušenost nebo měřicí metody technikou pokus omyl. S nástupem výpočetních technologií mají konstruktéři možnost simulace teplotních polí, a předvídat tak děje jenž se budou ve formě odehrávat. Pomocí těchto znalostí a s použitím aditivních technologií mají možnost navrhnout konformní chladící kanálky bez obavy o jejich vyrobiteľnost.



Obrázek 20: Porovnání běžných chladících kanálků s těmi konformními [24]

Při provozu formy obvykle trvá nějakou dobu než dosáhne své ustálené provozní teploty. Jak ukazuje obrázek 21, při použití přímých chladících kanálků se teplota formy zvedla z 12°C na 55°C po 25 po sobě jdoucích cyklech, zatímco v případě konformních kanálků rozmístěných velmi blízko ke stěnám formy se teplota formy ustálila velmi rychle, a to hned po prvním pracovním cyklu. Výhoda konformního chlazení je tedy nediskutovatelná. [23]

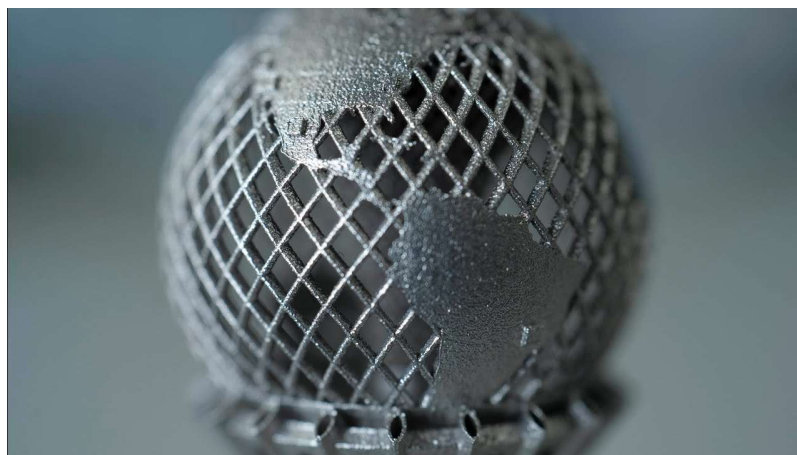


Obrázek 21: Porovnání průběhu pracovní teploty pro přímé a konformní chladící kanálky [23]

3.2.4 Snižování hmotnosti

Lehké vysoce výkonné díly jsou velmi žádané v oborech jako je automobilový nebo letecký a kosmický průmysl. Dobrým příkladem je, že současné náklady na vynesení kilogramu nákladu do vesmíru jsou přibližně 10 000 až 20 000 dolarů. V tomto odvětví má tedy snižování hmotnosti velký potenciál. [25]

Inženýři se v tomto odvětví inspirovali v přírodě, kde můžeme běžně najít složité topologické struktury, včetně porézních struktur, mřížkových struktur, buněčných struktur atd.. Většina z těchto složitých struktur má četné díry nebo dutiny. To přináší značné výhody v mechanických vlastnostech. Za prvé, pomocí velkého počtu otvorů lze výrazně snížit hmotnost geometrického modelu, mezitím lze také snížit spotřebu energie, materiálu a výrobního času. Za druhé, díky podobnosti s přírodními strukturami, porézní charakteristika komplexních topologických struktur může být aplikována jako lidské implantáty nebo lešení pro přilnutí k lidské tkáni. Tyto porézní struktury poskytují dostatek prostoru pro buňky, aby se mohly uchytit a množit. A za třetí, komplexní topologické struktury mohou být upraveny k dosažení mnoha rozdílných funkcí. Úpravou velikosti pórů, tvaru pórů nebo porozity můžeme dosáhnout dílů pro pohlcování energie, tlumení zvuku, izolování vibrací nebo rozptylování tepla. Přestože mají tyto struktury řadu výhod, doposud je bylo obtížné vyrobit tradičními výrobními procesy. Aditivní výroba se tedy nabízí jako efektivní technologie, která může spolehlivě vyrobit tyto komplexní struktury. Metod pro dosažení lehkého výkonného dílu je několik, např.: metoda povrchového rámu, metoda dutého dílu. [26]

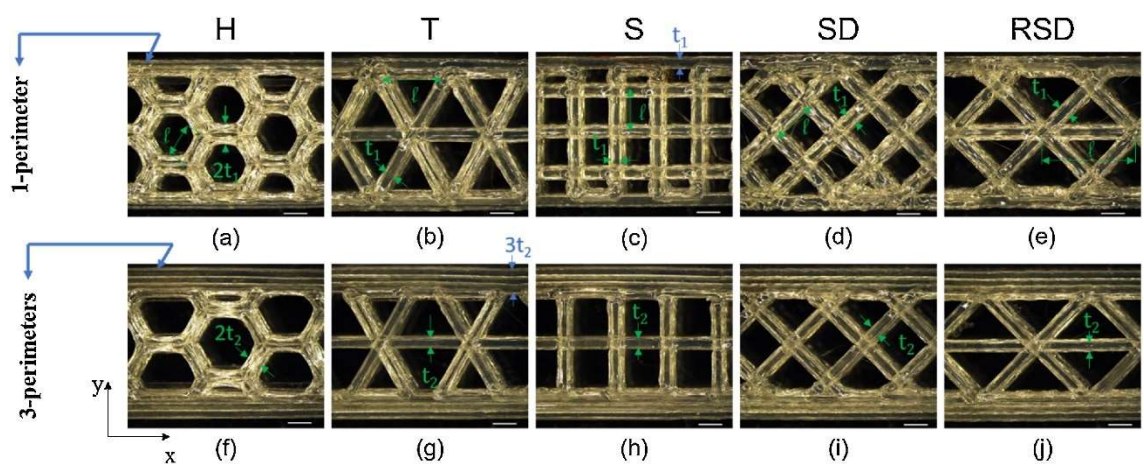


Obrázek 22: Ukázka dílu s povrchovým rámem [31]



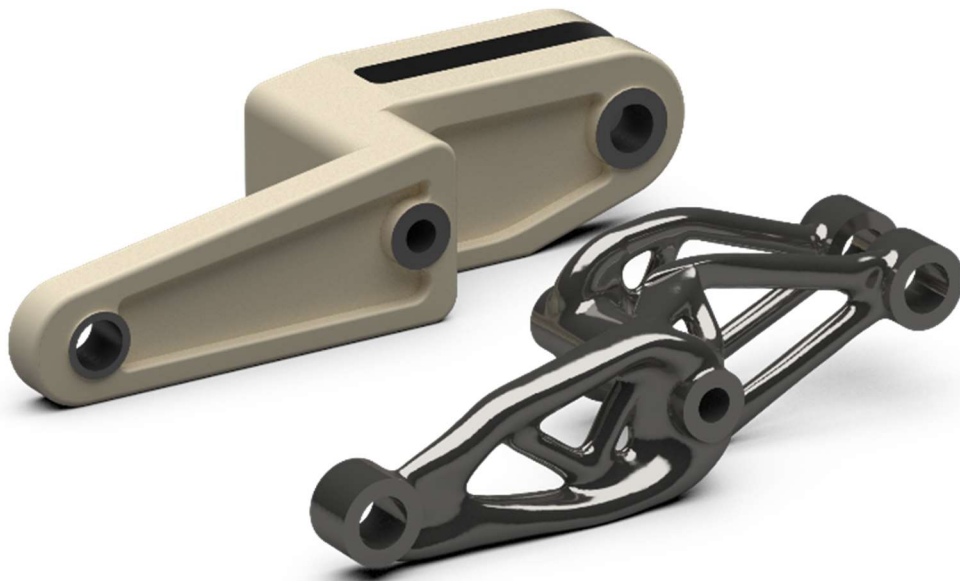
Obrázek 23: Ukázka dutého dílu s vnitřní strukturou ve tvaru nepravidelné plástve [32]

Vnitřní struktura odlehčeného dílu může mít různé tvary výplně, nejčastější se kterou se setkáme je pravděpodobně výplň hexagonální nebo ve tvaru pláství, ovšem existují i jiné tvary, jak vidíme na obrázku 24. Výplň se navrhuje dle požadavků na mechanické vlastnosti, přičemž lze upravovat hustotu výplně a nebo její tloušťku stěny. [27]



Obrázek 24: Vzory různých tvarů vnitřní výplně odlehčeného dílu [27]

Snižování hmotnosti vytvářením dutých dílů není jediná možnost, která se díky aditivním technologiím začíná více a více uplatňovat ve strojírenství. Další metodou je topologická optimalizace. Jedná se o metodu optimalizace tvaru, která pomocí výpočetních algoritmů adekvátně rozloží hmotu součásti v uživatelsky definované oblasti s přihlédnutím k daným okrajovým podmínkám, které konstruktér předem stanovil (vazby, působící síly a tlaky, volba materiálu, limity vlastní frekvence atd.). Topologická optimalizace tak dokáže maximalizovat výkon součásti odebráním nepotřebné hmoty z míst, kde nedochází k přenosu signifikantních zatížení. Tímto postupem lze výrazně snížit hmotnost nebo řešit problémy s rezonancí či teplotním namáháním. Výsledkem je často organický tvar běžně nevyrobitelný konvenčními technologiemi. Na druhou stranu je tato metoda odlehčení dílu perfektní volbou v kombinaci s aditivními technologiemi, které dokážou vyrobit tyto komplikovaně tvarované součásti bez větších problémů a bez zvýšení nákladů. [28]



Obrázek 25: Příklad topologicky optimalizovaného dílu [29]

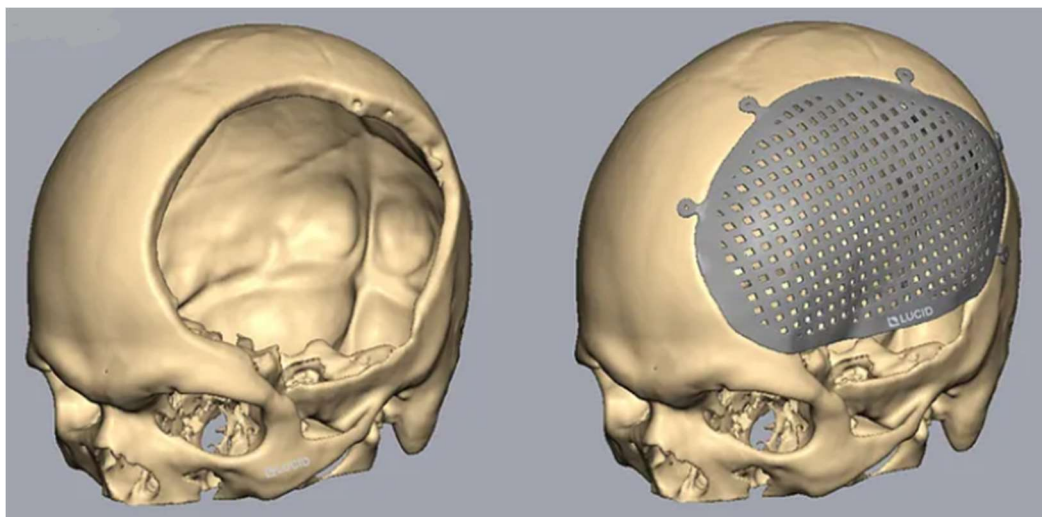
Při snižování hmotnosti se tedy snažíme dosáhnout rovnováhy mezi ušetřenou hmotností a fyzikálními vlastnostmi.

3.2.5 Medicínské aplikace

Aditivní výroba nachází uplatnění i v medicíně. Využívá se skenovacích zařízení jako laser skenerů, CT a dalších pro vytvoření anatomických dat o pacientovi. Pomocí těchto dat lze poté vyrobit přesnou protézu nebo implantát. V případě výroby symetrických nebo párových implantátů, jako například uší, může být naskenováno zdravé ucho a v počítači vytvořena zrcadlením přesná kopie pro tvorbu protézy. Tato možnost efektivně upravovat a vytvářet zdravotní náhrady je velmi důležitá, jelikož každý pacient je jiný a má své individuální potřeby. Níže jsou popsány nejdůležitější možnosti použití aditivních technologií v medicíně s praktickými příklady. [20]

3.2.5.1 Plánování a simulace složitých operací

V případě, že chirurg čelí složité operaci, jakou může být třeba kraniofaciální (vrozené poruchy obličeje) nebo maxilofaciální (chirurgie dutiny ústní, horní a dolní čelisti a obličeje), má často problémy přesně určit lokaci a velikost problému. Preciznost a rychlost chirurgického zákroku spočívá výrazně na chirurgově předchozí znalosti a zkušenosti v dané problematice. Aditivní výroba nabízí možnost trénovat a připravovat se na přesném modelu pacienta a připravit se na jakékoli komplikace, jenž by mohli během zákroku nastat. Tato příprava pomáhá k zajištění většího množství úspěšných operací. Příkladem může být cranioplastika velkého defektu lebky. Cranioplastika je chirurgická disciplína zabývající se defekty lebky a kovovými nebo plastovými implantáty. V tomto příkladu měl pacient vážně poškozenou pravou stranu hlavy. Část lebky byla rozdrčena a musela být nahrazena. Chirurg první provedl CT sken pacienta, naměřená data převedl do počítače a pomocí aditivní technologie vyrobil voskový model. Voskový model byl poté použit pro výrobu formy, ve které se z biokompatibilního materiálu (polymethylmetakrylát – PMMA) vyrobil implantát. Zárok zabral minimální možný čas, jelikož implantát přesně pasoval do pacientova defektu, dalo by se to přirovnat k technologii „plug&play“. Přesně pasující model má dvě hlavní výhody: první, po implantaci zajišťuje hladký přechod mezi implantátem a původní kostí, a druhá, snižuje nepotřebné nebo nepřesné výstupky implantátu, čímž chrání okolní tkáň před poškozením. [20]



Obrázek 26: Příklad cranioplastiky lebky za použití aditivních technologií [37]

3.2.5.2 Implantáty a protézy vyrobené na zakázku

Dříve se kloubní náhrady a další podobné zákroky prováděli pomocí standardizovaných náhrad zvolených z palety nabízené výrobcem. Takový systém může uspokojivě fungovat, ovšem pouze pro některé pacienty. Aby se vyhovělo všem pacientům, i těm kterým nevyhovují standartizované náhrady, jako jsou pacienti s mezi velikostí, se speciálními požadavky kvůli zdravotní indispozici nebo genetice, bylo doposud potřeba nákladně a zdlouhavě upravovat standartizované náhrady. Navíc, při nedokonalé pasující náhradě může dojít k dalším komplikacím, jako je opotřebením náhrady nebo okolních tkání. Aditivní výroba tak nabízí možnost vyrábět náhrady přesně pasující pacientovi a to bez výrazného zvětšení nákladů. [20]

Prvním, kdo úspěšně implementoval 3D tištěnou náhradu kyčelního kloubu, byl Dr. Guido Grappiolo. Setkal se s pacientem, jenž měl pokročilou artrózu a titanovou kyčelní pánev uchycenou šrouby z předchozí operace. Dr. Grappiolo se spojil se společností vyrábějící náhrady LimaCorporate a výrobcem 3D tiskáren GE Additive, s jejichž pomocí vytvořili a implantovali první 3D tištěnou kloubní náhradu. Její název je Delta-TT Cup, kde TT znamená Trabecular Titanium, biokompatibilní materiál s charakteristickou trojrozměrnou šesterečnou strukturou, která napodobuje přirozenou trabekulární morfologii lidské kosti. Díky tomu už po několika měsících od operace začali buňky pacienta přirůstat k implantátu. [30]



Obrázek 27: Delta-TT Cup, první implantovaná kloubní náhrada společnosti LimaCorporation [30]

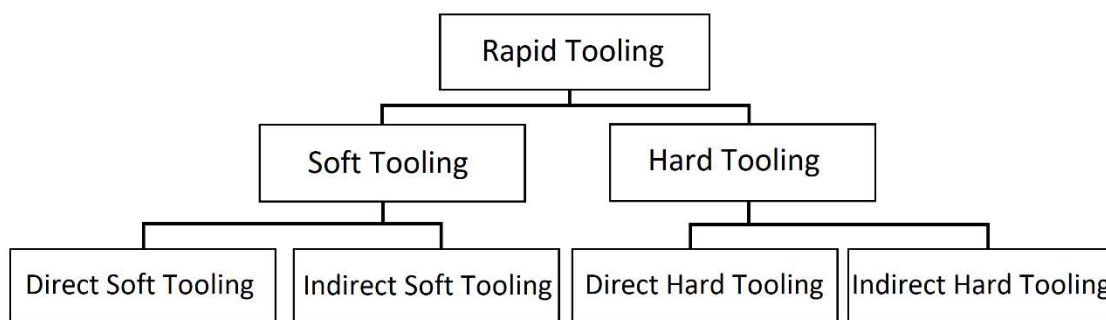
3.2.5.3 Zubní lékařství

Velmi blízké výrobě implantátů a náhrad je zubní lékařství. Použitím 3D skenerů v kombinaci s CAD/CAM programy a aditivní technologií mají dentální laboratoře možnost pečlivě přizpůsobit, zrychlit a zpřesnit výrobu plomb, zubních můstků a sádrových modelů. [20]

Aditivní technologie může být použita i při výrobě dentálních pomůcek. Společnost Blizzident vyrábí speciální zubní kartáčky vyrobené pomocí 3D tisku. Nejprve je nutné naskenovat otisk zubů pacienta. Blizzident poté pomocí simulací v CAD vytvoří 3D tištěný kartáček se 400 štětinkami, které čistí všechny zuby najednou a dostane se i na těžko dostupná místa. [20]

3.3 Výroba a tvorba nástrojů

Toto odvětví průmyslu se v praxi nazývá Rapid Tooling. Hlavním úkolem Rapid Tooling je schopnost vyprodukovat dané množství kopií prototypu s funkčními materiálovými vlastnostmi a to v co nejkratším čase. Rapid Tooling se dělí na soft (měkké) a hard (tvrdé) tooling, a to se dále dělí na direct (přímé) a indirect (nepřímé), jak ukazuje obrázek 28.



