

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojírenství
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv parametrů depozice na výsledné vlastnosti kovových
komponent vytvořených pomocí metody přímé laserové depozice

Autor: **Bc. Michal BRÁZDA**

Vedoucí práce: **prof. Ing. Jan DŽUGAN Ph. D.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal BRÁZDA**
Osobní číslo: **S17N0101P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**
Téma práce: **Vliv parametrů depozice na výsledné vlastnosti kovových komponent vytvořených pomocí metody přímé laserové depozice**
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Úvod do aditivních technologií se zaměřením na metody přímé depozice
2. Měření mechanických vlastností s využitím miniaturních zkušebních vzorků (tah, zkouška rázem v ohybu, lomová mechanika)
3. Metalografická analýza materiálů vytvářených pomocí aditivních technologií (mikro, makro)
4. Návrh depozičních strategií a realizace výroby experimentálních vzorků
5. Provedení zkoušek – experimentální výsledky (zkouška tahem, případně zkoušky vrubové a lomové houževnatosti)
6. Mikrostrukturní analýza vzorků včetně EBSD a fraktografické analýzy
7. Vyhodnocení výsledků, porovnání výsledků
8. Diskuse výsledků
9. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50-60 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

SKÁLOVÁ, J., KOVAŘÍK, R., BENEDIKT, V.: *Základní zkoušky kovových materiálů*. ZČU Plzeň

BRANDT Milan *Laser Additive Manufacturing – Materials, Design, Technologies, and Applications, A volume in Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials*, ISBN: 978-0-08-100433-3

QIAN Ma and FROES Francis H *Titanium Powder Metallurgy, Science, Technology and Applications*, ISBN: 978-0-12-800054-0

ASTM STP1329 Small Specimen Test Techniques: Fourth Volume, ASTM 1998

ASTM STP1418 Small Specimen Test Techniques: 5th Volume, ASTM 2002

STP1502 Small Specimen Test Techniques: 5th Volume 2009

ASTM STP1576 Small Specimen Test Techniques: 6th Volume, ASTM 2014

DONGDONG Gu. *Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials*. (2015)

VENUVINOD K. Patri, WEIYIN Ma. *Rapid Prototyping*. (2004)

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Jan Džugan, Ph.D.**
COMTES FHT a.s.
Konzultant diplomové práce: **Ing. Josef Hodek, Ph.D.**
COMTES FHT a.s.

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. října 2019

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Brázda	Jméno Michal	
STUDIJNÍ OBOR	2301R016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Prof. Ing. Džugan, Ph.D.	Jméno Jan	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KKM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Vliv parametrů depozice na výsledné vlastnosti kovových komponent vytvořených pomocí metody přímé laserové depozice		

FAKULTA	strojí	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2020
----------------	--------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	78	TEXTOVÁ ČÁST	50	GRAFICKÁ ČÁST	28
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Cílem této diplomové práce je zjištění vlivu parametrů depozice na výsledné vlastnosti kovových komponent. V práci jsou porovnány výsledky ze zkoušek tvrdosti, tahem a vrubové houževnatosti na miniaturních vzorcích. Dále je deponovaný materiál zkoumán pomocí metalografických zkoušek jako je světelná mikroskopie, elektronová mikroskopie a EBSD. Na porušených vzorcích je provedena fraktografie.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Přímá laserová depozice, DED, 316L, strategie, depozice, mechanické zkoušky, metalografie, miniaturní vzorky, MTT, MCT, světelná mikroskopie, elektronová mikroskopie, EBSD, fraktografie</p>

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Brázda		Name Michal	
FIELD OF STUDY	2301R016 „Materials Engineering and Engineering Metallurgy“			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Ing. Džugan, Ph.D.		Name Jan	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	The impact of deposition parametres on properties of metal parts fabricated by direct laser deposition			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	78	TEXT PART	50	GRAPHICAL PART	28
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The aim of the diploma thesis is to examine the impact of deposition parametres on properties of metal parts. It compares results of various testing – hardness test, micro tensile test and micro crack test. Another set of testing on deposited material follows, in particular metallographic tests such as light microscopy, electron microscopy and EBSD. Fractography was performed on damaged samples.
KEY WORDS	Direct laser deposition, DED, 316L, strategy, deposition, mechanical tests, metallography, miniature samples, MTT, MCT, light microscopy, electron microscopy, EBSD, fractography

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomáhali při zpracování mé diplomové práce. Největší poděkování patří vedoucímu prof. Ing. Janu Džuganovi Ph.D., který mi byl nápomocen při velmi nápomocen při jejím zpracování, za ochotu, užitečné rady a vynaložený čas. Dále bych rád poděkoval konzultantovi Ing. Josefu Hodkovi a kolektivu firmy Comtes FHT za umožnění tisku vzorků a veškerou pomoc.

Obsah

1	Úvod	12
2	Aditivní technologie.....	13
2.1	Historie a současnost	13
2.2	Rapid Prototyping.....	16
2.2.1	Pre-processing	17
2.2.2	Processing.....	17
2.2.3	Post-Processing	17
2.3	Rozdělení technologií aditivní výroby	17
2.3.1	FFF technologie (FFF – Fused Filament Fabrication)	20
2.3.2	Metoda práškového lože (Powder Bed)	22
2.3.2.1	Selective Laser Sintering (SLS)	23
2.3.2.2	Selective Laser Melting (SLM)	24
2.3.2.3	Electron Beam Melting (EBM)	24
2.3.2.4	Binder Jetting.....	25
2.3.3	Metoda přímé depozice (Direct Energy Deposition - DED).....	26
2.3.3.1	Metoda přímé depozice s využitím elektronového paprsku EBAM®	31
3	Vliv parametrů na depozici.....	32
3.1	Obecné parametry 3D tisku.....	32
3.1.1	Výkon laseru	32
3.1.2	Rychlost tisku.....	32
3.1.3	Strategie tisku.....	33
3.1.4	Výška vrstvy	34
3.1.5	Vzdálenost šrafování výplně (Hatch Distance)	35
3.2	Specifické parametry 3D tisku pro DED.....	35
3.2.1	Posun paprsku od osy.....	35
3.2.2	Vzdálenost trysky od povrchu výtisku	36
3.2.3	Množství přidávaného prášku	37
4	Charakterizace mechanických vlastností.....	38
4.1	Zkouška tahem – miniaturní vzorky	39
4.2	Zkouška lomové houževnatosti – miniaturní vzorky	40
4.2.1	J-integrál	41
4.2.2	J-R křivka.....	42
4.3	Zkouška tvrdosti dle Vickerse	44

5	Experimentální část	44
5.1	Experimentální materiál	44
5.2	Použité depoziční zařízení	45
5.3	Navržené parametry depozice	46
5.4	Experimentální vzorky	48
5.5	Mechanické zkoušky	50
5.5.1	Zkoušky tahem	51
5.5.2	Zkoušky lomové houževnatosti	56
5.5.3	Měření tvrdosti	60
5.6	Metalografické zkoušky	60
5.6.1	Světelná mikroskopie	60
5.6.2	Elektronová mikroskopie	63
5.6.3	Pórovitost	64
5.6.4	EBSD – difrakce zpětně odražených elektronů	65
5.6.4.1	IQ mapy	66
5.6.4.2	Pólové obrazce	67
5.6.4.3	EDS analýza	68
5.6.5	Fraktografie	69
6	Diskuze výsledků	70
7	Závěr	73
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ	75

Seznam symbolů a zkratk

3D – Three Dimension – tři dimenze

AM – Additive Manufacturing - aditivní technologie

DED – Direct Energy Deposition – přímá energetická depozice

DLD – Direct Laser Deposition – přímá laserová depozice

FFF - Fused Filament Fabrication – stavění natavováním materiálu

RP – Rapid Prototyping – rychlé prototypování

SLS – Selective Laser Sintering – selektivní laserové spékání

SLM – Selective Laser Melting – selektivní laserové tavení

EBM – Electron Beam Melting – tavení elektronovým svazkem

HIP - Hot Isostatic Pressing – izostatické lisování za tepla

MTT – Micro Tensile Test – zkoušky tahem na miniaturních vzorcích

MCT – Micro Crack Test – zkoušky lomové houževnatosti na miniaturních vzorcích

EBSD - Electron Backscatter Diffraction – difrakce zpětně odražených elektronů

IPF - Inverse Pole Figure – inverzní pólové obrazce

EDS – Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy – energetická disperzivní spektroskopie

IQ – Image Quality – Mapy kvality

CTDO - Crack Tip Opening Displacement - Rozevření špičky trhliny [mm]

J-integrál – veličina lomové houževnatosti [kJ/m^2]

K – faktor intenzity napětí

R_m – mez pevnost v tahu [MPa]

$R_{p0,2}$ – mez kluzu [MPa]

A – tažnost [%]

A_g – plastické prodloužení měřené průtahoměrem při max. zatížení [%]

Z – kontrakce [%]

DMT – Direct Metal Tooling

F – síla [F]

S – plocha [m²]

1 Úvod

Aditivní technologie neboli 3D tisk je metoda výroby součástí pomocí přidávání materiálu. Aditivní technologie jsou momentálně na vzestupu a mají mnoho výhod, ale i nevýhod. Existuje několik různých technologií 3D tisku, které mají svá specifika pro výrobu a následné využití. Tyto technologie mají široké využití v průmyslu od automobilového přes zdravotnictví až po zbrojní průmysl.

Z pohledu využitelnosti aditivních technologií v inženýrské praxi jsou klíčové mechanické vlastnosti součástí vytvořených pomocí 3D tisku. Výsledné mechanické vlastnosti jsou zásadně závislé na depozičních parametrech což je téma této diplomové práce. Proces sledovaný v této práci je laserová přímá depozice práškových kovových materiálů. Vyhodnocované vlastnosti v závislosti na depozičních parametrech budou charakteristiky vyhodnocované ze zkoušky tahem, lomové houževnatosti a tvrdosti. Výsledky těchto zkoušek budou doplněny mikrostrukturními a fraktografickými analýzami. Vlastnosti materiálu budou vyhodnocovány v různých orientacích vzhledem ke směru depozice.

2 Aditivní technologie

Aditivní technologie představují soubor různých technologií metod výroby součástí pro široké spektrum průmyslu (od lékařství, přes automobilový průmysl až po kosmický průmysl). Největší výhodou těchto technologií je možnost výroby složitých výrobků, které nelze vyrobit běžnými konvenčními technologiemi, jako například: odlehčování pomocí porézních nebo buněčných struktur, přes tvarově složité výrobky až po heterogenní materiály v rámci jedné součásti.

2.1 Historie a současnost

Nejstarší technologie 3D tisku se poprvé objevila koncem osmdesátých let, kdy byla nazývána technologií Rapid Prototyping (RP). Je to proto, že procesy byly původně koncipovány jako rychlá a nákladově efektivnější metoda pro vytváření prototypů pro vývoj průmyslových produktů. Skutečný počátek 3D tisku však lze vysledovat od roku 1986, kdy byl vydán první patent pro stereolitografický přístroj (SLA). Tento patent patřil Charlesi (Chuckovi) Hullovi, který poprvé představil svůj SLA přístroj v roce 1983. Hull později založil společnost 3D Systems Corporation – jedna z největších a dodnes nejplodnějších organizací působících v odvětví 3D tisku. [1]

Během devadesátých let a na počátku roku 2000 se nadále zavádělo množství nových technologií, které se stále zaměřovaly výhradně na průmyslové aplikace. A přestože stále převažovaly procesy pro prototypové aplikace, výzkum a vývoj se ubíral i směrem k technologiím pro specifické nástroje a přímé výrobní aplikace. Tím vznikla nová terminologie, jmenovitě Rapid Tooling (RT), Rapid Casting (RC) a Rapid Manufacturing (RM). [1]

V období mezi léty 2000 až 2009 začal sektor vykazovat známky jakési diverzifikace se dvěma specifickými oblastmi důrazu, které jsou až dnes jasněji definovány. Byl to high-end 3D tisk, jenže velmi drahý systém, který byl zaměřen na výrobu dílů pro velmi hodnotné a složité součásti. Tento trend stále pokračuje a výsledky jsou viditelné ve výrobních aplikacích v odvětvích letectví, automobilového průmyslu, lékařství a jemných šperků. Mnoho z nich ale stále zůstává za zavřenými dveřmi. Dále, se někteří výrobci 3D tiskáren vyvíjeli jako “koncepční modeláři”, jak byli v té době nazýváni. Konkrétně se jednalo o 3D tiskárny, které se zaměřily na zdokonalení koncepčního vývoje funkčních prototypů, které byly vyvíjeny speciálně jako nízkonákladové, uživatelsky přístupné systémy vhodné pro menší výrobce. [1]

V roce 2007 se na trhu objevila první tiskárna pod 10 000 dolarů od společnosti 3D Systems. Nikdy se však nesečkala s úspěchem, který jí byl souzen. Na vině byl částečně samotný systém, ale také další vlivy na trhu. Svatý grál v té době měla získat 3D tiskárna pod 5000 dolarů – to bylo viděno mnoha zasvěcenými osobami a uživateli jako klíčové k otevření technologie 3D tisku pro mnohem širší publikum. Po většinu tohoto roku byl očekáván příchod Desktop Factory – kterou mnozí označovali jako naplnění tohoto svatého grálu. K uskutečnění nedošlo, protože organizace selhala při přípravě. Společnost Desktop Factory a její leader Cathy Lewis byly společně s IP získány společností 3D Systems a v roce 2008 všechny zmizely. Jak se později ukázalo, rok 2007 byl skutečně zlomovým rokem, který zpřístupnil 3D technologii tisku, i když si to někteří lidé uvědomili až v době, kdy se stal základním kamenem fenomén RepRap (replicating rapid prototyper – možnost sebereplikační činnosti a rychlého prototypování). Doktor Bowyer počítal s konceptem open source RepRap, samoreprodukční 3D tiskárny již v roce 2004 a jeho myšlenka byla v následujících letech těžce vydřena jeho týmem v Bath. Nejznámější byli Vik Oliver a Rhys Jones, kteří vyvinuli koncept až po pracovní prototypy 3D tiskárny. Rok 2007 byl počátečním výstřelem a tento embryonální, open source 3D tisk začal získávat na oblíbenosti. [1]

Teprve v lednu 2009 byla nabídnuta k prodeji první komerčně dostupná 3D tiskárna – ve formě kitu a na základě konceptu RepRap. Byla to tiskárna BfB RapMan 3D. V dubnu téhož roku těsně následovala společnost Makerbot Industries, jejíž zakladatelé se intenzivně podíleli na vývoji společnosti RepRap, dokud se po rozsáhlých investicích neodklonili od filozofie open source. Od roku 2009 se objevilo velké množství podobných tiskáren a nadále se tak děje. Zajímavý kontrast spočívá v tom, že zatímco fenomén RepRap vyvolal zcela nový sektor komerčních 3D tiskáren, komunita RepRap se věnuje vývoji open source pro 3D tisk a udržování komercializace. [1]

Významné milníky při vývoji 3D tisku:

- 1984 - Vznik 3D tisku, vytvoření prvního funkčního zařízení na principu stereolitografie.
- 1990 - Společnost 3D Systems vyrábí první AM zařízení. Zařízení pracuje s fotopolymery vytvrzované UV laserem. Ačkoliv výsledné objekty nejsou dokonalé, zařízení dokáže vyrábět složité tvary v krátké době.
- 1999 - První transplantace orgánu (močového měchýře), při které bylo využito AM.

- 2000 - Vědci dokázali vyrobit miniaturní ledvinu, která byla schopná filtrovat krev a produkovat moč ve zvířeti.
- 2005 - Dr. Adrian Bowyer z univerzity v Bath založil RepRap – open source projekt AM zařízení, který má za cíl replikovat samo sebe vytvořením většiny použitých součástí. Vize tohoto projektu je levná distribuce RepRap zařízeních komukoliv kamkoliv.
- 2006 - První AM zařízení na principu Selective laser sintering.
- 2006 - Bylo vytvořeno AM zařízení, které bylo schopné zároveň pracovat s více materiály, tj. vyrobená součást může být tvořena z materiálů o různých vlastnostech a hustotách.
- 2008 - První samoreplikující se AM zařízení. Výsledek aktivit projektu RepRap, který umožnil uživatelům, kteří už vlastnili AM zařízení vyrobit další.
- 2008 - První osoba používá protézu nohy kompletně vyrobenou pomocí AM zařízení.
- 2009 - Společnost MarkerBot Industries uvedla na trh kit, který umožnil vyrobit další AM zařízení a jiné součásti.
- 2009 - Společnost Organovo využila AM technologii k vytvoření první cévy
- 2011 - Inženýři z univerzity v Southamptonu navrhli a vyrobili první letadlo vyrobené pomocí AM.
- 2011 - První automobil, kde bylo ve větší míře použito AM. Jedná se o lehké vozidlo se třemi koly a s tvarem slzy, které váží cca 500kg. Motor, šasi a kola jsou vyrobené s tradičních materiálů, ale většina automobilu je vytvořena vrstva po vrstvě z plastu ABS.
- 2011 - Tisk ze zlata a stříbra. Společnost i.materialise začala nabízet jako první možnost tisku ze zlata a stříbra. Pravděpodobně se tím otevírají nové možnosti v oblasti šperkařství.
- 2012 - Použití AM technologie k vytvoření kosti spodní čelisti a implantování pacientovi. [2]
- 2014 – Malá tiskárna ve formě 3D pera pro tisknutí kdekoliv

- 2016 – využití 3D tisku ve stavebnictví, kdy dům o dispozici 2+1 se vytiskl za jeden den
- 2018 – Představen funkční brzdový třmen od firmy Brembo pro automobil Bugatti Chiron
- 2018 – představen funkční disk kola pro automobily od firmy HRE3D+ s podporou firmy GE Additive

2.2 Rapid Prototyping

Rapid Prototyping je označení pro soubor úkonů při výrobě 3D objektů z virtuálního modelu pomocí 3D tiskárny. Výsledné součásti velmi přesně odpovídají předloze s ohledem na použitou technologii. Proces RP se skládá z několika na sebe navazujících kroků, viz. **Obr. 1**. Tyto kroky jsou přiblíženy v této kapitole.



Obr. 1: Schéma Rapid Prototyping [3]

2.2.1 Pre-processing

Pre-Processing v sobě zahrnuje položky 1-3 z **obr. 1**. V prvním kroku probíhá příprava modelu pomocí CAD softwaru, kdy se objekt vytvořený nejčastěji vyexportuje do formátu STL (lze použít i další formáty). Dalším krokem je umístění STL souboru do softwaru RP, kde dojde k umístění součásti v pracovním prostoru, vytvoření pomocných podpor a nastavení parametrů tisku. Poté software vygeneruje soubor tzv. Gcode (různé formáty, dle výrobce softwaru), který rozdělí součást do jednotlivých vrstev. Také obsahuje informace o nastavení parametrů tisku, atd. V poslední řadě dojde k přípravě stroje pro tisk.

2.2.2 Processing

Vlastní depozice součásti, položka 4 v **obr. 1**. Dochází k samotné výrobě součásti po jednotlivých vrstvách. Pomocí jedné z technologií tisku tiskárna vytvoří součást. Tisk probíhá automaticky a není potřeba dohledu. Tisk součásti může trvat od několika minut až po dny, záleží na mnoha faktorech avšak nejvíce na použité technologii a velikosti součásti.

