

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Možnosti monitorování 3D tisku kovů

Autor: **Matěj ROTT**

Vedoucí práce: **Ing. Ivana ZETKOVÁ, Ph.D.**

Akademický rok 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Matěj ROTT**
Osobní číslo: **S18B0361P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Název tématu: **Možnosti monitorování 3D tisku kovů**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Porovnání a zhodnocení metod monitorování
4. Zhodnocení
5. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- **Elektro optical systems, monitoring for 3D printing systems [online]. [cit. 2018-11-15]. Dostupný z WWW: <https://www.eos.info/software/monitoring-software/meltpool-monitoring>**
- **CONCEPT Laser GmbH, quality management [online]. [cit. 2018-11-15]. Dostupný z WWW: <https://www.concept-laser.de/en/products/quality-management.html>**
- **University of Nottingham, tomography for additive manufacturing review [online]. [cit. 2018-11-15]. Dostupný z WWW: <http://eprints.nottingham.ac.uk/33856/3/X-ray%20computed%20tomography%20for%20additive%20manufacture%20a%20rev>**
- **All3DP, metal 3D printer guide [online]. [cit. 2018-11-15]. Dostupný z WWW: <https://all3dp.com/1/3d-metal-3d-printer-metal-3d-printing/>**
- **Materialise, 3D printing technologies at Materialise [online]. [cit. 2018-11-15]. Dostupný z WWW: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/3d-printing-technology/>**
- **3DPrinting.com, 3D metal printing [online]. [cit. 2018-11-15]. Dostupný z WWW: <https://3dprinting.com/metal/>**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ivana Zetková, Ph.D.**
Regionální technologický institut

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Martin Nozar, Ph.D.**
Regionální technologický institut

Datum zadání bakalářské práce: **16. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2019**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 18. října 2018

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou/diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce, paní Ing. Ivaně Zetkové Ph.D. za pomoc a podporu při zpracování této práce. Děkuji také své rodině a přátelům, kteří svojí podporou činili překonávání překážek při studiu a psaní této práce snazším.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Rott	Jméno Matěj	
STUDIJNÍ OBOR	B2301 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetková Ph.D.	Jméno Ivana	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Možnosti monitorování 3D tisku kovů		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2018/19
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	---------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	49	TEXTOVÁ ČÁST	49	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Bakalářská práce se zaměřuje na rozbor metod a principů monitorování procesu 3D tisku kovů technologií DMLS. Práce obsahuje řešení z oblasti technologií 3D tisku, popis technologií 3D tisku kovů, monitorovacích metod a monitorovacích systémů. Možnosti monitorovacích systémů jsou srovnány a bodově a slovně vyhodnoceny.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">3D tisk, DMLS, monitorování, termokamera, fotodiody, monitorovací systémy</p>

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Rott	Name Matěj	
FIELD OF STUDY	B2301 „Manufacturing processes – Technology of Metal Cutting“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetková Ph.D.	Name Ivana	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Monitoring methods of metal 3D printing		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2018/19
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	---------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	49	TEXT PART	49	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The bachelor thesis focuses on the analysis of methods and principles regarding monitoring of the process of 3D metal printing by DMLS technology. The thesis includes research in the field of 3D printing technologies, description of 3D metal printing technologies, monitoring methods and monitoring systems. The options of monitoring systems are compared and then evaluated in terms of points and verbal commentary.
KEY WORDS	3D printing, DMLS, monitoring, thermocamera, photodiode, monitoring systems

Obsah

1	Úvod.....	10
1.1	Cíl práce.....	11
1.2	Použité metody	11
1.3	Popis 3D tisku.....	12
1.4	Vývoj a historie	13
1.1	Nekovový 3D tisk.....	15
1.1.1	FDM (FFF).....	15
1.1.2	SLA	15
1.1.3	PolyJet.....	16
1.1.4	SLS.....	17
1.1.5	LOM.....	17
1.2	3D tisk kovů.....	19
1.2.1	FDM	19
1.2.2	DED.....	20
1.2.3	Inkjet/Binder jetting	20
1.2.4	PBF.....	21
1.2.5	Technologie DMLS.....	21
2	Rozbor současného stavu	24
2.1	Význam monitorování procesu tisku	24
2.2	Rozdělení monitorovacích procesů	25
2.2.1	Monitorování před procesem tisku.....	25
2.2.2	Monitorování během procesu tisku (in-situ)	25
2.2.3	Monitorování po procesu tisku.....	25
2.3	Metody monitorování	27
2.3.1	Tomografie	27
2.3.2	Měření akustického signálu.....	29
2.3.3	Měření termokamerou	30
2.3.4	Měření světelných emisí meltpoolu	32
2.3.5	Měření pomocí termočlánků	33
3	Porovnání a zhodnocení metod monitorování.....	34
3.1	EOS - EOSTATE monitoring suite	35
3.1.1	EOSTATE Exposure OT.....	35
3.1.2	EOSTATE Meltpool	37
3.1.3	EOSTATE System	37

3.1.4	EOSTATE Powder Bed	38
3.2	Concept Laser – Quality Management	39
3.2.1	QM Meltpool 3D	39
3.2.2	Ostatní Nástroje QM	40
3.3	SLM Solutions – Additive.Quality	42
3.3.1	Melt Pool Monitoring	42
3.3.2	Laser Power Monitoring	42
3.3.3	Layer Control System	42
4	Zhodnocení monitorovacích systémů	43
5	Závěr	45
6	Použitá literatura	46

1 Úvod

Pojem 3D tisk je v několika posledních letech skloňován čím dál častěji a začal být populárním tématem snad ve všech sférách společnosti. Má své fanoušky mezi mladými nadšenci, kteří díky němu mohou dávat tvar svým kreativním fantaziím, stejně tak jako mezi vedoucími osobnostmi ve strojírenských firmách, které ho využívají k zefektivňování výroby. Od domácí výroby figurek superhrdinů po profesionální prototyping se dnes již s aditivními technologiemi můžeme setkat téměř kdekoliv. Dokonce i v oblastech, které zdánlivě na první pohled nemohou mít s 3D tiskem mnoho společného.

Vzhledem k tomu, jak nová technologie 3D tisku je, (počátky datujeme k letům 1980 resp. 1986 viz níže) a jakým se stala trendem, se nelze divit stále vzrůstající poptávce po kvalitě procesu 3D tisku. Ať už v domácím nebo profesionálním nasazení, uživatel tiskárny stále touží po kvalitnějším, přesnějším a rychlejším zpracování. Pojem kvality však můžeme chápat z mnoha úhlů pohledu s ohledem na to, k čemu a jakou přesně technologii využíváme. Proto bude za účelem lepšího pochopení a možnosti uvádění pojmů do souvislostí rešeršní část práce pojata spíše obecně. Pro vymezení cílů, které má tato práce za úkol naplnit, se však omezíme pouze na specifické principy a metody pro zadané téma relevantní.

V oblasti 3D tisku kovů se setkáváme s úskalími, z nichž mnohými nebylo doposud nutné se u jiných obráběcích metod zabývat. Ty často brání výrobcům součástí z aditivní technologie v aplikacích, které by pro ně byly lukrativní. Jedním z velkých problémů je opakovatelnost procesu. Zaručení kvality materiálu, ze kterého je součást vyrobena, je principiálně výrazně složitější, než u dílů vyrobených subtraktivními metodami, což pochopitelně hraje významnou roli v rozhodování konstruktéra, zda pro svou součást zvolit právě 3D tisk. Právě proto je podstatné dokázat proces 3D tisku podrobně sledovat a popisovat. To otevírá dveře samostatnému obsáhlému tématu „monitorování procesu tisku“.

1.1 Cíl práce

Zde se dostáváme k hlavní problematice této práce. Způsobů monitorování je totiž nespočetné množství a jejich podoba závisí jen na představivosti řešitele. Které z metod mají praktický význam, se často ukáže až po navržení a provedení monitorovacího experimentu. Výrobci i uživatelé tiskáren vyvíjí stále nové způsoby, jak proces tisku monitorovat z mnoha různých pohledů. Některé z těchto metod už dokonce našly uplatnění u nových modelů tiskáren. Reálně je však oblast monitorování stále rostoucí množinou řešení, která přináší různé výsledky. Cílem této práce je vybrat z těch známých ty, které jsou pro kvalitu a využitelnost dílů relevantní a pokusit se vyjasnit jejich přínos pro zdokonalování procesů 3D tisku. Zároveň budou analyzovány nejnovější monitorovací systémy několika dodavatelů 3D tiskáren na kov a rozebrány jejich možnosti, výhody a nedostatky. Shromážděné informace pak budou konfrontovány s aktuální problematikou projektu RTI PLUS, kterým se v současné době zabývá Regionální Technologický Institut (RTI) při Fakultě Strojní na Západočeské Univerzitě v Plzni, a který řeší možnosti aplikace a vývoje monitorovacích systémů za účelem zdokonalování procesu.

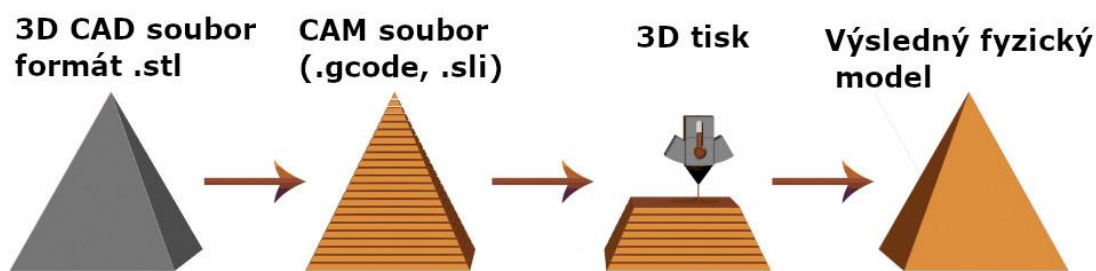
Experimentální část práce má pak za cíl zjistit možnosti monitorovacích metod v současné době dostupných a realizovatelných Laboratoří Experimentálního Obrábění (LEO) na RTI a zhodnotit jejich přínos dalšímu výzkumu.

1.2 Použité metody

Bakalářská práce je zpracována formou rešerše. Ta zahrne objasnění problematiky 3D tisku obecně za cílem vyjasnění rozdílů mezi tiskem kovů a jiných materiálů a jeho přínosu pro moderní průmysl. Dále bude popsána škála monitorovacích metod, jejich principů, výhod a nedostatků. V návaznosti na jednotlivé popsané metody budou analyzovány komerční monitorovací systémy od různých výrobců. Závěrem rešeršní části bude zhodnocení monitorovacích metod a systematické srovnání analyzovaných monitorovacích systémů. Jako zdroj informací budou využívány převážně internetové články vědecké, nebo odborné, dále informace od výrobců a osobní konzultace s jejich zástupci.

1.3 Popis 3D tisku

3D tisk je způsob výroby objektů řízený výpočetním systémem. Podobně jako CNC stroje využívá převodu dat z počítače do prostoru reálného světa. Ty však pracují na principu odebrání materiálu. Z celistvého bloku materiálu se operacemi, jako jsou soustružení, frézování, vrtání, řezání nebo například vyjiskřování, ubírají jeho části, dokud nám nezbyde jen díl požadovaných tvarů, vlastností a povrchu. Tyto metody můžeme souhrnně nazvat jako metody subtraktivní. [1] Metoda 3D tisku je naproti tomu označována jako aditivní. To znamená, že materiál není odebrán, nýbrž přidáván. Materiál je stavěn a spojován jen v požadovaných místech. Podobně jako se při stavbě domu skládá zeď z cihel, staví se na sebe kontinuálním procesem vrstvy zpracovaného vstupního materiálu, dokud není vytištěn celý objem požadovaného objektu.



Obr. 1.1 Znárodnění postupu výroby aditivní technologií

Tento způsob výroby s sebou nese mnoho výhod. Odpadá zde například nutnost programování velkého množství úkonů obráběcího stroje, které často vyžaduje speciální kvalifikaci pracovníka a může být v případě složitých součástí finančně nákladné. Pracovní úkon je zde totiž obecně jen jeden – přidání materiálu v dané souřadnici. S tím tedy odpadají i některé nároky například na pohony či na složitost konstrukce strojů. Naproti tomu je třeba počítat s nutností pravidelné kalibrace a údržby stroje důkladným čištěním jednotlivých komponent nebo například s náklady na postprocessing. [2]

Další, a možná nejvíce zásadní výhodou technologií 3D tisku, je možnost tisknutí struktur a dutin, které nelze vyrobit konvenčními obráběcími metodami. Je tak možné v jinak plném materiálu vytvořit tvarově složité kanály nebo odlehčené struktury, a to v jednom kuse bez nutnosti svařování jednotlivých částí. Toho se hojně využívá například pro výrobu chladících kanálů vysokotlakých vstřikovacích forem, [3] díky čemuž lze dosáhnout rovnoměrnějšího a efektivnějšího odvodu tepla z formy. Mřížovité výplně dílu zase šetří množství spotřebovaného materiálu a využívají se ke snížení hmotnosti při zachování dostatečné pevnosti a tuhosti, což nabízí široké uplatnění ve výrobě součástí, které svojí hmotností ovlivňují dynamické namáhání hřídel, jako jsou frézovací hlavy nebo turbínové lopatky.

V neposlední řadě nese 3D tisk výhodu snadné výroby prototypů, případně malých sérií výrobků. Výroba prototypů pro následnou optimalizaci produktů je totiž často spojena s nákladnou přípravou výroby, například výrobou forem. Pokud však vývojář disponuje 3D tiskárnou, může si prototypů za zlomek ceny i času vytisknout množství dle potřeby přímo v kanceláři a bez dalších výdajů na pracovní sílu a nákladný materiál. Prototyp je navíc po vytištění často rovnou připraven k použití. [4]

Technologií 3D tisku je však již velké množství a každá metoda má jiné výhody a úskalí. Právě podle využití by měl uživatel volit mez jednotlivými metodami tu, která bude pro jeho potřeby nejvhodnější.

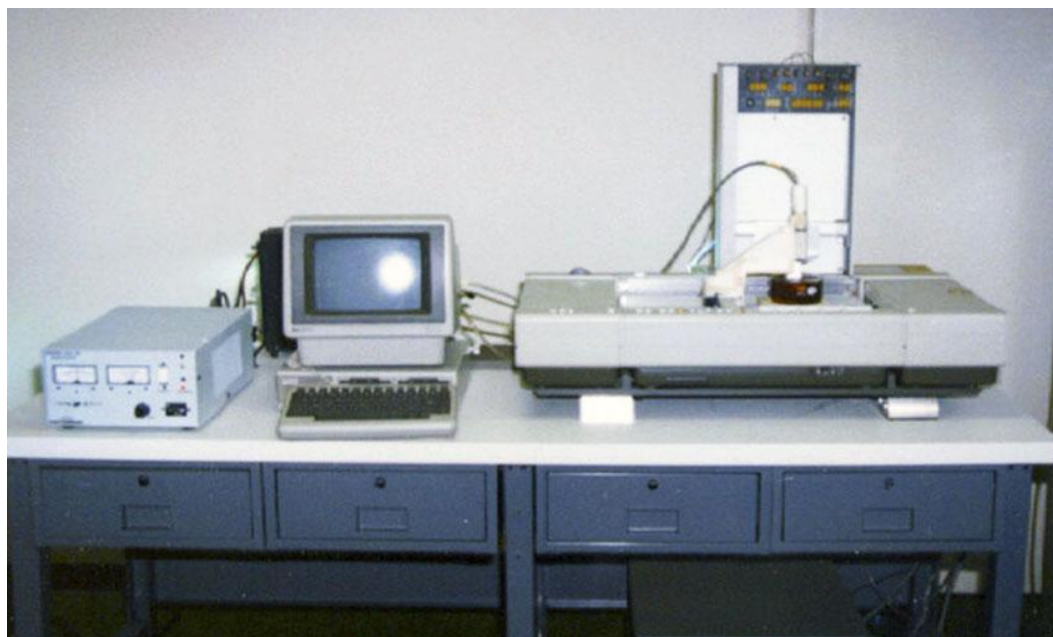
1.4 Vývoj a historie

Počátky 3D tisku datujeme do osmdesátých let minulého století. Tehdy však svět tento pojem ještě neznal. Technologie se nejčastěji souhrnně označovala jako Rapid Prototyping, protože první komerční tiskárny měly sloužit primárně k výrobě prototypových dílů. Název 3D tisk se začal dostávat do povědomí uživatelů až s nastupujícím trendem využívání technologie k výrobě finálních součástí. Přestože je však tento název nejrozšířenější, vývojáři i uživatelé raději používají označení „aditivní výroba“, které je výstižnější a částečně i vysvětluje, které technologie do této oblasti spadají.