Obrázek 28: Rozdělení Rapid Tooling [20]

3.3.1 Direct Soft Tooling

Tento proces vytváří nástroje nebo formy přímo, z 3D tiskárny tedy vychází hotový díl, který bude použit jako nástroj. Používá se například pro odlévání do pískových forem, kde je forma určena pro jednorázové použití. Další možnost použití je na formy pro výrobu kompozitních dílů. Direct soft tooling se také využívá pro vstřikování plastů. V souhrnu se jako soft tooling označují nástroje, které jak název napovídá jsou měkké, chybí jim tedy trvanlivost a odolnost proti opotřebení. Běžně jsou určené pro jedno použití, nebo vydrží menší počet opakování, přibližně v rozmezí mezi 100 až 1000 opakování, předtím, než se rozbijí nebo ztratí přesnost. [20]

3.3.2 Indirect Soft Tooling

V této rapid tooling metodě se nejdříve vytváří vzorová šablona, podle níž se následně nástroj nebo forma vyrobí. Běžně používané materiály jsou silikony, epoxidové pryskyřice, kovy s nízkou teplotou tání nebo určité druhy keramiky. [20]

3.3.3 Direct Hard Tooling

Hard tooling s použitím aditivních technologií je hlavním tématem výzkumu v této oblasti v posledních letech. Přestože bylo prokázáno několik metod, v této oblasti stále probíhá mnoho výzkumů. Výhody Hard Tooling vyráběných AM metodami jsou rychlé časy pro vytvoření vysoce komplexních tvarovaných forem pro velkoobjemovou výrobu. Navíc odezva na úpravy může být téměř okamžitá. [20]

3.3.4 Indirect Hard Tooling

Nyní existuje velké množství metod využívajících aditivní technologie pro Indirect hard tooling a jejich počet stále roste. Jako příklady lze uvést 3D Keltool, určený pro výrobu forem, kde se z vytištěného dílu udělá silikonový vzor, který se zasype práškovým kovem společně s pojivem, výsledná forma se pak sintruje. Dalším příkladem je výroba EDM elektrod, systém Ecotool nebo Copy milling. [20]

4. Představení použitých tiskáren

Z dříve popsaných technologií aditivní výroby se nyní zaměříme více v detailu na 3 vybrané. Jsou jimi Selective Laser Melting, Binder Jetting a Bound Powder Extrusion. U těchto tří technologií si provedeme srovnání tří typů 3D tiskáren, s jejichž pomocí byli vytisknuty vzorky zkoumané v pozdějších kapitolách této práce. Porovnávanými parametry budou velikost tiskové komory, rychlost tisku, tloušťka vrstvy, vnější rozměry a hmotnost, a v neposlední řadě pořizovací cena. Pro technologii SLM byla použita tiskárna od britského výrobce Renishaw plc, model Renishaw AM 400. Pro technologii BJ byla použita tiskárna amerického výrobce ExOne, model DesktopMetal X160 Pro a pro technologii BPE byla použita tiskárna relativně nové společnosti na trhu aditivní výroby založené v roce 2013, nesoucí název Markforged, model Metal X 2. generace.

4.1 SLM – Renishaw AM400

Britská mezinárodní společnost Renishaw zaměřující se na vysoce precizní metrologická zařízení a zařízení pro zdravotnické potřeby vstoupila na trh s aditivními technologiemi v roce 2010. Jedním z jejich nejnovějších modelů je tiskárna Renishaw AM400. Jak název napovídá, tiskárna disponuje laserem o výkonu 400 W, přičemž si uchovává relativně malou velikost bodu, do kterého je paprsek centrován. Tiskárna byla navržena pro uživatele, kteří požadují možnost tisku z různých materiálů, k tomu tiskárna nabízí širokou škálu příslušenství pro zamezení křížové kontaminace. Tiskárna AM 400 je plně kompatibilní se soubory vytvořenými pro jiné modely od společnosti Renishaw, jakými jsou například AM 250 nebo AM 500, a to bez jakýchkoli potřebných úprav, ovšem pro maximální využití výkonu laseru je potřeba vytvořit soubory nové s přihlédnutím k výkonu, jenž AM 400 nabízí.

[14]



Obrázek 29: Renishaw AM 400 [14]

4.1.1 Optický systém tiskárny Renishaw

Laserové práškové fúzní systémy Renishaw využívají vysoce stabilní lasery z ytterbiových vláken, zaostřené a vedené přes vyhrazený optický modul pro dodávání energie o intenzitách dostatečně vysokých k roztavení kovových prášků. Stroj je vybaven 400 W ytterbiovým vláknovým laserem, který je integrovaný do ovládacího systému hardwaru a softwaru. Energie je vedená přes optický kabel a dodávána pomocí metody expozice bod po bodu, která poskytuje přesnou kontrolu energie vnesené do práškového lože. Proces je konfigurovatelný pomocí nástrojů pro vývoj a optimalizace parametrů s otevřeným přístupem. Pro přesné polohování je zde implementován dvou osový galvanometr, pomocí něhož lze napolohovat paprsek v osách X a Y. Optický systém Renishaw je kalibrován na polohovací přesnost $\pm 25 \mu\text{m}$ přes celou plochu pracovního prostoru. K dispozici je několik možných strategií pohybu laseru v závislosti na geometrii výrobku, všechny individuálně konfigurovatelné v přiloženém softwaru. [14]

4.1.2 Spotřeba inertního plynu AM 400

Tiskárna AM 400 nabízí patentovanou technologii inertní atmosféry v tiskové komoře. Proces začne vytvářením vakua v komoře pro odstranění vzduchu a vlhkosti z komory, pokračující zaplněním argonem. Tato metoda snižuje spotřebu inertního plynu při prvotním plnění komory a rychlejší přípravu pro tisk než jiné metody. Implementovaný systém recirkulace pak zajišťuje nízkou spotřebu pod 50L/hod. Zároveň je tiskárna vybavena sekundárním okruhem pro proudění inertního plynu, který vede přes krycí sklo laseru a tím ho chrání před emisemi z procesu a zajišťuje spolehlivější fungování s vyšší životností. [14]

4.2 BJ - ExOne DesktopMetal X160 Pro

Americká společnost ExOne se zabývá technologií 3D tisku už přes 20 let a v posledních letech se zaměřuje na technologii Binder Jetting, kterou využívá i jejich desátá tiskárna DesktopMetal X160 Pro. Tato tiskárna se pyšní tím, že je největším systémem BJ na aktuálním trhu, se 160 litry objemnou tiskovou komorou nabízí dostatek prostoru pro tisk investičně náročných náhražek litých dílů v automobilovém, leteckém a obraném průmyslu. Maximální tisková rychlost je 10 000 cm³/hod, v závislosti na materiálu, čímž poskytuje kvalitní díly na úrovni rychlosti sériové produkce. V nabídce pro tisk je 6 různých materiálů, populární nerezové oceli 316L, 304L nebo 17-4PH, dále pak keramika a další speciální materiály. Systém také nabízí konektivitu ke cloudovému uložišti přes aplikaci Siemens MindSphere v rámci implementace Průmyslu 4.0. Patentovaná technologie pokročilého zhutňování Triple ACT (advanced compaction technology) pro dávkování, rozprostírání a zhutňování ultrajemných prášků poskytuje špičkovou hustotu a opakovatelnost. Slinuté díly pak vykazují hustotu přesahující 97 % v závislosti na materiálu, srovnatelná hodnota se vstřikováním kovu. Zcela nový systém recyklace pojivových kapalin přináší nižší provozní náklady a zajišťuje, že přínosy pro udržitelnost poskytované 3D tiskem se promítají do celého procesu. [15][16]



Obrázek 30: ExOne DesktopMetal X160 Pro [16]

4.3 BPE – Markforged Metal X Gen 2

Metal X Gen 2 staví na úspěchu svého předchůdce, původního systému Metal X, který byl uveden na trh v roce 2017, tím, že posouvá hranice toho, co je možné dosáhnout při tisku složitých průmyslových kovových dílů. Pomocí klíčových vylepšení hardwaru zlepšuje uživatelskou zkušenost a bezpečnost. Ovládání je jednoduché pomocí 7palcového dotykového displeje. Metal X je tak jednou z nejvíce intuitivních 3D tiskáren na dnešním trhu. Umožňuje tisknout širokou škálu materiálů od nerezové oceli až po měď, a to s minimální potřebnou kvalifikací pro pracovní postup. Systém je designovaný pro maximální bezpečnost a dostupnost pro všechny výrobce, nevyžaduje kvalifikovaného operátora, ani práškové hospodářství a klade minimální nároky na osobní ochranné pomůcky. Tiskárna Gen 2 také nabízí dodatečnou izolaci pracovní komory, vedoucí k více energeticky efektivnímu procesu a kratším časům ohřívání komory. Celý systém se skládá ze tří částí, samotné 3D tiskárny, omývací stanice a sintrovací stanice. Metal X tiskárna disponuje objemem pracovní komory 11,88 litru, pracovní komora je vyhřívána a pracovní deska opatřená vyměnitelným plechem je přidržována pomocí vakua. V pracovní komoře

se nachází dvě trysky, jedna určená pro tisk základního materiálu, druhá pro keramický materiál, který se vkládá mezi podpory a finální produkt. Spotřeba keramiky je přibližně desetinová oproti spotřebě základního materiálu. V nabídce výrobce je k dispozici 6 materiálů, nerezová ocel 17-4PH, nástrojové oceli A2, D2 a H13, Inconel 625 a měď. Velikost vrstvy se pohybuje v rozmezí 50 až 125 μm (po sintrování) v závislosti na materiálu. Maximální váha výrobku je omezena na 10 kg. Druhá část systému je mycí stanice, která nabízí objem 18,35 litru. Mycí proces částečně rozpouští některé části keramiky použité pro oddělení podpor a obvykle trvá 12 až 72 hodin. Třetí a poslední částí je sintrovací pec. Jedná se o vysoce optimalizovanou trubkovou pec. Nabízí špičkovou spolehlivost a provozní doby. Je vybavena pokročilými bezpečnostními prvky. Vnitřní pracovní prostor má objem 18,35 litru, tedy totožný s předchozí mycí stanicí. Maximální dosahovaná teplota v peci je 1300°C a proces obvykle trvá 26-31 hodin, přičemž pro malé součásti do 250 g lze použít expresní program zabírající hodin pouze 17. Cena celého systému má startovací cenovku 179 990 dolarů. [17][18]



Obrázek 31: Systém Markforged Metal X 2nd gen, zleva: sintrovací pec, 3D tiskárna, mycí stanice. [17]

4.4 Srovnání použitých tiskáren

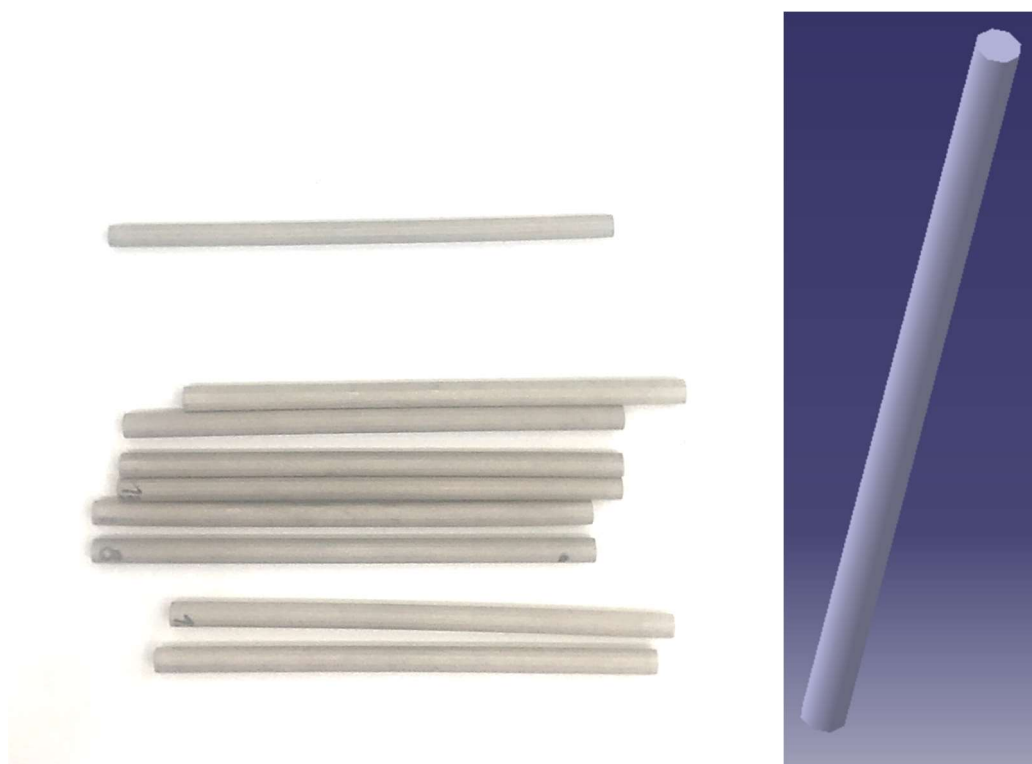
V tabulce 1 je srovnání parametrů udávaných výrobcem dané tiskárny v datovém listu. Při porovnání těchto parametrů se zdá být nejlepší tiskárna ExOne DesktopMetal X160 Pro. Nabízí totiž největší objem tiskové komory, společně s největší rychlostí tisku. Tloušťka vrstvy 30 μm při nejjemnějším nastavení by z ní měla také činit tiskárnu nejpřesnější, a v neposlední řadě je její cenovka nejnižší z vybraných. Jako druhá se umístila tiskárna Renishaw AM 400, která nabízí o malinko větší objem tiskové komory než Metal X, větší přesnost ale je téměř dvojnásobně dražší. Tiskárna Markforged Metal X sice dle údajů výrobce dopadla v tomto srovnání nejhůře, ale díky svým kompaktním rozměrům si uplatnění určitě najde.