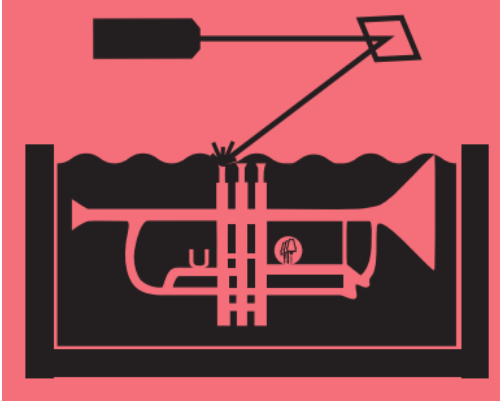
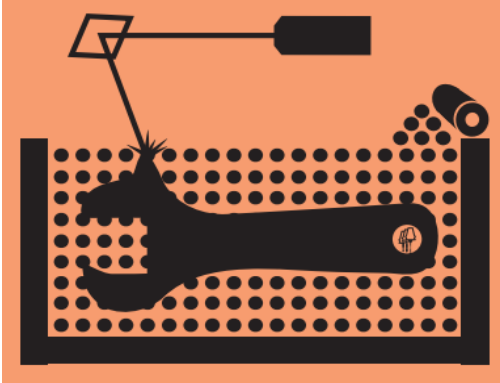

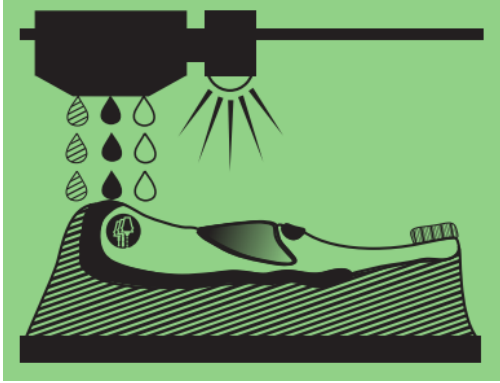
2.2.3 Post-Processing

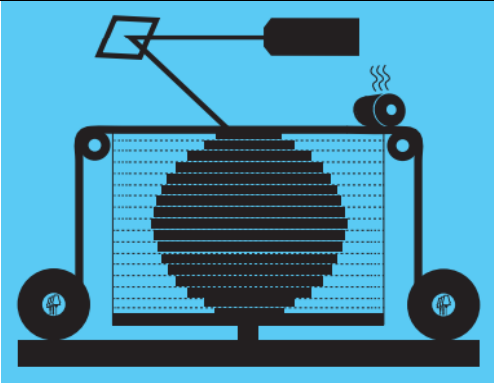
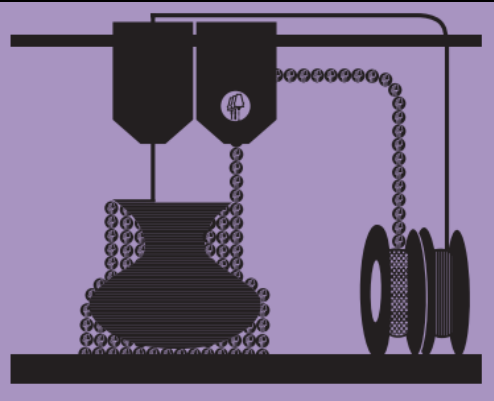
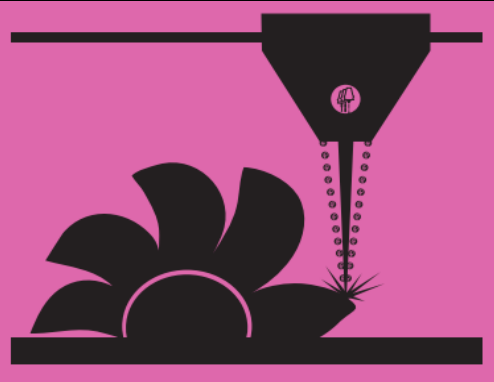
Jedná se o kroky, které souvisejí s následným vyjmutím součásti z tiskárny. Mezi tyto kroky patří očištění součásti od zbytků přebytečného materiálu nebo odstranění podpůrných konstrukcí. Dále mohou následovat různé dokončovací procesy, například: tepelné zpracování nebo úprava povrchu.

2.3 Rozdělení technologií aditivní výroby

Dle ASTM (ASTM F2792) rozlišujeme 7 AM procesů, viz. **Tab. 1**. Z toho se pro depozici kovů používají procesy práškového lože (powder bed), přímé energetické depozice (Direct Energy Deposition – DED), Binder Jetting, ale i technologie FFF (Fused Filament Fabrication) o nichž se podrobněji zmiňují v následných kapitolách.

Tab. 1: Rozdělení AM procesů dle ASTM [4]

Název technologie	Názorná ukázka technologie	Používané materiály
<p>Fotopolymerizace – VAT Photopolymerisation</p>		<p>Fotopryskyřice a resiny</p>
<p>Práškové lože – Powder Bed Fusion</p>		<p>Plasty, kovy, keramiky, písek v podobě prášku</p>
<p>Nastříkávání pojiva - Binder Jetting</p>		<p>Plasty, kovy, keramiky, sklo, písek ve podobě prášku</p>
<p>Nastříkávání materiálu – Material Jetting</p>		<p>Fotopolymery, polymery, vosky</p>

<p>Plošné laminování – Sheet Lamination</p>	 A schematic diagram of the sheet lamination process. It shows a stack of multiple thin sheets being fed from the left through a series of rollers. The sheets are then compressed together by a pair of large rollers, forming a thicker, laminated sheet. A small steam icon indicates heat is applied during the process.	<p>Papír, plastové fólie</p>
<p>Vytlačování materiálu – Material Extrusion</p>	 A schematic diagram of material extrusion. It shows a hopper at the top where material is loaded. The material is then pushed through a die to form a continuous extruded shape. This shape passes through a series of rollers and is then wound onto a spool.	<p>Termoplasty, termoplasty s obsahem kovového prášku</p>
<p>Přímá energetická depozice – Direct Energy Deposition</p>	 A schematic diagram of direct energy deposition. It shows a nozzle at the top that deposits material onto a substrate. The nozzle is heated, and the material is melted as it is deposited, forming a solid part. The substrate is shown with a semi-circular shape.	<p>Kovy v podobě prášku nebo přidavného drátu</p>

Současné výrobní procesy s přísadami kovů zahrnují nepřímé metody, jako jsou procesy selektivní slinování a přímé depozice, jako je selektivní tavení laserem nebo, tavení elektronovým paprskem. Nepřímé metody vyžadují následné zpracování, např. teplotní izostatické lisování, aby se vytvořily části hustoty větší než 90 %. Přímé metody mohou obvykle vyrábět součásti s hustotou vyšší než 90 % s optimalizovanými parametry procesu. V nepřímých metodách jsou kovové prášky buď částečně v pevném stavu slinuté dohromady anebo se k vázání kovových částic k výrobě předlisku používá pojivo s nízkou teplotou tání. Následné operace, jako je odstranění pojiva, slinování nebo infiltrace tekutého kovu, se používají k získání větší než 90% hustoty. Proces ultrazvukové konsolidace byl představen

vědci jako hybridní aditivní - subtraktivní proces, kdy se plechy (nebo proužky) kovových fólií nejprve ultrazvukem svařují do svazku pomocí ultrazvukové sondy. Pro tvarování kovového výrobku do požadovaného tvaru vrstvy se poté použije obrábění (často frézování na konci procesu). Střídáním mezi těmito svařovacími a obráběcími procesy jsou vyráběny trojrozměrné objekty. V ultrazvukovém tisku je 2D tvar vrstev získán kombinací svařování pásky nebo plechem a následným ořezáním svařované vrstvy na požadovaný tvar. Tento proces je schopen vyrábět části z čistého kovu, slitiny a kompozitního materiálu s využitím vysoce výkonného ultrazvuku a vysokého mechanického tlaku. [5]

Proces práškového lože nyní vstupuje do stadia technologické vyspělosti a v současné době je nejběžnějším kovovým 3D tiskem. [5]

Současné systémy tohoto procesu využívají tepelnou energii k roztavení laserovým nebo elektronovým paprskem. Výsledné struktury, morfologie a mikrostruktury tištěných materiálů jsou velmi závislé na tepelně-fyzikálních procesech a procesech přenosu tepla během procesu mikro svařování. Tyto procesy používají jako výchozí materiál jemné prášky, které mohou představovat zdravotní a bezpečnostní nebezpečí, zejména pokud se používají reaktivní kovové prášky, jako je hliník, hořčík nebo titan. Protože vzhledem k povaze této technologie tavení a tavení tepla probíhá proces výroby součástí v kontrolovaném prostředí inertních plynů nebo vakua, aby se zabránilo nadměrné oxidaci, rozptylu paprsků v případě elektronového paprsku. I když lze vyrobit vysoce kvalitní kovové části, typický systém kovového práškového lože začíná na 200 000 USD s objemem přibližně 800 cm³, aniž by se bralo v úvahu pomocné zařízení a zařízení potřebné k bezpečné manipulaci a zpracování kovových prášků. U systému se stavebním objemem praktickým pro výrobu konstrukčních prvků lze očekávat pouze kapitálové investice v hodnotě půl milionu až několika milionů. [5]

2.3.1 FFF technologie (FFF – Fused Filament Fabrication)

Tato technologie je nejpoužívanější pro tisk z polymerů. Pro tisk kovů pomocí této technologie přišla firma Markforged, kde systém technologie pracuje na principu difuzního spojování materiálu pomocí slinování - ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing). Tiskárna pomocí této technologie by měla výrazně slevit a zpřístupnit kovový 3D tisk.

Vytvořený model součásti se nahraje do softwaru výrobce, kde se následně automaticky upraví jeho velikost a to z důvodu objemových změn při slinování.

Tisk z počátku probíhá jako u klasické tiskárny na polymery metodou FFF, kdy používaný filament je na bázi pojiva smíchaného s kovovým práškem. Po vytisknutí součásti proběhne odstranění pojiva s následným slinováním na určitou teplotu dle použitého materiálu.

Tiskárna (**obr. 2**) tiskne v nejpoužívanější výšce vrstvy 50 μm a velikosti tiskového prostoru 300 x 220 x 180 mm. Momentálně výrobce nabízí tisk součástí z materiálů:

- nerezová ocel 17-4 PH (W.Nr. 1.4542),
- Nástrojová ocel D2 (W.Nr. 1.2379)
- Nástrojová ocel H13 (W.Nr. 1.2344)
- Nástrojová ocel A2 (W.Nr. 1.2363)
- Inconel IN 625

Dále ve vývoji jsou tyto materiály:

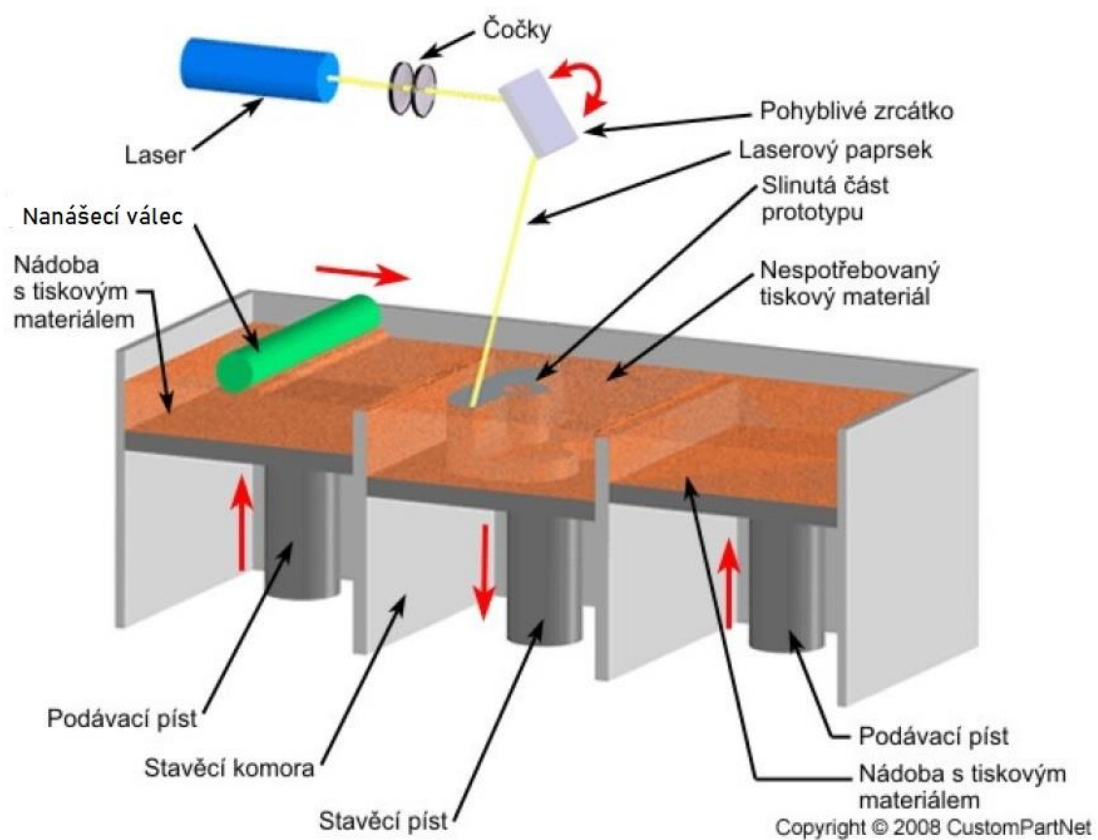
- Nerezová ocel 316L
- Titan Ti-6Al-4V
- Měď



Obr. 2: Tiskárna Markforged Metal X s příslušenstvím [6]

2.3.2 Metoda práškového lože (Powder Bed)

Metoda práškové lože zahrnuje všechny procesy, kde je soustředěna energie (laser nebo elektronový paprsek) k selektivnímu slinování nebo tavení vrstvy prášku. Princip této technologie spočívá v nanesení tenké vrstvy prášku ze zásobníku. Prášek je uložen v zásobníku a je dopraven na válec kde probíhá tisk. Takto dopravený prášek je rozmístěn nerovnoměrně, a proto musí dojít k vyrovnání souvislé vrstvy pomocí stěrky. Další možností je, že prášek je umístěn ve válci hned vedle komory, kde probíhá tisk a do této komory je dopraven pomocí stěrky viz. **obr. 3**.



Obr. 3: Princip metody práškového lože [7]

Po nanesení tenké vrstvy prášku dojde k natavení nebo slinování pomocí laseru nebo elektronového paprsku jedné vrstvy tisknuté součásti. Poté dojde k opětovnému nanesení další vrstvy prášku a celý proces se opakuje až k vytisknutí celé součásti.

Princip metody práškového lože pod sebe zahrnuje několik různých způsobů technologií, ale hlavní princip metody zůstává. Rozdělení je následující:

- Selectiv Laser Sintering (SLS)

- Selective Laser Melting (SLM)
- Electron Beam Melting (EBM)
- Binder Jetting

Výhody těchto technologií:

- Tisk převisů
- Tisk složitých struktur, které nelze vyrobit konvenčními metodami jako například tisk odlehčených součástí pomocí porézních struktur
- Tisk součástí s minimálním odpadem materiálu (možnost recyklace)
- Za použití topologické optimalizace lze vytisknout lehčí součást než běžným způsobem výroby při zachování mechanických vlastností

Nevýhody těchto technologií:

- Celý výrobek lze vytisknout jen z jednoho materiálu
- Výtisky mají jiné mechanické vlastnosti než třeba odlitky
- Omezená velikost tisku
- Nelze vytisknout uzavřenou dutinu, z důsledku zbytkového materiálu uvnitř dutiny
- Dlouhá doba tisku

2.3.2.1 Selective Laser Sintering (SLS)

Tato metoda je založena na spékání kovového prášku pomocí laseru. Laser částice jen lokálně natavuje a dochází k vytvoření jedné vrstvy tisknuté součásti. Celá komora, kde tento tisk probíhá, je předehřívána, aby docházelo k lepšímu spojování částic materiálu.

Takto vyrobená součást je porézní a proto se provádí post-processing pro zlepšení homogenity výsledné součásti v podobě slinování nebo technologie HIP (High Isostatic Pressing). Další možností snížení výsledné porozity je, že při spékání je k výrobku přidán bronz a pomocí kapilárního jevu je dopraven do výrobku, což slouží ke zlepšení výsledné hustoty. Celý proces tisku probíhá v inertní atmosféře, nejčastěji je používán argon nebo dusík. Touto metodou se tisknou materiály jako nerezové oceli, nástrojové oceli, ale také slitiny hliníku nebo titanu. Pomocí této metody lze tisknout i různé materiály jako plasty nebo keramiky.

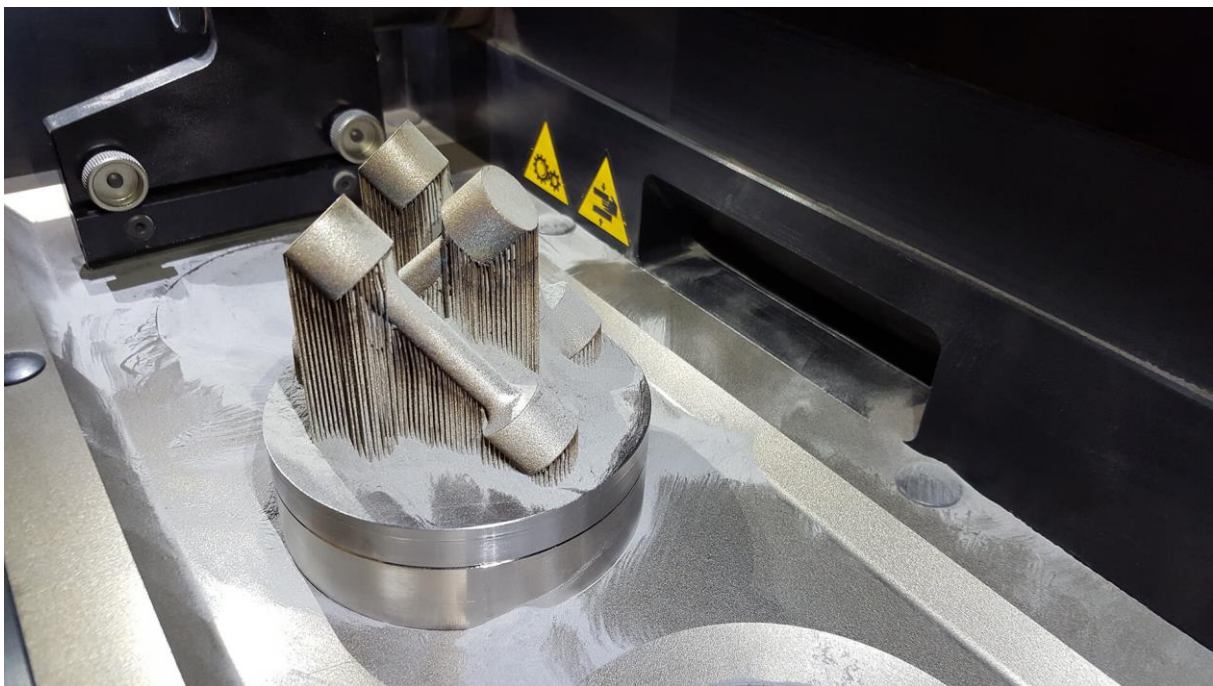
2.3.2.2 Selective Laser Melting (SLM)

Metoda SLM je velice podobná jako SLS technologie jen s rozdílem, že dochází k úplnému natavení částic prášku. Jelikož dochází k úplnému natavení částic je výsledná porozita menší než 1 %. Celý tisk opět probíhá v inertní atmosféře argonu nebo dusíku.