První pokus o patentování technologie vyrábění objektu po vrstvách udělal v roce 1980 Dr. Hideo Kodama (Nagoya – Japonsko), který poprvé přišel s myšlenkou vytvrzovat vrstvy pryskyřice pomocí UV světla. Naneštěstí pro něj se mu nepodařilo splnit požadavky na uznání patentu a k dalšímu komerčnímu vývoji už se nedostal. Vydal však publikace, ve kterých popsal své základní myšlenky a hlavní principy metody, které se později začalo říkat stereolitografie.

Podobně neúspěšná byla v uznání svého patentu tříčlenná skupina francouzských vědců Jean-Claude André, Alain le Méhauté a Olivier de Witte, kteří si patentovou přihlášku podali v roce 1986 (krátce před Chuckem Hallem). Jejich vývoj stereolitografie byl zaměřen na konkrétní aplikaci, kdy původně zkoumali vlastnosti fraktálního objektu a chtěli pouze najít přístroj, který by jim ho pomohl vytvořit. Přestože měli poměrně jasnou představu o jejich projektu, Francouzský národní ústav pro vědecký výzkum jejich patent nepřijal, čímž jim upřel prostředky k dalšímu vývoji a nakonec se museli projektu vzdát. Název stereolitografie už po nich však zůstal.

Prvním, komu se podařilo metodu úspěšně patentovat, byl v roce 1986 Chuck Hall (Denver – Colorado). Ten tehdy pracoval ve firmě, která se zabývala potahováním nábytku vrstvou pryskyřice vytvrzovanou UV zářením. Jeho zájem o zefektivnění práce rychlejší výrobou prototypů ho přivedla k myšlence stavby předmětů po vrstvách vytvrzované pryskyřice a tím se posléze dostal k myšlence stereolitografie. Následně založil firmu 3D Systems a v roce 1988 představil první komerční přístroj. Dnes je držitelem více než devadesáti patentů v oblasti 3D tisku a otcem společnosti, která je dodnes jednou z vlajkových lodí aditivních technologií. [5], [6], [13]



Obr. 1.2 První zařízení založené na principu SLA

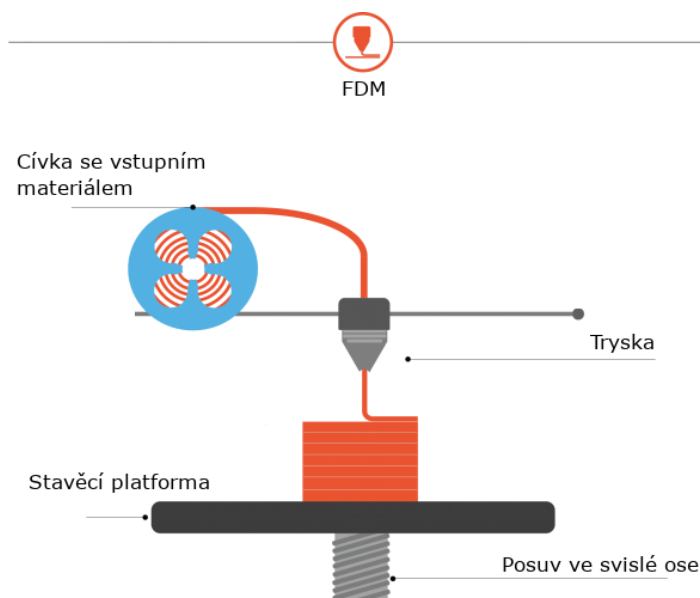
1.1 Nekovový 3D tisk

Není pochyb o tom, že v oblasti strojírenství a průmyslu obecně je tisk kovů velkým lákadlem. Nutno však říci, že obecně stále vede populární tisk plastový. [7] Je tomu tak převážně z důvodu cenové dostupnosti a uživatelské jednoduchosti. S klesající cenou stolních tiskáren rychle roste zájem pořizovat tiskárny do škol jako učební pomůcku nebo do kanceláří či domácností k tisku drobností. Vzhledem k významu nekovového 3D tisku pro dnešní společnost je zde krátce uveden popis jeho nejpoužívanějších metod.

1.1.1 FDM (FFF)

FDM neboli Fused Deposition Modelling (FFF – Fused Filament Fabrication) je registrovanou značkou firmy Stratasys. V dnešní době je nejpoužívanější a tedy i nejznámější formou 3D tisku. Materiál ve formě struny je přiváděn do tiskové hlavy (extruder), kde je nataven a pomocí trysky postupně nanášen do jednotlivých vrstev podle nahraného 3D modelu. Po nanesení každé vrstvy se hlava s tryskou přesune o vrstvu výš a tiskne dál. Výhodou je možnost používat různé výchozí materiály. Nejpoužívanějším materiálem je ABS (Acrylonitril butadien styren), ze kterého se vyrábí například známé kostičky LEGO. Kvalitnější, ale dražší možností jsou struny ze známého plastu PET (Polyethylentereftalát). Relativní novinkou je pak materiál PLA (kyselina polyléčná), který se vyrábí z kukuřičného škrobu a tudíž biologicky odbouratelný, bohužel však nemůže předchozím dvěma konkurovat v mechanických vlastnostech. [7]

Tisk je v základu z principu jednobarevný, lze však využít možnosti tisknout více tryskami najednou a vytvářet tak vícebarevné objekty. Více trysek se také využívá pro tisk podpůrných struktur z materiálů, které jsou rozpustné (např. v acetonu nebo ve vodě) a tudíž jsou výrazně snazší na odstranění. V současné době se také pracuje na možnosti tisknout jednou tryskou více materiálů – střídat je. [8]



Obr. 1.3 Princip metody FDM

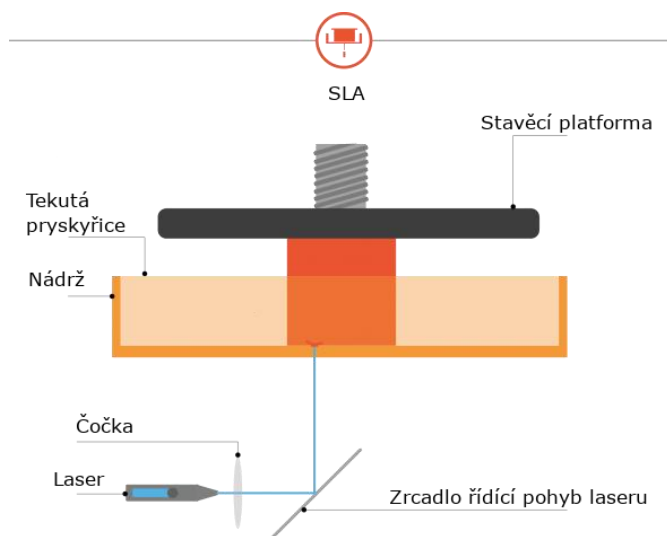
1.1.2 SLA

SLA neboli Stereolitografie je vůbec nejstarší technologií 3D tisku. Je založena na laserovém procesu, který pracuje s tekutou pryskyřicí citlivou na světlo. Reakcí na působení laserem pryskyřice tvrdne v požadovaných místech tak, že tvoří kompaktní tuhounou vrstvu materiálu,

opět podle virtuálního 3D modelu. Tisková platforma je ponořena do nádrže do výšky jedné vrstvy nad prosklené dno, skrz které následně působí laser. S tiskem každé další vrstvy se platforma postupně vynořuje a vytahuje s sebou výsledný objekt. [9]

Technologie SLA se vyznačuje vysokou přesností tisku a dobrou kvalitou povrchu. Nevýhodou je hlavně postupná degradace materiálu, obzvláště při aplikacích, kdy je výrobek vystavován UV záření. Postprocessing obnáší kromě odstraňování podpor také dodatečné vytvrzování vystavením modelu intenzivnímu světelnému záření ve speciálním zařízení.

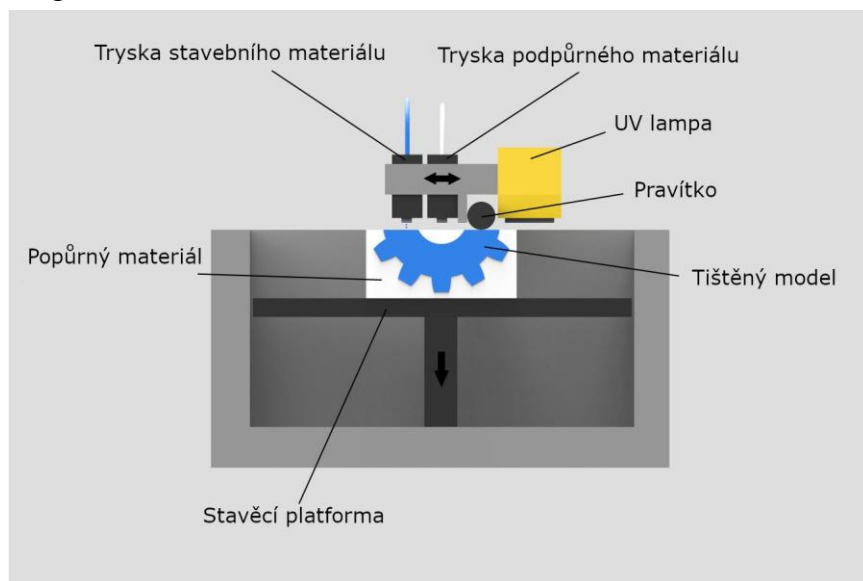
Základem materiálů jsou epoxidové světlocitlivé pryskyřice upravované podle požadovaných finálních vlastností. Podle použití se již dnes výrobci specializují na produkci speciálních pryskyřic například se zvýšenou pevností, pružností nebo teplotní odolností. Pryskyřice jsou k dostání v barevných, matných i průhledných variantách. [10]



Obr. 1.4 Princip metody SLA (<https://druckwege.de/en/home-en/technology>)

1.1.3 PolyJet

PolyJet 3D tisk je ze všech technologií nejpodobnější klasickému 2D tisku na papír. Tisková hlava však namísto inkoustu tryská kapičky fotopolymeru, který je následně vytvrzován pomocí UV světla podobně jako u metody SLA. Zatímco při tisku nad nádrží u metody SLA je možnost použít vždy jen jeden materiál, zde je možné tryskat více různých kapalných materiálů, což má mnohé uplatnění, nejčastěji pro tisk snadno odstranitelných podpor. Ty lze poté společně s přebytečnou nevytvrzenou pryskyřicí odstranit tryskáním za minimálního zásahu pracovníkem, což zvyšuje potenciál automatizace celého procesu. Objekty jsou navíc připravené k použití přímo po dokončení tisku, bez nutnosti dodatečného vytvrzování. [11]

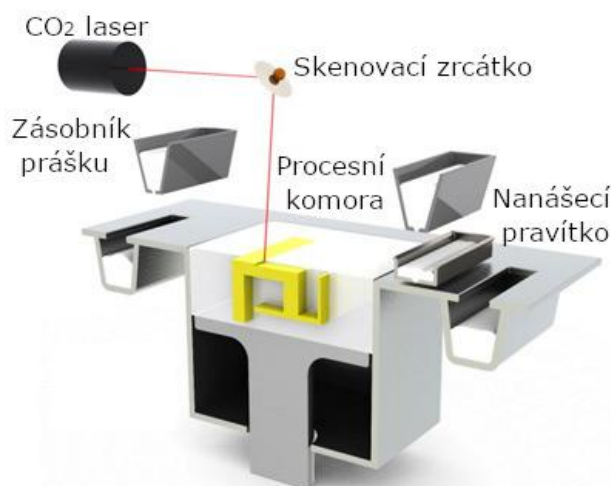


Obr. 1.5 Princip metody PolyJet

1.1.4 SLS

SLS neboli Selective Laser Sintering je metoda tisku, kde vstupním materiálem je prášek, nejčastěji plastový (nylon, polyamid). Ten je v kompaktní vrstvě nanesen na platformu a následně pomocí laseru spečen v požadovaných místech vrstvy. Princip opět vychází z počítačového 3D modelu, který je rozřezán po vrstvách a tyto vrstvy jsou následně jako souřadnice pro pohyb laseru posílány do řídicího systému stroje.

Výrobky jsou typické vysokou přesností a výbornými mechanickými vlastnostmi, v porovnání s ostatními metodami nekovového tisku, a to právě díky důkladnému spečení prášku s předchozími vrstvami. Do jisté míry se tím eliminuje vliv anizotropie v rámci jednotlivých vrstev, a díky tomu lze výrobky přímo používat v nejrůznějších aplikacích. S oblibou jsou využívány například v automobilovém průmyslu. [12]

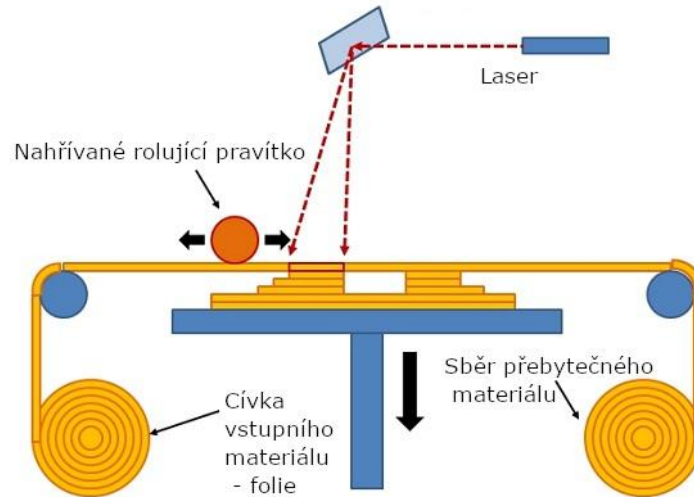


Obr. 1.6 Princip metody SLS

1.1.5 LOM

3D tisk výrobků, které mají primárně vizuální účel, tzn. figurky, umělecké předměty apod. se potýká s nutností součástky dodatečně barvit. Toto přirozeně vzbuzuje zájem o možnost tisknout v barvách. To dnes již umožňuje mimo jiných například technologie LOM

(Laminated Object manufacturing). Ta pracuje na principu lepení mechanicky řezaných vrstev. Požadované plochy jsou nařezány z barevného papíru nebo folie, poskládány a nalepeny na vrstvu předchozí. Náročné je zde ale odstraňování přebytečného papíru a také nelze počítat se spolehlivostí, pokud jde o mechanickou únosnost výrobku. [13]



Obr. 1.7 Princip metody LOM

Jak již bylo řečeno, popularita nekovového 3D tisku stále roste a jeho rozvoj je v současné době nejrychlejší. Výrobci intenzivně vylepšují své současné tiskárny, stejně tak jako vymýšlí zcela nové způsoby jak 3D tisk realizovat. Takto intenzivně se měnící obor tedy nelze obsáhnout kompletně takto na několika stránkách. Souhrn výše budiž tedy spíše přehledem a ukázkou toho, že 3D tisk má mnoho tváří a podob, a nové získává každým dnem.