Tabulka 1: Porovnání parametrů zvolených tiskáren [14][15][16][18][33][34]

	SLM Renishaw AM 400	ExOne DesktopMetal X160 Pro	ADAM Markforged Metal X Gen 2
Technologie	Selective Laser Melting	Binder Jetting	Bound Powder Extrusion
Objem tiskové komory X × Y × Z	248x248x285 mm	500x800x400 mm	250x183x150 mm
Rychlost tisku	20 cm ³ /hod	10 000 cm ³ /hod	Neuvádí se
Tloušťka vrstvy	20-100 μm	30-200 μm	50 μm
Vnější rozměry bez příslušenství	853x1700x2115 mm	3498x2010x2220 mm	575x467x1120 mm
Váha	1225 kg	3700 kg	75 kg
Zdroj napětí	220 V 16 A	400 V 50/60 Hz 3fáze	100-120/ 200-240 VAC (12A/6A)
Tisknutelné materiály	AlSi10Mg, CoCr, Inconel625, Inconel 718, nerezová ocel 316L, Ti6Al4V	Nerezová ocel, keramika	Nerezová ocel (17-4PH), nástrojová ocel (H13, A2, D2), Inconel 625, Měď
CENA	297 500\$	150 000\$	99 500\$ bez wash a sinter, 179 990\$ s wash a sinter

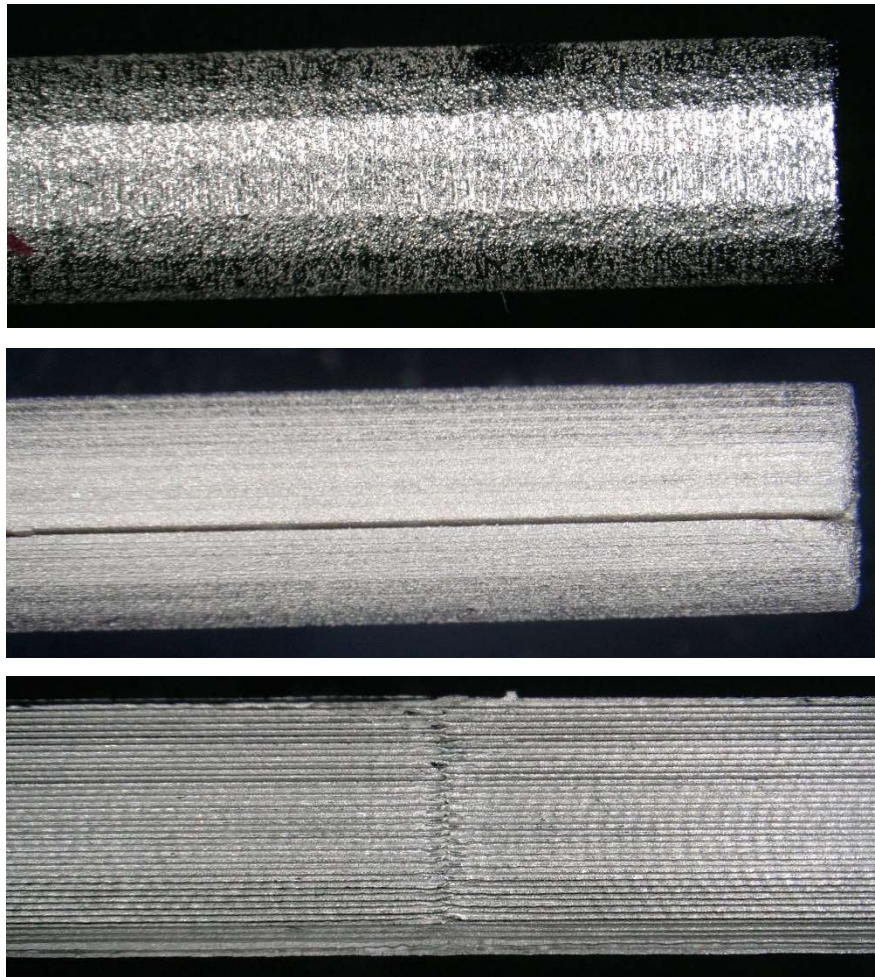
5. Zkoumané vzorky

Pomocí vybraných tiskáren popsaných v předchozí kapitole byli vytisknuty vzorky pro porovnání daných technologií. Jedná se o vzorky z technologií SLM, BJ a BPE, v tomto textu dále označované dle výrobce jako SLM, XOne a ADAM. Vzorky jsou tyčky kruhového průřezu o průměru 5 mm a délce 100 mm. Všechny zkoumané vzorky byly tisknuty v poloze na ležato. Pro zajištění objektivního srovnání byli i nastavené parametry jednotlivých tiskáren totožně nastavené na tloušťku vrstvy 50 μm . Od každého vzorku jsme zkoumali 5 kusů.



Obrázek 32: Vzorky technologie XOne a 3D model vzorku

Při pořizování makroskopických snímků jsem se zaměřil na oblasti, u kterých bylo i pouhým okem zaznamatelné nějaké poškození. U technologie SLM jsem nezaznamenal žádnou anomálii na povrchu, u vzorku XOne je patrná výrazná delaminace vrstev a u vzorku z technologie ADAM je viditelný šev přesně uprostřed vzorku, čím může být způsobený je mi neznámo.



Obrázek 33: Makroskopické snímky vzorků, shora SLM, XOne, ADAM

5.1 Materiál vzorků

Všechny měřené vzorky byli vyrobeny ze stejného materiálu, kterým je nerezová austenitická ocel třídy 316. Nerezová ocel třídy 316 je vysoce univerzální materiál. Má jedinečnou kombinaci chemických, fyzikálních a mechanických vlastností, díky kterým je ideální volbou pro mnoho aplikací. [12]

5.1.1 Chemické složení

Nerezová ocel třídy 316 obsahuje 16–18 % chromu a 11–14 % niklu, což jí poskytuje lepší odolnost proti korozi, než má levnější běžná nerezová ocel třídy 304. Má také obsah molybdenu, který jí dává větší odolnost proti důlkové a štěrbinové korozi ve srovnání s jinými austenitickými druhy nerezové oceli. Navíc obsahuje malé množství manganu, který pomáhá zlepšit tvarovatelnost a svařitelnost. Kompletní chemické

složení a porovnání chemického složení mezi různými druhy nerezové oceli AISI 316.

[12]

Tabulka 2: Chemické složení druhů oceli 316 [12]

Třída	Obsah v %	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N
316	Min	-	-	-	0	-	16	2	10	-
	Max	0,08	2	0,75	0,045	0,03	18	3	14	0,1
316L	Min	-	-	-	-	-	16	2	10	-
	Max	0,03	2	0,75	0,045	0,03	18	3	14	0,1
316H	Min	0,04	0,04	0	-	-	16	2	10	-
	Max	0,1	0,1	0,75	0,045	0,03	18	3	14	-

5.1.2 Rozdíl mezi ocelí 316L a 316H

Hlavními rozdíly mezi těmito dvěma typy nerezové oceli jsou jejich obsahy uhlíku a mechanické vlastnosti. Písmeno „L“ v 316L znamená „nízkouhlíkové“, což značí, že tento typ má přibližně 0,03 % hmotnosti tvořenou uhlíkem nebo méně. Na druhou stranu, „H“ v 316H znamená „high carbon“, což značí, že tento typ oceli má asi 0,04 % až 0,15 % hmotnosti tvořenou uhlíkem – což je téměř dvakrát více než 316L. Díky vyššímu obsahu uhlíku nabízí nerezová ocel 316H větší pevnost než její protějšek. Díky tomu je ideální pro aplikace, kde je prvořadá pevnost – jako jsou rukojeti nádobí nebo tlakové nádoby – a zároveň nabízí vynikající odolnost proti korozi díky obsahu chromu (který tvoří 16 % až 18 % slitiny). Je důležité si uvědomit, že zvýšená pevnost znamená také zvýšenou tvrdost. Pokud tedy potřebujeme něco snadno obrobitelného nebo tvarovaného do složitých tvarů, pak může být 316L vhodnější, protože je o něco měkčí než její protějšek. Ocel 316L díky svému nízkému obsahu uhlíku vykazuje odolnost vůči senzibilaci, což je precipitace karbidů na hranicích zrn.

[13]

5.1.3 Fyzikální vlastnosti nerezové oceli 316

Nerezová ocel třídy 316 má vysoký bod tání, 1425 °C (2597 °F), což z ní činí jeden z tepelně nejstabilnějších materiálů dostupných na současném trhu. Má také dobrou elektrickou vodivost, díky čemuž je vhodná pro použití v elektrických zařízeních nebo součástech, kde je potřeba proud účinně vést materiálem, aniž by došlo k jakýmkoli

ztrátám nebo poškození v důsledku nadměrného zahřívání nebo vzniku elektrického oblouku. Materiál také vykazuje vynikající tažnost, umožňující snadné tvarování při správném zahřátí během výrobních procesů, jako je lisování nebo tažení. Kromě těchto vlastností má relativně nízký koeficient tepelné roztažnosti, díky čemuž je vhodný pro použití v aplikacích, kde dochází ke kolísání teplot, jako jsou ty, které se vyskytují v leteckém nebo průmyslovém prostředí, kde se mohou vyskytnout extrémní teploty během různých provozních dějů nebo podmínek. [12]

Tabulka 3: Fyzikální vlastnosti oceli 316 [12]

Třída	Hustota [kg/m ³]	Modul pružnosti [GPa]	Koeficient teplotní roztahnosti [μm/m/°C]			Tepelná vodivost [W/m.K]		Měrná tepelná kapacita 0-100 °C [J/kg.K]	Elektrický odpor [nΩ.m]
			0- 100°C	0- 315°C	0- 538°C	Při 100°C	Při 500°C		
316/L/H	8000	193	15,9	16,2	17,5	16,3	21,5	500	740

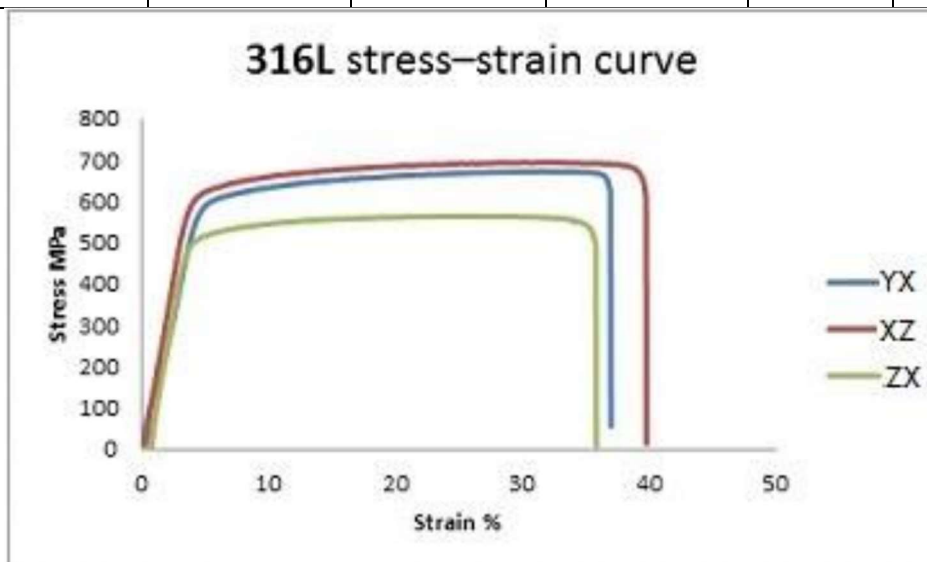
5.1.4 Mechanické vlastnosti

Nerezová ocel třídy 316 nabízí vynikající pevnost ve srovnání s jinými feritickými třídami nerezové oceli, přičemž si stále zachovává dobré hodnoty tažnosti a houževnatosti při pokojové teplotě, když je tavenina žhána nebo zpracovávána za studena v závislosti na procesu použitým během výrobních operací. Materiál vydrží zatížení až 900 MPa při zkoušce podle normy ASTM A370 pro účely zkoušení tahem, díky čemuž je vhodný pro použití v konstrukčních prvcích vystavených zatížení tahem, včetně nosníků, sloupů, rámců atd... Jeho mez kluzu se pohybuje mezi 185-205 MPa v závislosti na míře zpracování materiálu za studena, které bylo prováděno během výrobních operací, stejně jako na stavu žhání před testováním podle norem ASTM A370, díky čemuž je vhodný pro použití v aplikacích vyžadujících dobrou mez kluzu, jako jsou spojovací prvky, šrouby, šrouby atd... Jeho konečné hodnoty tvrdosti se pohybují mezi 200HBW- 300HBS v závislosti na tom, kolik tváření za studena bylo provedeno během výrobních operací, díky čemuž je vhodný pro použití v součástech odolných proti opotřebení, jako jsou ozubené hřídele, vačkové hřídele, posunovací válečky atd., kde jsou vyžadovány vyšší hodnoty tvrdosti, než jaké lze dosáhnout austenitickými třídami nerezové oceli, aniž by byly obětovány příliš vysoké hodnoty tažnosti/houževnatosti, protože feritické druhy mají tendenci nevykazovat příliš

křehké chování ani při vyšších úrovních tvrdosti a to kvůli jejich nižšímu obsahu uhlíku, typicky pod 0,20 %. Hodnoty mechanických vlastností pro jednotlivé druhy ocelí 316 jsou uvedeny v tabulce níže. [12]

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti oceli AISI 316 [12]

Třída	Pevnost v tahu [MPa]	Mez kluzu min [MPa]	Tažnost min [% in 50 mm]	Tvrdost	
				Rockwell B [HR B] max	Brinell [HB] max
316	515	205	40	95	217
316L	485	170	40	95	217
316H	515	205	40	95	217



Obrázek 34: Pevnost v tahu oceli 316L v závislosti na orientaci dílu při výrobě metodou 3D tisku SLM [14]

6. Experimentální srovnání technologií

6.1 Použité měřicí zařízení

Vzorky byly podrobeny zkoumání na dvou zařízeních. První z nich je přístroj pro počítačovou tomografii Zeiss Metrotom 1500. Na tomto stroji byli provedeny skeny a vyhodnocení porozity, válcovitosti a chybu jmenovitého rozměru průměru vzorků. Pro měření vybraných parametrů P-profilu povrchu byl použit přístroj Marsurf LD 120.

6.1.1 Zeiss Metrotom 1500

ZEISS METROTOM 1500 je průmyslový počítačový systém výpočetní tomografie pro měření a vyhodnocení kompletních dílů z plastu nebo lehkých kovů. S tradiční měřicí technologií lze kontrolovat skryté struktury až po časově a cenově náročnou destrukci dílu vrstvu po vrstvě. S počítačovým tomografickým systémem ZEISS METROTOM je možné naskenovat velké množství charakteristik dílu najednou. Výsledná měření jsou přesná a zpětně dohledatelná. Na rozdíl od metod kontaktního měření je ZEISS METROTOM výrazně rychlejší při snímání většího množství měřicích bodů.