Při tisku součástí (viz. **obr.4**), které se rozšiřují je zapotřebí použití podpor součástí, aby nedocházelo k její deformaci. Tisk bez použití podpor je možný pokud úhel převisu nepřesahuje úhel 45° od svislice. Firma SLM Solution dokáže pomocí metody „downskin“ tisk převisů až do úhlu 15° bez využití podpor.

Rychlost tisku u této metody je limitována rychlostí naklopení zrcadel. Výsledná skenovací rychlost tisku se pohybuje v rozmezí 7 – 10 m.s⁻¹.

SLM technologie nabízí možnost tisku nerezových ocelí, nástrojových ocelí, nebo slitin na bázi niklu, hliníku, titanu, kobaltu, wolframu, ale i zlata.

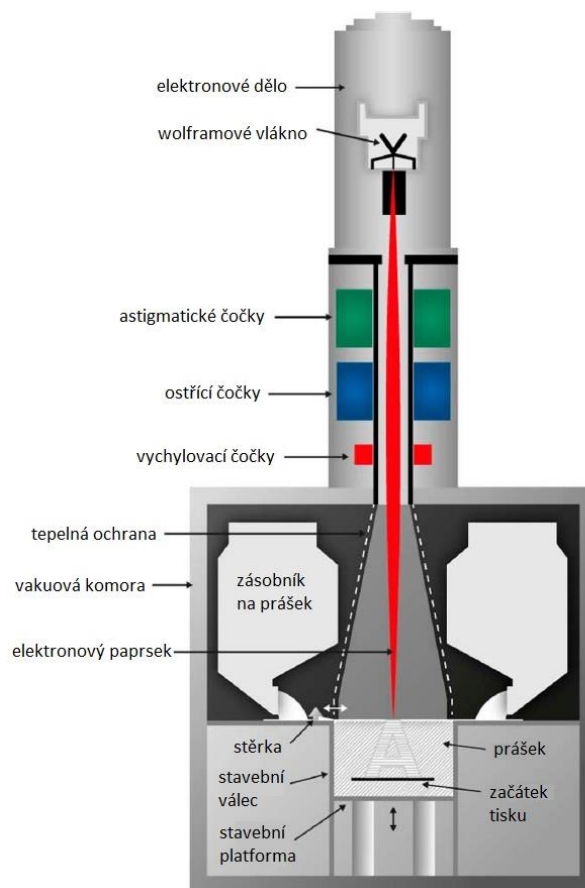


Obr. 4: Příklad tisku metodou SLM [8]

2.3.2.3 Electron Beam Melting (EBM)

EBM technologie (**obr. 5**) je založena na metodě práškového lože. Rozdílem mezi EBM a SLS/SLM je ten, že místo laseru je použité elektronové dělo jako zdroj energie. Při tisku dochází k úplnému natavení prášku jako u metody SLM. Svazek elektronů se získává přivedením vysokého napětí na wolframovou katodu, zatímco anoda má nulový potenciál. Mezi

oběma elektrodami je vytvořeno silné elektrické pole, které urychluje elektrony směrem k anodě. Množství urychlených elektronů lze regulovat na třetí elektrodě. Aby urychlené elektrony neztrácely na energii a nedocházelo k rozptylu svazku kolizemi s molekulami vzduchu, musí tento proces probíhat ve vakuu, což je jednou z nevýhod tohoto způsobu tisku. Další nevýhodou je, že pokud urychlovací napětí je vyšší než 15 kV vzniká rentgenové záření, proto zařízení musí mít dostatečné stínění. Jednou z dalších nevýhod je horší kvalita povrchu ve srovnání s metodou SLM. Mezi výhody této technologie je skenovací rychlost tisku až 8 000 m.s⁻¹, které je dosaženo díky elektromagnetům, které vychylují svazek elektronů. Momentální přední výrobce této technologie firma Arcam nabízí možnost tisku z titanových slitin, CoCr slitiny a ve vývoji je niklová slitina IN718.



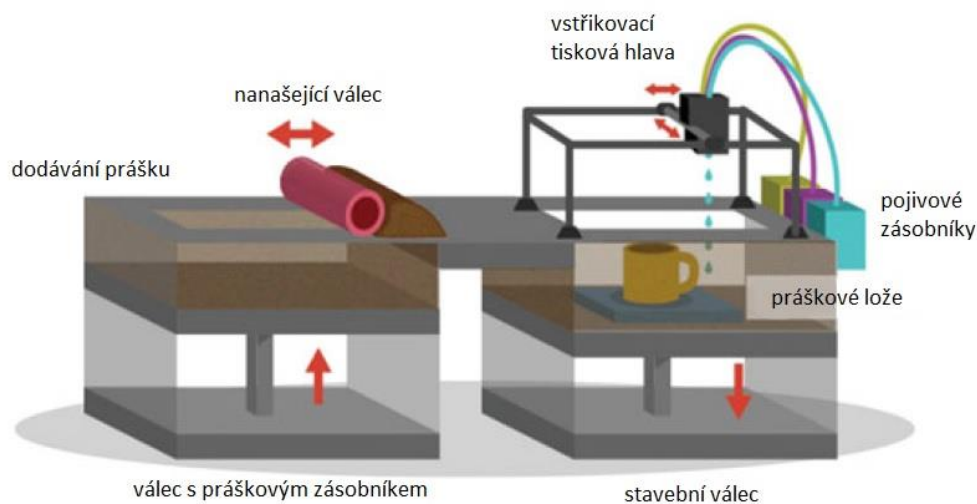
Obr. 5: Princip metody EBM [9]

2.3.2.4 Binder Jetting

Princip technologie Binder Jetting (**obr. 6**) je kombinací procesu práškového lože a procesu tryskání pojiva. Základní materiál se pokládá na stavení platformu a vytváří se souvislá vrstva. Tisková hlava s jednoduchými nebo vícenásobnými tryskami se pohybuje v určité výšce

nad práškovým ložem a nanáší kapičky pojivového materiálu, aby v podstatě „slepila“ částice prášku v oblastech definovaných tiskem jednoho řezu 3D modelu. Tento proces vytváření vrstvy se opakuje, jak platforma klesá v souřadnici Z, aby se dokončila celá trojrozměrné součást. Po dokončení tisku je hotový díl obklopen nevyužitým práškem. Následně se tištěná součást zvedne a nevyužitý prášek se odstraní. [5]

V prostředí s více tryskami / materiály může být pojivo také kombinováno s barevným inkoustem, což poskytuje možnosti barevného tisku. Pro polymerní aplikace je část vyrobená tímto postupem často použitelná okamžitě bez jakýchkoli následných procesů. Avšak v případě kovových nebo keramických aplikacích je vyžadováno odstranění pojivového materiálu a je provedeno opětovné zahřátí tištěné části na slinovací teploty, aby se umožnilo odstranění pojiva mezi částicemi základního materiálu, které má za následek vyšší pevnost. V této fázi postprocesu jsou tištěné části porézní. Pokud je požadována co nejmenší poréznost v materiálech, je možné provést HIP nebo infiltrace druhého materiálu. Tento proces byl použit např. pro výrobu vstřikovacích lisovacích forem, kde se k tisknutí forem používá prášek na bázi oceli a následuje proces infiltrace bronzem, aby se dosáhlo plného objemu. [5]



Obr. 6: princip metody Binder Jetting [5]

2.3.3 Metoda přímé depozice (Direct Energy Deposition - DED)

I když strategie zpracování DED se řídí obecným principem aditivní výroby, způsob dodávky přídavného materiálu je odlišný oproti technologii zpracování v procesu SLS / SLM na koaxiální přívádění v procesu DED. Systém pro dodávání prášku DED se skládá ze speciálně navrženého podavače přídavného materiálu, který dodává do trysky pro přívod

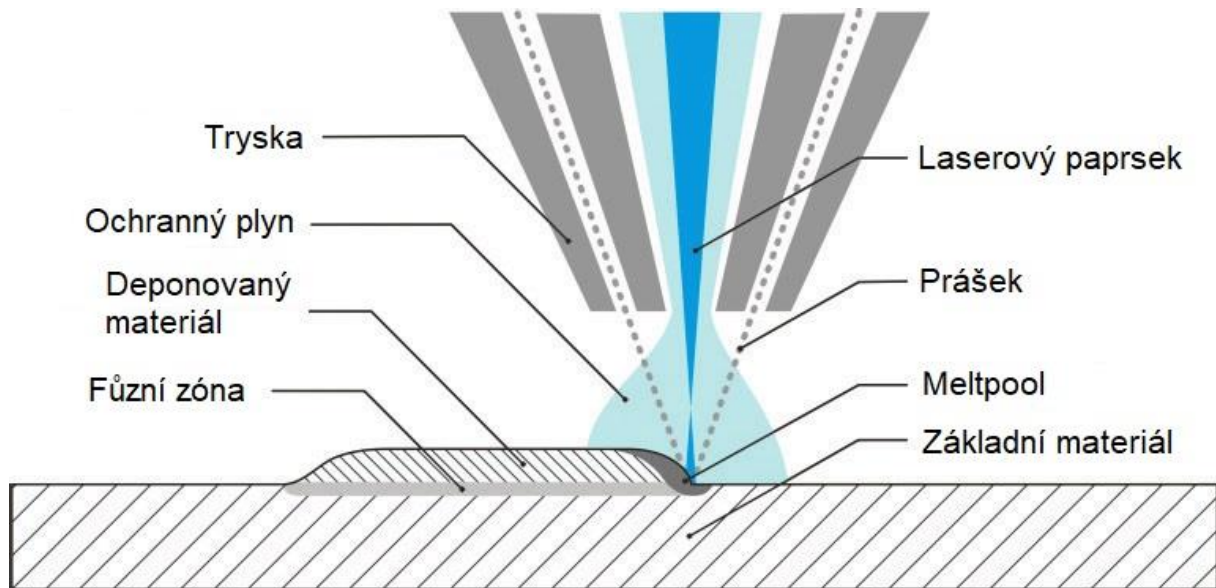
ochraného plynu pomocí trysek. Vysokoenergetický laserový paprsek je dodáván podél osy ve středu soustavy trysek a je zaostřen systémem čoček do těsné blízkosti obrobku. Pohyb objektivu a práškových trysek ve směru Z řídí výšku ostření laseru i prášku. Obrobek se pohybuje ve směru X-Y, lze i přidat další dvě osy polohování samotného stolu, většinou označované A a C, kde se počítačem řízený systém, pod zónou kde spolu interaguje paprsek a prášek, tak aby se vytvořila požadovaná geometrie průřezu. Následné vrstvy se aditivně ukládají a vytvářejí trojrozměrnou součást. Díky integraci víceosého depozičního systému a schopnosti mnohonásobného dodání materiálu a v některých případech patentovaného systému řízení uzavřené smyčky, DED může povlékat a stavět komponenty mající složité geometrie, a rozměrové přesnosti. DED má proto vysoce univerzální procesní schopnost a lze jej použít pro výrobu nových součástí, opravu a obnovu opotřebovaných nebo poškozených součástí a přípravu povlaků odolných proti opotřebení a korozi. [10]

Většinou technologie DED pracuje s využitím zdroje energie v podobě laserového paprsku. V tomto případě se využívá ochranného plynu nejčastěji argonu, lze ale použít i další plyny jako dusík nebo helium. Další možností je využití elektronového paprsku, kde ochranu před oxidací zajišťuje vytvořené vakuum.

Technologie DED se dále dělí do dvou skupin podle formy přídavného materiálu:

- Powder Blown

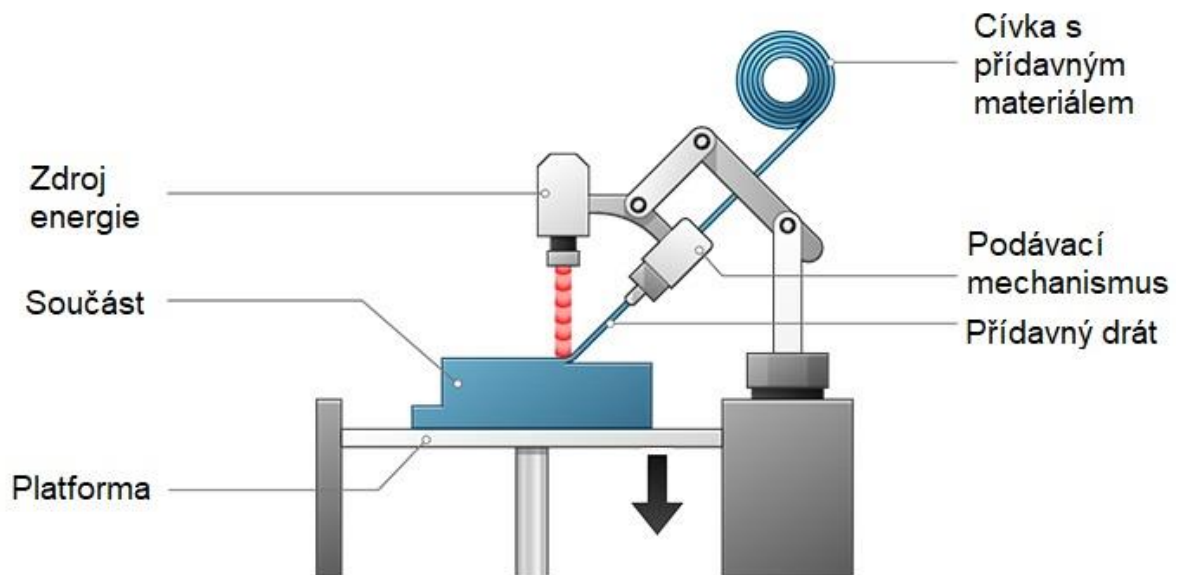
Přídavný materiál je ve formě prášku a je přiváděn do trysky (viz. **obr. 7**), kde se sype do ohniska laserového paprsku. Prášek by měl splňovat určité parametry pro zajištění optimálního množství prášku a následného natavení meltpoolu.



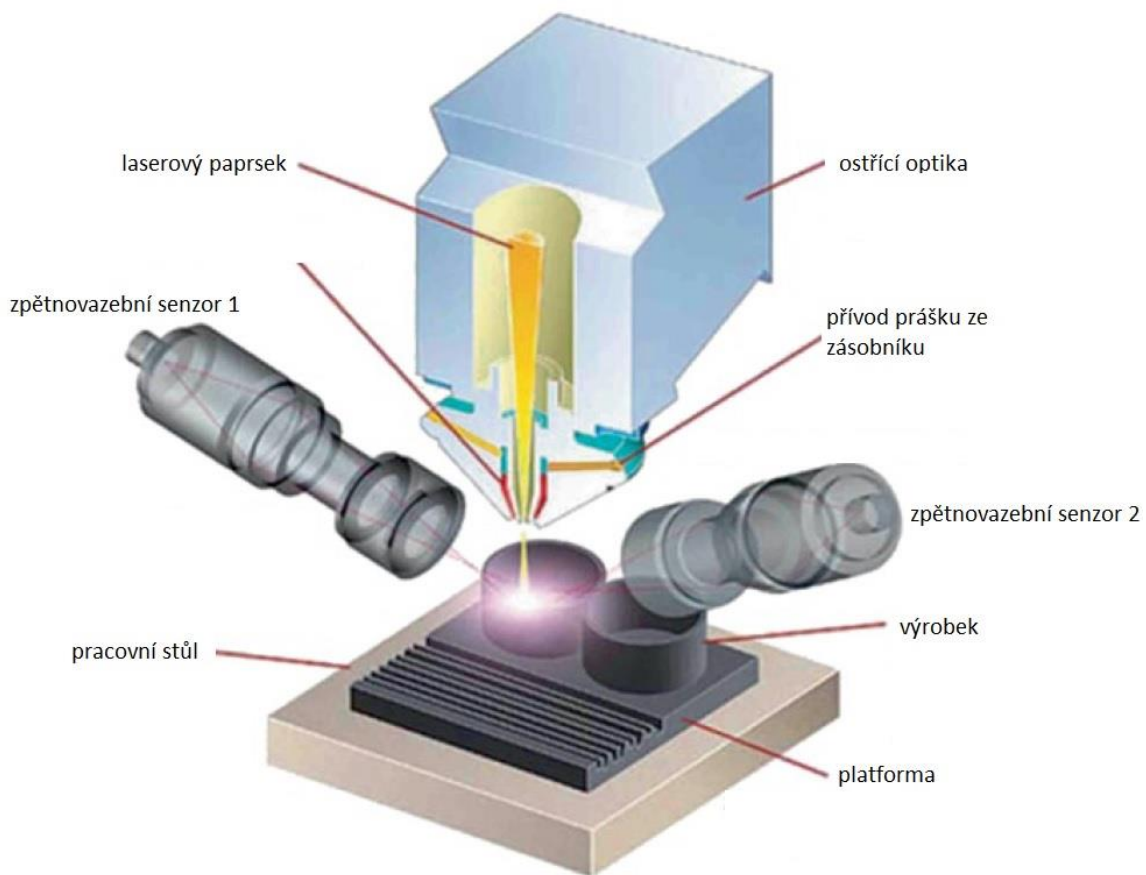
Obr. 7: Schéma metody DED – Powder blown [10]

- Wire Feed

Přidávným materiálem u této technologie je drát. Ten je dodáván do ohniska energie z cívky pomocí posuvného mechanismu, viz. **obr. 8**.