1.2 3D tisk kovů

3D tisk kovových součástí přináší zcela nové možnosti v oblasti konstrukce. S pomocí aditivní výroby lze navrhnout a zkonstruovat díly, které nelze vyrobit žádnou jinou obráběcí metodou. Zvláště ve strojírenství hrají významnou roli například 3D tištěné odlehčené struktury nebo konformní chladicí kanály. Díky aditivním technologiím lze o součástech přemýšlet zcela novým způsobem a není pochyb, že právě kovovému tisku se v budoucnu bude věnovat ještě velmi významná část vývoje.

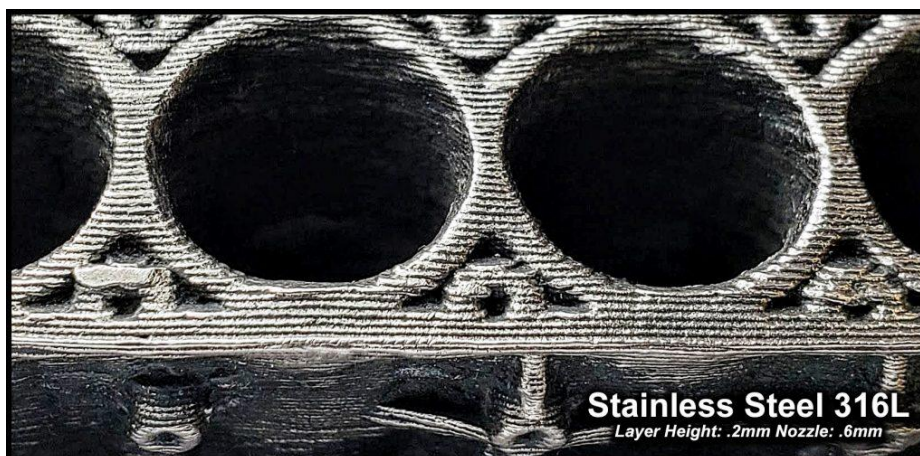
Stejně jako pro nekovové materiály i pro kovy platí, že metod jejich tisknutí stále přibývá. Mnoho technologií se navíc vzájemně prolíná v použitých principech, tudíž jejich striktní oddělení není snadné. Roli v nejasném dělení také hraje fakt nejasného názvosloví a ohraničení toho, v čem se vlastně jednotlivé metody liší. Přestože se tato práce bude věnovat převážně technologii DMLS, je zde pro snazší orientaci v problematice popsáno několik dalších významných zástupců technologií kovového 3D tisku.

V souvislosti s tisknutím kovů je záhodno zmínit firmy a společnosti, které se v dnešní době tiskem nejintenzivněji zabývají a jsou vzhledem ke svému know-how a patentům zároveň vedoucími hráči v oblasti vývoje kovového 3D tisku a výroby tiskových zařízení. Těmi jsou firmy EOS GmbH, SLM Solutions AG, GE Concept Laser, 3D Systems, Renishaw s.r.o. nebo Arcam EMB. [14]

Přestože jednotliví výrobci využívají různých technologií tisku, mnoho aspektů vývoje mají společných, a proto se vývoj a výzkum v této oblasti dotýká v podstatě všech z nich.

1.2.1 FDM

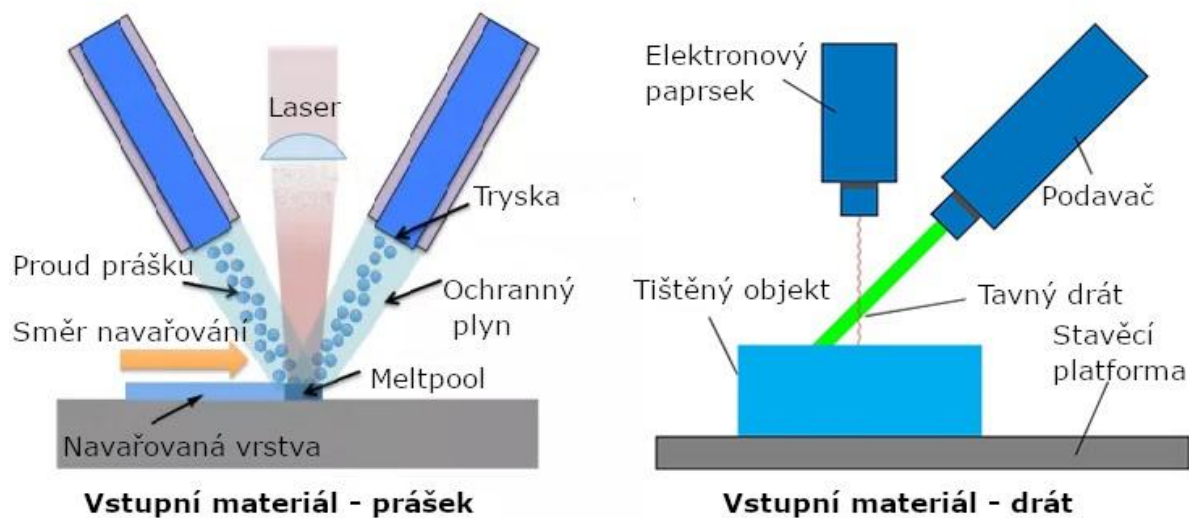
Nejrozšířenější princip 3D tisku si vyžádal odezvu na touhu spotřebitelů touto metodou tisknout také kovové materiály. Tou byl vývoj materiálu s obsahem 80% kovového prášku spojeného termoplastickým pojivem. Ten dává možnost tisku i na tiskárnách na plast, a to naprosto stejným způsobem. Vyrobený díl je pak v rámci postprocessingu vypalován a spékán v peci, čímž se zbaví termoplastického pojiva a speče jednotlivé částice kovu do finální kovové součásti. Svým charakterem je tato metoda dnes spotřebním uživatelům nejbližší. Nutno však myslet na zásadní nedostatky, kterými jsou vedle pórovitosti a nedostatečnému spékání ve velkých objemech součástí hlavně výrazné smrštění způsobené úbytkem plastového pojiva. Pro mnoho aplikací se však tato metoda osvědčila, zvláště u symetrických a tenkostěnných výrobků. [15]



Obr. 1.8 Kovová součást vyrobená metodou FDM - před postprocessingem

1.2.2 DED

DED je zkratkou pro Direct Energy Deposition, je někdy také označován jako DLF (Direct Laser Fabrication). Jde o způsob výroby objektu, při kterém je nejčastěji drát nebo prášek výchozího materiálu tryskou směřován do požadovaného místa přičemž je taven pomocí laseru. Přírodním příbuzným této metody je laserové svařování. Kromě spojování a opravování součástí však dává možnost součást celou vyrobit pomocí postupného navařování. Zařízení pro navařování se dnes využívá samostatně nebo jako součást obráběcích center, která výrobek upraví na požadované rozměry s žádoucím povrchem. Využívá se hojně k opravě namáhaných součástí, jako jsou například turbínové lopatky nebo vojenská zařízení. Přednostmi této metody je možnost tisku výrobků o velkých rozměrech a možnost navařování přímo na již hotovou součást v několika osách. [16]



Obr. 1.9 Princip metody DED pro různé formy vstupního materiálu

1.2.3 Inkjet/Binder jetting

Dvě sobě velmi podobné metody se které se staly mezi výrobci součástí oblíbenými zástupci kovového 3D tisku. V obou případech jde o spojování kovového prášku pomocí tekutého pojidla (lepidla) nanášeného tiskovou hlavou podobnou těm, které známe z 2D inkoustových tiskáren. Rozdíl v metodách je ten, že zatímco Inkjet tiskne přímo směs lepidla a kovového prášku, Binder jetting tiskne pouze lepidlo do předem připravené vrstvy. Již během procesu tisku probíhá průběžné vytvrzování jednotlivých vrstev. Postprocessing takto vyrobených dílů je vzhledem k nutnosti spékání a dalšího vytvrzování poměrně zdlouhavý. Přesto se však v dnešní době jedná o levnější metody tisku. [17]



Obr. 1.10 Tryska tiskové hlavy pro Binder Jetting

1.2.4 PBF

Skupina Powder Bed Fusion metod zahrnuje hned několik technologií, které se však vyznačují mnoha společnými znaky. Společným principem je spékání kovového prášku pomocí paprsku laserového, nebo elektronového. Proces tisku probíhá analogicky k nejstarší metodě SLA, namísto pryskyřice je však použit kovový prášek a laser nevytvrzuje působením UV záření ale natavováním vstupního materiálu. Schématem odpovídá metodě SLM, která se svojí podstatou liší pouze použitím kovu namísto plastu. Patří sem metody SLM (Selective Laser Melting), DMLS (Direct Metal Laser Sintering) a EBM (Electron Beam Melting). PBF metody si drží své postavení mezi ostatními především díky vysoké přesnosti a skvělým mechanickým vlastnostem výrobků. Nevýhodou je menší uživatelská dostupnost vzhledem k složitosti a cenám tiskových zařízení. Nacházejí své uplatnění v automobilovém, lékařském nebo leteckém průmyslu. [18]

1.2.5 Technologie DMLS

Technologie, ke které se bude vztahovat další obsah této práce, je právě DMLS. Jiným názvem SLM (Selective Laser Melting) nebo LPBF (Laser Powder Bed Fusion). Proces tisku pomocí této metody je možné zjednodušeně popsat v několika krocích. Na kovovou platformu je ze zásobníku pomocí pravítka (recoater) nanášena vrstva jemného kovového prášku o přesné tloušťce. Následně počítačem řízený laser umístěný nad tiskovým prostorem taví a spéká prášek v předem definovaných plochách do jedné výsledné vrstvy o tvaru řezu budoucího dílu. Po spečení (sintrování) všech ploch v dané vrstvě se celá platforma posune směrem dolů o vzdálenost rovnou tloušťce nanášené vrstvy prášku. Následné nanesení další vrstvy uzavírá procesní cyklus. Díl je tedy „vrstven“ pomocí spečených řezů směrem zdola nahoru. Samotnému procesu tisku předchází příprava počítačového modelu a jeho úprava pro řídicí systém stroje pomocí softwaru, nastavení procesních parametrů, příprava vstupního materiálu, kalibrace tiskové platformy a tlakování tiskové komory ochranným plynem. Po vytištění pak následuje postprocessing, který obnáší odříznutí dílu od platformy, začištění podpurných struktur, úprava povrchů a tepelné zpracování – žíhání, vytvrzování, apod. [19], [20]

Škála materiálů, které lze tisknout se liší pro různé modely strojů. Obecné podmínky pro použitelnost materiálu jsou však výrobnost kovového prášku a kapacita stroje ve smyslu schopnosti materiál kvalitně spékat. Podle použité metody výroby prášku i podle typu materiálu jsou vytvářeny prášky o různé hrubosti a různém tvaru zrn, kdy pro proces DMLS jsou obecně vhodné kulovité částice o průměru 15-45 μ m. Možnosti výběru materiálu jsou

však již dnes poměrně široké. K dnešnímu dni lze zpracovávat například nástrojové oceli, slitiny hliníku, mědi, kobaltu, niklu, titanu, nerezové oceli, drahé kovy nebo některé superslitiny. Tisk probíhá v ochranné atmosféře, nejčastěji argonu nebo dusíku, dle tištěného materiálu. [3]

Kvalita a přesnost výsledného výrobku jsou přímo ovlivňovány vstupními parametry laseru. Poměr dodávaného výkonu a skenovací rychlosti hrají významnou roli v míře dodané energie do konkrétního místa, což ovlivňuje míru protavení, tepelný gradient a tím výslednou strukturu. Procesní parametry společně s velikostí laserového spotu do $\text{Ø}100\mu\text{m}$ [21] určují mimo jiné i procesní čas. Parametry zároveň nejsou konstantní po celou dobu tisku. Charakter procesu dává za vznik anomáliím ve specifických oblastech vyráběných dílů, jako jsou tenké stěny nebo okraje součástí. Pro kvalitní výtisk těchto problematických míst je třeba upravovat procesní parametry tak, aby byla zajištěna co nejlepší výsledná homogenita a kvalita struktury v objemu i na povrchu. [22]

Pro představu dosahovaných hodnot při výrobě dílů technologií DMLS je v následující tabulce uveden přehled materiálových specifikací pro materiál EOS MaragingSteel MS1 – martenzitickou ocel dodávanou firmou EOS.

Tab. 1 Výňatek z materiálového listu - EOS MaragingSteel MS1

Vlastnosti materiálu EOS MaragingSteel MS1		
Dosahovaná rozměrová přesnost		
Malé díly (< 80 x 80 mm)	±20 μm	
Velké díly	±50 μm	
Smrštění po tepelném vytvrzení	0,08 %	
Minimální tloušťka stěny	0,3 – 0,4 mm	
Dosahovaná drsnost povrchu		
Pro vrstvu 20 μm parametry „Surface“*	R _a 4μm R _z 20μm	
Po pískování	R _a 4 – 6,5 μm R _z 20 – 50 μm	
Po leštění	R _z < 0,5 μm	
Dosahovaná rychlost tisku		
Pro vrstvu 50 μm parametry „Speed“*	5,5 mm ³ /s (19,8 mm ³ /h)	
Mechanické vlastnosti při 20 °C	Po vytištění	Po vytvrzení
Mez pevnosti v tahu		
Ve směru osy x/y	1100 ± 100 MPa	2050 ± 100 MPa
Ve směru osy z		
Mez kluzu Rp0,2		
Ve směru osy x/y	1050 ± 100 MPa	1990 ± 100 MPa
Ve směru osy z	1000 ± 100 MPa	
Modul pružnosti		
Ve směru osy x/y	162 ± 25 GPa	180 ± 20 GPa
Ve směru osy z	150 ± 20 GPa	
Tvrdość	33 – 37 HRC	50 – 56 HRC
Vrubová houževnatost	45 ± 10 J	11 ± 4 J

*Pro různé požadavky na proces tisku (rychlost/kvalita) má systém možnost volit mezi několika sadami parametrů. „Speed“ upřednostňuje rychlost tisku, „Surface“ kvalitu povrchu. Střední cestou poskytující přijatelný poměr mezi kvalitou a rychlostí je sada parametrů „Performance“. [22], [23]

2 Rozbor současného stavu

2.1 Význam monitorování procesu tisku

S rozvojem aditivních technologií směřuje kovový tisk čím dál tím blíže k zařazení do sériové výroby, což vede k většímu zájmu o stabilitu procesů vzhledem k jejich opakovatelnosti. Monitorovací systémy umožňují shromažďovat a komplexně analyzovat data o procesech tisku a tím poskytují náhled na výslednou kvalitu tisknutých dílů. To poskytuje široké možnosti v oblasti zajišťování jakosti a vývoje.

V oblasti zajišťování kvality umožňuje monitorování vyhledat anomálie v tiskovém procesu, které se pak mohou projevit defektem v součásti. Zároveň lze monitorovat parametry vstupního materiálu a hodnot, a tím předpovídat pravděpodobnost výskytu vad. Kvalitu součásti lze pak hodnotit na základě množství a charakteru zjištěných anomálií. Vzhledem k dosavadní neexistenci norem v této oblasti je pak na uživateli resp. spotřebiteli, jakým způsobem si kvalitativní standardy nastaví. Odpadají tak tedy částečně náklady spojené s náročným zjišťováním kvality již vyrobeného dílu. Čím více monitorovacích způsobů do procesu zahrneme, tím komplexnější bude pohled na výslednou kvalitu. Zároveň umožňují lépe zpracovávat a uchovávat procesní dokumentaci, která zvláště v sériové výrobě s vysokými nároky na kvalitu výrazně nabývá na důležitosti.