Obrázek 35: Počítačová tomografie ZEISS METROTOM 1500 [35]

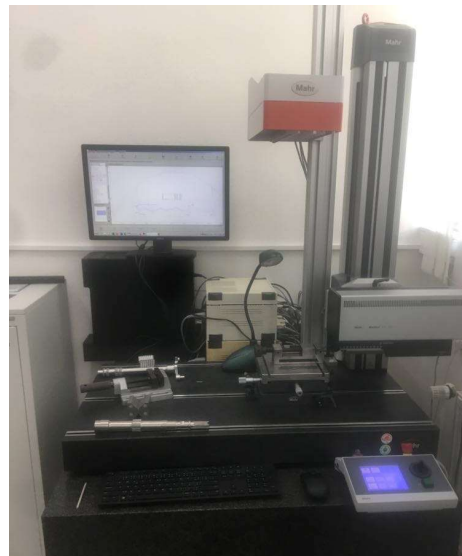
Údaje a technické parametry udávané výrobcem jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5: Základní parametry ZEISS METROTOM 1500 [35]

Mikrofokusovací trubice	Max. urychlovací napětí [kV]	225
	Max. proud [μ A]	3 000
	Max. výkon [W]	500
	Min. velikost ohniska [μ m]	7
Plochý detektor	Rozlišení [px]	2 048 x 2 048
	Velikost pixelu [μ m]	200 x 200
Přesnost (MPE odpovídá VDI/VDE 2630-1.3)	Chyba středu koule [μ m]	4,5+L/50
	Chyba snímání PS [μ m]	3
	Chyba snímání PF [μ m]	3
	Chyba měřené délky [μ m]	9+L/50
Maximální parametry měřeného dílu	Maximální hmotnost dílu [kg]	5
	Max. průměr dílu [mm]	430
	Max. výška dílu [mm]	800

6.1.2 Marsurf LD 120

Marsurf LD 120 je vysoce precizní stroj pro měření v rozmezí nm. Jedná se o roky prověřený stroj, který reprezentuje špičkovou technologii pro měření profilu a drsnosti. Příklad nabízí možnost dynamicky ovládat měřící sílu v rozmezí mezi 0,5 až 30 mN, pro zajištění co největší přesnosti. V kombinaci s univerzálním měřícím, kontrolním a vyhodnocovacím softwarem od společnosti Mahr nesoucí název MarWin, představuje vrcholnou technologii v oblasti měřících stanic pro měření profilu a drsnosti. [36]



Obrázek 36: Měřící stanice Marsurf LD 120

6.2 Nastavení parametrů měření na CT

Pro dosažení co nejlepších výsledků skenování je důležité správné nastavení přístroje. Jedním z podstatných parametrů je geometrické zvětšení obrazu M . To závisí čistě na poloze dílu v soustavě zdroj-detektor (tzn. na X souřadnici). Větší geometrické zvětšení nám dává větší obraz na detektoru a tím i lepší rozlišení, nevýhodou však je horší ostrost, tkz. penumbra efekt. S geometrickým zvětšením M souvisí i velikost voxelu V_x , která je mu nepřímo úměrná. Voxel je analogicky 3D pixel. Dalším důležitým parametrem je velikost optického ohniska [μm] (spot size). Na velikosti optického ohniska závisí přesnost výsledného zobrazení. Velikost optického ohniska roste se zvětšující se energií rentgenového svazku, která je potřebná k prozáření rozměrnějších a hmotnějších dílů. Naším cílem bylo dosáhnout hodnot velikosti voxelu a velikosti optického ohniska přibližně na podobné číselné hodnotě.

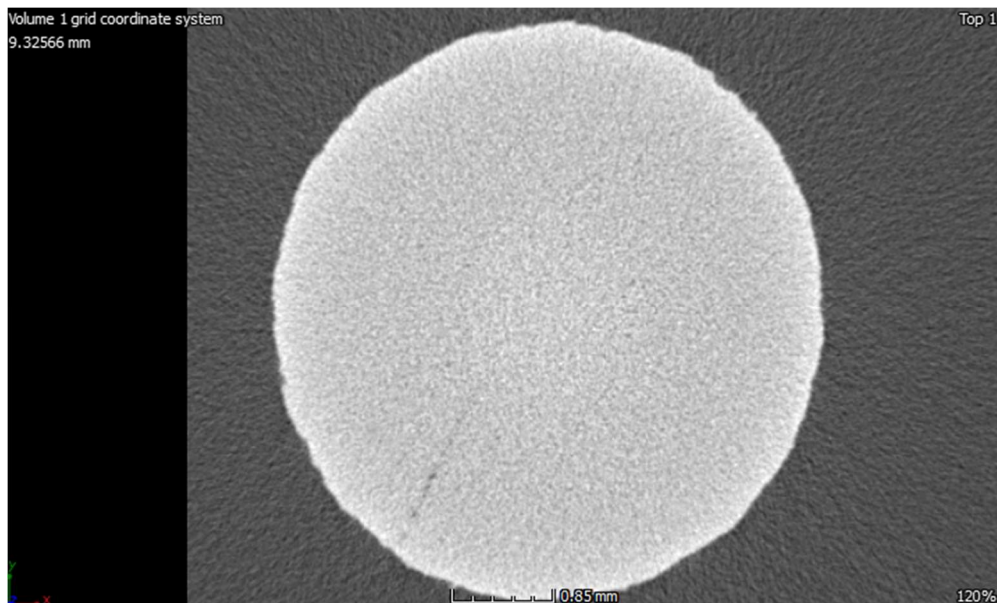
Při nastavování skenování jsme se řídili doporučením výrobce. Doporučené parametry výrobce uvádí ve svém dokumentu *CT COOKBOOK*, která je jakýmsi návodem pro zacházení s měřícím systémem ZEISS METROTOM, a to nejenom námi použitý METROTOM 1500 ale i pro ostatní modely společnosti ZEISS. První skenování jsme provedli pro vyhodnocení porozity měřených vzorků. Pro ocelové díly bez ohledu na jejich tloušťku výrobce doporučuje energii rentgenového svazku 225 kV. Velikost energie a hardwarového filtru ovlivňuje spektrum rentgenových paprsků, při napětích nad 100 kV je vliv hardwarového filtru znatelnější než vliv energie svazku. Pro tloušťku stěny, která je v našem případě 5 mm doporučuje výrobce měděný filtr o tloušťce 1 mm. Nastavení velikosti proudu probíhá automaticky a je řízeno softwarem. Výsledné zvolené hodnoty jsou v tabulce 6.

Tabulka 6: Nastavení doporučené výrobcem

Zvětšení	Integrační čas [ms]	Položka X [mm]	Materiál a tloušťka filtru	Napětí [kV]	Proud [μA]
1	2000	80	Cu 1 mm	225	68

Po změření vzorků s nastavením doporučeným výrobcem jsme nebyli spokojeni s výsledky a začali jsme experimentální metodou parametry měnit. Změna

parametrů nebyla náhodná, nýbrž byla inspirována zkušenostmi z předchozích měření.



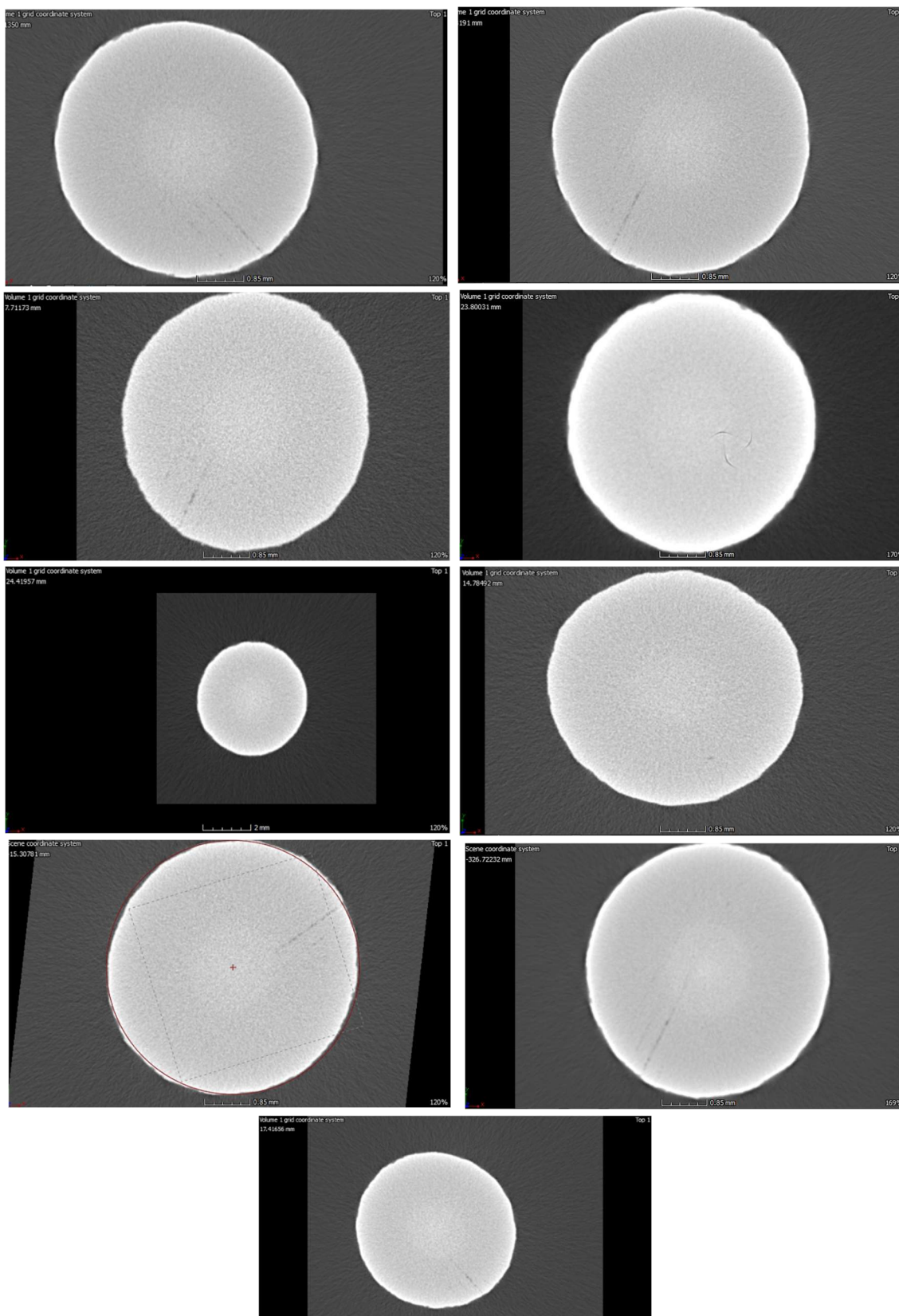
Obrázek 37: Výsledný obraz skenování při nastavení dle doporučení výrobce

Experimentálně nastavené hodnoty parametrů skenování uvádí následující tabulka 7. Provedených měření bylo celkem 10 (včetně toho dle doporučení výrobce), z těchto měření jsme opticky vybrali to s nejnižší hladinou šumu, tudíž nejvhodnější pro analýzu porozity. Vybraná varianta je měření číslo 7.

Tabulka 7: Experimentálně nastavené parametry skenování

Číslo měření	Zvětšení	Integrační čas [ms]	Poloha X [mm]	Materiál a tloušťka filtru	Napětí [kV]	Proud [μA]
1	1	2000	80	-	225	68
2	1	2000	80	-	225	68
3	1	2000	80	Cu 1 mm	225	120
4	4	2000	120	Cu 0,25 mm	225	68
5	2	500	200	Cu 0,25 mm	225	68
6	16	2000	80	Cu 0,5 mm	225	68
7	2	2000	80	Cu 0,25 mm	225	68
8	1	2000	120	-	225	99
9	2	2000	120	Cu 0,25 mm	225	68

Na následujícím obrázku jsou zobrazeny výsledky skenů s nastavením dle tabulky 7. Měřítka je u většiny zobrazení nastaveno stejně pro lepší srovnání.



Obrázek 38: Naskenované vzorky dle nastavení z tabulky 7. Číslováno z levého horního obrázku jako číslo měření 1

Předchozí nastavení sice nabízí detailní zobrazení vnitřní struktury vzorků, ale kvůli poloze na ose X zaznamenává jen část vzorku. Pro vyhodnocení válcovitosti a průměru vzorků však bylo potřeba naměřit vzorky celé, logicky tak bylo třeba jiného nastavení. Nastavení zvolené pro měření válcovitosti a průměru jsou v tabulce 8.

Tabulka 8: Nastavení parametrů CT pro skenování celých vzorků

Zvětšení	Integrační čas [ms]	Poloha X [mm]	Materiál a tloušťka filtru	Napětí [kV]	Proud [μ A]
4	2000	500	Cu 1 mm	200	663

6.3 Naměřené hodnoty na CT

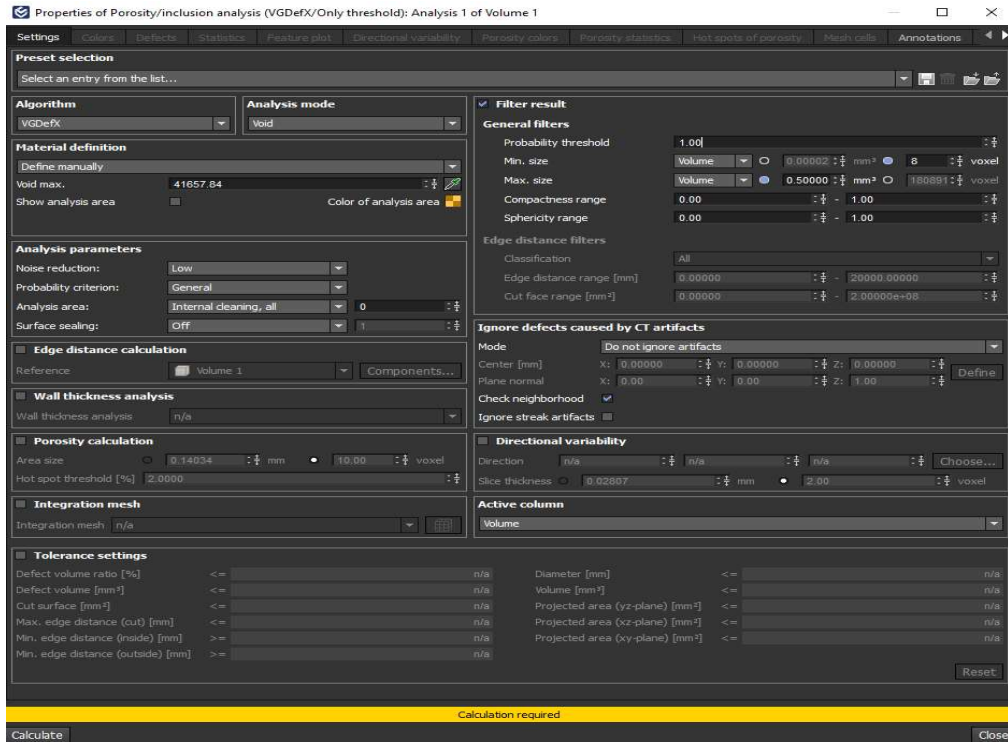
6.3.1 Měření porozity

Detailnější skeny jsme zkoumali na přítomnost porozity. V tomto srovnání figurují pouze technologie SLM a BJ, jelikož třetí srovnávaná, technologie ADAM, měla chybou na straně dodavatele vzorků vzorky duté a zdatelně delaminované vrstvy, jak ukazuje obrázek 41 a 42. Tento fakt znemožnil objektivně vyhodnotit porozitu u těchto vzorků. Vyhodnocení proběhlo v softwaru VGStudio Max 3.2.2. Pro vyhodnocení jsme použili implementovaný nástroj pro vyhodnocení porozity VGDefX/Only threshold. Nastavené parametry vyhodnocení jsou zobrazeny na obrázku 39. Naměřené hodnoty jsme poté profiltrovali pomocí parametrů uvedených v tabulce 9. Filtrace sloužila k odstranění šumu, který se nedá považovat za porozitu. Zvolená metodika filtrace se odrážela od parametru pravděpodobnosti, kterou software označoval pravděpodobnost nálezu jako póru. Parametry, které byli odfiltrovány, byli nejmenší nálezy s nejnižší pravděpodobností a nejmenším objemem. Jak je vidět na obrázku 40, jednalo se o oblast nejhustěji obsazenou nálezy, tedy i oblast s největší pravděpodobností šumu.