Obr. 8: Schéma metody DED – Wire Feed [11]



Obr. 9: Princip technologie přímé depozice [12]

Typická DED technologie je schematicky znázorněna na **obr. 9** a některé z hlavních funkcí jsou:

- Regulace zpětné vazby pro proces DED

Tento systém slouží jako klíčový nástroj pro výrobu produktů. Vysokorychlostní senzory shromažďují informace o tisknuté vrstvě, které jsou přímo přiváděny do řídicího systému, který upravuje vstupní parametry zpracování, aby se zachovala rozměrová přesnost a integrita materiálu. [12]

- Koaxiální tryska s lokální ochranou taveniny, tzv. meltpoolu

Konstrukce koaxiální trysky je založena na patentu a nabízí stejné rychlosti nanášení v jakémkoli směru. Inertní plyn přiváděný tryskou napomáhá jak při dopravě prášku, tak při ochraně depoziční vrstvy před oxidací. Strategie přívodu ochranného plynu musí být

v rovnováze mezi tlakem odvádějícím okolní a dodáváním prášku, aniž by způsoboval nadměrné rušení uvnitř roztaveného meltpoolu. [12]

- Víceosý počítačem podporovaný výrobní (CAM) software pro AM

Víceosý software DED CAM pro AM, který zahrnuje integrovanou databázi DED s návrhy procesu jako součást softwaru, vytvářející dráhu nástroje CAM přímo z dat CAD. Dráhy pro ukládání vrstev, povrchů a objemů jsou poskytovány ve třech rozměrech, a proto mohou být vícevrstvé depoziční dráhy připraveny v jediné operaci. Zahrnuté jsou simulační moduly a moduly pro detekci kolizí a umožňují tak uživateli detekovat jakoukoli možnou kolizi zpracovávací hlavy a součásti při vytváření dráhy nástroje pro ukládání. [12]

- DED vizuální systém

Vizuální systém DED byl vyvinut pro ukládání malých objektů s jemnými vlastnostmi. Systém vyhledá polohu souřadnic součásti ve stroji a umožňuje snadné generování dráhy nástroje pro přesné tisknutí. Tím se eliminuje ruční sběr součástí, což je prakticky nemožné pro velmi malé součásti s jemnými strukturami. Rychlejší provoz a lepší opakovatelnost výrazně zvyšují produktivitu. [12]

Výhody této technologie jsou:

- Rychlejší tisk v porovnání s metodou práškového lože
- Možnost tisku heterogenních materiálů
- Možnost tisku z více prášků (materiálů) najednou za vzniku jiného materiálu než jsou použité prášky
- Možnost tisku povlaků na již hotové součásti

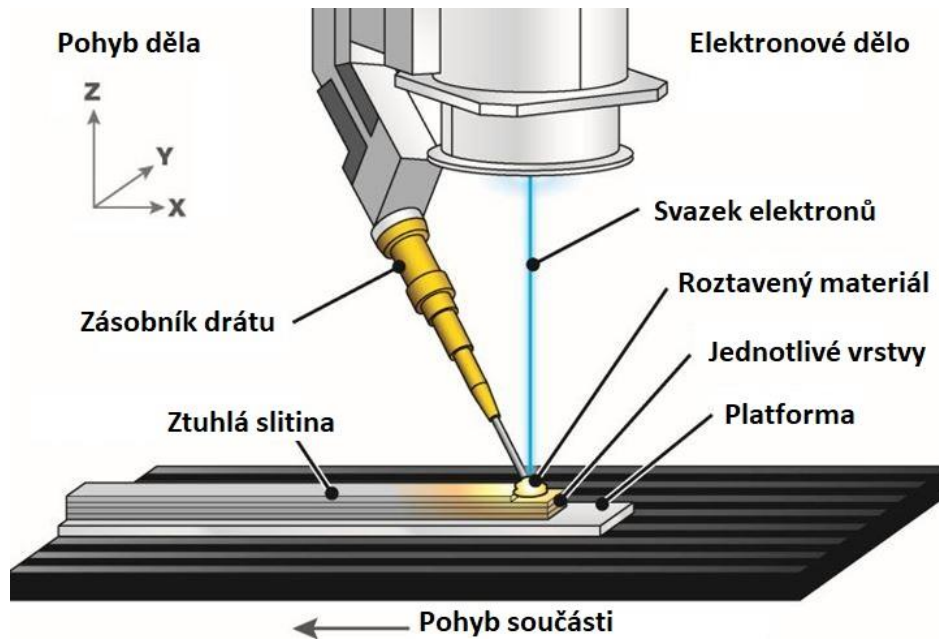
Nevýhody této technologie jsou:

- Horší tvarová přesnost
- Nelze tisknout porézní struktury
- U tříosého systému nelze tisknout součást s převisy nad 5° od kolmice

Metoda přímé depoziice se nejčastěji používá s využitím prášku jako tisknouceho média o velikosti prášku $d = 45 - 150 \mu\text{m}$. Další možností je využití přidávaného materiálu v podobě drátu kdy se tato možnost nejčastěji využívá při tisku s elektronovým paprskem, kdy nelze použít plyn k dopravě prášku.

2.3.3.1 Metoda přímé depozice s využitím elektronového paprsku EBAM®

Další možností získávání energie pro tavení materiálu je možnost využití elektronového paprsku. Celý tento proces probíhá ve vakuu, a proto nelze využít přidávaného materiálu ve formě prášku. To z důvodu, že prášek je dodáváný za pomoci inertního plynu, kdy plyn by narušoval svazek elektronů. Materiál se dodává ve formě drátu viz. **obr. 10**.



Obr. 10: Princip metody EBAM® [13]

Touto technologií lze tisknout různé materiály jako například:

- Titan a jeho slitiny
- Inconel 625, 718
- Tantal
- Wolfram
- Niob
- Nerezové oceli
- Hliník
- Zircalloy
- Slitiny niklu a mědi v poměru 70:30, 30:70

3 Vliv parametrů na depozici

Technologie 3D tisku je závislá na desítkách parametrů. V této kapitole se zaměřím na parametry s nejvyšším vlivem na výsledné vlastnosti deponované součásti. Parametry mohou být od velikosti a distribuce částic, přes rychlost tisku až po strategii tisku. Dále pak v této kapitole se budu zabývat nejvýznamnějšími parametry 3D tisku a následně se zaměřím na parametry specifické pro DED PB, jež bude využita v experimentální části.

3.1 Obecné parametry 3D tisku

V 3D tisku existuje několik parametrů, které jsou společné pro všechny typy technologií a mají obdobné dopady na výsledné mechanické vlastnosti.

3.1.1 Výkon laseru

Výkon laseru určuje výsledný tvar meltpoolu, který je udáván tvarovým faktorem jako je výška a šířka meltpoolu. Při nízkém výkonu dochází k částečnému natavení prášku, výška a šířka meltpoolu je nedostatečná. Dochází k malému překryvu jednotlivých linií tisku a výsledný výtisk je v ose Z příliš nízký nebo povrch může být propadlý, dále může docházet ke špatné přilnavosti jednotlivých vrstev a odtržení výtisku od platformy. S rostoucím výkonem dochází k nárůstu výšky a šířky meltpoolu, kdy je natavováno příliš velké množství prášku a výška vrstvy je vyšší, než je žádáno. V průběhu tisku může dojít až ke kolizi výtisku a trysky z důvodu postupného navyšování součásti, protože tryska se vždy posouvá o definovanou vzdálenost ve směru Z nebo natavený prášek se uchytí na trysce a dojde k natavení prášku uvnitř trysky a k jejímu zaslepení. V extrémním případě, kdy dojde k navýšení výkonu nad určitou mez, dojde ke spálení prášku a vnesením oxidů do meltpoolu.

3.1.2 Rychlost tisku

Rychlost tisku je spjata s množstvím vložené energie do materiálu a bude mít vliv na rozměry meltpoolu. Mezi roztaveným meltpoolem a základnou je velký teplotní gradient a povrchové napětí. Při nízké rychlosti tisku dojde ke vnesení vysoké energie do meltpoolu a tím se sníží teplotní gradient a povrchové napětí při přestupu tepla z taveniny do okolí, ale povrch meltpoolu je hrbolatý. Při zvýšení rychlosti tisku nad optimální hodnotu, dochází k nedostatečnému vložení energie, dále dochází ke špatné adhezi meltpoolu k povrchu nebo k natavení malého množství prášku a výsledný meltpool má vysokou pórovitost. Rovněž při vysoké rychlosti tisku bude mít výsledný výtisk menší výšku než skutečný model.

3.1.3 Strategie tisku

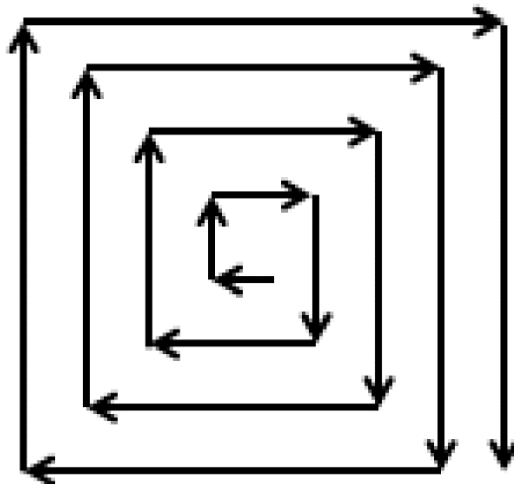
Strategie tisku nebo taktéž skenovací vzory mají vliv na pórovitost, drsnost povrchu mikrostrukturu a hlavně na vnesené teplo do součásti. Existuje několik typů strategií tisku, jako jsou například ZigZag, Zig nebo Spiral. Ke každému typu tisku lze také nastavit, zda se daná vrstva bude tisknout s konturou (což je dráha tisku po obvodu dané vrstvy) a výplně nebo jejich různé kombinace. Počet kontur závisí na tvaru výsledné hrany. Například, pokud je strategie označována jako CFC+CF znamená to, že tisk proběhne následovně: v první vrstvě se vytiskne kontura, poté se tiskne výplně vrstvy a nakonec se vytiskne opět kontura. V následující vrstvě proběhne tisk kontury a poté výplně. Tyto dvě vrstvy se následně střídají a je tím zajištěna nejlepší výška krajů součásti a nedochází k zaoblení vrchních hran.

Strategie typu „ZigZag“ pracuje na principu souvislého tisku celé výplně, kdy tryska tiskne například ve směru +X, následně dojde o přejetí o danou vzdálenost v kolmém směru a poté probíhá tisk ve směru -X, až do vyplnění celé plochy. V další vrstvě dojde k pootočení o 90° a tryska tiskne ve směrech +Y a -Y. Při každé vrstvě se taktéž mění počáteční bod tisku a tisk probíhá souvisle. Tato strategie se opakuje každých 8 vrstev. Princip je znázorněn na **obr. 11**.



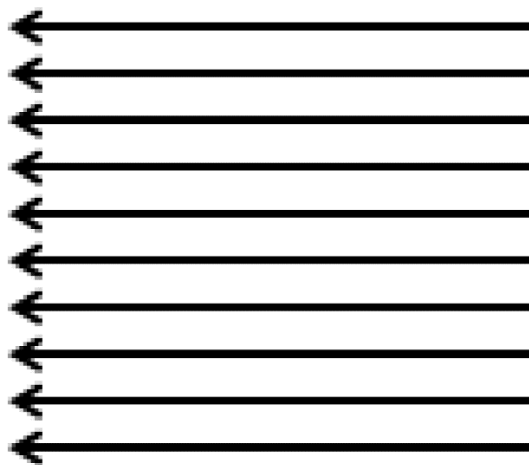
Obr. 11: Strategie typu ZigZag

Dalším typem je strategie „Spiral“, která začíná uprostřed dané vrstvy a postupně ve čtvercích vyplňuje celou vrstvu v souvislém tisku. V následující vrstvě dochází k posunutí místa přejezdu do dalšího čtverce o 90° v rámci „kříže“, poté se přejezd přesune do úhlopříček s pootáčením o 90°. V každé vrstvě dochází i ke změně směru tisku – po směru hodinových ručiček a proti směru hodinových ručiček. Tento typ strategie se opakuje každých 8 vrstev. Způsob tisku je znázorněn na **obr. 12**.



Obr. 12: Strategie typu Spiral

Strategie typu „Zig“ se zakládá na tisku v jednotlivém směru např. +X, po vytisknutí jedné linie dojde k návratu tiskové hlavy k počátku (s posunutím v druhé ose) a znovu se tiskne pouze jedna linie. Další vrstva je pootočená o 90°. Tento způsob tisku je časově nejnáročnější z důvodu přejezdů a ke střídání dochází po 4 vrstvách. Způsob tisku je znázorněn na **obr. 13**.



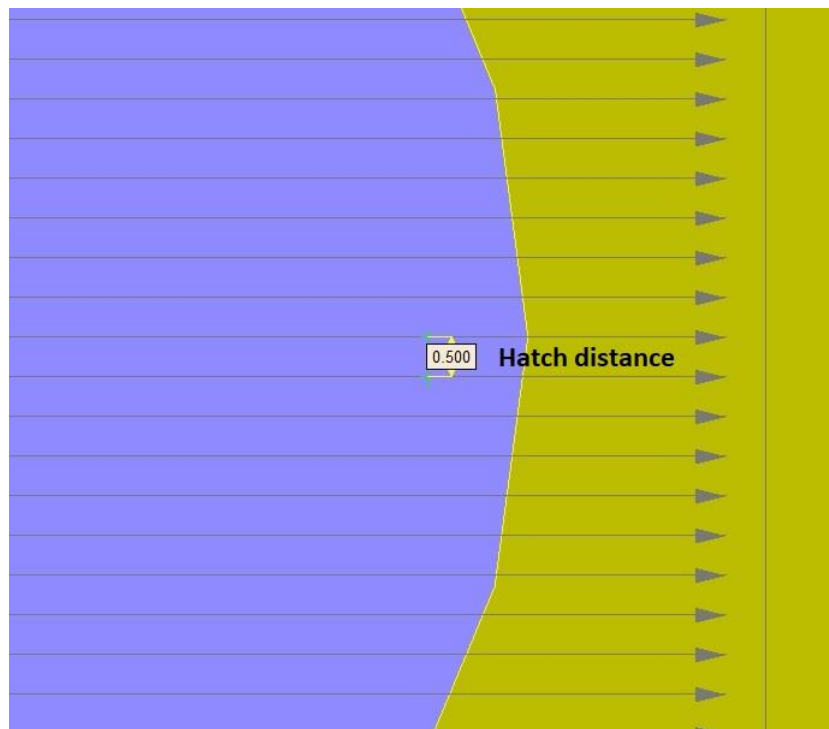
Obr. 13: Strategie typu Zig

3.1.4 Výška vrstvy

Výška vrstvy jednotlivých „řezů“ ve směru Z závisí na typu optického systému trysky a v dnešní době jsou na trhu již výrobci, kteří disponují proměnlivou optikou a jsou schopni měnit v průběhu tisku průměr laserového paprsku a tím i výšku vrstvy. Tento parametr má vliv na výslednou mikrostrukturu, pevnost, drsnost povrchu nebo celkový čas tisku.

3.1.5 Vzdálenost šrafování výplně (Hatch Distance)

Jednotlivé trasy tisku jsou od sebe vzdáleny o definovanou vzdálenost od sousední trasy tisku. Tato vzdálenost ovlivňuje pórovitost, mechanické vlastnosti a výsledný rozměr ve směru Z. Tato vzdálenost by měla být v ideálním případě kolem 2/3 průměru paprsku laseru. Viz. **obr. 14.**



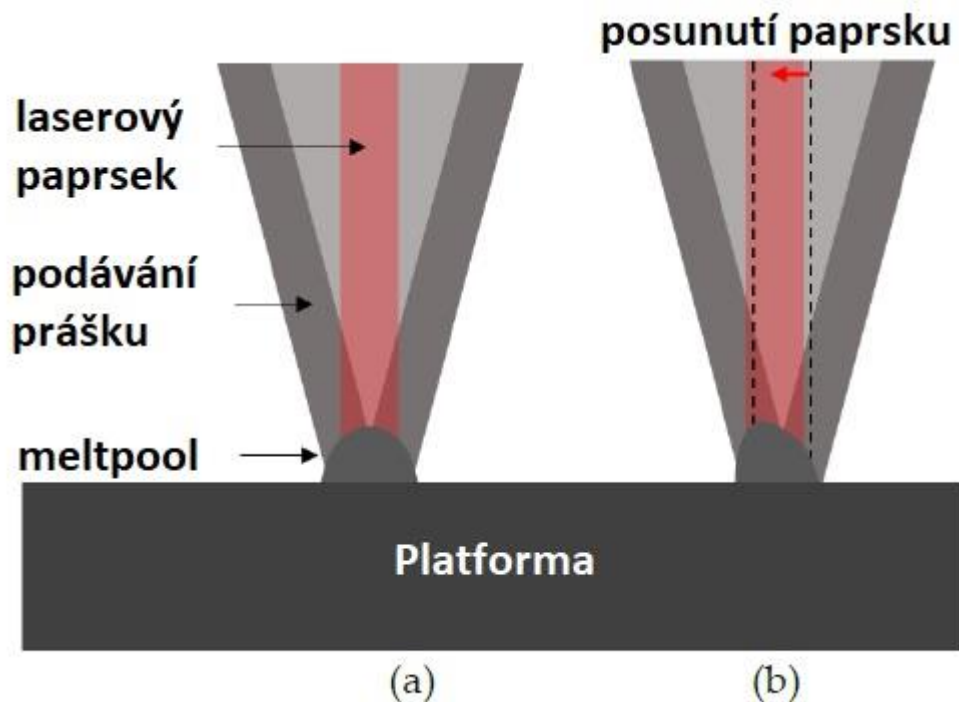
Obr. 14: Vzdálenost šrafování neboli Hatch Distance pro průměr paprsku 0,8 mm

3.2 Specifické parametry 3D tisku pro DED

V této části se budu zabývat parametry specifickými pro technologii DED – Powder Blown s využitím laseru jako zdroje energie.