Charakter technologie 3D tisku implikuje objevování nových procesních dějů. Monitorováním stavebního procesu může být sledován vliv změny vstupních parametrů. Systémy pak tyto závislosti dokážou sledovat s vysokou frekvencí a přesností a analyzovat je pro použití v oblasti vývoje procesů. [24]

Jedním z nejdůležitějších činitelů je teplota. Teplotní historie tisknutých dílů ovlivňuje výsledné pnutí v materiálu, stejně tak jako jeho strukturu. Analýza teplotních průběhů je přitom velice komplexní, jelikož materiál je zahříván lokálně, nerovnoměrně a s velmi vysokými teplotními gradienty. Vliv má zároveň možnost odvádění tepelné energie, tedy ukotvení dílů do platformy, tloušťky stěn nebo časy mezi jednotlivými cykly tepelného ovlivňování. Vzhledem k velkému množství faktorů, které průběhy teplot v materiálu ovlivňují je právě monitorování tepla velmi důležité z hlediska reprodukovatelnosti a spolehlivosti procesu. [25]

Dalšími ději, které je třeba dokázat sledovat jsou například tiskové podmínky, vstupy hmotné i informační nebo způsoby záznamu života vyráběné součásti. Monitorování mnoha z těchto činitelů je specifické pro technologii 3D tisku kovů a tudíž vyžaduje zvláštní výzkum monitorovacích metod, které budou spolehlivě poskytovat všechny potřebné informace o procesu umožňující jeho stabilizaci, spolehlivost a tím k jeho rozšiřování do širšího okruhu aplikací.

2.2 Rozdělení monitorovacích procesů

Množství monitorovacích procesů, ve smyslu sledování a kontroly jednotlivých výrobních etap, můžeme rozdělit z časového hlediska podle jednotlivých životních fází výrobku, ve kterých jsou metody aplikovány. Výslednou kvalitu totiž ovlivňují faktory působící nejen během procesu tisku, ale i před i po jeho realizaci. Jednotlivé monitorovací metody tedy lze rozdělit na monitorování procesů před tiskem, po tisku a v průběhu tisku

2.2.1 Monitorování před procesem tisku

V počáteční fázi výroby součásti technologií DMLS má nejvýznamnější vliv na výsledné vlastnosti vstupní materiál. Základním předpokladem pro kvalitní výsledek jsou dobré vlastnosti spékaného kovového prášku. Vedle jeho chemického složení se jedná především o velikost a tvar zrn prášku. Ty se odvíjejí zejména od metody jejich výroby. Požadavky na kontrolu pak klade způsob zacházení s práškem před vstupem do výrobního stroje. Proto jsou prášky dodávány výrobcem v zapečetěných barelech, což zamezuje neodborné manipulaci, kontaminaci nežádoucími látkami nebo přístupem vlhkosti.

Dalším ze základních vstupů je počítačový model, který pak řídicí systém stroje zpracovává. Kontrola jeho zpracování a přípravy pro tisk je tedy taktéž zásadní.

Bezprostředně před zahájením procesu je pak zapotřebí nástrojů, které zajistí a zkontrolují připravenost tiskového prostoru pro bezproblémový průběh procesu, tzn. například stav složení a tlak atmosféry v tiskové komoře nebo kalibraci tiskové platformy.

2.2.2 Monitorování během procesu tisku (in-situ)

Děje, které probíhají při samotném procesu tisku, jsou těmi nejvýznamnějšími činiteli pro výslednou kvalitu součásti. Jejich správné sledování, pochopení a ovládání je základním předpokladem pro zvyšování jakosti. Sledovat je proto potřeba stabilitu vstupů, jako je výkon laseru a rychlost skenování, dále proudění plynu, teplotu, nebo množství vstupního prášku.

Vyskytuje se zde také riziko chyby v nanášení vrstvy, ať už ve smyslu nerovnoměrného rozložení prášku po tiskové ploše nebo zaseknutí nanášecího pravítka o tištěný díl. Proto je důležitá také optická kontrola procesu, která umožní ho případně zastavit a chybu opravit.

Specifické podmínky samotného výrobního procesu vyžadují adekvátní přístupy k monitorování a záznamu informací o něm. Proto je právě monitorování během procesu tisku, nebo také „in-situ“, hlavním tématem vývoje většiny výrobců 3D tiskáren na kov. [24]

2.2.3 Monitorování po procesu tisku

Po vyjmutí dílu z tiskové komory vždy následuje postprocessing, který obnáší odřezávání dílu od platformy, ve většině případů pak také odstraňování podpurných struktur a tepelné zpracování. Následné principy monitorování a kontroly kvality se pak prakticky shodují s principy aplikovanými při konvenčních způsobech výroby, jako jsou mechanické zkoušky, metalografické výbrusy či neinvazivní zkoušky, jako jsou magnetická prášková metoda nebo rentgenové snímkování. Právě rentgenová tomografie našla u dílů vyrobených aditivní technologií významné uplatnění, neboť umožňuje vhléd do vnitřních struktur součásti, které jsou optickými metodami nepřístupné a v maximálním využití potenciálu 3D tisku hrají významnou roli.

Jako poslední lze zmínit také potřebu průběžné tvorby a kontroly procesní dokumentace, kterou je opět nutné, vzhledem ke specifčnosti procesu, provádět systematicky a zodpovědně s ohledem na jeho dlouhodobé zkvalitňování.

2.3 Metody monitorování

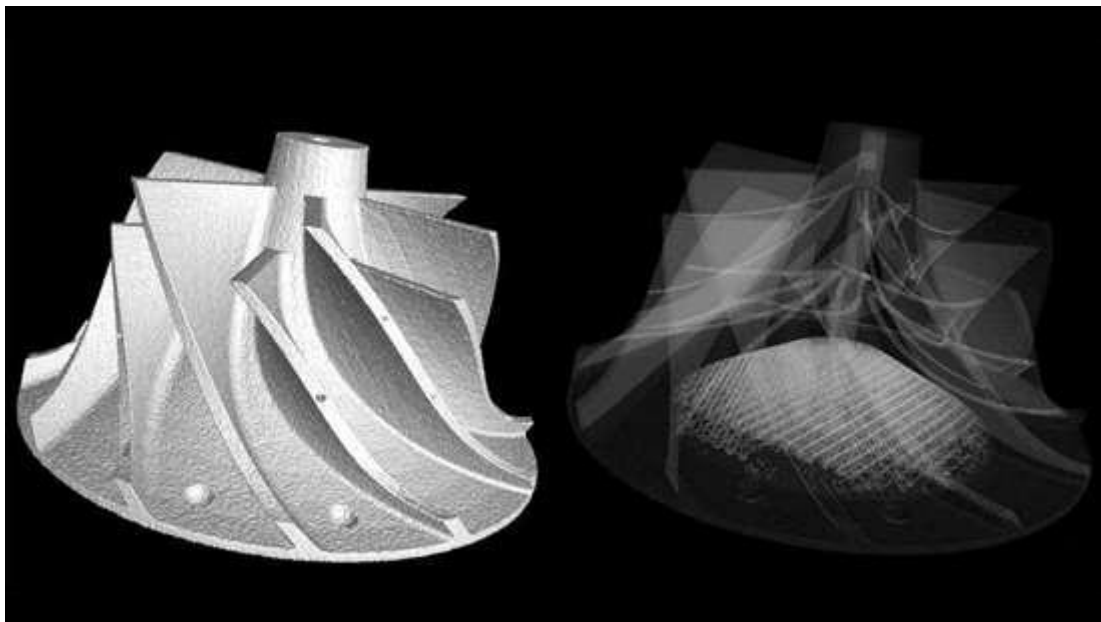
2.3.1 Tomografie

Kompletní vzhled do objemu součásti poskytuje tomografie, neboli v řezech zpětně sestavený počítačový model vytisknutého objektu. Ten by měl dávat co nejpřesnější informaci o tom, jak se vytisknutý díl v objemu liší od předpokládaného, namodelovaného stavu.

Ve fázi kontroly kvality po procesu tisku se tomografický snímek získává nejlépe pomocí magnetického nebo rentgenového CT skenu (micro CT). Ten je ve většině případů schopen objevit nehomogenity v materiálu i rozměrové deviace výtisku. Právě díky svému rozvoji v oblasti strojírenství si snadno našel uplatnění v oblasti aditivních technologií. Jde totiž o spolehlivou neinvazivní metodu kontroly výrobků, jejichž konstrukce se často vyznačuje přítomností dutin a kanálů uzavřených pod povrchem, a které tedy nelze jinými konvenčními metodami sledovat ani měřit. S jeho pomocí lze odhalovat důležité problémy a anomálie ve struktuře, mezi které patří:

- Špatně spečený nebo nespečený prášek v nežádoucích místech, jako např. průchozí kanály
- Vady struktury jako jsou póry, znečištění nebo praskliny
- Rozměrové odchylky od CAD modelu, jako např. změna tloušťky stěn nebo smrštění

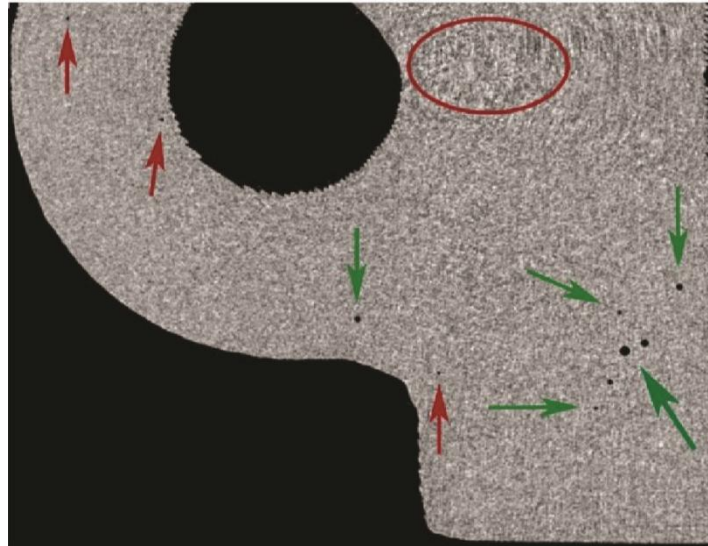
Detail výsledného snímku závisí na použitém rozlišení detektoru. V dnešní době jsou skenovací zařízení schopna dosáhnout přesnosti až 50-100 μm . Přesnost je dále také závislá na velikosti ohniskového spotu, který se pro různé energie rentgenu pohybuje od 80 μm až do 1 μm u nízkoenergetických rentgenů. Tato metoda získávání tomografického snímku velmi rychle se rozvíjícím způsobem výstupní kontroly a v dnešní době již může dosahovat rychlostí skenování v řádech desetin sekundy na díl. Je jednou z nejhojněji používaných metod kontroly kvality dílů vyrobených aditivní technologií.



Obr. 2.1 Zpětně sestavený model získaný rentgenovou tomografií

Použití rentgenového skenování je však omezeno mnoha faktory. Těmi jsou například prostupnost záření materiálem, která klesá s hustotou a dalšími vlastnostmi skenovaného

objektu, nebo velikost rentgenového detektoru pro rozměrné součásti. Lépe se skenují větší předměty s nižší hustotou, stejně tak jako malé objekty o vyšší hustotě. Mezi největší zástupce takto skenovaných součástí patří například letadlové turbínové lopatky, při energii rentgenu 450 kV nebo hliníkové hlavy motorů při energii 225 kV. [26]



Obr. 2.2 Defekty zachycené v objemu materiálu rentgenovou tomografií

Aditivní technologie si však žádá jednodušší a spolehlivější způsob, jak kontrolovat kvalitu výrobku, a to nejlépe již v procesu výroby. To nabízí metoda optické tomografie. Jedná se o snímkování vrstev, které probíhá současně s tiskem součástí. S ohledem na charakter procesu lze opticky sledovat každou vrstvu zvlášť. Pomocí kamery s vysokým rozlišením lze nasbírat snímky z každé zvlášť a z nich v reálném čase stavět tomografický obraz v počítači. Ten lze přímo během procesu porovnávat s výchozím modelem a v případě zjištění vad proces zastavit a případně upravit, což šetří množství spotřebovaného materiálu a především čas ztracený na výrobě zmetku. Tato data lze zjišťovat kontinuálně pro všechny tisknuté díly, což opět šetří čas a náklady rentgenování každého dílu zvlášť.

Vzhledem k úhlovému zkreslení kamery je třeba použití speciálního softwaru pro vyrovnání obrazu každé vrstvy. Tyto programy společně s uživatelským rozhraním i celou monitorovací sestavou obvykle vyvíjí jednotliví výrobci systémů individuálně. Z hlediska zajišťování kvality a vývoje poskytuje kombinace optické a rentgenové tomografie další významný nástroj pro zlepšování. Získané modely lze totiž porovnávat nejen s výchozími daty, ale i mezi sebou, díky čemuž lze sledovat, jaké anomálie a defekty vznikly již během procesu tisku, a které vznikly až posléze, například průběhem chlazení nebo postprocessingem.

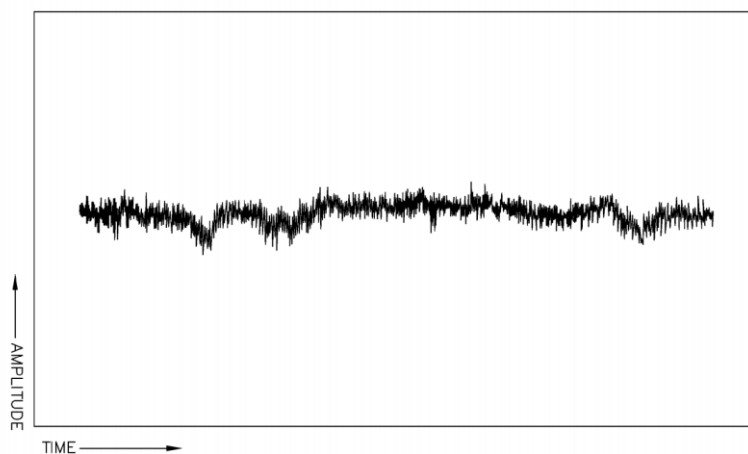
Jako první se systémem optické tomografie přišla na trh firma EOS ve spolupráci s MTU Aero Engines. Jejich cílem při vývoji a testování bylo zjistit, jestli jejich systém EOSTATE OT dokáže odhalit vady materiálu stejně efektivně jako jiné konvenční testovací metody, jako výše zmíněný rentgenový sken nebo destruktivní metody. Úspěchem jejich práce bylo zjištění, že systém zachytil ne stejné, nýbrž dokonce větší procento chyb, než jiné zkušební metody. Zvláště vynikl v identifikaci druhů vad, zvláště pak nedostatečně spečených částic a zbytků prášku. Mohl tedy nahradit předešlé principy kontroly kvality u sériové výroby, čímž ušetřil firmě významnou část nákladů. [26], [27], [28], [36]

2.3.2 Měření akustického signálu

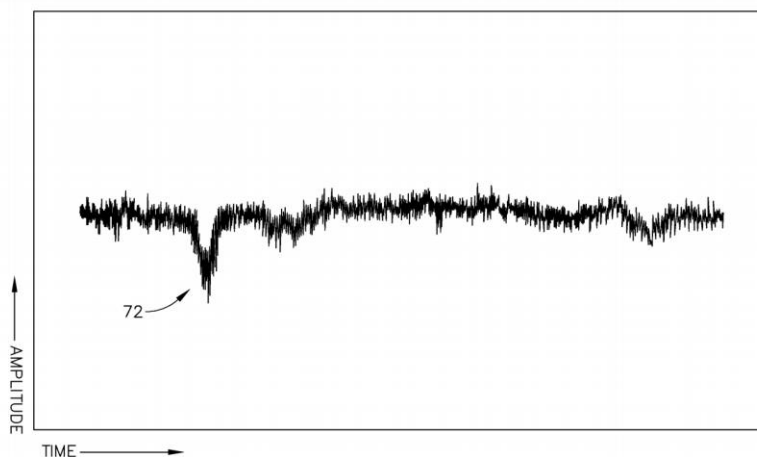
Jako další metoda sledování dějů během tisku se osvědčilo sbírání a vyhodnocování zvukového signálu produkovaného meltpoolem. Akustickým senzorem nainstalovaným do prostoru tiskárny lze sledovat nepravidelnosti zvukového signálu, které jsou v korelaci s nepravidelnostmi v tisknuté vrstvě, které mohou být počátečním místem vzniku vady součásti. Senzor může být umístěn kdekoliv v prostoru tiskárny, kde je možné zvukové vlny zaznamenávat. Jednou z možností je instalace na spodní plochu stavební platformy, která je výhodná pro následné určování aktuální polohy meltpoolu vzhledem k senzoru. Ukazatelem je pak naměřená energie vlnění, bez nutnosti uvažovat frekvenční rozpětí takového vlnění.