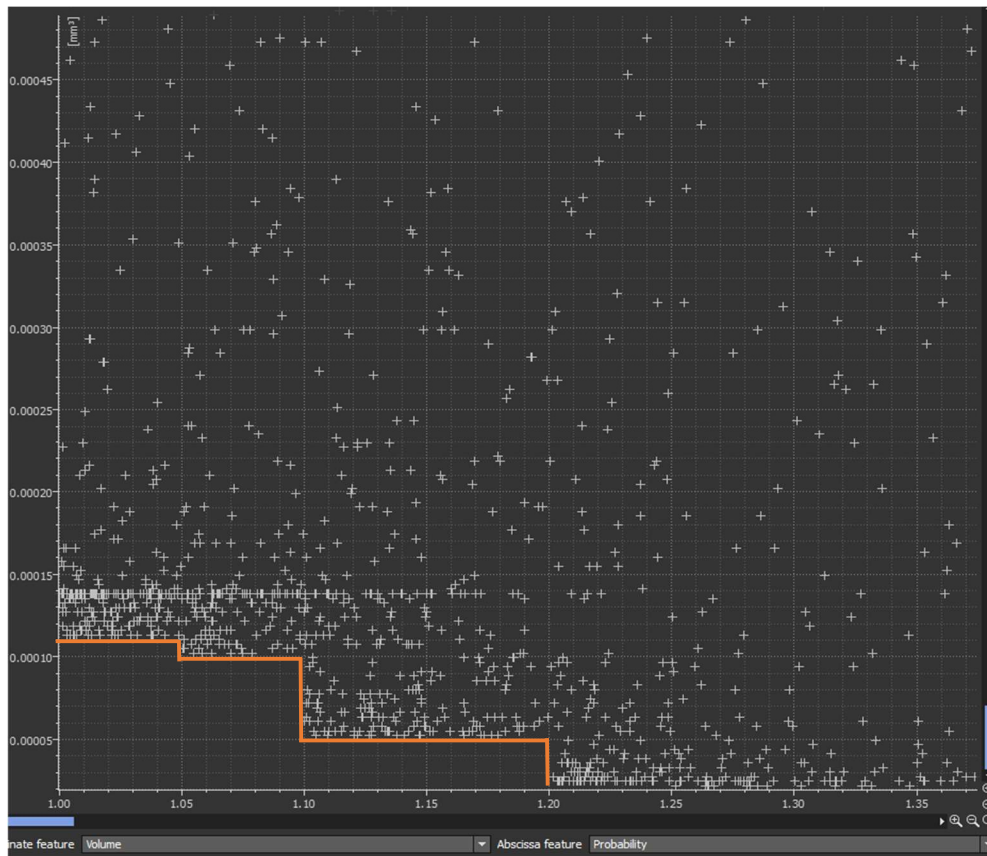
Tabulka 9: Zvolené hodnoty filtrace dat

Filtr 1	Voxel \leq 40	Probability \leq 1,05
Filtr 2	Voxel \leq 8	Probability \leq 1,25
Filtr 3	Volume \leq 0,00005	Probability \leq 1,2
Filtr 4	Volume \leq 0,0001	Probability \leq 1,1

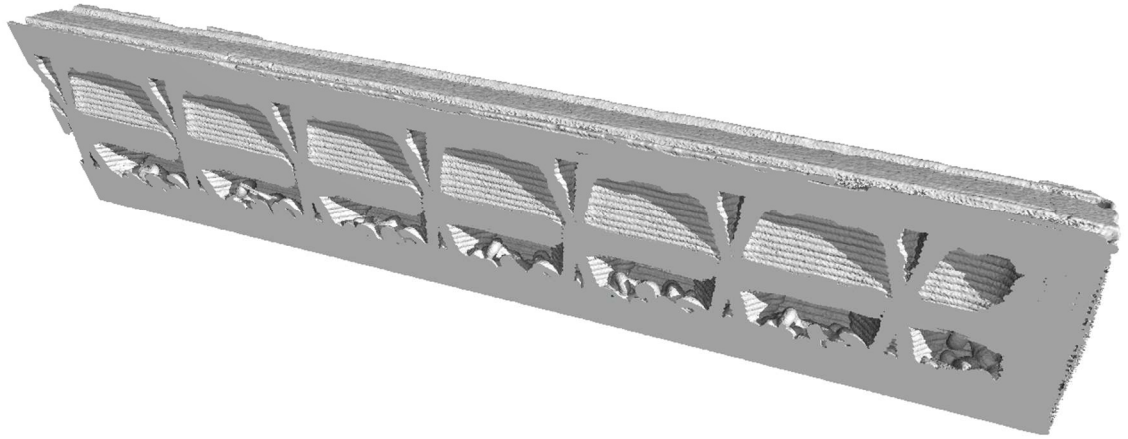
DIPLOMOVÁ PRÁCE



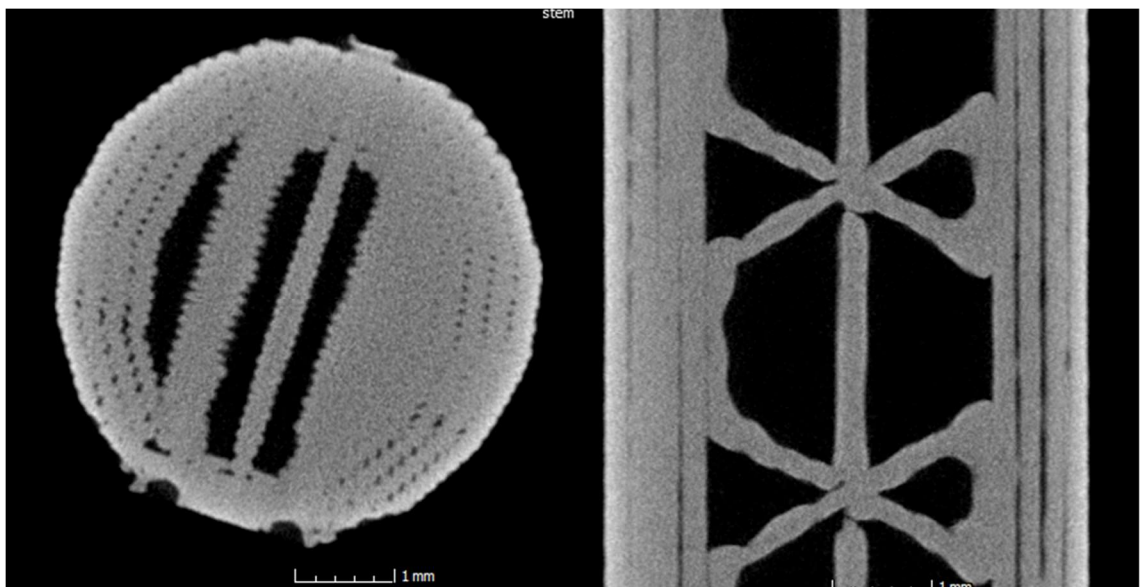
Obrázek 39: Nastavené parametry pro vyhodnocení porozity



Obrázek 40: Graf zobrazující oblast vyfiltrovaných hodnot, na ose Y velikost voxelu, na ose X pravděpodobnost



Obrázek 41: Řez 3D modelem skenu vzorku z technologie ADAM. U vzorku je viditelná odlehčená vnitřní struktura, kvůli které se vzorek nehodil na vyhodnocení porozity

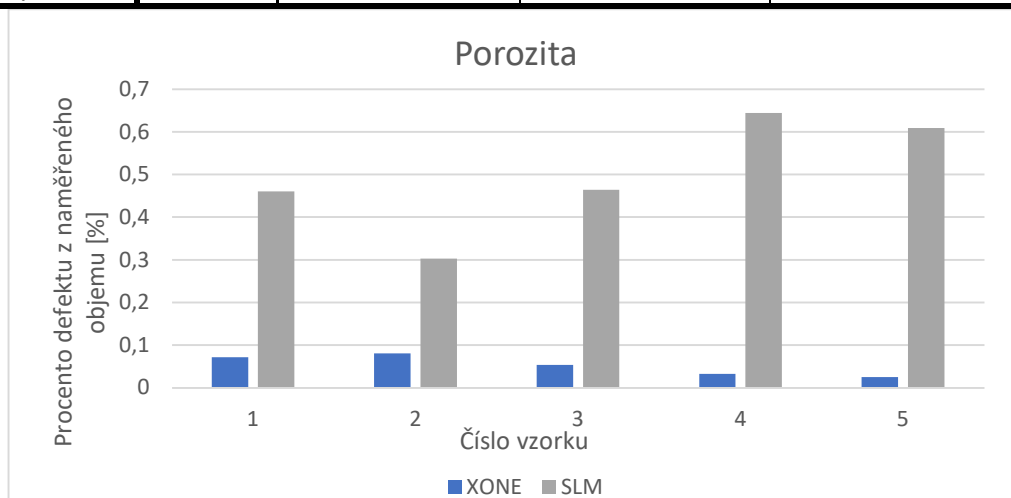


Obrázek 42: Příčný a podélný řez skenem technologie ADAM pro zobrazení duté vnitřní struktury a výrazné delaminace vrstev

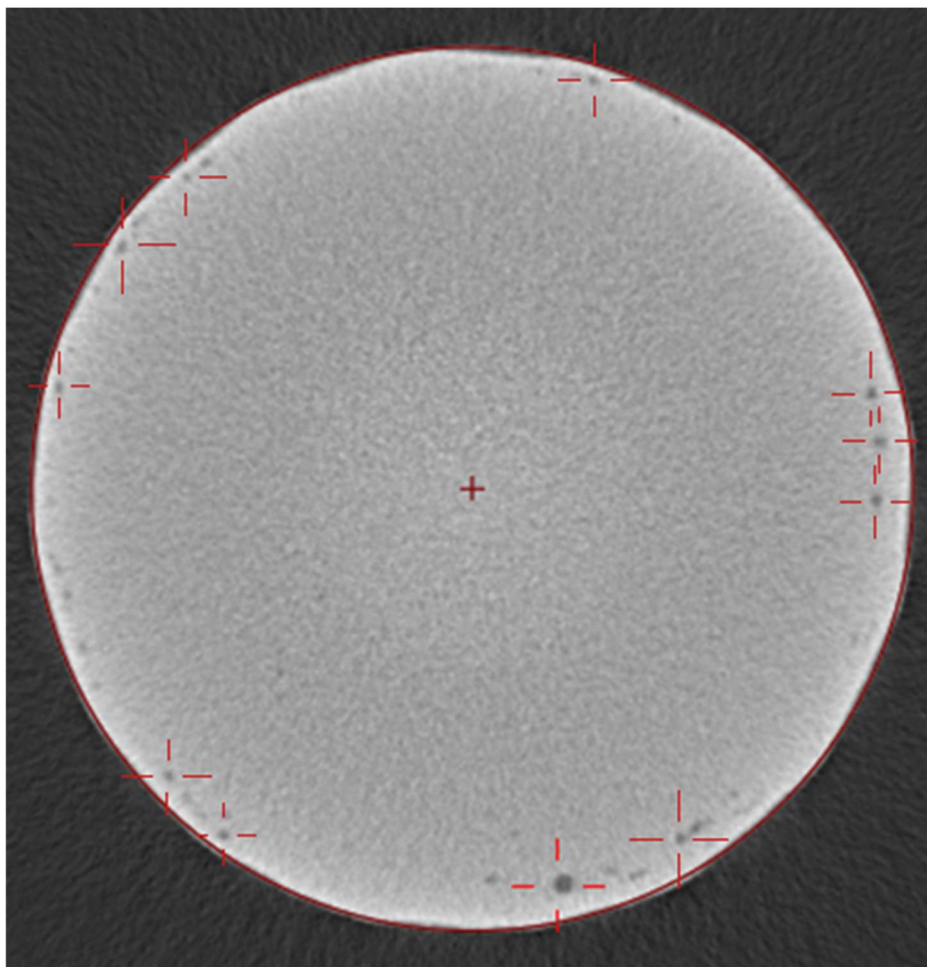
Výsledky po filtraci jsou uvedeny v tabulce 10, kterou následně reprezentuje přiložený graf 1. Dle naměřených hodnot vykazovala technologie SLM porozitu v rozmezí 0,3 až 0,65 % z měřeného objemu, což je výrazně více než technologie XOne, která se pohybovala v řádu setin procenta. Že je technologie SLM více porézní ukazuje i obrázek 43, na kterém je vidět výrazná porozita v blízkosti povrchu. Tento jev byl pozorován u všech měřených vzorků z technologie SLM. Naproti tomu XOne vykazoval až na jednu výjimku, kde byla zřetelná delaminace vrstev (viz. obrázek 44), porozitu nízkou.

Tabulka 10: Naměřené hodnoty porozity po filtraci šumu

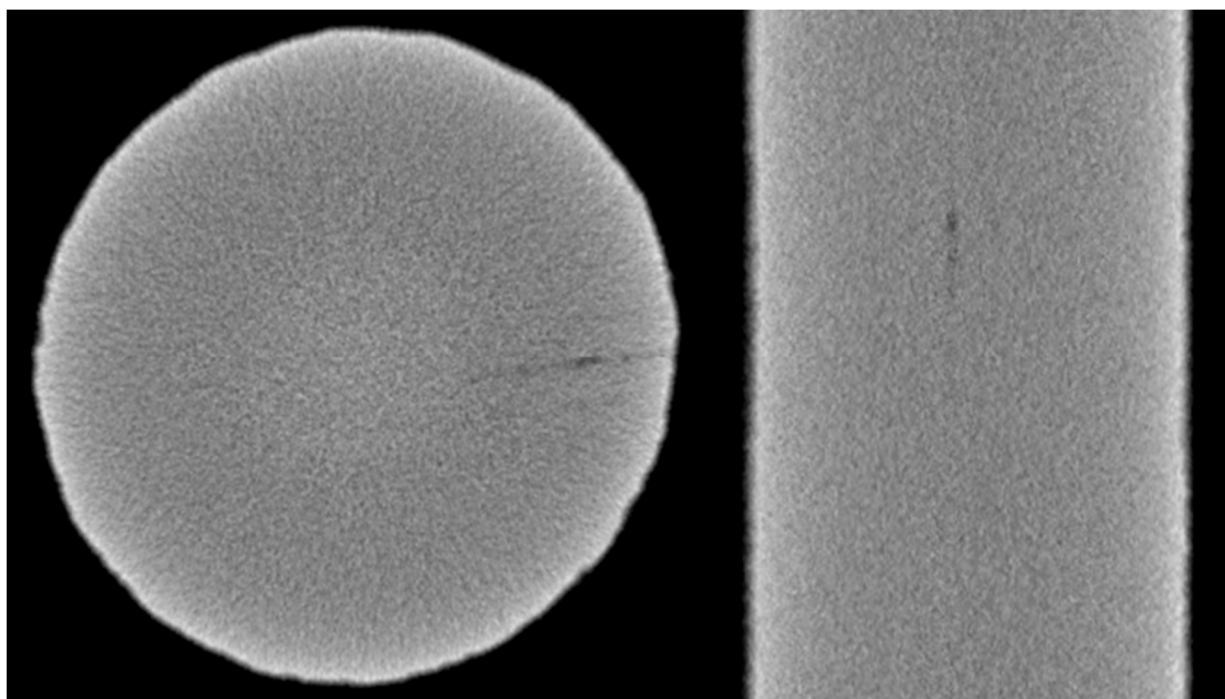
Technologie	Číslo vzorku	Objem materiálu [mm ³]	Objem defektů [mm ³]	Procento defektu z objemu [%]
XONE	1	416.57541	0.29889	0.0717
	2	392.65009	0.31507	0.0802
	3	421.16583	0.22579	0.0536
	4	418.27112	0.13393	0.0320
	5	427.96057	0.10549	0.0246
Průměr	-	-	0,21583	0,05242
Výb. směr. odchylka	-	-	0,094510936	0,024164892
SLM	1	436.78452	2.01956	0.4602
	2	456.95187	1.38820	0.3029
	3	451.61029	2.10560	0.4641
	4	456.31094	2.95984	0.6445
	5	438.03571	2.68341	0.6089
Průměr	-	-	2,23132	0,49612
Výb. směr. odchylka	-	-	0,61372345	0,13636847



Graf 1: Srovnání technologie SLM a XOne na porozitu



Obrázek 43: Snímek z technologie SLM s vyznačenou pórovitostí v blízkosti povrchu



Obrázek 44: Snímek z technologie XOne s viditelnou delaminací vrstvy

6.3.2 Měření průměru a válcovitosti

Jak už bylo zmíněno dříve, pro měření průměru a válcovitosti jsme vzorky naskenovali celé, přičemž nebyl brán takový zřetel na šum ve vnitřních strukturách, ale zaměřovali jsme se na vnější povrch, který byl naskenován s dostatečnou přesností. Měření jsme stejně jako měření porozity provedli v softwaru VGStudio Max 3.2.2, který má implementovanou funkci pro měření průměru i válcovitosti. Prvním krokem bylo napasovat teoreticky přesný válec na povrch naskenovaného objektu. K tomu jsme použili funkci *fit geometry element*, která pomocí vyhledávání podobných bodů vytvoří virtuální válec z mraku bodů okolo naskenovaného objektu. Z tohoto virtuálního válce jsme pak byli schopni naměřit průměr vzorků a jejich válcovitost. Výsledky měření udává tabulka 11.