3.2.1 Posun paprsku od osy

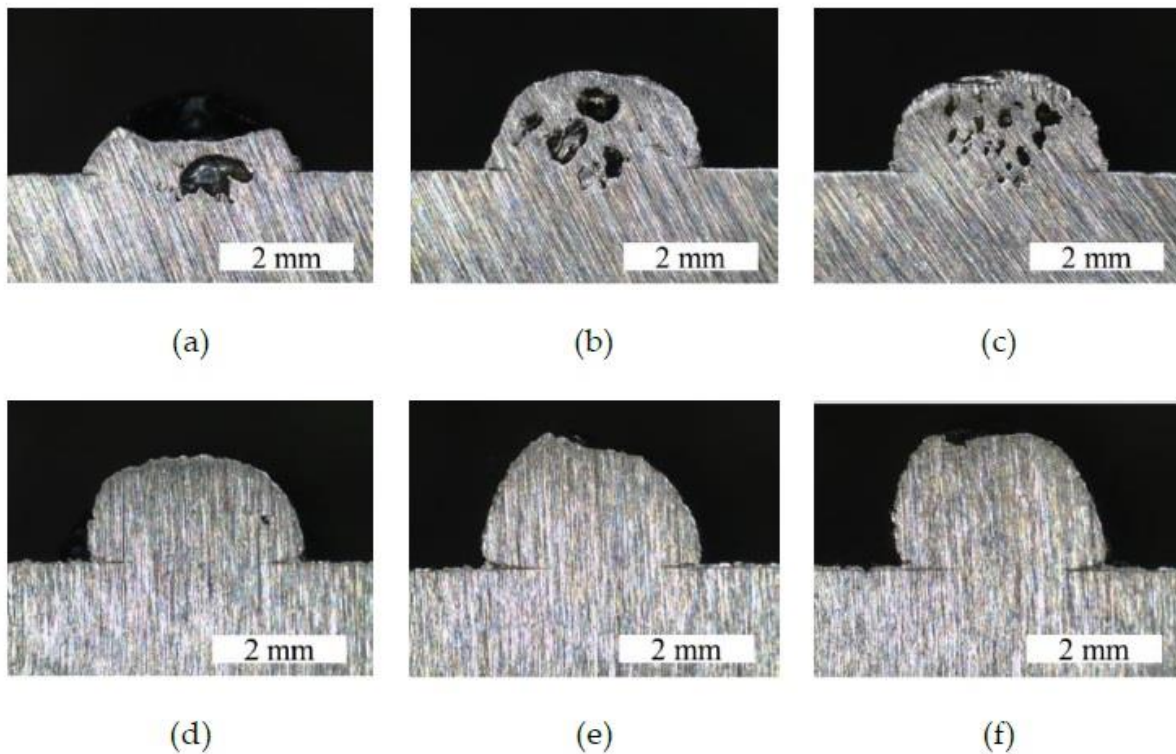
V případě tisku pomocí přímé depozice je důležité, aby ohnisko laserového paprsku bylo fokusováno do stejného místa přidávaného prášku a bylo v ose tisku, viz **obr. 15**. Dalším důvodem je že dochází k překryvu jednotlivých meltpoolů a při vyosení by mohlo dojít k nesprávnému spojení. Na nedokonalý překryv se váže i to, že by mohla vzrůst lokální pórovitost. Pórovitost je způsobena natavením jen části dodávaného prášku a zbylý prášek ulpívá na tavenině. Další vrstvou dojde k překryvu tohoto místa a tímto procesem dojde ke vzniku lokální pórovitosti. [14]



Obr. 15: Posunutí paprsku od osy: (a) paprsek ve středu osy, (b) vychýlení paprsku od osy [14]

3.2.2 Vzdálenost trysky od povrchu výtisku


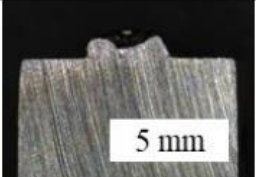

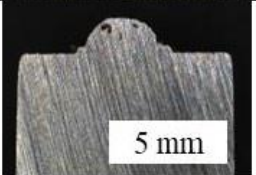

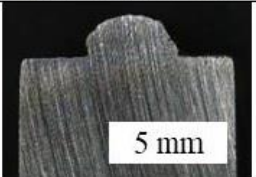

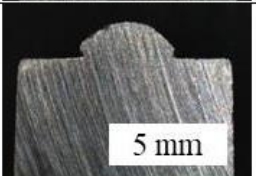

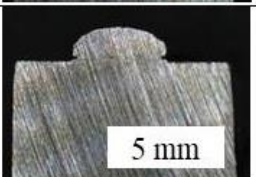
Vzdálenost trysky od výtisku má vliv na výsledný tvar, výšku a přilnavost k meltpoolu. Pokud je vzdálenost trysky nad deponovanou součástí příliš nízká, dochází k propadu meltpoolu z důvodu, že ochranný a nosný plyn má příliš vysoký tlak a je koncentrován do úzké oblasti, viz **obr. 16 a)**, dalším jevem který nastává je zvýšená porozita. Při dalším zvýšení vzdálenosti trysky dochází ke snižování tlaku ochranného a nosného plynu a proto výška meltpoolu se zvyšuje na optimální výšku, také se snižuje porozita uvnitř meltpoolu, viz **obr. 16 b) – c)**. Při příliš velké vzdálenosti trysky od povrchu dochází k natavování prášku v centru meltpoolu a může dojít ke špatnému přilnutí meltpoolu k povrchu, viz **obr. 16 d) – f)**. Z toho důvodu je dobré snížit množství dodávaného ochranného a nosného plynu, kdy se sníží výsledná porozita a zůstane zachována dostatečná přilnavost meltpoolu k povrchu. [14]



Obr. 16: Vzdálenost trysky od povrchu výtisku: (a) 5 mm, (b) 7 mm,
(c) 9 mm, (d) 11 mm, (e) 13 mm, and (f) 15 mm. [14]

3.2.3 Množství přidávaného prášku

Změna množství dodávaného prášku má obdobný vliv jako změna výkonu laseru. Při malém množství dodávaného prášku dochází k tomu, že meltpool je příliš nízký a jeho povrch je zvrásněný. Při překrytí další vrstvou dochází k vytváření pórů nebo k uzavření nenataveného prášku uvnitř pórů. Zvýšením množství dodávaného prášku nad určitou mez, dojde k zastavení zvyšování meltpoolu až začne klesat účinnost depozice s tím, že většina prášku je ve formě odpadu. Z toho důvodu musí být podmínka průtoku přidávaného prášku vybrána s ohledem na účinnost nanášení prášku. Na **obr. 17** lze vidět různé množství přidávaného prášku na změnu meltpoolu. [14]

Množství prášku (g/min)	Vzhled meltpoolu	Řez meltpoolu
15.0		
18.8		
22.5		
26.3		
30.0		

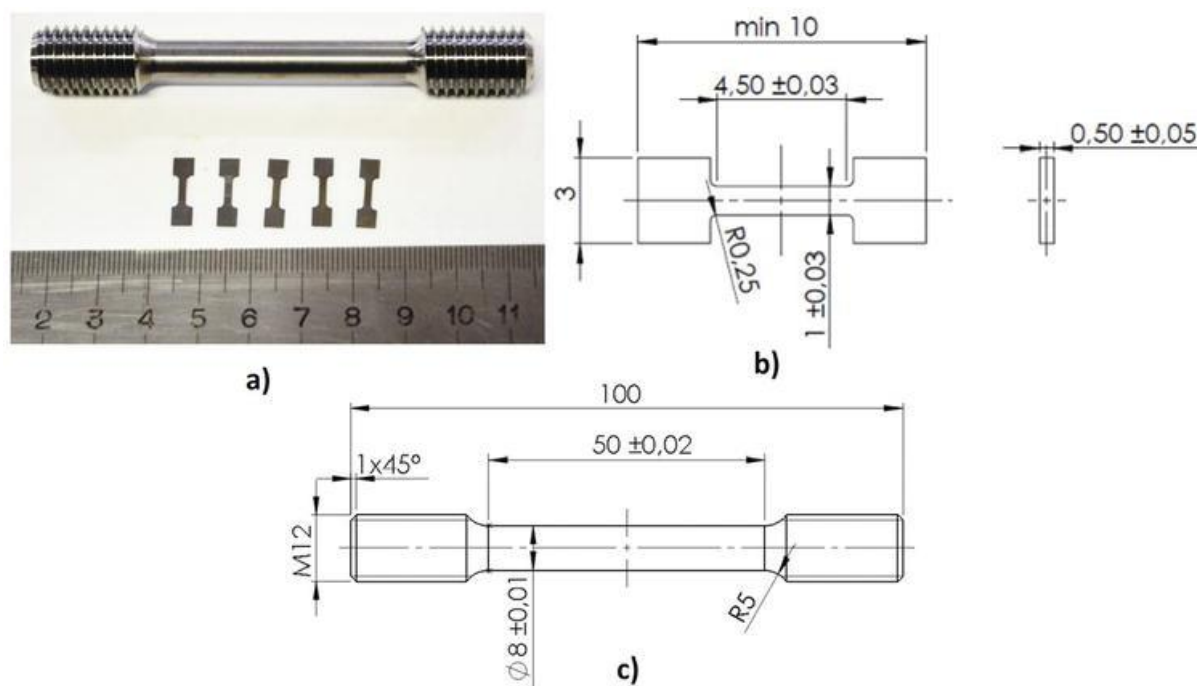
Obr. 17: Vliv změny přidávaného prášku na meltpool [14]

4 Charakterizace mechanických vlastností

Mechanické vlastnosti jsou důležitou součástí pro dimenzování strojních součástí, následnou počítačovou simulaci nebo pro ověření kvality materiálu. Pro mechanické zkoušky jsou určeny podmínky zkoušení a tvar zkušebního tělesa. Výsledkem těchto zkoušek je stanovení mechanických vlastností materiálu, které vyjadřují zpětnou vazbu na působící zatížení. Tato zpětná vazba je závislá na druhu materiálu, způsobu výroby nebo na velikosti samotné součásti. V případě 3D tištěných součástí jsou mechanické charakteristiky velmi významné zejména vzhledem k tomu, že mechanické vlastnosti jsou u těchto materiálů mnohdy závislé na daném směru depozice a tloušťce deponované vrstvy. V následujících kapitolách budou přiblíženy miniaturní zkoušky tahem a lomové houževnatosti umožňující vyhodnocení lokálních vlastností. [15]

4.1 Zkouška tahem – miniaturní vzorky

Zkouška tahem pro miniaturní vzorky je obdobná se standardizovanou zkouškou tahem, jen momentálně tato zkušební metoda není ustanovena normou a její provedení závisí na předpisech zkušební laboratoře, kde je prováděna. Miniaturní vzorky byly vyvinuty z důvodu co největší úspory materiálu, možno vidět na **obr. 18**, kde je srovnání klasického vzorku a miniaturního vzorku a také geometrie příslušných zkušebních těles. Na miniaturní vzorky je kladen vysoký nárok na výrobu a z toho důvodu se vzorky vyrábějí pomocí elektrojiskrového obrábění. [15]



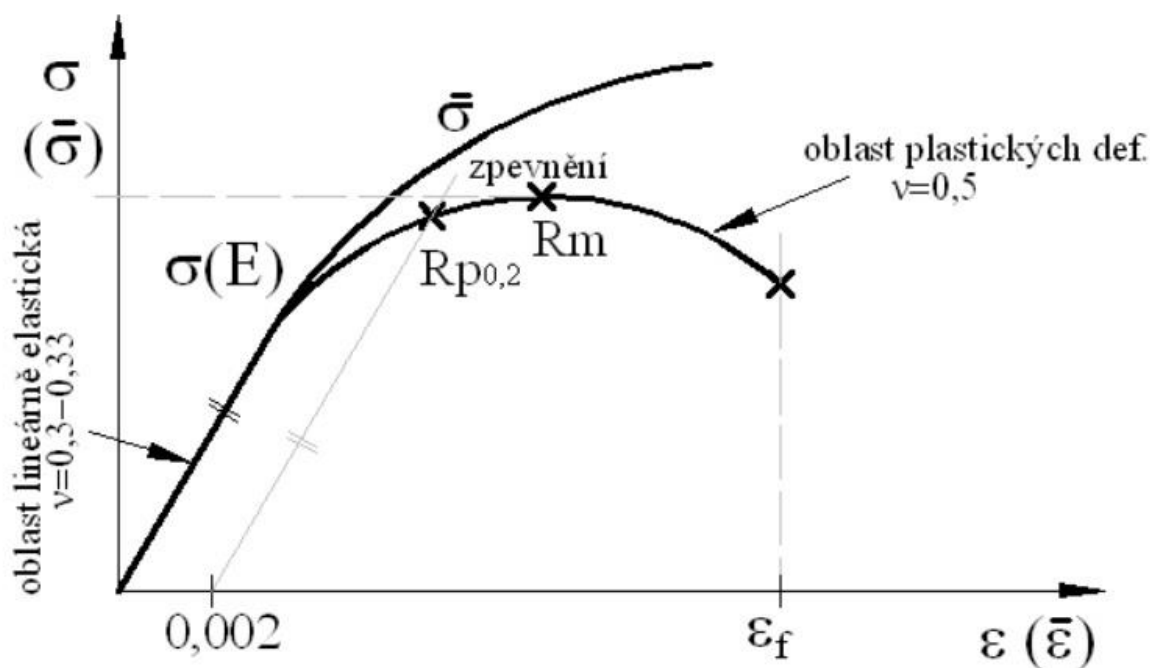
Obr. 18: Vzorky pro zkoušku tahem: a) porovnání standartního vzorku a mini vzorků (MTT),
b) geometrie mini vzorků, c) geometrie standartního vzorku [21]

Podstata zkoušky spočívá v upnutí zkušebního tělesa za upínací konce do čelistí strojů a za quasi-statických podmínek je těleso zatěžováno jednoosým tahovým zatížením. V průběhu zkoušky je měřena závislost mezi velikostí působící síly, a jí odpovídající deformaci vzorku. Pokud se velikost působící síly vztáhne na jednotku plochy průřezu vzorku, mluví se o tzv. napětí [16]:

$$R = \frac{F}{S} = [MPa] \quad (1)$$

Toto napětí působí po ose vzorku ve směru kolmém na jeho průřez, jedná se tedy o normálové napětí. Ze získaného grafu, viz. **obr. 19** je možné stanovit základní pevnostní

charakteristiky materiálu. Jsou to především hodnoty meze kluzu R_e , což je oblast přechodu mezi elastickým a plastickým chováním materiálu, hodnoty meze pevnosti R_m , největšího napětí, kterého je dosaženo aniž by došlo k porušení vzorku a hodnoty poměrného prodloužení ϵ , což je procentuální poměrná změna délky tělesa k původnímu rozměru. S ohledem na geometrii miniaturních těles nejsou hodnoty tažností vždy spolehlivé. Ověření použitelnosti a věrohodnosti hodnot R_e a R_m , ze zkoušek miniaturních těles bylo provedeno v řadě výzkumných prací, viz [16 - 20]

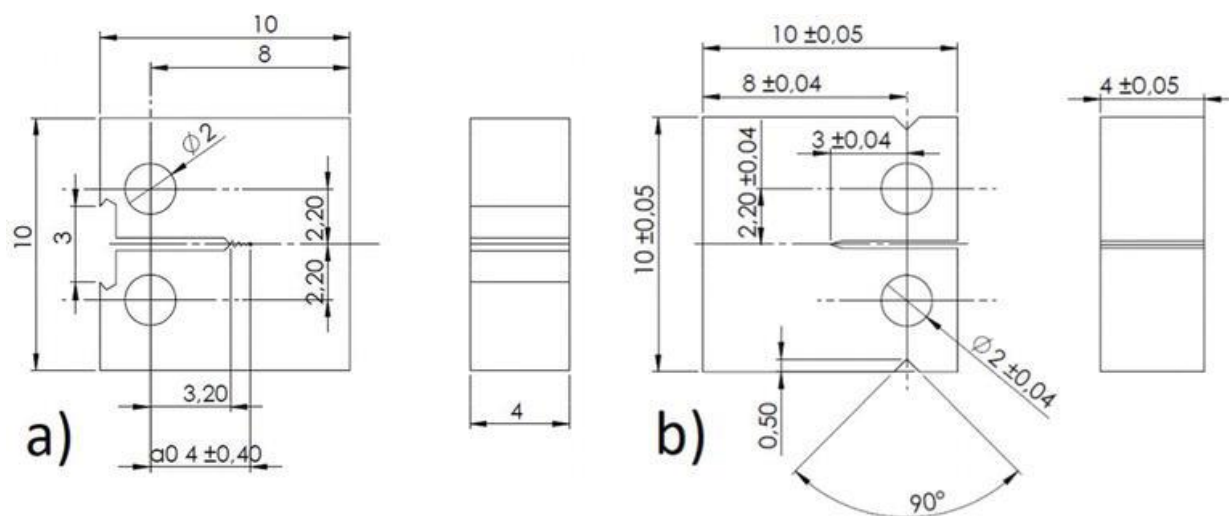


Obr. 19: Průběh zkoušky tahem [22]

4.2 Zkouška lomové houževnatosti – miniaturní vzorky

Tradiční kritéria pro stanovení porušení konstrukčních součástí nejsou použitelná pro vyhodnocení strukturálních porušení, ke kterým dochází za značně nižších napětí, než je mez pevnosti v tahu daného materiálu. U výrobků aditivních technologií je tento fakt ještě vyšší a to z důvodu, že při procesu tisku často dochází k vytvoření různých vad v porovnání s konvenčními metodami výroby. Cílem oboru Lomové mechaniky je popsat chování strukturálních defektů, které během zatěžování tělesa mohou iniciovat růst trhliny. V případě Elasto-plastické lomové mechaniky, kdy podmínky napjatosti na čele trhliny v tělese neodpovídají podmínkám malé plastické oblasti (SSY – Small Scale Yield), se pro popis

Lomové houževnatosti materiálu používají parametry J-integrál a CTOD. Na **obr. 20** jsou znázorněny různé geometrie miniaturních vzorků pro lomovou houževnatost. [23]



Obr. 20: Geometrie mini vzorků pro lomovou houževnatost [21]

4.2.1 J-integrál

J-integrál se v lomové houževnatosti využívá jako lomového parametru, který vyjadřuje hnací sílu trhliny pro nelineárně se chovající materiál. Hodnota J-integrálu je shodná s derivací elastické deformační energie podle délky trhliny, kterému i odpovídá parametr G – hnací síla trhliny. Bilance energie tělesa s rostoucí trhlinou během jeho zatěžování může být znázorněna jako:

$$\frac{\partial W}{\partial a} = \left(\frac{\partial U^e}{\partial a} + \frac{\partial U^p}{\partial a} \right) + \frac{\partial \Gamma}{\partial a} \quad (2)$$

Kde ∂U^e a ∂U^p reprezentují změnu elastické energie a plastické práce v závislosti na růstu trhliny, zatímco $\partial \Gamma$ vyjadřuje energii pro růst trhliny. Rovnici (2) lze upravit do tvaru

$$-\frac{\partial \Pi}{\partial a} = \frac{\partial U^p}{\partial a} + \frac{\partial \Gamma}{\partial a} \quad (3)$$

Kde $\Pi = U^e - W$ vyjadřuje potenciální energii systému. Rovnice (7) ukazuje, že rychlost snižování potenciální energie během růstu trhliny odpovídá rychlosti disipace energie při plastické deformaci a růstu trhlině. [23]

Metodu stanovení J-integrálu navrhl J. Rice, který dokázal, že J-integrál představuje změnu potenciální energie tělesa z počáteční délky trhliny na hodnotu. Z toho plyne platnost vztahu

$$\frac{\partial \Pi}{\partial a} = J \quad (4)$$

Ačkoli je J-integrál založen na čistě elastické analýze, je možné ho použít pro plastické materiály. Samotný význam J-integrálu pro popis lomového chování materiálu je, že popisuje deformační pole na čele trhliny. Dle vztahu (5)

$$J = W dy - T_k \frac{\partial u_k}{\partial x} ds \quad (5)$$

kde W je hustota deformační energie, T_k je tenzor napjatosti a $\frac{\partial u_k}{\partial x}$ znázorňuje posunutí v daném směru, hodnota tohoto křivkového integrálu je nezávislá na integrační cestě kolem špičky trhliny. To umožňuje, zvolit integrační cestu v různé vzdálenosti od čela trhliny. Hodnota J-integrálu představuje průměrnou hodnotu deformačního pole v daném místě a může být použita jako lomové kritérium. [23]

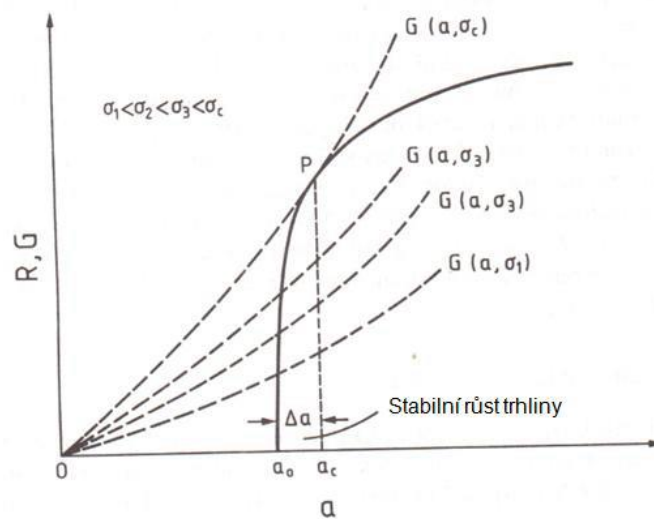
4.2.2 J-R křivka

Lomová houževnatost materiálu, který při svém porušování vykazuje stabilní růst trhliny, se hodnotí pomocí tzv. R křivek. R křivky vyjadřují závislost mezi lomovým parametrem (J-integrál) a nárůstem tvárné trhliny Δa . Základem je opět energetická bilance během stabilního růstu trhliny, kdy upravením vzorce (2) na vzorec (6) dostaneme

$$\frac{\partial W}{\partial a} - \frac{\partial U^e}{\partial a} = \frac{\partial U^p}{\partial a} + \frac{\partial \Gamma}{\partial a} \quad (6)$$