Při správném a plynulém procesu spékání lze sledovat relativně hladký průběh měřené energie, bez výraznějších odchylek. Pokud se naopak v místě spékání vytvoří anomálie jako prasklina nebo pór, změní se způsob propagace zvukového signálu prostředím a senzor zaznamená výraznou změnu v průběhu měřené energie.

Monitorovací proces využívá znalosti předpokládaného ideálního akustického profilu pro danou součást jako porovnávací vzorek pro analýzu změn energií. Srovnání může být vyhodnocováno po procesu tisku v rámci kontroly kvality výtisku nebo již během tisku v reálném čase. Pro každý specifický výrobek a každou jeho vrstvu může být v průběhu tisku vyhodnocován základní zvukový profil zvláště a zároveň být přímo porovnáván se zaznamenávanými anomáliemi.



Obr. 2.3 Stabilní průběh akustického signálu



Obr. 2.4 Anomálie v průběhu akustického signálu - signalizace možného defektu

Během tisku a porovnávání akustických profilů může být zároveň také sledována poloha meltpoolu. Tu lze určit díky známé dráze laseru po tiskové ploše. Pomocí synchronizace dat z měření akustického signálu a dat o pohybu laseru, lze každé anomálii zjištěné porovnáním profilů přiřadit přesnou polohu místa, ve kterém k ní došlo. Tato informace je pak velmi významná pro lokalizaci vad uvnitř objemu součásti.

Polohu meltpoolu lze sledovat i dalším způsobem, a to přímo pomocí akustických senzorů. Za předpokladu, že umístíme do prostoru stroje více senzorů najednou a budeme znát jejich přesnou vzájemnou polohu, proces triangulace a trilateralizace dokáže vypočítat pozici zvukového zdroje. Tu je pak možné opět synchronizovat se získaným akustickým profilem.

Pokud je zjištěn defekt již při tisku součásti, lze tisk přerušit a šetřit čas na výrobě vadného dílu. Jinou možností je pokusit se místa defektů opravit zvlášť po vytištění vrstvy. Laserem může být dodatečně zaměřeno místo vady, což zajistí její nápravu. V případě nedopečeného prášku jeho dodatečné spečení, v případě prasklin jejich zaplnění roztaveným materiálem.

Protože jde opět o metodu monitorování in-situ, je teoreticky možné v reálném čase v závislosti na získaných informacích upravovat parametry tisku, jako výkon laseru nebo rychlost skenování, přímo během procesu. Zároveň lze však data použít následně k optimalizaci procesu a dalšímu vývoji. Velký význam hraje také v kontrole kvality, jelikož dokáže v mnoha případech eliminovat nutnost časově náročné kontroly rentgenem po vytištění.

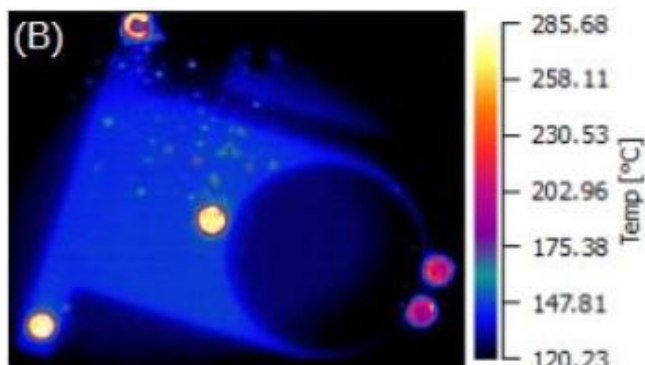
Nevýhodou této metody je náchylnost k chybě způsobenou rušením. V nevhodných podmínkách může být akustický signál snadno zkreslen vnějšími vlivy a tím být znehodnocen. Je proto vhodné použití zvukového těsnění. Další nevýhodou je omezená možnost identifikace typu vady. Odchylka v průběhu energie totiž upozorní na anomálii, avšak z jejího průběhu již nelze zjistit, o jakou anomálii se jedná. [29]

2.3.3 Měření termokamerou

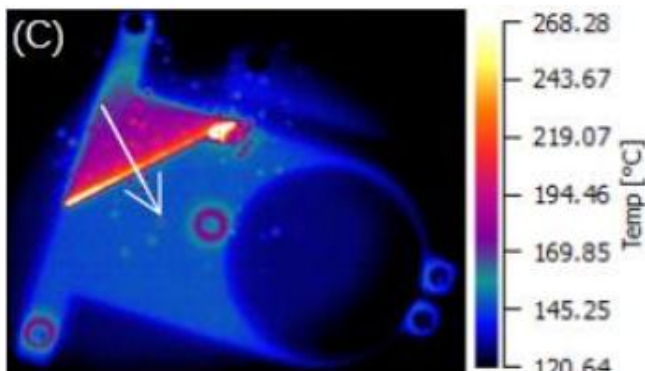
Teplota hraje v procesech 3D tisku kovů velmi významnou roli. Při rychlostech skenování laserem v řádech metrů za sekundu je kovový prášek spékán ve velmi krátkém časovém intervalu. Rychlé průběhy teplot a fázových přeměn v materiálu tedy vnáší do výtisku výrazné zbytkové pnutí, které je jedním ze základních problémů řešených v průběhu postprocessingu. Na teplotě spékání je mimo jiné závislá i výsledná struktura materiálu a plynulý průběh teplot je tedy žádoucí pro zajištění výsledné homogenity součásti. Rozložení teplot v tiskové ploše lze sledovat bezdotykovou metodou měření teploty – pomocí termokamery.

Každý objekt s teplotou vyšší než absolutní nula vyzařuje kmitáním elektronů a jádra určité elektromagnetické záření. Toto záření lze sledovat převážně v infračerveném spektru vlnových délek, přičemž pro měření teplot je významné záření v rozpětí 0,8 μm až 14 μm . Toto záření lze sledovat pomocí termokamery, neboli teplotního senzoru schopného sledovat a zobrazovat spektrum infračerveného záření produkované teplotním zdrojem.

Pro rozložení teplot je zásadních několik faktorů. Jedním z nich je strategie pohybu laseru po tisknuté vrstvě. Skenování laserem tepelně ovlivňuje i okolní oblast, která může mít v daný moment různou teplotu v závislosti na předešlém spékání okolních oblastí. To způsobuje rozdílné gradienty teplot v různých místech tisknuté plochy, což může vést k nestejně rozložení napětí v součásti a posléze tvarovým odchylkám výtisku. Takové rozložení teploty lze sledovat v čase právě termokamerou. Analýza získaných dat je pak důležitá pro další plánování a optimalizaci plánování cest laseru po tiskové ploše. [30]



Obr. 2.5 Rozložení teplot při tisku při vytváření celoobjemových částí výrobku



Obr. 2.6 Rozložení teplot při tisku při vytváření husté mřížky

Při měření je nutno brát v potaz parametry tisku při výběru měřícího zařízení. Vzhledem k rychlosti skenování je nutné použití vysokorychlostní termokamery s dostatečným rozlišením. Zároveň je nutné stanovit rozpětí teplot, ve kterých se měřené hodnoty budou pohybovat.

Pro správnou interpretaci teplot je dále nutné správně stanovit emisivitu tepelného zdroje. Ta závisí na složení materiálu, především na složení povrchu, dále na teplotě, vlnové délce, pozorovacím úhlu a dalších faktorech. Stanovení emisivity pro relevantní měření je však komplikováno změnou struktury. Pro sledování gradientů teplot již spečeného materiálu je třeba nastavit emisivitu vyčištěné struktury, ale pokud bychom chtěli sledovat teplotu přímo v místě působení laseru, je třeba nastavit emisivitu tavné lázně, kterou je vzhledem k její nestálosti problematické přesně určit. Zobrazení teplot naměřených termokamerou tedy odpovídá skutečnosti pouze v oblastech, jejichž emisivita je pro měření právě nastavena.

Nevýhodou této metody je riziko zkreslení měření přítomností plynů a nežádoucích částic v zorném poli kamery. Při spékání dochází k emisi spalin, které mohou způsobit narušení měření a zobrazení chybných teplot. Další nevýhodou je náročnost nastavení a správné instalace měřící soustavy. V případě potřeby sledovat proces ve vysokém rozlišení je z důvodu objemu dat možné sledovat pouze malou oblast tisknuté vrstvy, čímž vyvstává problém přesného zaměření. Zároveň je třeba, aby kamera měla dostatečnou frekvenci pořizování snímků vzhledem k vysoké rychlosti skenování. [30], [25]

2.3.4 Měření světelných emisí meltpoolu

Kritickým místem celého procesu tisku je místo spékání prášku – meltpool. Právě zde vzniká lázeň taveniny, která následně tuhne a tvoří výslednou strukturu součásti. Z hlediska optimalizace a vývoje je pozorování meltpoolu jedním z nejdůležitějších aspektů monitorování. Důkladné porozumění a změření dějů odehrávajících se v meltpoolu je totiž zásadní pro úpravu procesních parametrů, jako jsou energie laseru a rychlost skenování. Vedle měření rozměrů meltpoolu, tedy jeho délky, šířky a hloubky, je velmi podstatné pozorování rozložení teplot v rámci meltpoolu. To lze měřit pomocí fotodiody instalované koaxiálně do cesty laseru.

Meltpool svojí teplotou produkuje infračervené záření v určitém spektru a vysílá ho do všech směrů. Část záření je vysílána i zpět po cestě laseru do optického systému stroje. Pomocí kalibrovaného polopropustného zrcadla je pak možné infračervené záření odklonit od původní cesty laseru do měřícího bodu fotodiody. Ta měří intenzitu záření z oblasti meltpoolu a jeho těsné blízkosti. Vstupní signál lze analyzovat ve smyslu rovnoměrnosti proudu dopadajícího záření, přičemž sleduje jeho odchylky a anomálie jako následek chyby vzniklé v procesu spékání.

Fotodiody je zařízení schopné analyzovat pouze malou oblast v okolí meltpoolu, ale díky jejímu řazení v optickém systému se její sledovací bod pohybuje společně s laserem, což umožňuje sledovat místo spékání po celou dobu procesu. Snímané hodnoty lze navíc synchronizovat s polohou laseru, kterou zadává řídicí systém, a tak přiřadit každému snímku přesnou polohu, ve které byl pořízen.

Stejně jako při měření termokamerou, ani zde neměří fotodiody přesnou teplotu, nýbrž pouze teplotní rozložení jako interpretaci spektra vlnových délek. Pro přesné stanovení teplot je potřeba přepočítat naměřené hodnoty v závislosti na emisivitě tepelného zdroje. Tu je ovšem u meltpoolu značně náročné zjistit, vzhledem k dynamice procesu, vysokým teplotám a nestálému povrchu tepelného zdroje, což jsou všechno faktory, které emisivitu zásadně ovlivňují. Teplotní rozsah spektra lze však do jisté míry předpovědět, je-li měřená teplota známa alespoň v určitém bodě. Je zde možné využít znalosti teplot jednotlivých fázových přeměn při tavení materiálu. Ze snímaného obrazu lze vypočítat místa výrazných změn záření, která odpovídají místům fázových přeměn. Této hodnotě záření pak lze přiřadit známou teplotu fázové přeměny a od ní odvinout zbytek tepelného spektra, čímž se eliminuje nutnost zadávání emisivity.

Vzhledem k charakteru způsobu měření je s používáním této metody nutné počítat již při konstrukci celého zařízení. Stejně jako zbytek optického systému je i infračervený senzor velmi citlivý na přesné seřízení a koaxiální zapojení vyžaduje instalaci společně se zbytkem systému. Náročnost metody dále zvyšuje nutnost přepočtu změřených hodnot. Optický systém je totiž nastaven na rovnoměrný přenos záření o vlnových délkách laseru, zatímco infračervené záření, které projde optickým systémem zpět, bude závislé na aktuální úhlové odchylce skenování. Měřená intenzita se tedy bude lišit v závislosti na poloze meltpoolu v rámci platformy a je nutná korekce pomocí přidaného softwaru pro správnou interpretaci. [31], [32], [24]

2.3.5 Měření pomocí termočlánků

Termočlánky představují vedle termokamer jediný přípustný způsob měření teplot při procesu tisku technologií 3D tisku. Na rozdíl od termokamer jsou však schopné sledovat teplotu i v objemu materiálu. Vzhledem k možnosti zavést termočlánek do objemu součásti lze sledovat historii průběhu teplot v daném místě, což nachází uplatnění při ověřování hodnot získaných počítačovými simulacemi tepelných toků.

Naproti tomu se prokázaly být nevhodné pro měření okamžitých teplot povrchu a meltpoolu, přestože se jedná o monitorování in-situ. Prvním zásadním problémem je instalace termočlánku do prostoru tisku, umístění totiž vyžaduje téměř vždy speciální procesní podmínky, jako například upravenou platformu nebo přerušení tisku za účelem zavedení termočlánku do součásti. Dalším problémem je pak nedostatečná citlivost článků vzhledem k rychlosti pohybu laseru po platformě. V porovnání k rychlosti procesu spékání je rychlost odezvy většiny termočlánků neúměrně velká, a tudíž neposkytuje relevantní informace o průběhu teplot.

Obecně vzato se termočlánky k monitorování procesu 3D tisku využívají výhradně speciálními způsoby, specificky navrhnutými pro konkrétní účel. Vhodně je lze využít pro ověřování počítačového modelování průběhu teplot. Měřením teplotních spádů uvnitř materiálu lze kalibrovat připravené simulace a ověřovat, zda byly provedeny správně.

Například v [33] je rozebírán příklad měření teploty termočlánkem zavedeném 0,3 mm pod povrch, jehož teplota byla následně zkoumána. Sledován byl jednotlivý přejezd, přičemž měření probíhalo v ploše tiskové platformy, a tudíž nebyl brán v potaz tvar a velikost součásti. Měření se ukázalo jako efektivní způsob ověření výsledků, neboť průběhy teplot z měření odpovídaly charakterem průběhu simulovanému. Zároveň byly všechny teploty posunuty o nezanedbatelnou hodnotu, což pomohlo při dodatečném nastavování parametrů pro výpočtový model a tedy při jeho odladění.

V článku [34] je pak rozebírán další experiment, kdy byly termočlánky různých typů zaváděny přímo do tisknutých součástí. Byla měřena přímo teplota meltpoolu při tavení materiálu v místě instalace termočlánku, stejně tak jako průběhy teplot uvnitř již zpevněného materiálu v závislosti na vzdálenosti od okraje součásti, tloušťce tištěné stěny nebo hloubce pod spékanou vrstvou. Z těchto měření bylo opět možné stanovit tepelnou historii součásti a tu konfrontovat s následně zjištěnými materiálovými vlastnostmi.

Použití termočlánků ke sledování procesů tisku má mnohá omezení a jejich hlavní přínos je určen především způsobem interpretace výsledné informace, tzn. vhodně stanoveným účelem konkrétního měření. Pro kontinuální in-situ měření nejsou tedy příliš vhodné.