Tabulka 11: Naměřené hodnoty průměru a válcovitosti

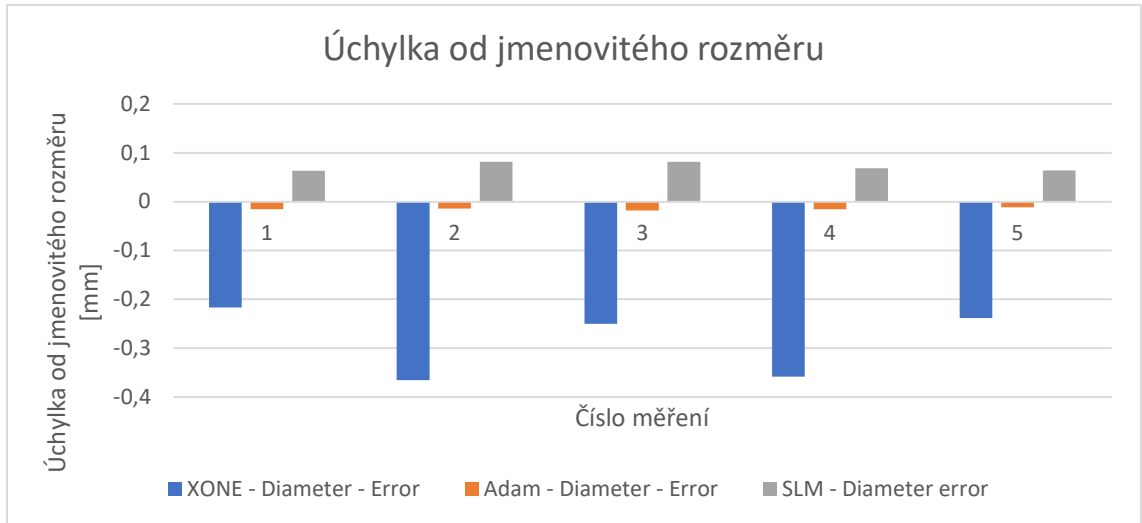
XOne – číslo vzorku	1	2	3	4	5	Průměr	Výb.směr.odchyl.
Průměr [mm]	4,78	4,63	4,75	4,64	4,76	4,71	0,0705
Průměr – úchylka [mm]	-0,22	-0,37	-0,25	-0,36	-0,24	-0,29	0,0705
Válcovitost [mm]	0,34	0,54	0,42	0,59	0,73	0,52	0,1511

Adam – číslo vzorku	11	12	13	14	15	Průměr	Výb.směr.odchyl.
Průměr [mm]	4,98	4,99	4,98	4,98	4,99	4,98	0,0023
Průměr – úchylka [mm]	-0,02	-0,01	-0,02	-0,02	-0,01	-0,02	0,0023
Válcovitost [mm]	0,21	0,46	0,37	0,32	0,35	0,34	0,0876

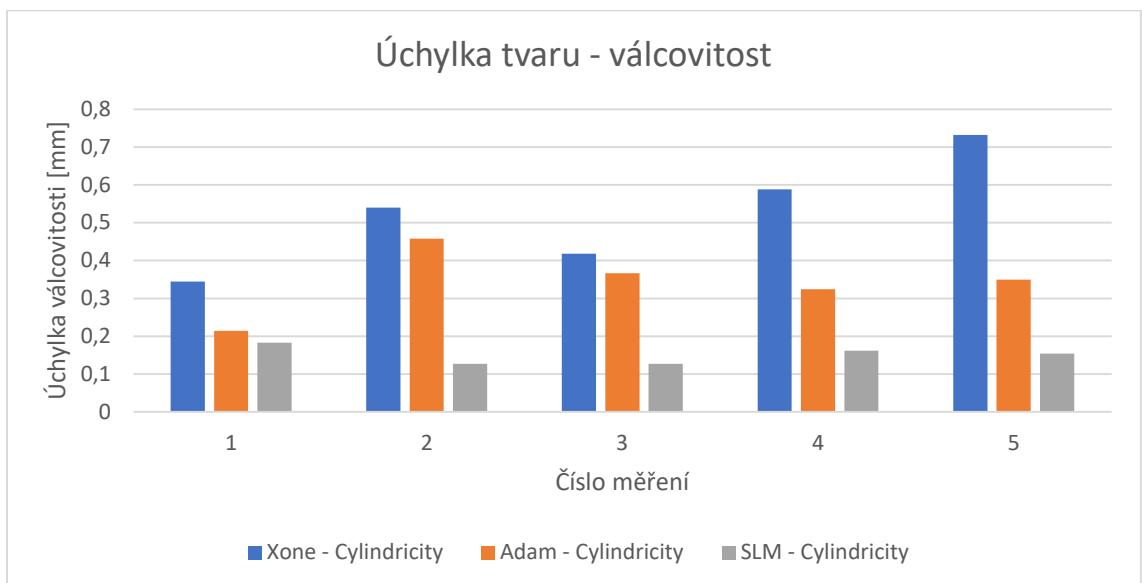
SLM - číslo vzorku	1	2	3	4	5	Průměr	Výb.směr.odchyl.
Průměr [mm]	5,06	5,08	5,08	5,07	5,06	5,07	0,0092
Průměr – úchylka [mm]	0,06	0,08	0,08	0,07	0,06	0,07	0,0092
Válcovitost [mm]	0,18	0,13	0,13	0,16	0,15	0,15	0,0240

Jak je vidět z naměřených hodnot a grafů, nejbližší k nominální hodnotě se přiblížila technologie ADAM, která vytvořila vzorky lehce menší než jejich nominální hodnota. Zajímavé ovšem je, že technologie XOne vytvářela vzorky podstatně menší než jejich nominální hodnota, naproti tomu technologie SLM naopak vzorky lehce větší. Příčinou proč technologie XOne vytvořila vzorky menší může být špatně vypočtená hodnota smrštění po sinterování.

I v případě válcovitosti technologie XOne vykázala nejhorší výsledky. Tento jev byl očekávatelný, jelikož už při optickém zhodnocení bylo znatelné, že vzorky z technologie XOne nejsou přímé, nýbrž měli viditelně zahnutý tvar. Nejlepší hodnoty válcovitosti prokázala technologie SLM.



Graf 2: Úchylka rozměru od nominální hodnoty průměru vzorku 5 mm



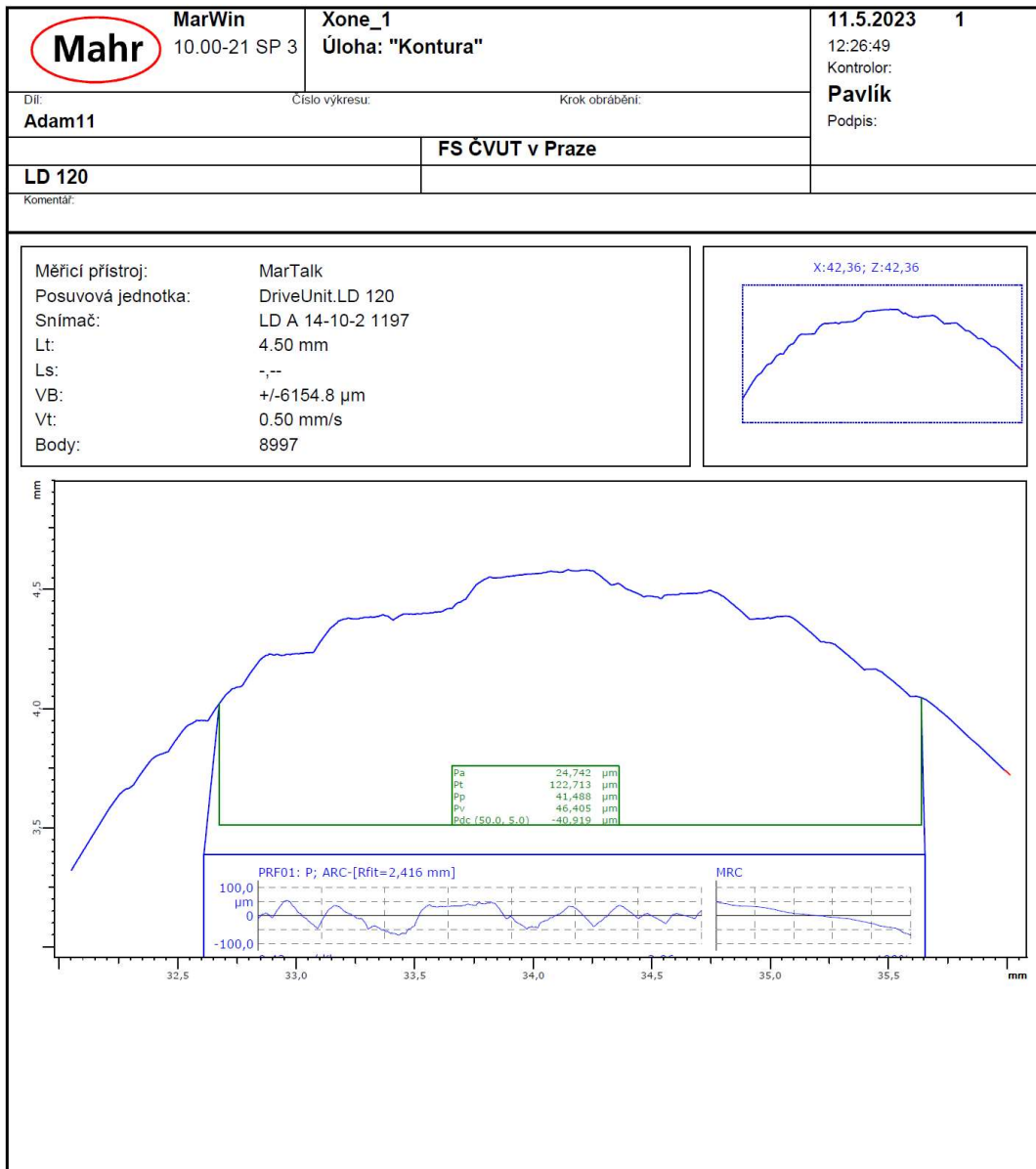
Graf 3: Úchylka tvaru válcovitosti vzorků

6.3.3 Měření základního profilu povrchu

Při měření základního profilu povrchu jsme vybrali 5 parametrů na které jsme se zaměřili. Těmito parametry byli Pa (aritmetická průměrná odchylka profilu povrchu), Pt (největší vzdálenost minima a maxima), Pp (výška nejvyššího výstupku profilu), Pv (hloubka nejnižší prohlubně profilu), Pdc (50,0; 5,0) (v jaké hloubce profil dosáhne

DIPLOMOVÁ PRÁCE

50% nosného prvku). Měření jsme prováděli příčně na vzorek. Každý vzorek jsme proměřili dva krát a z výsledku jsme udělali průměr. K vyhodnocení jsme použili software společnosti Mahr, Marwin, pomocí kterého jsme si nechali vygenerovat protokol, ukázka protokolu je na obrázku 45, protokoly jsou k práci dodány ve formě příloh.



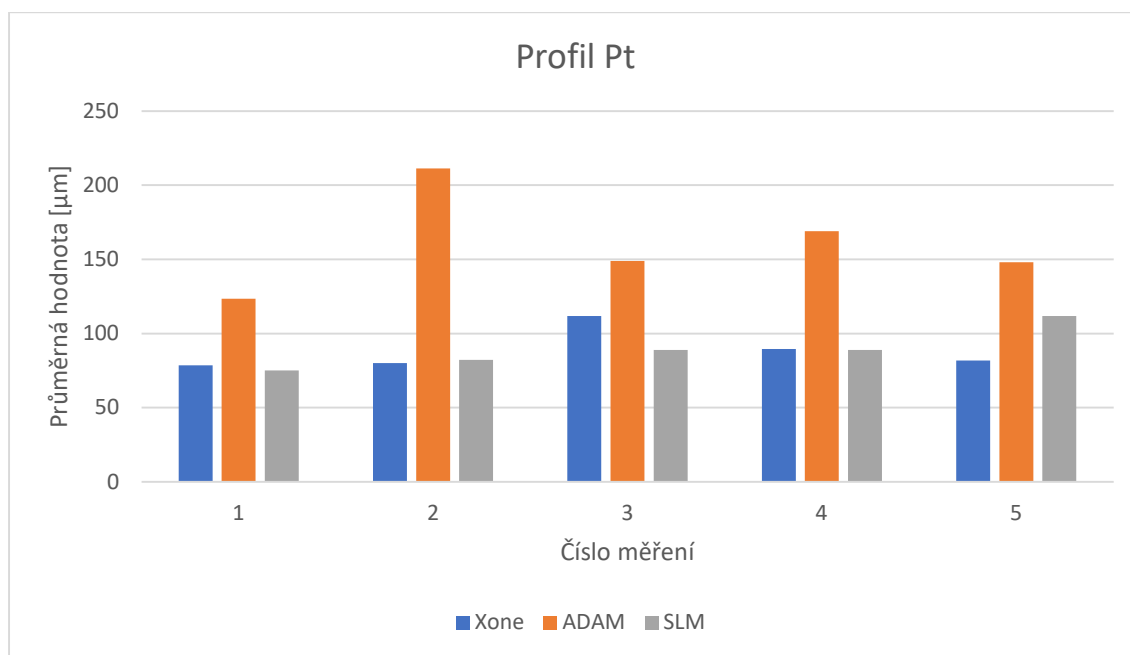
Obrázek 45: Protokol vygenerovaný softwarem Marwin

Naměřené hodnoty doplněné grafy jsou v následujících tabulkách.

Profil Pt

Tabulka 12: Naměřené hodnoty profilu Pt

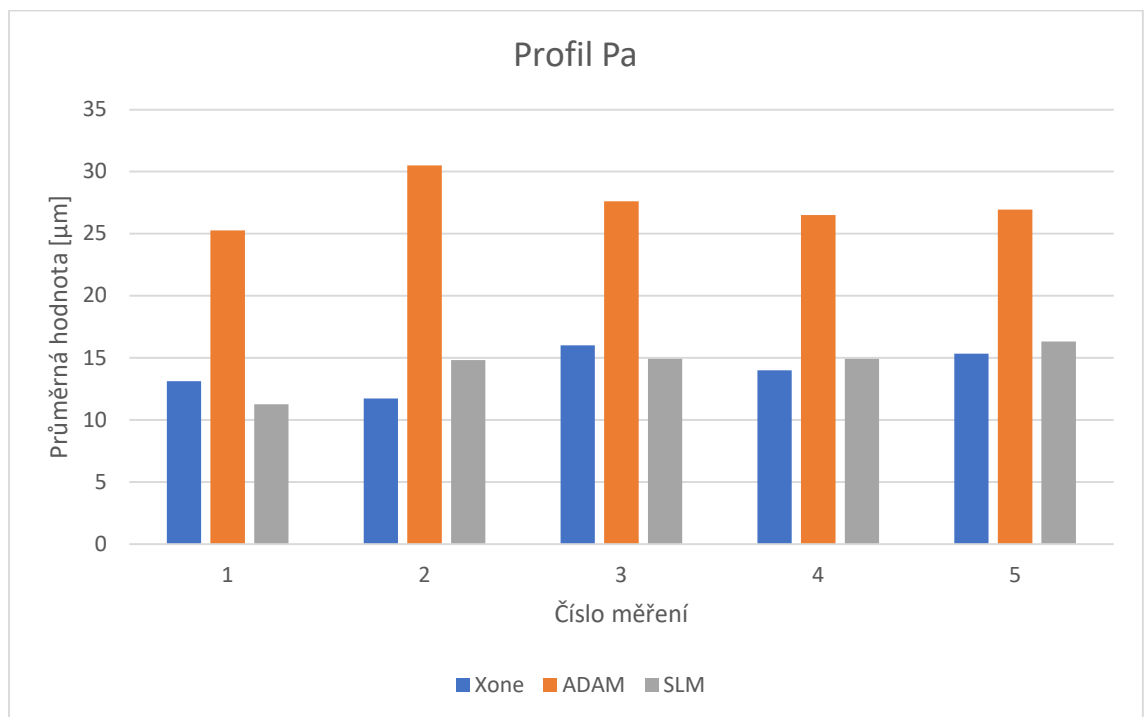
Pt	Vzorek číslo	1		2		3		4		5	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Xone	Naměřená hodnota [μm]	85,5	71,8	78,7	81,3	131,8	91,6	105,9	73,2	84,3	79,2
	Průměr hodnot [μm]	78,6245		79,9945		111,7115		89,5205		81,783	
ADAM	Naměřená hodnota [μm]	122,7	124,2	220,5	202,3	132,8	165,3	169,9	168,2	165,6	130,6
	Průměr hodnot [μm]	123,4565		211,393		149,018		169,045		148,0655	
SLM	Naměřená hodnota [μm]	79,9	70,2	81,4	83,0	70,4	107,5	75,3	102,6	140,6	83,1
	Průměr hodnot [μm]	75,0595		82,1575		88,9285		88,9245		111,848	