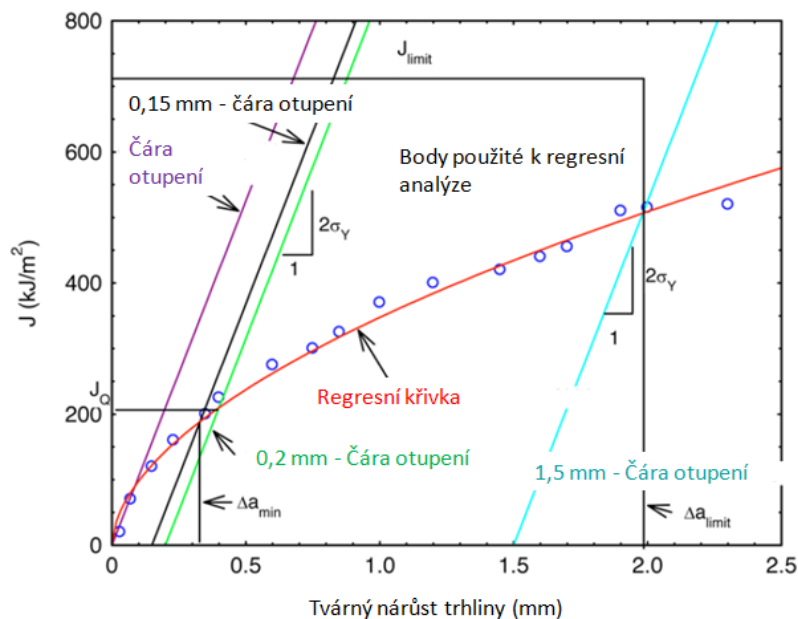
kde levá strana rovnice je rovna hnací síle trhliny G a pravá strana rovnice zahrnuje členy vyjadřující disipaci energie spojenou s růstem trhliny, což lze vyjádřit jako odpor materiálu proti tvárnému nárůstu trhliny. Podmínky nestability trhliny lze vyjádřit rovnicí (7), graficky viz **obr. 21**. Zde bod P vyjadřuje hranici nestability růstu trhliny. [23]

$$\frac{\partial(G-R)}{\partial a} \begin{cases} > - \text{Nestabilní lom} \\ < - \text{Stabilní lom} \\ = - \text{Rovnováha} \end{cases} \quad (7)$$



Obr. 21 Křivka odporu proti růstu trhliny pro stanovení kritického zatížení [23]

Standard ASTM E 1820 poskytuje dvě základní metodiky pro stanovení J-R křivky. Metodiku zkoušení více těles (Multiple Specimen Method) a metodu měření na jednom vzorku (např. Unloading Compliance – UC). UC metoda spočívá v konstrukci J-R křivky zkoušením jediného tělesa, které je v postupných krocích systematicky zatěžováno a po určitém nárůstu trhliny opět odlehčeno. Na základě změny poddajnosti tělesa se stanovuje skutečný přírůstek trhliny, jemuž odpovídá hodnota J-integrálu. Vynesením bodů závislosti J-integrál - Δa a konstrukcí čáry otupení je získána provizorní hodnota Lomové houževnatosti v podobě J_Q viz **obr. 22**, jejíž platnost je posuzována dle požadavků stanovených v příslušné normě. [23, 24]



Obr. 22: J-R křivka lomové houževnatosti dle standardu ASTM E 1820 [23,24]

4.3 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Tvrdost - odolnost povrchových oblastí materiálu proti místnímu porušení cizím tělesem. Tvrdost však není žádnou fyzikálně definovatelnou vlastností, nýbrž je výslednicí celé řady vlastností hmoty, a to zejména vlastností povrchu. [26]

Indentorem je čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem stěn 136° , takže vznikají pravidelné čtyřhranné vtisky. Tento úhel je volen tak, aby tření co nejméně ovlivňovalo výsledek a dále proto, aby se hodnoty tvrdosti příliš neodlišovaly od tvrdosti stanovené metodou dle Brinella. Po provedení vtisku se měří jeho úhlopříčka. Její hodnota je pak dosazena do vztahu. [26]

Obvyklá zatížení dle normy ČSN 42 0374 jsou 9,8; 29,4; 49; 98; 294 a 490 N. Vickersova zkouška je ze všech dosavadních metod jediná, která splňuje všechny teoretické požadavky. Dává jednotnou stupnici tvrdosti od nejměkčích kovů až po nejtvrďší kalené ocele. Hodnoty tvrdosti jsou na velikosti zatížení prakticky nezávislá. Přesto je-li zatížení jiné než dříve používaných 30 kp (29,4 N) je třeba toto zatížení uvést spolu s naměřenou hodnotou, např. HV10 – zatížení 10 kp. [26]

5 Experimentální část

Experimentální část diplomové práce se zabývá depozicí vzorků pomocí DED PB s využitím různých depozičních parametrů. Následuje realizace mechanických zkoušek a mikrostrukturních analýz. Celkově bylo v této práci použito celkem 8 variant depozičních parametrů. Jako experimentální součást se byla zvolena krychle o hraně 30 mm, ze které se následně pomocí elektrojiskrového obrábění připraví vzorky pro mechanické zkoušení a zbylý materiál se využije pro metalografické zkoušky. Z mechanických zkoušek budou provedeny tahové zkoušky, zkoušky lomové mechaniky a zkoušky tvrdosti. Z metalografických zkoušek bude provedena mikrostrukturní analýza, EBSD a fraktografie.

5.1 Experimentální materiál

Pro depozici byla zvolena korozivzdorná austenitická ocel 316L (chemické složení viz. **tab. 2**), prášek byl dodán od společnosti Sandvik Osprey LTD s distribucí částic v rozmezí 50 – 150 μm , šarže: Batch No. 19D1249. Tisk je proveden na platformách o rozměru 95 x 95 x 10 mm ze stejného materiálu. Platformy se před tiskem tepelně zpracovali po dobu 4 hodin při 400 °C pro snížení možného zbytkového napětí při výrobě platform. Vzorky jsou analyzovány v deponovaném stavu bez dalšího zpracování.

Tab. 2: Chemické složení v hm. %

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Bal.	0,02	0,43	1,58	0,02	0,005	18,0	13,5	2,8
Bal.	Max. 0,03	Max. 1,00	Max. 2,00	Max. 0,045	Max. 0,03	16,0 – 18,0	10,0 – 14,0	2,0 – 3,0

„Bulk“ materiál má následující mechanické vlastnosti objemového materiálu vyrobeného konvenčním způsobem při teplotě 20 °C jsou pro základní náhled očekávaných vlastností uvedeny v **tab. 3**. Tyto údaje jsou od firmy Sandvik.

Tab. 3: Mechanické vlastnosti „bulk“ materiálu 316L

R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]
≥ 205	515 - 690	≥ 40	≥ 50

5.2 Použité depoziční zařízení

Tisk proběhl na tiskárně Insstek MX – 600 viz. **obr. 23** s technickými daty viz. **tab. 4**. Tato tiskárna umožňuje tisk až 4 různých druhů materiálu současně. Dále umožňuje tisk v módu DMT (Direct Metal Tooling), který pomocí senzorů zajišťuje stabilní výšku jedné vrstvy za pomoci upravování výkonu laseru. [27]

Tab. 4. Technické parametry

Laser	2kW Ytterbiový vláknový laser (1070 nm)
Pracovní prostor – X/Y/Z	600 / 450 / 350 mm
Pohyb	5 os
Moduly pro tisk	SDM 800, SDM 1800
Zásobníky pro prášek	4 zásobníky
Software	Magics for Insstek
Materiály pro tisk	Fe, Ti, Ni, Co slitiny



Obr. 23: Depoziční zařízení Insstek MX-600 [28]

5.3 Navržené parametry depozice

Pro tisk jsou použity dva moduly SDM 800 a SDM 1800, parametry jednotlivých modulů jsou uvedeny v **tab. 5**. Dalšími zvolenými parametry jsou strategie tisku a mód tisku (DMT mód nebo Normal mód (pevný výkon laseru), výkon laseru byl zvolen podle zkušeností z předchozího tisku) viz. **tab. 6**. Poslední parametry jsou pro průběh tisku, které jsou nastaveny od výrobce, viz. **tab. 7**.

Tab. 5: Parametry pro jednotlivé moduly

Modul	Hatch Distance [mm]	Průměr paprsku [μm]	Výška jednotlivé vrstvy [μm]
SDM 800	0,5	800	250
SDM 1800	1,1	1800	700

Tab. 6: Základní depoziční parametry

Modul	Strategie depoziční	Mód	Název výtisku	Rozměry v ose Z	Doba tisku
SDM 800	ZigZag	500 W	Součást 1	29,2	5hod 9min 39s
	ZigZag	DMT	Součást 2	30	5hod 1min 14s
	Spiral	DMT	Součást 3	29,9	5hod 5min 46s
	Zig	DMT	Součást 4	30,2	16hod 39min 21s
SDM 1800	ZigZag	1 000 W	Součást 5	31,5	1hod 3min 59s
	ZigZag	DMT	Součást 6	30	1 hod 7min 44s
	Spiral	DMT	Součást 7	30,9	1hod 6min 59s
	Zig	DMT	Součást 8	29,3	4hod 6min 38s

Rozměry v ose X a Y jsou pro modul SDM 800 31 mm a pro modul SDM 1800 32 mm.

Tab. 7: Doplnkové parametry depoziční pro materiál 316L

Modul	Rychlost tisku [mm/min]	Množství dodávaného prášku [g/min]	Otáčky podavače prášku [ot/min]	Množství koaxiálního plynu [l/min]	Množství plynu pro prášek [l/min]	Množství ochranného plynu [l/min]
SDM 800	849	4,6	980	8,5	2,5	10
SDM 1800	849	10	2140	12	3	20

Hustota výkonu laserového paprsku

Hustota výkonu, také značená jako intenzita I , lze vypočítat, jako střední hodnotu výkonu optického záření P a obsah plochy S , na kterou záření dopadá (viz. vzorec 8)

$$I = \frac{P}{S} \quad (8)$$

V následující tabulce (**tab. 8**) je vypočtena hustota výkonu pro součásti deponované pod pevným výkonem. Pevný výkon byl zvolen ze zkušeností z předchozích tisků a odpovídá průměrné hodnotě výkonu tisku v režimu DMT. Z vypočtených hodnot vyplývá, že hustota výkonu je pro modul SDM 800 cca. 2,5x vyšší než u modulu SDM 1800.

Tab. 8: Hustota výkonu laseru

Modul	Hustota výkonu [W/mm ²]
SDM 800	994,72
SDM 1800	392,98

5.4 Experimentální vzorky

Jak vyplývá z **tab. 6**, je vytisknuto celkem 8 součástí pomocí dvou modulů se třemi různými strategiemi tisku, které jsou v režimu DMT a jedna varianta je vytištěna s pevným výkonem laseru. Na **obr. 24** je zobrazen průběh tisku při stavbě experimentálních vzorků.

Všechny vzorky byly navrženy jako 30 mm krychle a v **tab. 6** jsou uvedeny jejich finální rozměry a doba tisku.



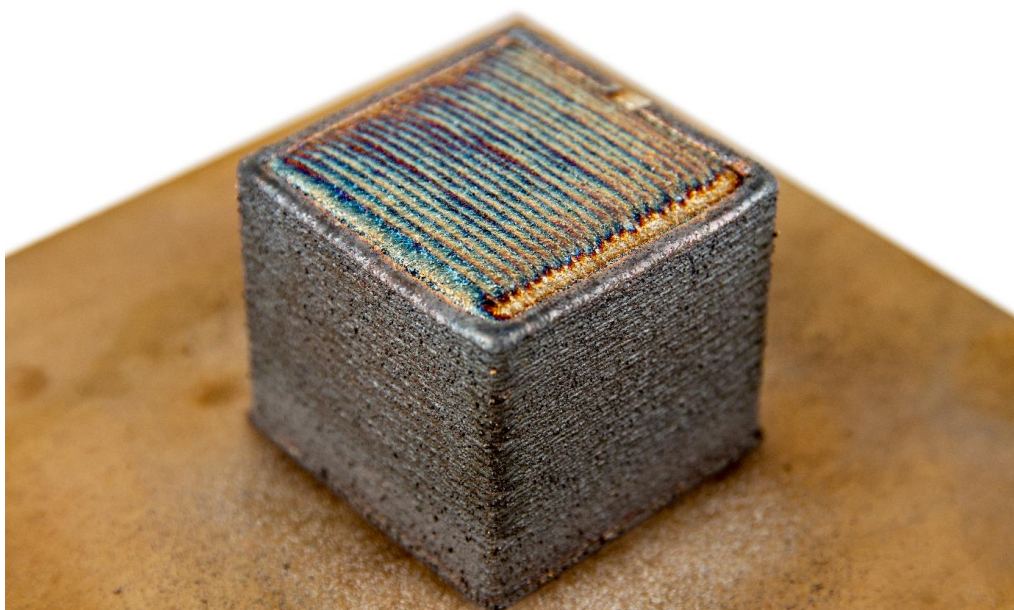
Obr. 24: Depozice experimentálních vzorků

Na následujících obrázcích jsou znázorněny deponované vzorky, kdy pro ukázkou jsou vybrány součást 3 a součást 6 (**obr. 25**) jako reprezentivní zástupci pro každý modul.

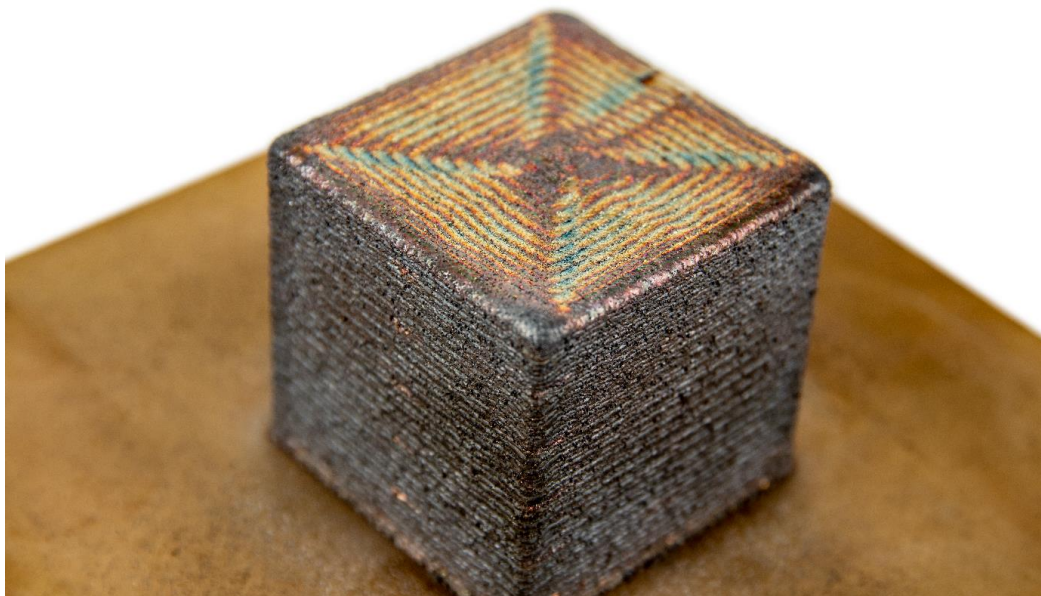


Obr. 25: Reprezentivní součásti – a) Součást 3, b) Součást 6

Z **obr. 25** je patrné, že povrch svislých stěn se výrazně neliší, je patrný pouze mírný rozdíl v drsnosti a to z důvodu různé výšky deponované vrstvy v jednotlivých krocích. Největší rozdíly v kvalitě povrchu se projevují u modulu SDM 1800 na horní ploše, kde jsou patrné propady mezi konturou a výplní u součásti 8 (**obr. 26**) nebo jsou znatelné přechody mezi jednotlivými trajektoriemi u strategie tisku Spiral u součásti 7 (**obr. 27**)



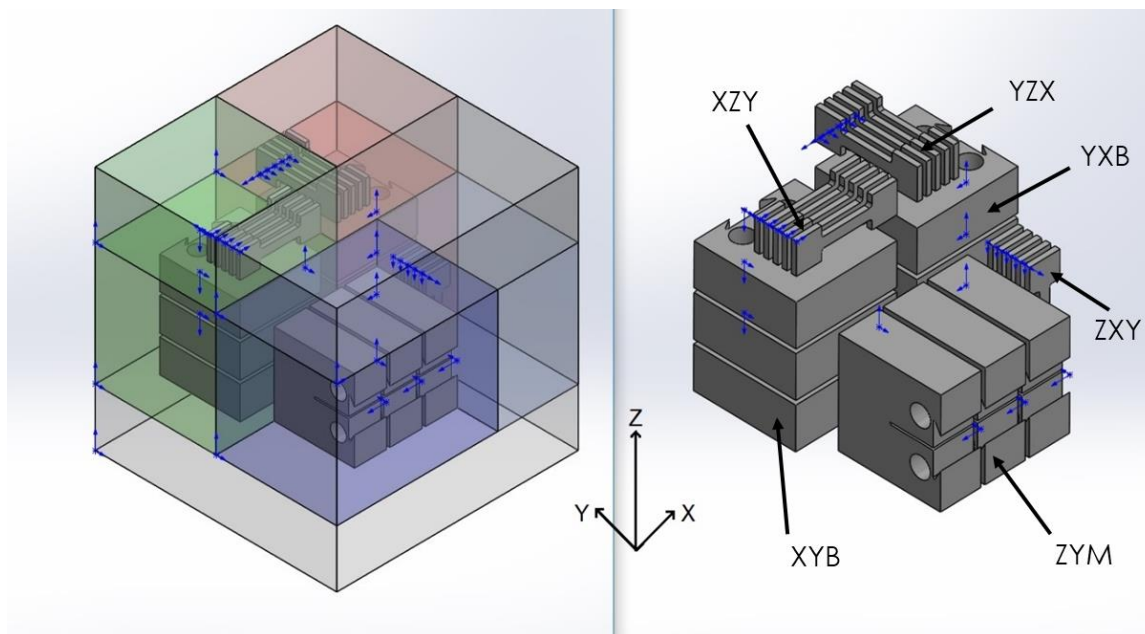
Obr. 26: Detail horní plochy u Součásti 8



Obr. 27: Detail horní plochy Součásti 7

5.5 Mechanické zkoušky

Vzorky pro mechanické zkoušení byly vyrobeny pomocí elektroerozivního obrábění. V každém směru je vyrobeno 5 vzorků MTT – miniaturní tahové vzorky a 3 vzorky MCT – miniaturní vzorky pro zkoušky lomové houževnatosti 0,16T-CT. Každá součást byla rozřezána dle rozřezového schéma znázorněného na **obr. 28**.