3 Porovnání a zhodnocení metod monitorování

Nároky na kvalitu dílů vyrobených kovovým 3D tiskem se pochopitelně liší podle jejich koncových aplikací. Vzhledem ke svobodě v možnostech konstrukce, kterou 3D tisk nabízí, je někdy kvalita dokonce opomíjena na úkor účelného designu výrobku. Pro specifické účely, jako aplikace v leteckém nebo zdravotnickém průmyslu, je naopak kontrola jakosti a požadovaných vlastností na prvním místě. Pro takové účely chce mít samozřejmě výrobce k dispozici stroj s co nejspolehlivějším systémem. Není proto divu, že nejvíce úsilí do vývoje monitorovacích systémů vkládají právě samotní výrobci 3D tiskáren na kov. Většina firem zabývajících se vývojem kovových 3D tiskáren již disponuje monitorovacími systémy, které jsou navrhované přímo na jejich konkrétní stroje.

Monitorovací systémy ve většině případů zahrnují základní monitorovací prvky, které lze u těchto strojů považovat za samozřejmost a jsou běžnou výbavou každé tiskárny. Jedná se především o sledování stavu atmosféry v tiskové komoře. Standardem většiny dodávaných systémů pak bývá in situ pozorování kamerou, kontrola nanášené vrstvy prášku, nebo měření energie dodávané laserem. Nejnovější systémy pak většinou nabízí bližší vhléd do místa tisku formou monitorování meltpoolu či zpětné sestavování a kontrolu modelu v reálném čase pomocí tomografie.

S ohledem na principiální podobnost technologií dodávaných jednotlivými výrobci následuje srovnání několika v dnešní době dostupných systémů. Byly vybrány systémy vyvinuté společnostmi, které mají v oblasti vývoje technologie kovového 3D tisku bohaté zkušenosti a v rámci společnosti zabývající se touto problematikou významné postavení. Těmito zástupci jsou následující systémy:

- EOSTATE Monitoring suite od společnosti EOS GmbH
- QM suite od společnosti Concept Laser GmbH
- Additive.Quality suite od společnosti SLM Solutions Group AG

3.1 EOS - EOSTATE monitoring suite

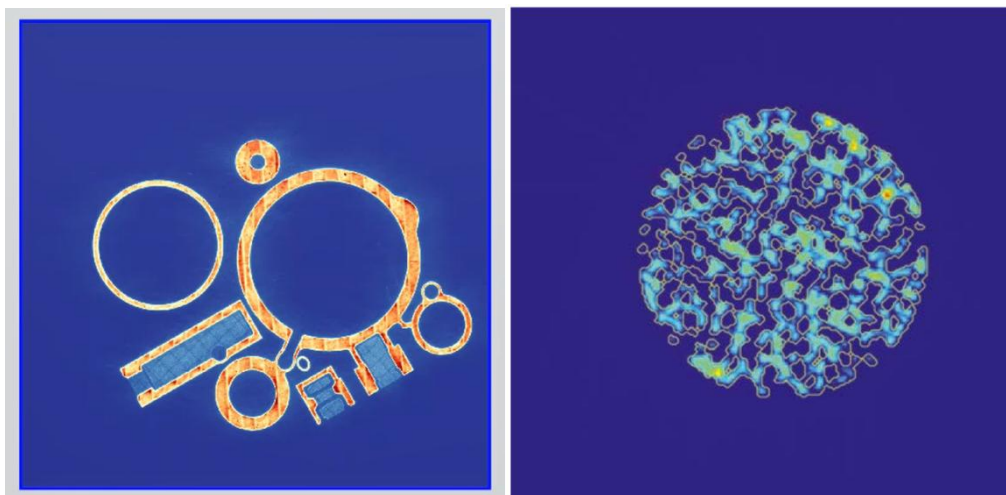
Společnost EOS GmbH je jedním z vedoucích představitelů aditivních technologií. Tato firma, založena již roku 1989 se zaměřuje převážně na technologii DMLS a tisk polymerů. V oblasti kovového tisku nabízí v dnešní době šest různých řešení pro široké rozpětí využití – od tiskáren pro zlatnické, hodinářské či zámečnické účely s rozměrem tiskové platformy Ø80 mm, po stroje přímo určené na výrobky velkorozměrové, pro větší objemy výroby s tiskovými platformami až 400x400 mm či konfigurací čtyř laserů pracujících v tiskové komoře zároveň. Jejich nejúspěšnějším produktem je verze EOS M290, na které také provádí nejintenzivnější výzkum v oblasti monitorování, a jejich monitorovací systém je tedy zaměřen primárně na tuto tiskárnu. Jedná se o model s tiskovým prostorem 250x250x325 mm a jedním laserem. [35]

Společnost se však snaží průběžně vyvíjet monitorovací systém tak, aby bylo možné ho použít i na dalších jejich strojích. Většina prvků systémů EOSTATE není standardní výbavou stroje, nicméně všechny jeho komponenty lze pro zařízení nainstalovat zvlášť.

Systém se skládá z následujících částí:

3.1.1 EOSTATE Exposure OT

Systém Exposure OT (Optical Tomography) využívá kamery snímající světelné emise ve spektru blízkém infračervenému záření (NIR – near infrared), podobně jako je tomu u termokamer. Obraz je snímán v celé ploše tiskové platformy a to ve vysokém rozlišení 2560x2160 pixelů, což umožňuje analýzu obrazu v prostorovém rozlišení až 125µm/pixel. Rychlost snímání je 10 snímků za vteřinu. Jednotlivé snímky v rámci vrstvy jsou po vytištění každé vrstvy superponovány do jednoho obrazu, který pak poskytuje kompletní vzhled do každé z nich. Takto získaný obraz poskytuje možnost analyzovat rozdílnosti ve vloženém teplu v jednotlivých oblastech, včetně jeho nepravidelností v rámci jedné menší oblasti. [24]

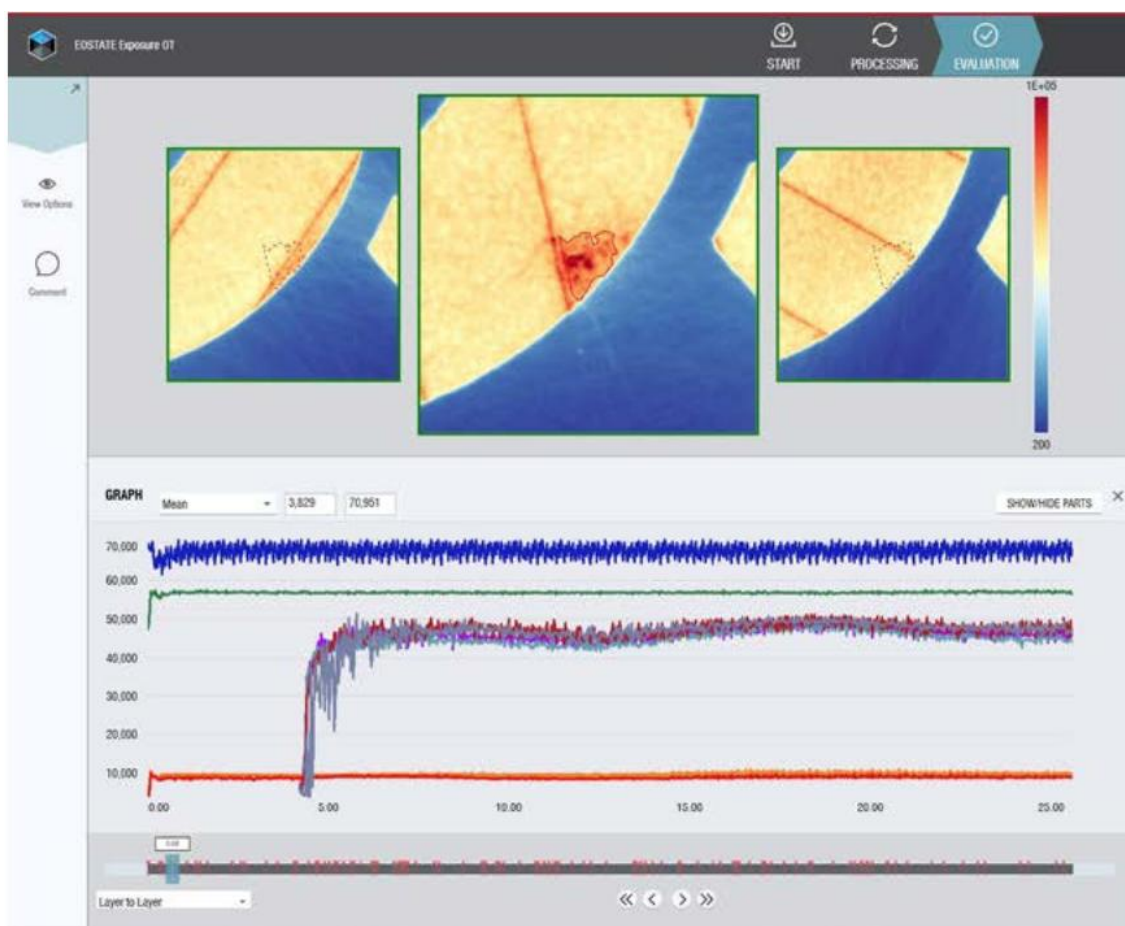


Obr. 3.1 Vizualizace vrstvy plného materiálu (vlevo)
Vizualizace vrstvy tenkostěnné struktury (vpravo)

Systém je tzv. off axis, neboli mimo osu laseru, což je jedním z faktorů ovlivňujících přesnost a detail pozorování. Hardware a optický systém kamery je instalován pomocí speciálního přípravku shora nad prostor tiskové komory. Z důvodu nevycentrované pozice kamery a dalších vlivů optických komponent je nutné snímání obrazu dále rektifikovat pomocí speciálního softwaru ve smyslu prostorové korekce, což je dalším potenciálním zdrojem vnesení chyby. Přestože senzor disponuje poměrně vysokým rozlišením, není systém schopen

spolehlivě pozorovat detail místa tisku, hlavně z důvodu malé frekvence snímování, a systém k tomu ani není určen. Snímané hodnoty jsou v mikroměřítku zprůměrované a tedy značně nepřesné. Naproti tomu pro kompletní sledování a porovnávání jednotlivých oblastí v rámci tiskové platformy je systém velmi vhodný.

Software pro systém sleduje komplexně údaje o procesu jako ovládání kamery a komunikace s uživatelem a zároveň shromažďuje a vyhodnocuje data v reálném čase, přičemž analýzy jednotlivých vrstev ukládá pro další zpracování. Klient služby EOSTATE Exposure OT pak může být nainstalován na integrovaném, případně i separovaném offline počítači. Ten umožňuje přístup k datům ve třech uživatelských rolích – Support, Operator a QA-Engineer. Pro vyhodnocování výsledků slouží právě poslední zmíněná role. Postup analýzy v této roli se skládá ze čtyř kroků. Nejprve je nutné nahrát data sesbíraná systémem. Druhým krokem je volba profilu, podle kterého bude analýza provedena. Všechny doposud dostupné profily obsahují algoritmy fungující na základě vyhledávání hodnot mimo nastavený rozsah, je však možné je upravit změnou vyhodnocovacích parametrů s ohledem na konkrétní aplikaci a požadavky na kvalitu. Následuje zobrazení výsledků ve formě tabulkové nebo grafické, a čtvrtým krokem je klasifikace a ohodnocení indikovaných oblastí.



Obr. 3.2 Uživatelské prostředí EOSTATE OT

Obrázek 3.2 ukazuje výsledky analýzy zobrazované v uživatelské roli QA-Engineer. Grafické znázornění dokáže zobrazit každou nalezenou vadu zvlášť, včetně jejího vymezení a ohraničení. Graf ve spodní části pak zobrazuje průměr měřených hodnot v rámci dané vrstvy.

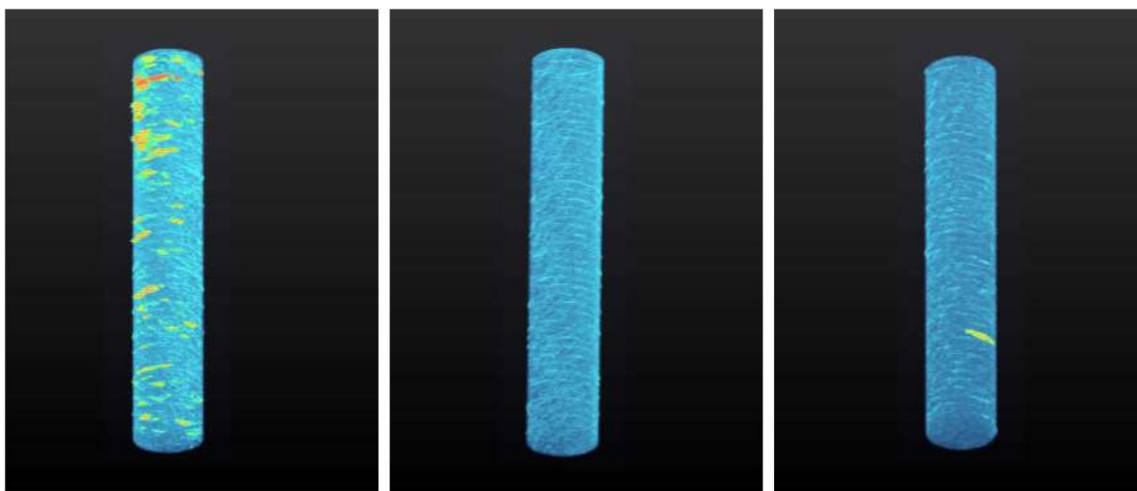
Dalším krokem ke zlepšení tohoto systému, který společnost plánuje je implementace systému radiometrické korekce. Ten by měl umožnit porovnání referenčních hodnot pro měření v různých zařízeních a tím pádem přenos parametrů měření mezi jednotlivými procesy

na různých strojích. Tento systém by měl fungovat na principu nastavení reference měřením světelného zdroje o známém rozpětí vlnových délek uvnitř komory. [24], [36], [37]

3.1.2 EOSTATE Meltpool

Tento systém byl prvním nástrojem k monitorování procesu tisku in-situ, který společnost EOS představila. Je založen na principu dvojice fotodiód umístěných o prostoru procesní komory, přičemž jedna je umístěna v ose laseru (on-axis) a druhá mimo ní (off-axis). Off-axis fotodióda snímá emise meltpoolu z celé platformy najednou, zatímco on-axis fotodióda je umístěna v pořadí před optickým systémem laseru, který zpětně cestou laseru směřuje emise kontinuálně přímo z místa meltpoolu. Separace emisí z optického systému zajišťuje citlivý komponent označovaný jako Beam-splitter, což je v podstatě polopropustné zrcadlo, které propouští laserový paprsek v jednom směru a světelné emise ve směru opačném odklání do fotodiódy. Tato součástka je jediným elementem dodatečně instalovaná do laserového ústrojí a je stejně jako ostatní části optického systému velmi citlivá na manipulaci. Její správné seřízení má výrazný vliv na správnost a spolehlivost měřených hodnot.