Profil Pa

Tabulka 13: Naměřené hodnoty profilu Pa

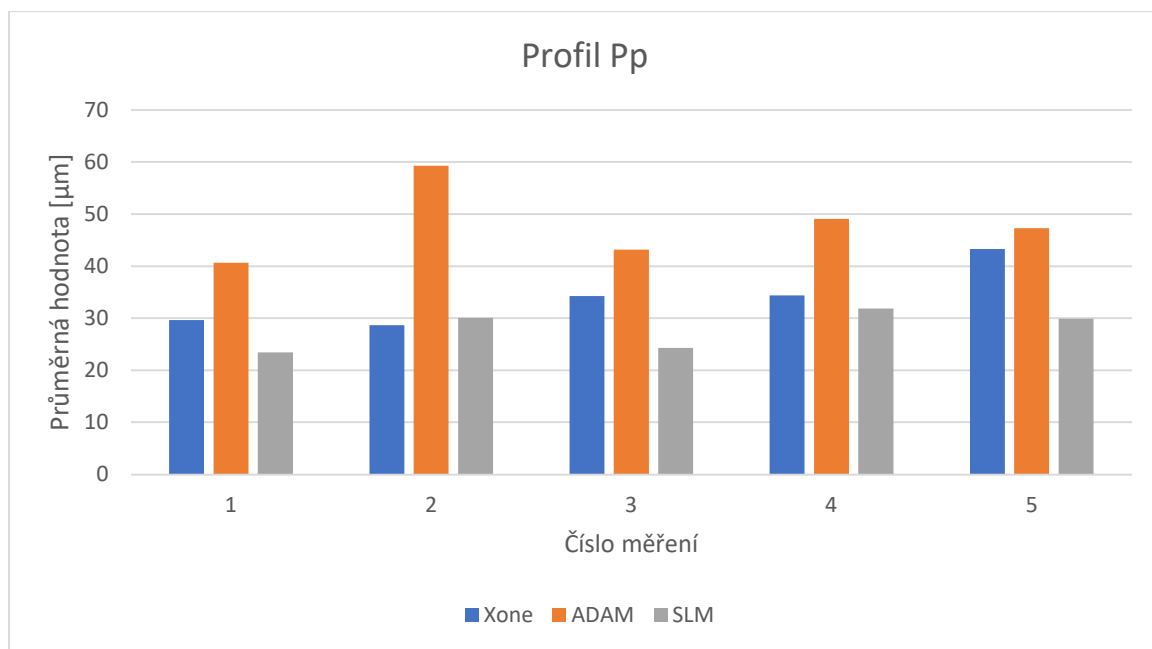
Pa	Vzorek číslo	1		2		3		4		5	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Xone	Naměřená hodnota [μm]	14,9	11,3	12,2	11,2	20,8	11,2	15,0	13,0	14,4	16,3
	Průměr hodnot [μm]	13,11		11,7195		15,9915		13,985		15,3255	
ADAM	Naměřená hodnota [μm]	24,7	25,7	30,2	30,8	27,5	27,7	25,0	28,0	28,3	25,5
	Průměr hodnot [μm]	25,2425		30,501		27,594		26,4865		26,925	
SLM	Naměřená hodnota [μm]	10,0	12,6	15,6	14,1	12,0	17,8	13,2	16,7	17,8	14,8
	Průměr hodnot [μm]	11,266		14,8195		14,916		14,922		16,3035	



Profil Pp

Tabulka 14: Naměřené hodnoty profilu Pp

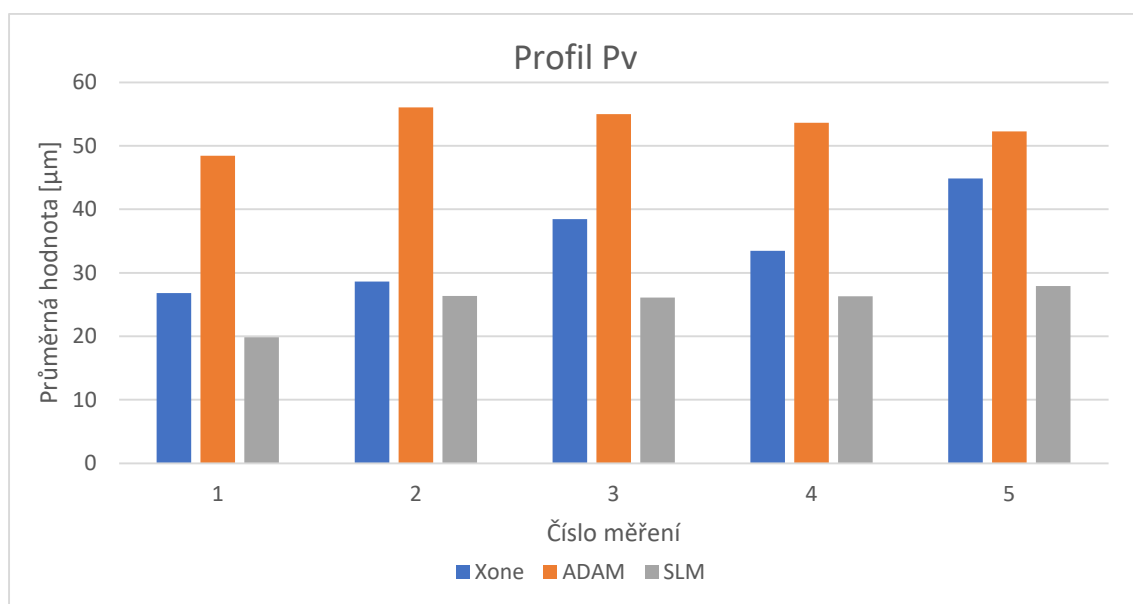
Pp	Vzorek číslo	1		2		3		4		5	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Technologie	Číslo měření	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
	Naměřená hodnota [μm]	30,5	28,8	27,5	29,9	39,5	29,0	34,3	34,5	32,8	53,9
Xone	Průměr hodnot [μm]	29,627		28,6815		34,264		34,394		43,3275	
ADAM	Naměřená hodnota [μm]	41,5	39,8	59,0	59,6	40,1	46,3	47,0	51,2	54,5	40,1
	Průměr hodnot [μm]	40,6265		59,3055		43,19		49,0815		47,2975	
SLM	Naměřená hodnota [μm]	21,9	25,0	31,6	28,5	23,5	25,0	27,2	36,6	35,8	24,0
	Průměr hodnot [μm]	23,4575		30,074		24,2755		31,8615		29,9045	



Profil Pv

Tabulka 15: Naměřené hodnoty profilu Pv

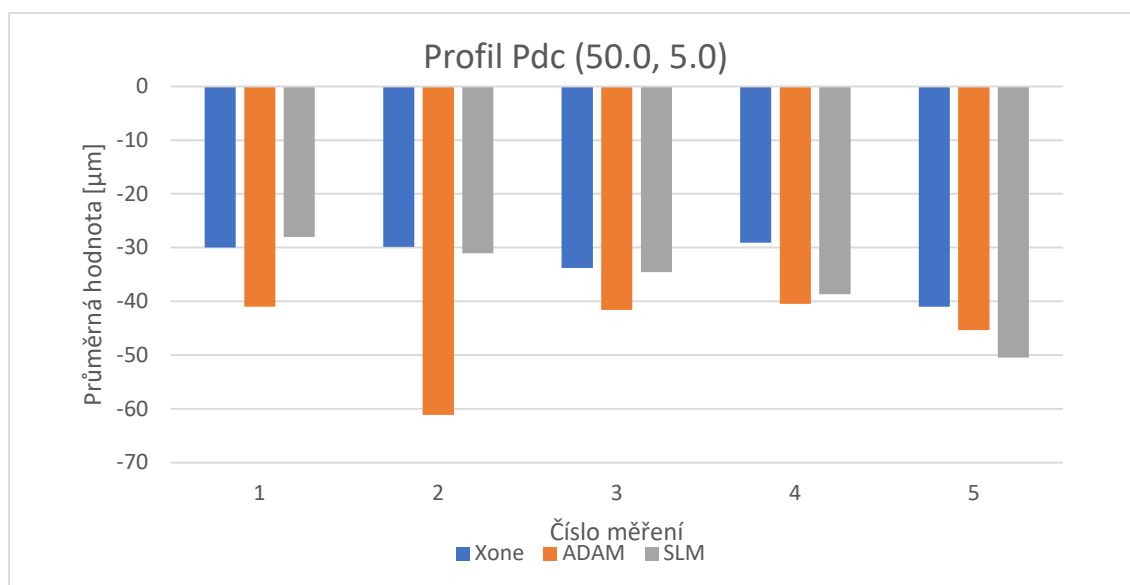
Pv	Vzorek číslo	1		2		3		4		5	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Xone	Naměřená hodnota [μm]	30,0	23,7	28,2	29,0	44,3	32,6	39,1	27,8	33,0	56,8
	Průměr hodnot [μm]	26,8285		28,6075		38,456		33,4735		44,8855	
ADAM	Naměřená hodnota [μm]	46,4	50,5	61,1	51,1	56,5	53,4	50,4	56,9	54,4	50,2
	Průměr hodnot [μm]	48,4335		56,0835		54,9925		53,619		52,259	
SLM	Naměřená hodnota [μm]	22,0	17,7	27,8	24,9	24,4	27,8	24,2	28,5	26,3	29,6
	Průměr hodnot [μm]	19,8515		26,338		26,111		26,3305		27,933	



Profil Pdc

Tabulka 16: Naměřené hodnoty profilu Pdc

Pdc	Vzorek číslo	1		2		3		4		5	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Xone	Naměřená hodnota [μm]	-32,6	-27,4	-29,7	-30,0	-38,8	-28,9	-29,7	-28,5	-29,3	-52,7
	Průměr hodnot [μm]	-30,0105		-29,8465		-33,8275		-29,091		-41,037	
ADAM	Naměřená hodnota [μm]	-40,9	-41,2	-64,6	-57,8	-41,6	-41,6	-37,6	-43,3	-52,0	-38,7
	Průměr hodnot [μm]	-41,036		-61,1895		-41,6125		-40,454		-45,352	
SLM	Naměřená hodnota [μm]	-23,9	-32,1	-37,9	-24,2	-21,4	-47,7	-25,0	-52,4	-70,8	-30,1
	Průměr hodnot [μm]	-28,047		-31,0405		-34,5715		-38,669		-50,487	



7. Závěr

Zaměřením této práce bylo srovnat mezi sebou technologie 3D kovového tisku, primárně posoudit, zda nově se vyvíjející se technologie vyrovnají již zavedené technologii. Jako nově se vyvíjející technologie byli brány technologie Binder Jetting a Bound Powder Extrusion, jako zavedená technologie pak Selective Laser Melting. V úvodní části je tedy popsán význam 3D tisku a shrnutí jeho vzniku. Následně je v teoretické části popsáno, na jakém principu jednotlivé technologie pracují, čímž si můžeme vytvořit představu, co mezi sebou bude porovnáváno. Zároveň je věnován prostor pro upozornění na důležité parametry prášků a zacházení s nimi. V podkapitole úpravy po tisku se práce zaměřuje na popis technologie Laser Shock Peening, která jak se z různých experimentů ukazuje, má výrazný vliv na potlačování porozity a zlepšování mechanických vlastností 3D tištěných kovových dílů. Jedna kapitola byla věnována rozsáhlým oblastem použití 3D tisku a názorně ukazuje, proč je důležité se této problematice nadále věnovat, jelikož je vidět, že má mnoho praktických uplatnění a určitě se bude v budoucnu nadále rozvíjet. Je zde popsáno použití v designu, strojírenství a medicíně.

Praktická část začíná představením a srovnáním tiskáren použitých pro tisk zkušebních vzorků, kde každá má své výhody a nevýhody, ale tiskárna pro technologii Binder Jetting se dle parametrů výrobce zdá být nejlepší, pro její příznivou cenu, která je až o polovinu menší než použitá tiskárna technologie SLM, tiskovou komorou téměř dvakrát větší než technologie SLM a BPE a rychlostí tisku až 10 000 cm³/hod, zatímco SLM disponuje pouze 20 cm³/hod. SLM ale na rozdíl od BJ nevyžaduje sintrování, které zabere přibližně 15 hodin. Dále jsou popsány vzorky, které byli pro experiment použity, hlavně pak z jakého jsou materiálu, jelikož materiál je důležitým faktorem v uplatnění aditivní výroby. Použity byli tyčinky z nerezové oceli průměru 5 mm a délky 100 mm. V naměřených výsledcích byl popsán postup měření a následného vyhodnocení naměřených hodnot. Měření proběhlo na počítačové tomografii Zeiss Metrotom 1500 a vyhodnocení v softwaru VGStudio Max 3.2.2.. Z naměřených hodnot jsme odpozorovali, že technologie BJ

(XOne) vykazovala velmi nízkou porozitu, v řádu setin procenta z objemu tělesa (průměrně 0,0524 %) přesně jak výrobce uvádí (výrobce tvrdí 97 % celistvost), naproti tomu více zavedená technologie SLM byla výrazně více porézní, a to hlavně v kritické oblasti těsně pod povrchem, procento porozity z objemu tělesa se pohybovalo až o jeden řád výše než technologie BJ (průměr 0,4961 %). V tomto aspektu je tedy technologie BJ lepší než doposud nejrozšířenější technologie SLM. Technologii BPE (ADAM) jsme na porozitu nezkoumali kvůli její duté vnitřní struktuře a nespojitosti jednotlivých vrstev zkreslující měření. Problémem pro technologii BJ byla však přesnost výtisků, jelikož ze tří srovnávaných technologií její úchyly tvaru a rozměru dosahovali nejvyšších hodnot. Průměrná úchylka BJ byla -0,29 mm, tedy vzorky byly asi o 6% menší než jejich jmenovitá hodnota 5 mm. U válcovitosti byla též největší úchylka ze tří technologií a to průměrně 0,52 mm. Za vinu by se mohla považovat chyba lidského faktoru, ať už ve špatně nastavené poloze tisku, která byla horizontální, nebo pro špatně vypočtený součinitel smrštění při sintraci po tisku. Nedostatky v přesnosti tvaru u druhé technologie vyžadující sintraci, technologie ADAM, nebyli nijak znatelné, s průměrnou úchylnou rozměru -0,02 mm od jmenovité hodnoty vyšla ze tří zkoumaných technologií nejlépe. V měření válcovitosti byla s průměrnou úchylnou 0,34 mm mezi technologiemi BJ a SLM. Poslední technologie SLM, která produkuje hotové díly bez nutnosti jejich post processingu vykazovala také vysokou přesnost rozměrů, průměrná úchylka +0,07 mm ukazuje, že SLM vytvořilo vzorky o malinko větší než jmenovitá hodnota, i přesto s přesností větší než BJ, avšak menší než ADAM. V měření profilu povrchu vyšla nejhůře technologie ADAM. Její hodnoty vzdálenosti nejvyššího výstupku od nejhlubší prohlubně byly nad 100 μm (v rozmezí 120-211), zatímco SLM se pohybovalo v hodnotách 80 – 110 μm , stejně tak i technologie BJ. Střední aritmetická úchylka profilu povrchu se tak u technologie ADAM pohybovala v rozmezí 25 – 30 μm , zatímco SLM 11 – 16 μm a BJ také 11 – 16 μm . Nově se vyvíjející se technologie tedy v některých oblastech, jako porozita, překonávají dosud zavedenou technologii SLM, zatímco v oblasti přesnosti rozměrů se jí vyrovnala jen jedna z novinek, a to ADAM. Lze tedy říci, že nové technologie se vyrovnají zavedené technologii a v blízké budoucnosti ji pravděpodobně s trochou vývoje předčí.