Obr. 28: Rozmístění vzorků v součásti

Způsob značení vzorků v grafech:

ZZ_SDM1800__1000W_X3

Depoziční strategie: ZZ – ZigZag, S – Spiral, Z – Zig

Modul: SDM 800, SDM 1800

Depoziční mód: hodnota 500 W a 1000 W značí Normal mód a jeho příslušný výkon laseru, pokud není uvedeno, jedná se DMT mód

Vzorek: směr depozice a číslo vzorku

5.5.1 Zkoušky tahem

Pro měření charakteristik v tahu byly použity mini vzorky MTT, pro všech 8 součástí bylo vyrobeno celkem 120 vzorů (5 vzorků v orientaci XZY, 5 vzorků v orientaci YZX, 5 vzorků v orientaci ZXY). V souhrnné tabulce (**tab. 9**) jsou uvedeny pouze průměrné hodnoty v každém směru pro jednotlivé součásti. Měření probíhalo při teplotě 23 °C. Metodika mikro-tahových zkoušek byla vyvinutá v COMTES FHT. Základ zkoušky se odvíjí od norem ČSN EN ISO 6892-1 Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty (a ČSN EN ISO 6892-2 pro zkoušení za zvýšených teplot). Protože však tyto normy neuvažují zkoušení miniaturních těles, byl vytvořen a akreditován postup „Postup zkoušení mikro-tahových vzorků“ s interním předpisem ŘD 2/30. Při této metodice se také zachovává doporučená zkušební deformační rychlost. Zkoušky byly provedeny na speciálním zkušebním zařízení LabControl o kapacitě 5 kN. Deformace vzorků byla měřena s využitím systému digitální obrazové korelace. Na vzorky byl před zkouškou nanesen náhodný rastr s vysokým kontrastem. Rozměry vzorků před a po zkoušce byly změřeny mikrometrem, či s využitím světelného mikroskopu.

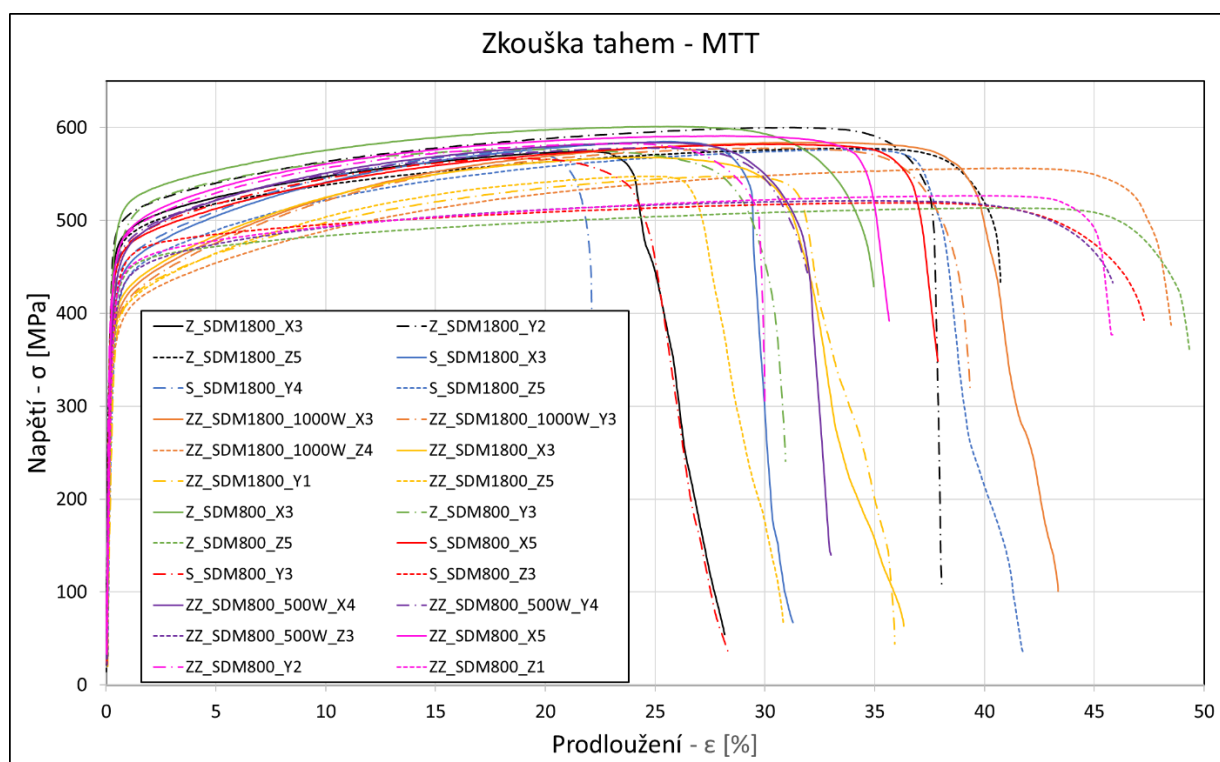
Tab. 9: Výsledky měření zkoušky tahem

Modul	Součást	Orientace	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A _g [%]	A ₅ [%]	Z [%]
SDM 800	Součást 1 (ZigZag 500W)	XZY	435,2	586,5	25,5	34,9	70,6
		YZX	434,6	577,9	24,7	33,1	69,1
		ZXY	395,9	520,8	33,8	44,4	71,9
	Součást 2 (ZigZag DMT)	XZY	446,1	592,1	26,6	35,3	72,0
		YZX	428,0	583,1	24,7	32,0	70,4
		ZXY	410,4	528,5	38,9	48,1	76,1
	Součást 3 (Spiral DMT)	XZY	432,9	567,5	26,4	34,8	68,3
		YZX	422,7	558,8	23,1	32,5	75,4
		ZXY	415,9	519,9	32,9	43,5	76,6
	Součást 4 (Zig DMT)	XZY	469,0	579,8	23,0	32,7	77,2
		YZX	466,4	579,9	20,3	29,7	74,1
		ZXY	404,6	516,9	38,6	48,6	75,6
SDM 1800	Součást 5 (ZigZag 1000W)	XZY	367,9	579,2	30,8	39,4	78,2
		YZX	377,7	577,7	31,1	38,8	76,2
		ZXY	364,6	558,3	34,9	43,3	71,4
	Součást 6 (ZigZag DMT)	XZY	401,0	571,6	27,6	35,0	75,5
		YZX	390,0	549,8	30,7	39,3	74,7
		ZXY	385,0	550,6	27,9	35,6	78,0
	Součást 7 (Spiral DMT)	XZY	421,7	582,1	27,5	34,1	69,6
		YZX	392,3	542,7	19,1	23,9	75,5
		ZXY	409,3	570,1	28,0	34,8	73,5
	Součást 8 (Zig DMT)	XZY	455,3	578,2	21,8	29,0	73,7
		YZX	473,9	603,2	26,8	34,4	75,9
		ZXY	439,5	576,1	32,3	39,5	78,8

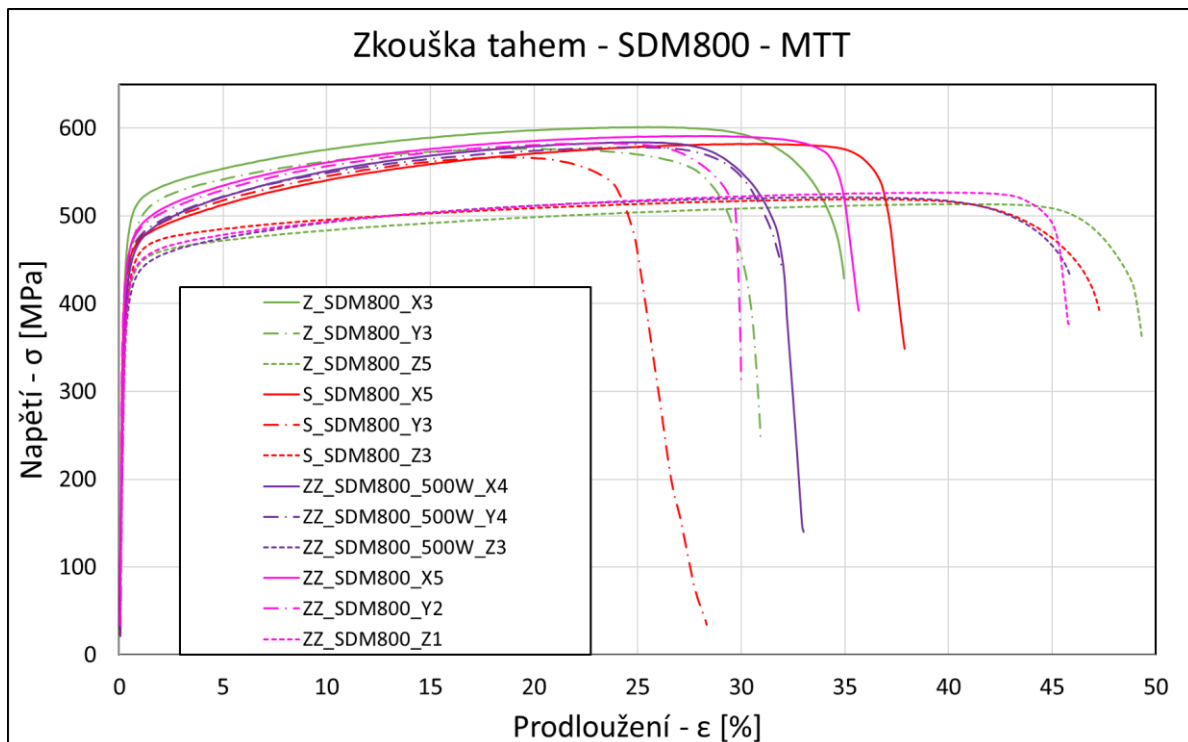
V grafu (**graf. 1**) jsou znázorněny průběhy tahových zkoušek. Pro velké množství výsledků je vždy vybrán jeden reprezentativní vzorek, který má nejbližší k průměrným hodnotám meze v tahu pro jednotlivou součást a danou orientaci. **graf 2** a **graf 3** znázorňují tahové zkoušky pro jednotlivé moduly.

V dalším grafu (**graf. 4**) jsou znázorněny porovnání meze pevnosti v tahu pro jednotlivé orientace a všechny součásti. Z tohoto grafu vyplývá, že mez pevnosti v tahu je nejnižší ve směru Z. Součást 8 vykazuje nejvyšší mez pevnosti v tahu ve směru Y, naopak Součást 7 vykazuje nejnižší hodnoty pro směr Y. Ostatní součásti mají velice obdobný trend.

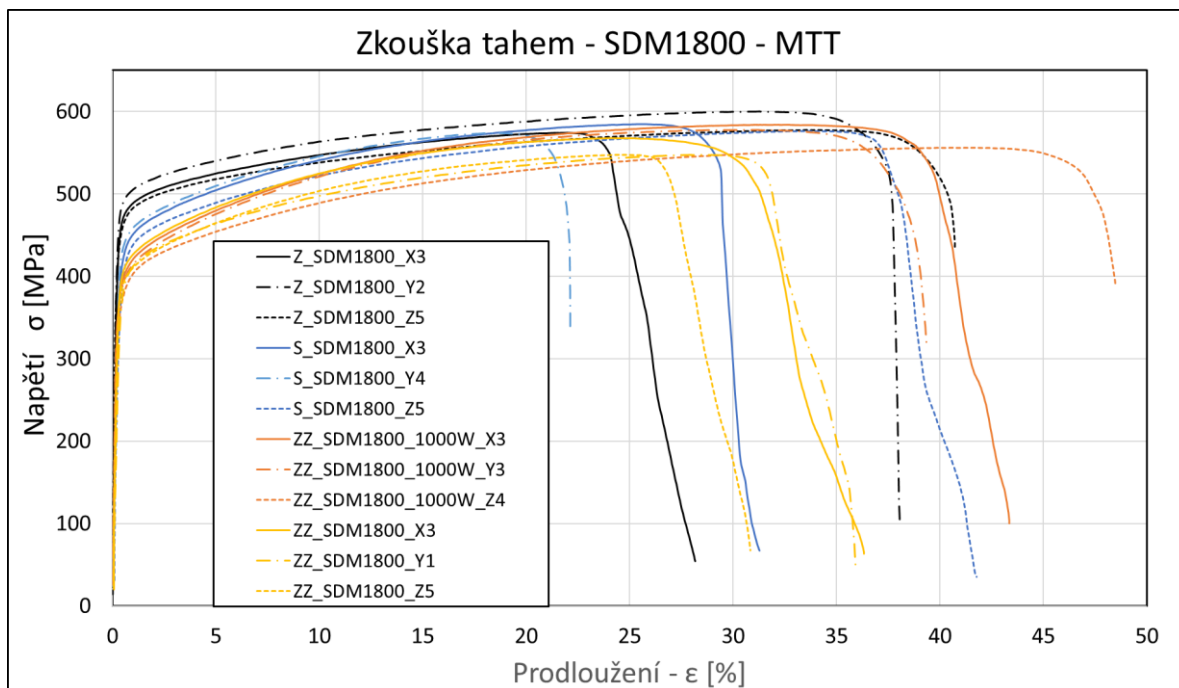
V dalším grafu (**graf. 6**) je znázorněna tažnost A_g pro jednotlivé orientace a všechny součásti. U všech součástí je nejvyšší tažnost ve směru Z. Součást 7 vykazuje obdobnou tažnost i ve směru X. Součásti deponované na modulu SDM 1800 vykazují nárůst tažnosti ve směru $X \rightarrow Y \rightarrow Z$ (od nejvyšších hodnot po nejnižší), kromě Součásti 7. Součásti deponované na modulu SDM 800 vykazují následující trend v růstu tažnosti podle směru: $Y \rightarrow X \rightarrow Z$.



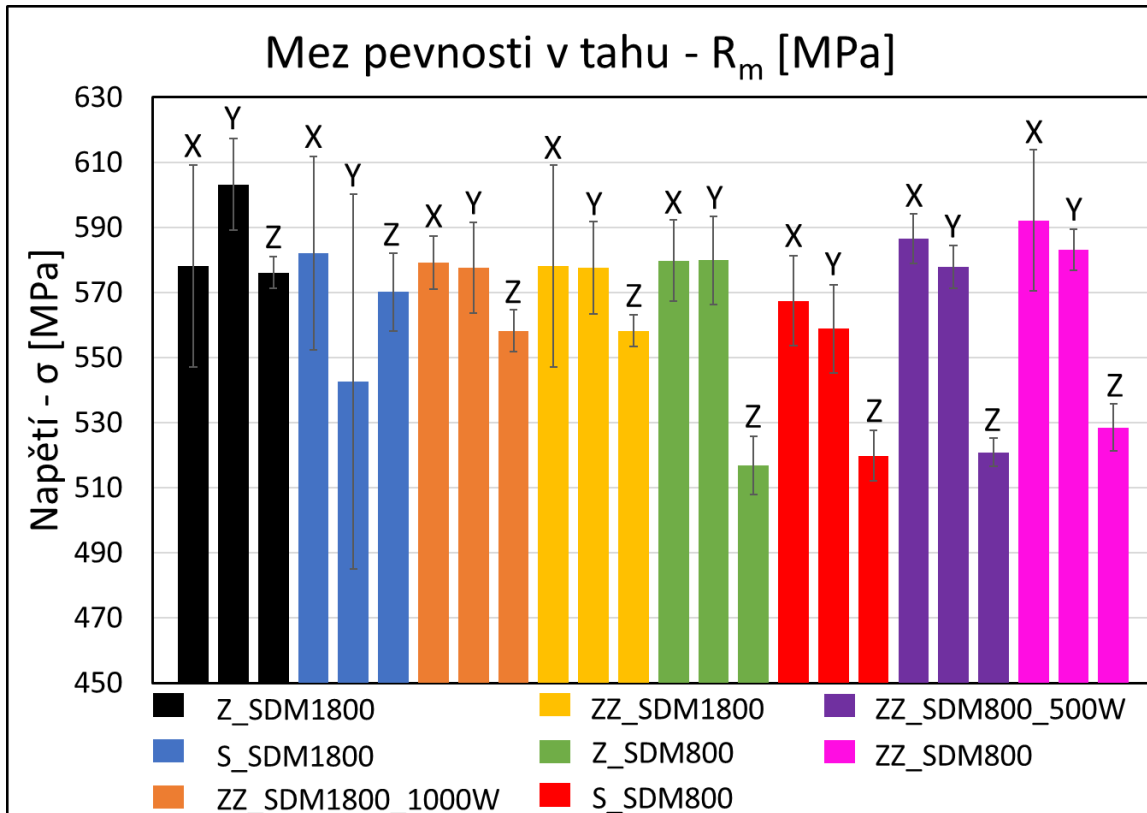
Graf 1: Zkouška tahem – MTT



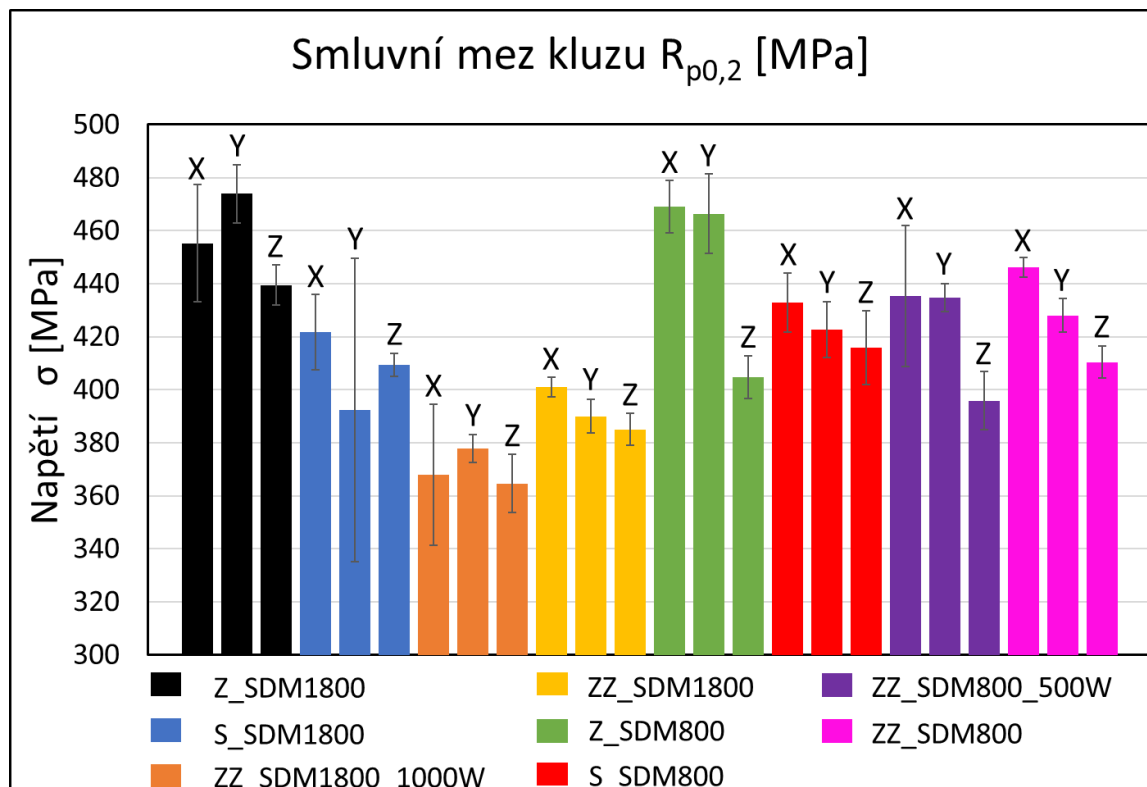
Graf 2: Zkouška tahem pro modul SDM 800 – MTT