Snímané světelné spektrum je určeno filtrem umístěným před obě fotodiódy. Frekvence snímání obou senzorů je 60 kHz a každý snímek je ukládán ve formě 16-bitových hodnot. Systém sleduje tiskové parametry jako aktuální energii laseru a rychlost skenování, což je postaveno do korelace s měřenými hodnotami a díky tomu je možné nastavit kritéria pro rozpětí sledovaných hodnot. Systém zároveň synchronizuje každý snímek s aktuální polohou laseru na platformě, což umožňuje při analýze dat nasbírané hodnoty zmapovat v rámci celé tiskové plochy s vysokou přesností. Rozlišení je přímo ovlivněno rychlostí skenování, vzhledem k fixní frekvenci snímání. Hustota snímání (rozestupy mezi jednotlivými snímanými místy) pak dosahuje maximálních hodnot až 50 μ m (při 3000 mm/s). [24]



Obr. 3.3 Repräsentace deviací světelného signálu ve 3D

3.1.3 EOSTATE System

Ke správnému procesu tisku je zapotřebí optimální nastavení a kontrola základních procesních parametrů. Každá tiskárna EOS je tedy v základu vybavena nástrojem EOSTATE System. Ten pomocí senzorů sleduje stav systému a tiskové podmínky. Pokud hodnoty opustí rozmezí předdefinovaných hodnot, proces je zastaven a operátor informován. Tím je možné předcházet produkci zmetků, což může mnohdy výrazně šetřit čas. [38]

Nástroj zahrnuje kontrolu následujících vlivů:

- Stav optického a skenovacího systému, včetně automatické kalibrace
- Chladicí systém
- Elektrický systém a kontrolu před výpadkem proudu
- Pozici tiskové platformy
- Systém dávkování a sběru prášku
- Stav cirkulace vzduchovými filtry
- Teplota v procesní komoře a teplota platformy

3.1.4 EOSTATE Powder Bed

Dalším klíčovým předpokladem kvalitního tisku je správné a rovnoměrné nanášení vrstev prášku (recoating). Vlivy, jako stav recoateru nebo způsob uspořádání dílů na platformě, mohou mít nepříznivý vliv na nanášení vrstvy, což může mít za následek lokální nedostatek materiálu a tím pádem vznik nežádoucích struktur, pórů nebo rozměrových deviací. Monitorování každé vrstvy prášku umožňuje nástroj EOSTATE Powder Bed, který pomocí kamery umístěné nad procesní komorou snímá tiskovou plochu po každém nanášecím cyklu. Vizualní kontrola pak umožňuje v případě chyby proces zastavit a opravit. Systém navíc poskytuje možnost nahrávání procesu tisku jako videosnímku, případně živého přenosu obrazu na externí stanoviště. [38]

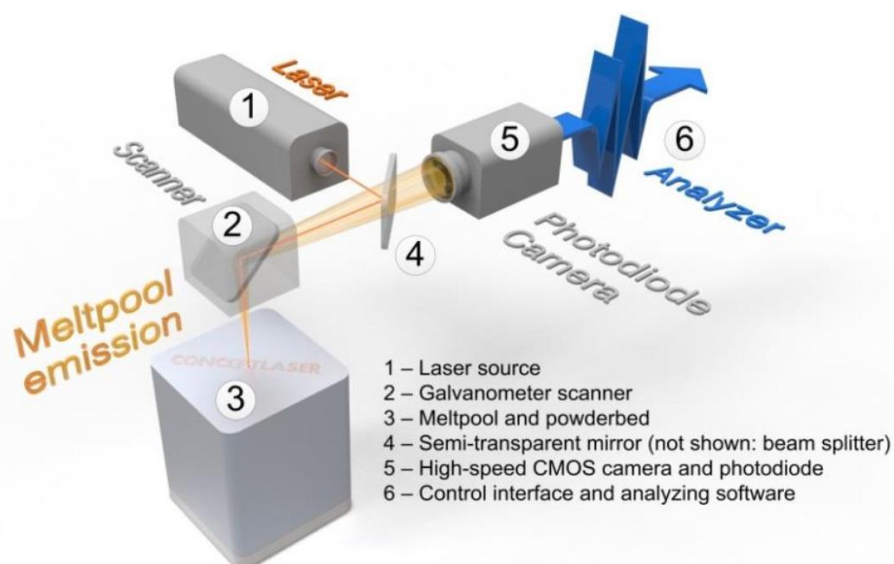
3.2 Concept Laser – Quality Management

Společnost Concept Laser fungující od roku 2000, která je součástí společnosti digitálních technologií GE Additive, je dalším z vedoucích hráčů na poli vývoje kovového 3D tisku technologií DMLS. Jejich nejnovější projekt je zaměřen na vývoj a produkci velkých zařízení pro rychlou a tedy ekonomicky výhodnou produkci velkorozměrných součástí. Jejich uplatnění se předpokládá převážně v odvětvích leteckého, případně automobilového průmyslu. Jejich portfolio však obsahuje zařízení v širokém rozpětí velikostí a uplatnění, včetně tiskáren pro tisk malých součástí vysoké přesnosti. Jejich nejmenší řešení pro kovový tisk s mezními rozměry tisku 50x50x80 mm je ideální pro využití v medicínském, dentálním nebo zlatnickém průmyslu, zatímco jejich největší zařízení s tiskovým prostorem 800x400x500 mm je k dnešnímu dni na prvním místě co se týče velikosti tištěných součástí. Vývojový trend si udržují i v oblasti tisku více lasery najednou s dvoulaserovou tiskárnou o tiskovém prostoru 250x250x350 mm.

Monitorovací sada QM má celkem 8 částí. Podrobně jsou zde rozebrány ty, které mají význam pro monitorování in-situ.

3.2.1 QM Meltpool 3D

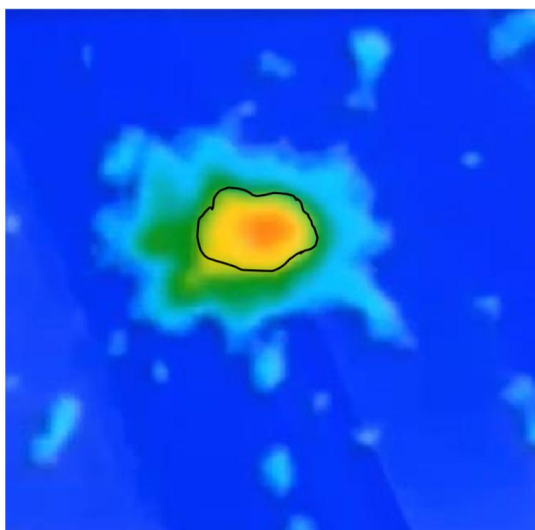
Hlavním nástrojem pro in-situ monitoring procesu tisku je QM Meltpool 3D. Využívá kombinace fotodiody a termokamery, přičemž oba senzory jsou zapojeny koaxiálně, tedy v cestě laserového paprsku (on-axis). Princip zapojení v rámci optického ústrojí je přes Beam-splitter, obdobně, jako u výše zmiňovaného systému EOSTATE Meltpool. Oba senzory sledují plochu 1 mm² kolem meltpoolu. Zatímco fotodioda snímá průměrnou hodnotu intenzity světla vyzařovaného ze sledované oblasti, kamera umožňuje sledovat i tvarové deviace tepelného pole. Software ke zpracování dat z monitorování pak skládá informace z obou senzorů do prostorového obrazu, který je mapou složenou z naměřených hodnot a tvarů meltpoolu, resp. světelného signálu. Zároveň umožňuje průběh měřených hodnot sledovat ve formě grafů.



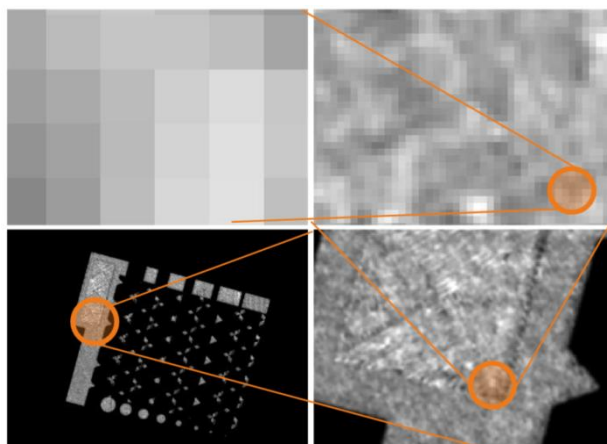
Obr. 3.4 Schéma zapojení monitorovacího systému v rámci optické soustavy stroje

Oba senzory shromažďují snímky ve frekvenci 40 kHz. Fotodioda sama disponuje snímkováním o frekvenci 40 kHz, zatímco kamera pouze 10 kHz. Snímky z termokamery je tedy nutné namnožit (upsample) tak, aby bylo možné je postavit do korelace se snímky

z fotodiody. Hodnoty z obou senzorů jsou v reálném čase přepočítávány a ukládány ve formě číselných hodnot, poněvadž shromažďování veškerých obrazových dat z termokamery v uvedené frekvenci není s ohledem na jejich objem možné. Grafické zobrazení je tedy zprostředkováno jen několika snímky za vteřinu. [39]



Obr. 3.5 Snímek z termokamery s vyznačenou hranicí tavení materiálu



Obr. 3.6 Grafická reprezentace hodnot naměřených fotodiódou

Rozlišení kamery na sledované ploše je 100x100 pixelů, což umožňuje detail 10 μ m/pixel. Rozlišení výsledného obrazu je pak opět vzhledem k fixní frekvenci snímání závislé na rychlosti skenování, kdy hustota snímkování dosahuje hodnot až 40 μ m (při 1500 mm/s). S ohledem na velikost laserového spotu (cca 0,1 mm) je pozorovací oblast 1mm² poměrně rozsáhlá. Pokud systém tedy zaznamená deviaci měřených hodnot, má poměrně omezenou možnost určit její přesnou polohu. [31]

3.2.2 Ostatní Nástroje QM

Dalšími nástroji monitorovací sady jsou ve své postati obdobou nástrojů výše zmíněného systému EOSTATE a do monitorování in-situ přispívají jen některé z nich. Je zde tedy pouze v bodech uveden jejich výčet s popisem. [40]

- QM Coating – sledování a kontrola nanášené vrstvy prášku
- QM Live view – snímání procesu tisku kamerou ve vysokém rozlišení
- QM Fiber Power – informace o aktuálním výkonu laseru, jen pro systémy s jedním laserem
- QM Cusing Power – měření skutečného výkonu dopadajícího laserového paprsku za účelem kalibrace
- QM Atmosphere – sledování stavu atmosféry v tiskové komoře
- QM Powder – systém na kontrolu kvality prášku (pre-situ)
- QM Documentation – softwarové rozhraní shromažďující informace z jednotlivých senzorů

3.3 SLM Solutions – Additive.Quality

Firma SML Solutions Group AG fungující pod současným názvem od roku 2014 má historii vývoje kovového 3D tisku sahající až do roku 1996. Od té doby si vytvořila na trhu významné postavení se svými stroji využívající technologii SLM. Stejně jako ostatní výrobci tiskáren, i tato společnost disponuje širokou škálou řešení pro 3D tisk kovů. Od nejmenšího stroje s tiskovým prostorem 125x125x125 mm až po velkou čtyřlaserovou tiskárnu s tiskovým prostorem 500x280x850 mm. Kromě vývoje systémů s více lasery se společnost zaměřuje také na další speciální prvky zlepšující celkovou stálost procesu. Těmi jsou například systém vícesměrného nanášení vrstev prášku nebo automatická manipulace s práškem v uzavřeném cyklu. [41]

Jejich monitorovací balík Additive.Quality obsahuje celkem 3 části ale je nabízen jako celek výrobcem zvláště pro zlepšení kontroly procesu.

3.3.1 Melt Pool Monitoring

Nástroj Melt Pool Monitoring (MPM) využívá dvojice fotodiody zapojených koaxiálně, tedy on-axis, podobně, jako u předchozích dvou systémů. Ty opět měří hodnoty intenzity odraženého záření z malé oblasti kolem meltpoolu. Beam-splitter se v tomto případě však liší tím, že i ve směru od laseru k procesní komoře je částečně polopropustný pro účely měření nástrojem LPM (viz níže). Rozdílné filtry před každou fotodiadou upravují vstupní záření tak, že každá z nich snímá světelné emise v jiném spektru vlnových délek, což umožňuje spolehlivější sledování deviací procesu spékání.

Použité fotodiody snímají s frekvencí až 100 kHz. Podobně jako u předchozích systémů MPM mapuje aktuální polohu na platformě a přiřazuje jí měřené hodnoty signálu. To opět umožňuje sledovat přesné lokace deviací a zobrazovat rozložení signálu v rámci každé vrstvy. Rozlišení pro měření polohy pak dosahuje až 15 μ m/pixel (při 1500 mm/s). Uživatelské rozhraní přitom umožňuje skládání obrazu a zobrazování rozložení signálu v reálném čase. [42]

3.3.2 Laser Power Monitoring

Výše zmíněný nástroj Laser Power Monitoring (LPM) využívá další fotodiody zapojené koaxiálně v trase laseru. Díky částečně polopropustnému Beam-splitteru je část laserového paprsku ze zdroje odkloněna ještě před vstupem do procesního prostoru a nasměrována na senzor. Ten sleduje stálost výkonu laseru a jeho případné odchylky. Frekvence snímání 100 kHz zajišťuje spolehlivou kontrolu a umožňuje systému včas upozornit na případnou chybu. [43]

3.3.3 Layer Control System

Tento nástroj vyvinutý na míru metodě SLM umožňuje kontrolovat nanášení vrstvy prášku. Před a po nanesení každé vrstvy jí opticky kontroluje a dává možnost její opravy v případě, že objeví chybu. Tím předchází vadám způsobeným nedostatečným nebo nevhodným dávkováním prášku.

4 Zhodnocení monitorovacích systémů

Následuje shrnutí charakteristik jednotlivých zkoumaných monitorovacích systémů, přičemž jsou vyzdvíženy nástroje, které mají zásadní přínos in-situ monitorování a které se principem a kvalitou provedení v jednotlivých systémech liší.

Tab. 2 Porovnání parametrů jednotlivých zkoumaných nástrojů

	EOSTATE OT (EOS)	EOSTATE Meltpool (EOS)	QM Meltpool 3D (Concept Laser)	Melt Pool monitoring (SLM Solutions)
Využívaná metoda	Optická tomografie v NIR spektru	Měření světelných emisí dvojicí fotodiod	Měření světelných emisí fotodiodou a snímkování termokamerou	Měření světelných emisí dvojicí fotodiod
Umístění senzoru	Off – axis	On – axis Off - axis	On – axis	On - axis
Rozsah měření	Celá tisková plocha	Meltpool a Celá tisková plocha	Meltpool	Meltpool
Snímaná plocha	-	-*	1 mm ²	-*
Snímkovací frekvence	10 Hz	60 kHz	40 kHz (fotodioda) 10 kHz (termokamera)	100 kHz
Hustota snímkování (při sken. rychlosti 3000 mm/s)	300 mm	50 μm	75 μm	30 μm
Rozlišení kamery	125 μm/px	-	10 μm/px	-
Vizuální reprezentace výsledků (zpětné sestavení modelu)	Ano	Ano	Ano	-*

*výrobce neposkytl potřebnou přesnou informaci

Následuje tabulka bodového ohodnocení s dodatečným komentářem.

Tab. 3 Bodové hodnocení zkoumaných nástrojů

	EOSTATE OT (EOS)	EOSTATE Meltpool (EOS)	QM Meltpool 3D(Concept Laser)	Melt Pool monitoring (SLM Solutions)
Využívaná metoda	Optická tomografie v NIR spektru	Měření světelných emisí dvojicí fotodiod	Měření světelných emisí fotodiodou a snímkování termokamerou	Měření světelných emisí dvojicí fotodiod
Umístění senzoru	1	3	2	2
Rozsah měření	2	3	2	2
Snímaná plocha	-	-	-	-
Snímkovací frekvence	0	2	1	3
Hustota snímkování (při sken. rychlosti 3000 mm/s)	-	-	-	-
Rozlišení kamery	-	-	-	-
Vizuální reprezentace výsledků (zpětné sestavení modelu)	2	2	2	0
Celkem	5	10	7	7

Snímaná plocha nebyla ohodnocena, neboť většina zástupců nemá od výrobců uvedenou přesnou hodnotu. Hustota snímkování nebyla ohodnocena z důvodu přímé závislosti na snímkovací frekvenci. Rozlišení kamery nebylo ohodnoceno z důvodu zásadního rozdílu ve způsobu jejich využití.