Seznamy

Seznam použitých zkratek

UV	Ultraviolet
CAD	Computer-Aided Design
STL	Steriolitografie (formát souboru)
FDM	Fused Deposition Modeling
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
SLS	Selective Laser Sintering
SLA	Steriolitografie (technologie)
PBF	Powder Bed Fusion
SLM	Selective Laser Melting
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
BJ	Bindej Jetting
PM	Prášková Metalurgie
DED	Direct Energy Deposition
ISO	Internation Organization for Standardization
ASTM	the American Society for Testing and Materials
BPE	Bound Powder Extrusion
ADAM	Atomic Diffusion Additive Manufacturing
AM	Additive Manufacturing
AT	Aditivní Technologie
CT	Computer Tomography
PMMA	Poly(methyl methacrylate)
CAM	Computer Aided Manufacturing
EDM	Electrical discharge machining
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
WLAM	Wire Laser Additive Manufacturing
EBF	Electron Beam freeform Fabrication

DIPLOMOVÁ PRÁCE

C	Carbon – uhlík
Mn	Mangan
Si	Křemín
P	Fosfor
S	Síra
Cr	Chrom
Mo	Molybden
Ni	Nikl
N	Dusík
Cu	Měď
YAG	Yttrium Aluminium Garnet
LSP	Laser Shock Peening

Seznam použitých symbolů

<i>mm</i>	milimetr
<i>W</i>	Watt
<i>g</i>	gram
<i>min</i>	minuta
<i>°C</i>	Stupeň celsia
<i>sec</i>	Vteřina
<i>kg</i>	kilogram
<i>m</i>	metr
<i>μm</i>	mikrometr
<i>L</i>	Litr
<i>hod</i>	hodina
<i>cm³</i>	centimetr krychlový
<i>V</i>	Volt
<i>A</i>	Amper
<i>Hz</i>	Hertz
<i>Vx</i>	Voxel

$^{\circ}F$	stupeň Fahrenheita
m^3	metr krychlový
GPa	Giga Pascal
K	Kelvin
J	Joul
Ω	Ohm
HB	tvrdost Brinella
HBW	tvrdost Brinella s použitím wolframové kuličky
HBS	tvrdost Brinella s použitím ocelové kuličky
px	pixel
N	Newton

Seznam obrázků

Obrázek 1: Carl Deckard vynálezce prvního SLS stroje [5]	9
Obrázek 2: SLA-1, první 3D tiskárna na světě [2]	10
Obrázek 3: Rozdělení technologií 3D tisku kovu	11
Obrázek 4: Princip technologie DMLS [6]	14
Obrázek 5: Schéma stroje pro technologii EBM [8]	15
Obrázek 6: Schéma procesu tisku technologií Binder Jetting [7].....	17
Obrázek 7: Koaxiální a mimoosový podavač prášku technologie DED [1]	18
Obrázek 8: Proces výroby metodou Atomic Diffusion Additive Manufacturing [11]	20
Obrázek 9: Vliv rozložení velkých a malých částic prášku v celku [30]	21
Obrázek 10: Procentuální rozložení různých velikostí částic v jemném a hrubém prášku pro technologii DED [41]	22
Obrázek 11: Procentuální zastoupení různě velkých částic v jemném a hrubém prášku pro technologii BJ [42]	22
Obrázek 12: Různé rozložení velikosti částic u tří prášků se stejným rozpětím velikosti částic pro technologii SLM [43]	22
Obrázek 13: Rozdělení dokončovacích metod úprav povrchu [21]	25
Obrázek 14: Princip procesu Laser Shock Peening [39]	26
Obrázek 15: Ukázka vlivu technologie LSP na porozitu [40]	27
Obrázek 16: 3D reprezentace redukce porozity před a po použití LSP na 3D tištěný vzorek [40]	28
Obrázek 17: Vertikální řez CT skenu horizontálně tištěného vzorku před a po aplikaci LSP [40]	29

Obrázek 18: 3D reprezentace horizontálně tištěného vzorku s viditelným rozdílem v drsnosti povrchu před a po aplikaci LSP [40]	29
Obrázek 19: Systém s přepážkami a systém spirálových kanálků [21][22].....	34
Obrázek 20: Porovnání běžných chladících kanálků s těmi konformními [24]	35
Obrázek 21: Porovnání průběhu pracovní teploty pro přímé a konformní chladící kanálky [23]	35
Obrázek 22: Ukázka dílu s povrchovým rámem [31]	36
Obrázek 23: Ukázka dutého dílu s vnitřní strukturou ve tvaru nepravidelné plástve [32]	37
Obrázek 24: Vzory různých tvarů vnitřní výplně odlehčeného dílu [27].....	37
Obrázek 25: Příklad topologicky optimalizovaného dílu [29]	38
Obrázek 26: Příklad cranioplastiky lebky za použití aditivních technologií [37]	40
Obrázek 27: Delta-TT Cup, první implantovaná kloubní náhrada společnosti LimaCorporation [30]	41
Obrázek 28: Rozdělení Rapid Tooling [20]	42
Obrázek 29: Renishaw AM 400 [14].....	45
Obrázek 30: ExOne DesktopMetal X160 Pro [16]	47
Obrázek 31: Systém Markforged Metal X 2nd gen, zleva: sintrovací pec, 3D tiskárna, mycí stanice. [17]	48
Obrázek 32: Vzorky technologie XOne a 3D model vzorku.....	50
Obrázek 33: Makroskopické snímky vzorků, shora SLM, XOne, ADAM	51
Obrázek 34: Pevnost v tahu oceli 316L v závislosti na orientaci dílu při výrobě metodou 3D tisku SLM [14]	54
Obrázek 35: Počítačová tomografie ZEISS METROTOM 1500 [35]	55
Obrázek 36: Měřicí stanice Marsurf LD 120.....	56
Obrázek 37: Výsledný obraz skenování při nastavení dle doporučení výrobce.....	58
Obrázek 38: Naskenované vzorky dle nastavení z tabulky 7. Číslováno z levého horního obrázku jako číslo měření 1	59
Obrázek 39: Nastavené parametry pro vyhodnocení porozity.....	61
Obrázek 40: Graf zobrazující oblast vyfiltrovaných hodnot, na ose Y velikost voxelu, na ose X pravděpodobnost.....	61
Obrázek 41: Řez 3D modelem skenu vzorku z technologie ADAM. U vzorku je viditelná odlehčená vnitřní struktura, kvůli které se vzorek nehodil na vyhodnocení porozity	62
Obrázek 42: Příčný a podélný řez skenem technologie ADAM pro zobrazení duté vnitřní struktury a výrazné delaminace vrstev.....	62
Obrázek 43: Snímek z technologie SLM s vyznačenou pórovitostí v blízkosti povrchu	64

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Obrázek 44: Snímek z technologie XOne s viditelnou delaminací vrstvy.....	64
Obrázek 45: Protokol vygenerovaný softwarem Marwin	67

Zdroje

- [1] DONG-GYU, Ang. *Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art* [online] [cit. 2023-04-02] Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40684-020-00302-7>
- [2] Ph.D NOORANI, Rafiq. *3D Printing Technology, Applications and Selection*, Taylor and Francis Group CRC Press, 2021, 293 s. ISBN 9780367781965
- [3] *Types of 3D printing in metal* [online] [cit. 2023-04-16] Dostupné z: <https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-metals/metal-additive-manufacturing-introduction/types-of-3d-printing-metal>
- [4] *EBM (Electron Beam Melting)* [online] [cit. 2023-04-20] Dostupné z: <https://www.cotu.cz/en/blog/122/ebm-electron-beam-melting>
- [5] Profil uživatele Carl Deckard, [online] Dostupné z: <https://www.linkedin.com/in/carl-deckard-337ab855>
- [6] *Direct Metal Laser Sintering* [online] [cit. 2023-05-06] Dostupné z: <https://www.one3d.cz/technologie/detail/direct-metal-laser-sintering-dmls/>
- [7] S. MIRZABABAEI, S. PASEBANI, *A Review on Binder Jet Additive Manufacturing of 316L Stainless Steel*, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2019.
- [8] M. GALATI, *A literature review of powder-based electron beam melting focusing on numerical simulations*, Volume 19, 2018.
- [9] DONG-GYU, Anh. *Direct Metal Additive Manufacturing Processes and Their Sustainable Applications for Green Technology: A Review*, INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-GREEN TECHNOLOGY, 2016, 15 s. ISSN 2198-0810

- [10] *The Markforged Metal Additive Manufacturing Process* [online] [cit. 2023-05-17] Dostupné z: <https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-metals/metal-additive-manufacturing-introduction/metal-additive-manufacturing-process>
- [11] P. MINETOLA, M. GALATI, *Analysis of Density, Roughness, and Accuracy of the Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) Process for Metal Parts*, 2019 [online] Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/24/4122>
- [12] *316 Stainless Steel (UNS S31600) – Composition, Properties, and Uses*, 2022 [online] Dostupné z: <https://blog.thepipingmart.com/grades/316-stainless-steel-material-properties-composition-uses/>
- [13] *316L vs 316H Stainless Steel – What’s the Difference*, 2023 [online] Dostupné z: <https://blog.thepipingmart.com/metals/316l-vs-316h-stainless-steel-whats-the-difference/>
- [14] *AM 400 additive manufacturing system*, Datasheet, [online] Dostupné z: https://tech-labs.com/sites/default/files/H-5800-3137-01-A_EN-07%20-%20AM400%20Data%20Sheet%20-%20Media.pdf
- [15] *ExOne Introduces New X1 160PRO Metal 3D Printer for High-Volume Production of Quality Parts* [online] [cit. 2023-06-20] Dostupné z: <https://www.exone.com/en-US/Resources/News/ExOne-X1-160PRO>
- [16] *X1 160Pro*, Datasheet, [online] Dostupné z: https://www.multistation.com/voy_content/uploads/sites/4/2020/10/en-2020-data-sheet-x1-160pro.pdf
- [17] *Metal X System*, [online] Dostupné z: <https://markforged.com/3d-printers/metal-x>
- [18] *Metal X (Gen 2)*, Datasheet, [online] Dostupné z: <https://s3.amazonaws.com/mf.product.doc.images/Datasheets/2021-docs-folder/F-PR-5000-gen2.pdf>

- [19] GIBSON, Ian; ROSEN, David. *Additive Manufacturing Technologies*, Springer Dordrecht, 2015, 498 s., ISBN 978-1-4939-2112-6
- [20] CHUA, Chee Kai; LEONG, Kah Fai. *3D Printing and Additive Manufacturing*, World Scientific Publishing, 2015, 456 s., ISBN 978-9814571401
- [21] *Injection Mold Cooling Design*, Upmold, Dec 2017, [online] [cit. 2023-07-07] Dostupné z: <https://upmold.com/injection-mold-cooling-design/>
- [22] ZAREI, Ahmad; SEDDIGHI, Sadegh; ELAHI, Sohail, *Experimental investigation of the heat transfer from the helical coil heat exchanger using bubble injection for cold thermal energy storage systém*, Applied Thermal Engineering, 2021, [online] Dostupné z: <https://www.researchgate.net/figure/Geometry-and-dimensions-of-the-different-spiral-coils-and-evaporator-helical-coils-in-fig6-354721083>
- [23] Xu, Xiaorong; SACHS, Emanuel; ALLEN, Samuel; CIMA, Michael, *Designing Conformal Cooling Channels for Tooling*, MIT, 1998, 146 s. [online] [cit. 2023-07-07] Dostupné z: <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/73436/1998-14-Xu.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [24] *Conformal Cooling*, Linearams, [online] [cit. 2023-07-07] Dostupné z: <https://www.linearams.com/conformal-cooling/>
- [25] *Additive technologies compared*, [online] [cit. 2023-07-07] Dostupné z: <https://www.hubs.com/guides/metal-3d-printing/>
- [26] FENG, Jiawei; FU, Jianzhong; *A review of the design methods of complex topology structures for 3D printing*, Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art, 2018, [online] [cit. 2023-07-09] Dostupné z: <https://vciba.springeropen.com/articles/10.1186/s42492-018-0004-3>
- [27] LUBOMBO, Christian; *Effect of infill patterns on the mechanical performance of lightweight 3D printed cellular PLA parts*, Materials today, 2018, [online] [cit. 2023-07-09] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492818301600>

- [28] *Topologická optimalizace a generativní design*, AM Akademie, 2021. [online] [cit. 2023-07-09] Dostupné z: <https://www.one3d.cz/blog-topologicka-optimalizace/>
- [29] *Industrializace 3D tisku – cesta, jak překonat dnešní limity výroby?*, TechSim Engineering, 2020. [online] [cit. 2023-07-09] Dostupné z: <https://www.techsim.cz/blog/55-industrializace-3d-tisku-cesta-jak-prekonat-dnesni-limity-vyroby/>
- [30] HUCK-JONES, Debbie; *Beyond particle size: Exploring the influence of particle shape on metal powder performance*; Metal AM, 2017, [online] [cit. 2023-07-15] Dostupné z: <https://www.metal-am.com/articles/the-influence-of-particle-shape-on-powder-performance-metal-3d-printing/>
- [31] *Showroom aditivní výroby společnosti TRUMPF*, TRUMPF, [online] [cit. 2023-17-07] Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/spolecnost/profil/trumpf-ve-svete/showroomy/showroom-aditivni-vyroby/
- [32] WILLIAMS, Chris; *The top 7 design tips for 3D metal printing*, Star Rapid, 2017, [online] [cit. 2023-17-07] Dostupné z: <https://www.starrapid.com/blog/the-top-7-design-tips-for-3d-metal-printing/>
- [33] *How much does a metal 3D printer cost?*, Foxdoc, 2022, [online] [cit. 2023-17-07] Dostupné z: <https://facfox.com/docs/kb/how-much-does-a-metal-3d-printer-cost>
- [34] *Renishaw AM400*, 3D natives, [online] [cit. 2023-17-07] Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/3D-compare/en/3d-printers/renishaw-am-400/>
- [35] *Zeiss Metrotom 1500 Datasheet*, Carl Zeiss, [online] [cit. 2023-17-07] Dostupné z: https://www.msiviking.com/documents/ZEISS/CT/METROTOM_2018.pdf
- [36] *MarSurf UD 120 / LD 120 Two in One datasheet*, Mahr, [online] [cit. 2023-17-07] Dostupné z: <https://swissinstruments.com/wp-content/uploads/2018/07/files/marsurf-ud120-ld120-en.pdf>

- [37] SAPKAL, Pranav; *3D printed FTP cranioplasty – A case study*; LUCID Implants, 2023, [online] [cit. 2023-17-07] Dostupné z: <https://blog.lucidimplants.com/3d-printed-ftp-cranioplasty-a-case-study-a7d77d9cdb2e>
- [38] MÁDL, Jan; *Technologie obrábění*, Praha. Vydavatelství ČVUT, 2000, 246 s., ISBN 80-01-02091-6.
- [39] *Laser shock peening*; Matca [online] [cit. 2023-17-07] Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/laserove-technologie/laser-shock-peening/>
- [41] XUEPENG, Jiang; *Effects of Particle Size Distribution and Impact Speed on Printing Quality in Direct Energy Deposition*, Iowa State University, 2022, [online] [cit. 2023-17-07] Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213846322000967?ref=pdf_download&fr=RR-9&rr=7e917393ac21b38b
- [42] MANOTHAM, Supalak; *Effect of particle size on mechanical properties of alumina ceramic processed by photosensitive binder jetting with powder spattering technique*, Journal of the European Ceramic Society, 2022, [online] [cit. 2023-17-07] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221921008918>
- [43] BAITIMEROV, Rustam; *Influence of Powder Characteristics on Processability of AlSi12 Alloy Fabricated by Selective Laser Melting*, Materials, 2018, [online] [cit. 2023-17-07] Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/325013584_Influence_of_Powder_Characteristics_on_Processability_of_AlSi12_Alloy_Fabricated_by_Selective_Laser_Melting