Nejvyšší bodové hodnocení získal nástroj EOSTATE Meltpool. Jeho přednostmi oproti ostatním nástrojům je využití kombinace dvou senzorů zapojených v různých prostorových schématech, monitorování meltpoolu i celé tiskové plochy zároveň. Nástroj QM Meltpool 3D efektivně kombinuje prvky obou hodnocených nástrojů firmy EOS dohromady, tedy využití fotodiody a termokamery zároveň, vše ve srovnatelné kvalitě sbírané informace. Nástroj MPM vyniká snímkovací frekvencí a snímáním dvou různých světelných spekter, chybí však uspokojivé množství informací od výrobce. Nejméně bodů získal nástroj EOSTATE OT, který oproti ostatním není možné využít pro detailní analýzu dějů uvnitř meltpoolu. Nachází však uplatnění v kombinaci s dalšími nástroji sady EOSTATE, pro které je vhodný prvotní celkový pohled na tiskovou plochu a do objemu součásti, před zkoumáním konkrétních oblastí tisku.

5 Závěr

V úvodu práce byla přednesena problematika technologie 3D tisku v souvislosti s jejím uplatněním v dnešní době. Byly předloženy základní předpoklady, které by technologie měla splňovat, aby byla svojí významností plnohodnotně srovnatelná s konvenčními způsoby výroby, tzn. požadavky na kvalitu, stabilitu a opakovatelnost procesu. Byly předneseny některé základní výhody technologie ve srovnání s konvenčními metodami výroby. Dále byl popsán celkový záměr práce a jeho význam pro RTI při Fakultě Strojní na ZČU.

Následovala rešeršní práce, skládající se z několika částí. Pro zasazení tématu do kontextu byly nejprve rozebrány způsoby 3D tisku, kovového i nekovového, pro porovnání výhod a nevýhod jednotlivých způsobů. Byli představeni někteří významní zástupci výrobců 3D tiskáren. Následně byla podrobněji popsána technologie DMLS, které se následný rozbor monitorování týkal.

Hlavním přínosem práce je pak podrobný popis v dnešní době používaných monitorovacích metod, které jsou pro technologii kovového 3D tisku signifikantní. Byly vysvětleny obecné principy fungování metod, možnosti jejich využití a subjektivní hodnocení jejich výhod a nevýhod.

Pro příklad z aplikační praxe bylo následně popsáno několik monitorovacích systémů, které jsou v dnešní době na trhu dostupné. Opět byly popsány způsoby fungování jejich jednotlivých nástrojů, přičemž ty nejvýznamnější, převážně pro monitorování v průběhu tisku, byly popsány podrobně, včetně dosahovaných kvalit měření. Základní vlastnosti zástupců těchto nástrojů byly shrnuty ve srovnávací tabulce a následně bodově ohodnoceny a slovně srovnány.

Práce poskytuje seznámení s problematikou monitorování procesu 3D tisku, které je podstatné pro budoucí výzkum a vývoj monitorovacích metod a zlepšování procesu. Shromážděné informace mají význam nad rámec potřeb laboratoře LEO ve smyslu možnosti aplikace informací v průmyslové praxi. S přihlédnutím ke směru vývoje v rámci projektu RTI PLUS bude na tuto práci možné navázat dalšími akademickými pracemi. Vzhledem k výše uvedenému věřím, že cíle práce byly naplněny.

6 Použitá literatura

- [1] AXIOM TECH s.r.o., *Aditivní výroba – moderní způsob obrábění*. Dostupné z: <https://www.axiomtech.cz/25836n-aditivni-vyroba-moderni-zpusob-obrabeni>
- [2] my3dconcepts.com, *How 3D printing works*. Dostupné z: <http://my3dconcepts.com/explore/how-3d-printing-works/>
- [3] Zetková, I., *Problematika výroby strojních součástí 3 tiskem*. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/28412/1>, Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni
- [4] Wikipedia, *Rapid prototyping*. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Rapid_prototyping
- [5] Sculpteo, *Discover the history of 3D printer*. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>
- [6] Sculpteo, *The history of 3D printing: From the 80s to today*. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today/>
- [7] Průša, J., *Základy 3D tisku*. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>
- [8] josefprusa.cz, *Představujeme 4 materiálův tisk*. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/predstavujeme-4-materialovy-3d-tisk/>
- [9] Wikipedia, *Stereolithography*. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography>
- [10] 3dhubs.com, *SLA 3D Printing materials compared*. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/sla-3d-printing-materials-compared>
- [11] Sculpteo, *Resin 3D printing Material using Polyjet technology*. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/materials/polyjet-resin-material/>
- [12] Protolab.cz, *3D tisk plasty*. Dostupné z: https://protolab.cz/3d-tisk-plast/?gclid=EAIaIQobChMIqLUpcuk4QIVSuh3Ch0GLQeiEAAYAiAAEgKX2vD_BwE
- [13] o3D.cz, *Historie 3D tisku*. Dostupné z: <http://www.o3d.cz/3d-tisk/%C5%A1t%C3%ADtky/historie-3d-tisku/>
- [14] 3dnatives.com, *A Comprehensive List of all the Metal 3D Printer Manufacturers*. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/metal-3d-printer-manufacturers/>
- [15] 3dprintingindustry.com, *The Virtual Foundry filament for 3D printing metal on an FDM system*. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/the-virtual-foundry-filament-for-3d-printing-metal-on-an-fdm-system-140705/>
- [16] 3dprint.com, *Comparison of Metal 3D Printing*. Dostupné z: <https://3dprint.com/182367/directed-energy-deposition/>
- [17] exone.com, *What is Binder Jetting?* Dostupné z: <https://www.exone.com/Resources/Technology-Overview/What-is-Binder-Jetting>
- [18] all3dp, *All 10 Types of 3D Printing Technology in 2019*. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>

- [19] 3D Tech, *DMLS*. Dostupné z: <https://www.3dtech.cz/technology/dmls/>
- [20] SEKERA, V., *Výroba dílů technologií DMLS a jejich porovnání s jinými konvenčními technologiemi z hlediska ekonomické náročnosti*. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41825
- [21] EOS, *System Data Sheet EOS M 290*. Dostupné z: <http://pdf.directindustry.com/pdf/eos-gmbh-electro-optical-systems/system-data-sheet-eos-m-290/5078-666883.html>
- [22] PFEFFERKORN, F., WILHAMMER, J., *EOS Part Property Management: Whitepaper*. Dostupné z: https://www.eos.info/systems_solutions/plastic/part_property_management
- [23] EOS, *EOS Maraging Steel MSI – High-Performance Steel for Tooling and Mechanical Engineering*. Dostupné z: <https://www.eos.info/material-m>
- [24] FUCHS, L., EISCHER, CH., *In-process Monitoring Systems for Metal Additive Manufacturing*. Dostupné z: <https://www.eos.info/software/monitoring-software>
- [25] HEIGEL, J., LANE, B. *Measurement of the Melt Pool Length During Single Scan Tracks in a Commercial Laser Powder Bed Fusion Process*. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/318999525_Measurement_of_the_Melt_Pool_Length_During_Single_Scan_Tracks_in_a_Commercial_Laser_Powder_Bed_Fusion_Process
- [26] VILLARRAGA, H., RAMSEY, A. *Verifying Structural Integrity of Metal 3D-Printed Parts*. Dostupné z: <https://www.additivemanufacturing.media/blog/post/verifying-structural-integrity-of-metal-3d-printed-parts>
- [27] German Aerospace Industries Association, *Optical Tomography from Industrial 3D Printers*. Dostupné z: https://www.bdli.de/en/innovation_of_the_week/optical-tomography-industrial-3d-printers
- [28] VILLARRAGA, H., LEE, CH., CORBETT, T., TARBUTTON, J., SMITH, S., *Assessing additive manufacturing processes with X-ray CT Metrology*. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/283119260_Assessing_Additive_Manufacturing_Processes_with_X-ray_CT_Metrology
- [29] General Electric Company, *Acoustic Monitoring Method for Additive Manufacturing Processes*, Vynálezci: GOLD, S., SPEARS, T., Patent Application 20170146488, *United States*
- [30] LANGEVIN, M., *High-Speed Infrared Imaging of Metal Parts Fabrication by Additive Manufacturing*. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/321914303_High-Speed_Infrared_Imaging_of_Metal_Parts_Fabrication_by_Additive_Manufacturing
- [31] TOEPEL, T., SCHUMANN, P., EBERT, M., BOKKES, T., FUNKE, K., WERNER, M., ZAULNER, F., BECHMANN, F., HERZOG, F., *3D Analysis in laser beam melting based on real-time process monitoring*. Dostupné z: <https://www.concept-laser.de/en/products/quality-management.html#c723>
- [32] CHENG, B., LYDON, J., COOPER, K., COLE, V., NORTHROP, P., CHOU, K., *Melt Pool Dimension Measurement In Selective Laser Melting Using Thermal Imaging*. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/8108/4c89f6bb161f5e743343f147621aa7038803.pdf>
- [33] ZÄH, M., LUTZMANN, S., *Modelling and simulation of electron beam melting*. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11740-009-0197-6#CR11>
- [34] QUIAN, L., MEI, J., LIANG, J., WU, X., *Influence of position and laser power on thermal history and microstructure of direct laser fabricated Ti-6Al-4V samples*. Dostupné z:

<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1179/174328405X21003?needAccess=true&redirect=1>

[35] EOS, *Systems and Equipment for Metal Manufacturing*. Dostupné z:

https://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment

[36] EOS, MTU: *Optical Tomography Enables Considerable Savings in Quality Assurance*.

Dostupné z: https://www.eos.info/press/case_studies/optical-tomography-enables-considerable-savings-in-quality-assurance

[37] LISTL, M., ORYE, D., *Correlation of In-process Monitoring Data and Mechanical*

Properties of Lattice Structures. Dostupné z: <https://www.eos.info/software/monitoring-software>

[38] EOS, *EOSTATE Monitoring Suite – Real-time monitoring for industrial 3D printing*.

Dostupné z: <https://www.eos.info/software/monitoring-software>

[39] CONCEPT LASER, *QM Meltpool 3D Training*, Školící texty firmy Concept Laser

[40] CONCEPT LASER, *Quality management*. Dostupné z: <https://www.concept-laser.de/en/products/quality-management.html>

[41] SLM SOLUTIONS, *Additive Quality*. Dostupné z: [https://www.slm-](https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/SLM_AdditiveQuality_Folder_EN_WEB_2seitig.pdf)

[solutions.com/fileadmin/user_upload/SLM_AdditiveQuality_Folder_EN_WEB_2seitig.pdf](https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/SLM_AdditiveQuality_Folder_EN_WEB_2seitig.pdf)

[42] SLM SOLUTIONS, *Melt Pool Monitoring*. Dostupné z: [https://www.slm-](https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/downloads/en/607xx171025-01-001-mpm_web_en.pdf)

[solutions.com/fileadmin/user_upload/downloads/en/607xx171025-01-001-mpm_web_en.pdf](https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/downloads/en/607xx171025-01-001-mpm_web_en.pdf)

[43] SLM SOLUTIONS, *Laser Power monitoring*. Dostupné z: [https://www.slm-](https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/downloads/de/603xx171025-01-001-lpm_web.pdf)

[solutions.com/fileadmin/user_upload/downloads/de/603xx171025-01-001-lpm_web.pdf](https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/downloads/de/603xx171025-01-001-lpm_web.pdf)

Seznam obrázků:

Obr. 1.1 *Znázornění postupu výroby aditivní technologií* [online], [cit 2019-04-27]. Dostupné z <http://my3dconcepts.com/explore/how-3d-printing-works/>

Obr. 1.2 *První zařízení založené na principu SLA* [online]. [cit 2019-03-20]. Dostupné z:

<https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today/>

Obr. 1.3 *Princip metody FDM* [online]. [cit 2019-05-27]. Dostupné z:

<https://druckwege.de/en/home-en/technology/fused-deposition-modelling-fdm>

Obr. 1.4 *Princip metody SLA* [online]. [cit 2019-05-28]. Dostupné z:

<https://druckwege.de/en/home-en/technology/stereolithographie-sla>

Obr. 1.5 *Princip metody PolyJet* [online]. [cit 2019-05-28]. Dostupné z:

<https://www.tth.com/3d-printing/objet-prototyping/>

Obr. 1.6 *Princip metody SLS* [online]. [cit 2019-05-28]. Dostupné z:

<https://www.aniwaa.com/best-professional-desktop-sls-3d-printers/>

Obr. 1.7 *Princip metody LOM* [online]. [cit 2019-05-28]. Dostupné z:

<http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/#dlp>

Obr. 1.8 *Kovová součást vyrobená metodou FDM - před postprocessingem* [online]. [cit

2019-05-28]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/the-virtual-foundry-filament-for-3d-printing-metal-on-an-fdm-system-140705/>

Obr. 1.9 *Princip metody DED pro různé formy vstupního materiálu* [online]. [cit 2019-05-28]. Dostupné z: <https://www.lightmetallage.com/news/industry-news/3d-printing/article-additive-manufacturing-of-aluminum-alloys/attachment/figure-2-ded-processes/>

Obr. 1.10 *Tryska tiskové hlavy pro Binder Jetting* [online]. [cit 2019-05-28]. Dostupné z: <https://www.exone.com/Resources/Technology-Overview/What-is-Binder-Jetting>

Obr. 2.1 *Zpětně sestavnený model získaný rentgenovou tomografií* [online]. [cit 2019-05-28]. Dostupné z: <https://www.additivemanufacturing.media/blog/post/verifying-structural-integrity-of-metal-3d-printed-parts>

Obr. 2.2 *Defekty zachycené v objemu materiálu rentgenovou tomografií* [online]. [cit 2019-05-28]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/283119260_Assessing_Additive_Manufacturing_Processes_with_X-ray_CT_Metrology/figures

Obr. 2.3 *Stabilní průběh akustického signálu* [online]. [cit 2019-05-28]. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/20170146488.pdf>

Obr. 2.4 *Anomálie v průběhu akustického signálu - signalizace možného defektu* [online]. [cit 2019-05-28]. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/20170146488.pdf>

Obr. 2.5 *Rozložení teplot při tisku při vytváření celoobjemových částí výrobku* [online]. [cit 2019-05-28]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/321914303_High-Speed_Infrared_Imaging_of_Metal_Parts_Fabrication_by_Additive_Manufacturing/figures

Obr. 2.6 *Rozložení teplot při tisku při vytváření husté mřížky* [online]. [cit 2019-05-28]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/321914303_High-Speed_Infrared_Imaging_of_Metal_Parts_Fabrication_by_Additive_Manufacturing/figures

Obr. 3.1 *Vizualizace vrstvy plného materiálu (vlevo) Vizualizace vrstvy tenkostěnné struktury (vpravo)* [online]. [cit 2019-05-28]. Dostupné z: https://cdn0.scrvt.com/eos/22b7c7da62ac7d1f/81bae949dc7c/Whitepaper_AdditiveMinds_Lattice-Monitoring_en_WEB.pdf

Obr. 3.2 *Uživatelské prostředí EOSTATE OT* [online]. [cit 2019-05-28]. Dostupné z: https://cdn0.scrvt.com/eos/839090ec135565bc/b6a6ac17dca9/EOS_Whitepaper_Monitoring.pdf

Obr. 3.3 *Reprezentace deviací světelného signálu ve 3D* [online]. [cit 2019-05-28]. Dostupné z: http://itp-forum.ru/upload/iblock/000a1/EOS_Industry%204.0.pdf

Obr. 3.4 *Schéma zapojení monitorovacího systému v rámci optické soustavy stroje* [online]. [cit 2019-05-28]. Dostupné z: https://www.concept-laser.de/fileadmin/Neue_Produnkte/1016_QM-process_monitoring_EN_Korr_2__lowres_einzel.pdf

Obr. 3.5 *Snímek z termokamery s vyznačenou hranicí tavení materiálu* [39]

Obr. 3.6 *Grafická reprezentace hodnot naměřených fotodiodou* [39]

Seznam tabulek

Tab. 1 Výňatek z materiálového listu - EOS MaragingSteel MS1

Tab. 2 Porovnání parametrů jednotlivých zkoumaných nástrojů

Tab. 3 Bodové hodnocení zkoumaných nástrojů