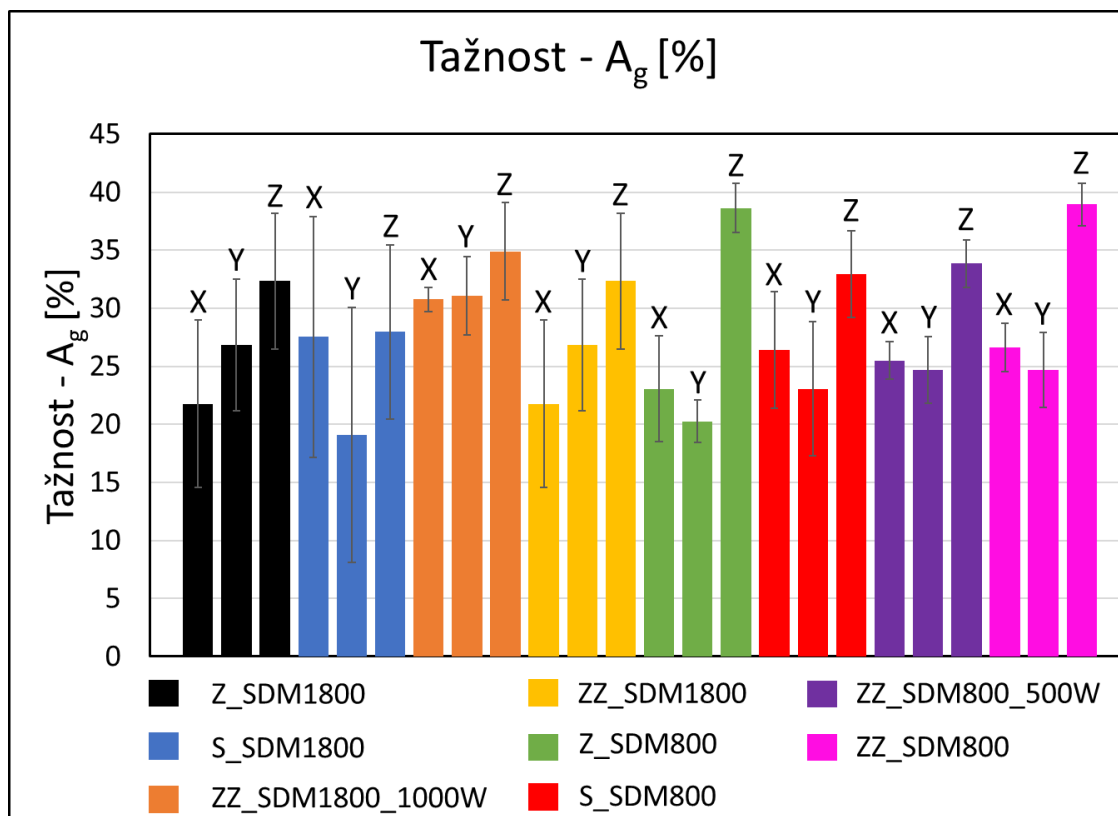
Graf 3: Zkouška tahem pro modul SDM 1800 – MTT



Graf 4: Hodnoty meze pevnosti v tahu (R_m [MPa])



Graf 5: Hodnoty smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$ [MPa])



Graf 6: Hodnoty tažnosti (A_g [%])

5.5.2 Zkoušky lomové houževnatosti

Měření lomové houževnatosti proběhlo na vzorcích pro všechny uvažované strategie depozice v režimu DMT, v depoziční orientaci X, Y a Z. Pro každou orientaci byly vyzkoušeny 3 vzorky, celkem tedy 54 vzorků. Zkušební vzorky 0,16T-CT byly nakmitány na magnetorezonančním stroji Rumul. Únavová trhlinka byla u všech vzorků nakmitána na shodný finální rozměr, aby poměr $a/W \approx 0,5$. Zátěžná síla nakmitávací procedury zajišťuje, že hodnota faktoru intenzity napětí na čele trhliny po nakmitání nepřekračuje hodnotu $20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. Následně vzorky byly opatřeny bočními vruby s hloubkou o velikosti 10 % šířky zkušebního tělesa. Pro samotné provedení zkoušek byl použit servohydraulický zkušební stroj MTS se siloměrem o kapacitě 10 kN a testovací procedurou pro zkoušky lomové houževnatosti metodou jednoho tělesa s využitím měření změny poddajnosti pro stanovení aktuální délky trhliny podle zkušební standardu ASTM E 1820-11. Pro jednotlivé kroky odlehčování byly vyhodnoceny hodnoty poddajností a z nich stanovené přírůstky tvárné trhliny Δa . Vynesením těchto přírůstků do grafu společně s odpovídajícími hodnotami J-integrálu je získána J-R křivka lomové houževnatosti. Na základě parametrů Mez kluzu a Mez pevnosti získaných ze zkoušek miniaturizovaných tahových těles je zkonstruována čára otupení. Posunutím této čáry na x-ové

ose o hodnotu 0,2 mm je získán průsečík s J-R křivkou lomové houževnatosti. Hodnota J-integrálu v tomto bodě je provizorní hodnotou lomové houževnatosti J_Q daného materiálu a při splnění několika podmínek dle zkušební standardu je označena za platnou hodnotu lomové houževnatosti J_{IC} . Žádné z měřených zkušebních těles nespĺnilo všechny podmínky pro platné vyhodnocení lomové houževnatosti. V následující tabulce (**Tab. 10**) jsou uvedeny průměrné naměřené hodnoty pro jednotlivé orientace. Z časové náročnosti zpracování MCT vzorků byly zpracovány je vzorky deponované v DMT módu.

Tab. 10: Naměřené průměrné hodnoty lomové houževnatosti

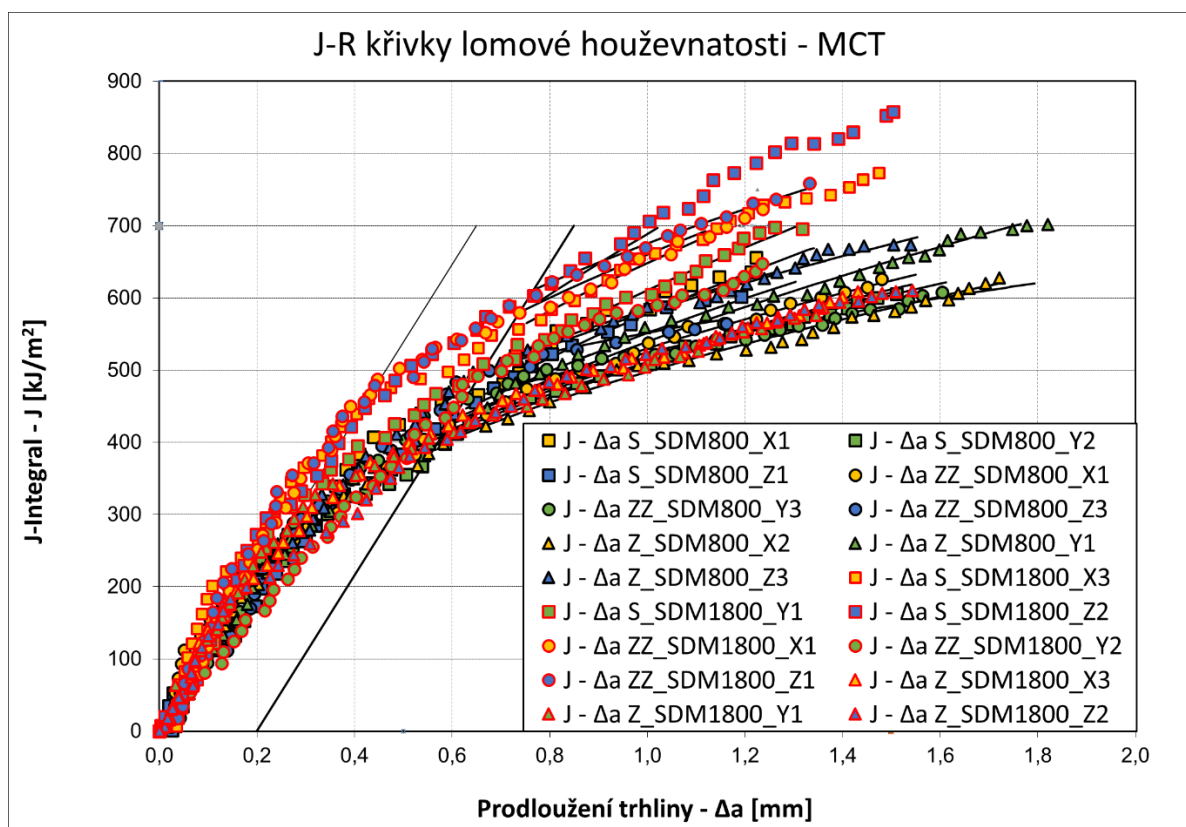
Modul	Součást	Orientace	J_Q [kJ/m ²]	K_Q [MPa.m ^{1/2}]
SDM 800	Součást 2 (ZigZag DMT)	XYB	462,09	318,68
		YXB	475,11	323,13
		ZYM	521,13	338,41
	Součást 3 (Spiral DMT)	XYB	459,57	301,46
		YXB	435,84	309,41
		ZYM	497,48	330,37
	Součást 4 (Zig DMT)	XYB	399,96	283,66
		YXB	435,17	276,59
		ZYM	526,28	340,1
SDM 1800	Součást 6 (ZigZag DMT)	XYB	580,61	357,21
		YXB	525,79	339,94
		ZYM	609,62	366,01
	Součást 7 (Spiral DMT)	XYB	528,37	340,63
		YXB	533,68	342,43
		ZYM	628,06	371,49
	Součást 8 (Zig DMT)	XYB	416,5	302,53
		YXB	382,58	289,86
		ZYM	399,25	296,14

V grafu (**graf 7**) jsou znázorněny J-R křivky pro oba moduly. Pro velké množství vzorků byl vždy vybrán jeden reprezentativní vzorek, který se blížil průměrné hodnotě pro jednotlivé orientace. V dalších grafech (**graf 8** a **graf 9**) jsou znázorněny výsledky lomových houževnatostí pro jednotlivé moduly.

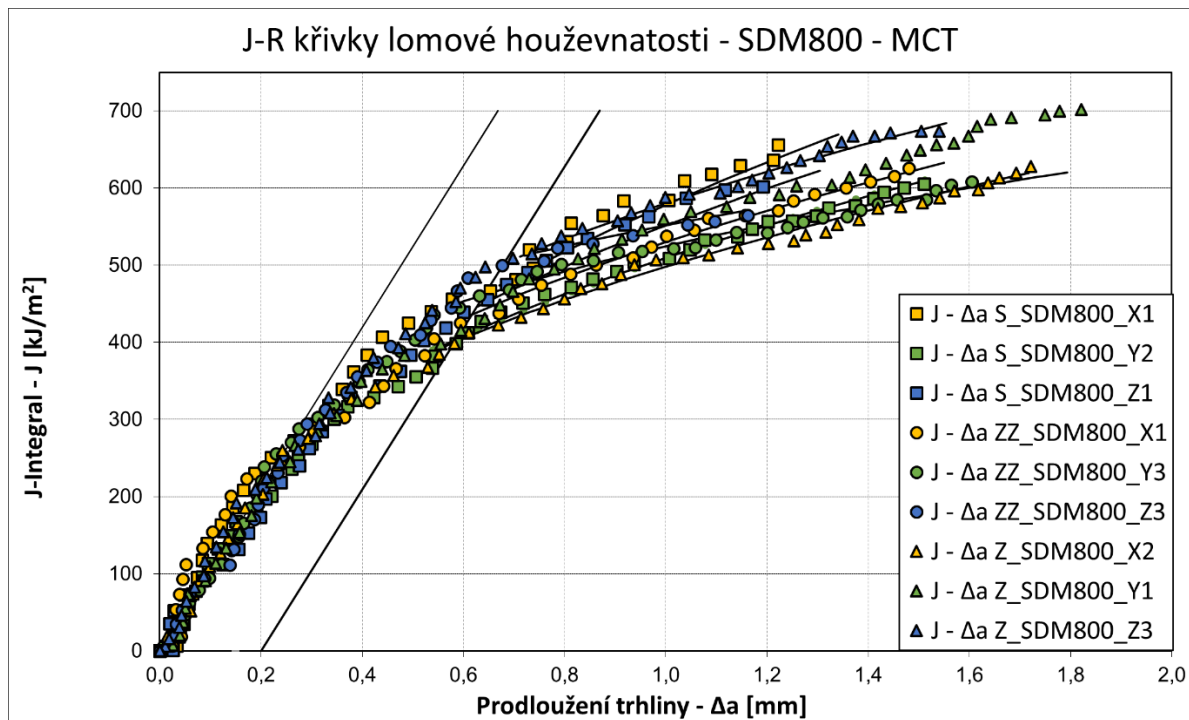
Vzorky ze součástí modulu SDM 1800 dosahují vyšších hodnot než u modulu SDM 800. Pro strategii depozice Zig u modulu SDM 1800 (Součást 7) jsou tyto hodnoty obdobné jako pro modul SDM 800.

Z **grafu 7** vyplývá, že pro modul SDM 800 mají vzorky v orientaci X rozdílné hodnoty lomové houževnatosti pro jednotlivé strategie tisku. Naopak pro orientaci Y a Z jsou tyto hodnoty obdobné pro jednotlivé strategie tisku. Nejvyšší hodnoty lomové houževnatosti vykazují vzorky u strategie tisku Zig v orientaci Z. Směr růstu lomové houževnatosti je pro orientace podle směru: $Z \rightarrow Y$, pro orientaci X je rozptyl hodnot vyšší a nevykazuje trend.

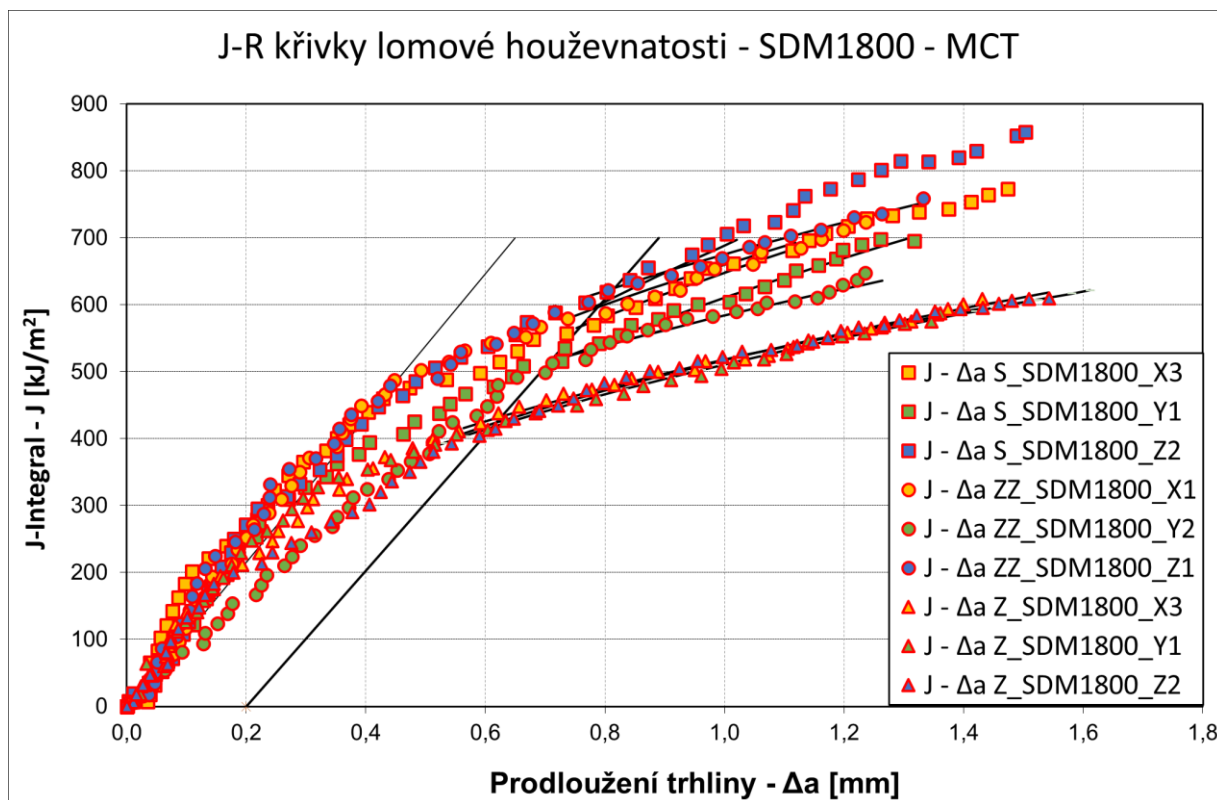
Z **grafu 8** vyplývá, že pro modul SDM 1800 je rozptyl hodnot vyšší než u modulu SDM 800. U vzorků deponovaných pomocí strategie ZigZag a Spiral je vidět obdobný trend pro jednotlivé orientace a směr růstu lomové houževnatosti je pro orientace podle směru: $Z \rightarrow X \rightarrow Y$. Pro strategii depozice Zig jsou naměřené hodnoty obdobné pro všechny orientace a nabývají nejnižších hodnot.



Graf 7: J-R křivka lomové houževnatosti pro všechny vzorky



Graf 8: J-R křivka lomové houževnatosti pro modul SDM800



Graf 9: J-R křivka lomové houževnatosti pro modul SDM1800

5.5.3 Měření tvrdosti

Měření tvrdosti proběhlo dle normy ČSN EN ISO 6507-1 (420374) Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse. Měření tvrdosti proběhlo na jednotlivých součástech v rovině YZ na mikrotvrdoměru Struers Durascan 50 – metodou Vickers při zatížení HV10. Naměřené hodnoty jsou v **tab. 11**, na každé součásti byli provedeny tři vpichy.

Tab. 11: Naměřené hodnoty tvrdostí na jednotlivých součástech

Modul	Součást	Měřící bod	Tvrdost HV10	HV10	Modul	Součást	Měřící bod	Tvrdost HV10	HV10
SDM 800	Součást 1 (ZigZag 500W)	1	211	216	SDM 1800	Součást 5 (ZigZag 1000W)	1	190	193
		2	216				2	193	
		3	221				3	195	
	Součást 2 (ZigZag DMT)	1	217	214		Součást 6 (ZigZag DMT)	1	197	196
		2	215				2	201	
		3	209				3	191	
	Součást 3 (Spiral DMT)	1	220	220		Součást 7 (Spiral DMT)	1	204	206
		2	223				2	208	
		3	216				3	206	
	Součást 4 (Zig DMT)	1	227	224		Součást 8 (Zig DMT)	1	223	220
		2	219				2	219	
		3	227				3	217	

5.6 Metalografické zkoušky

Na všech vytisknutých součástích budou provedeny mikrostrukturní analýzy pomocí světelné mikroskopie v rovinách XYZ, YZX a XZY, kde se budou analyzovat meltpooly, pórovitost tištěných součástí, popřípadě trhliny nebo vměštky v součástech. Dále bude provedena analýza EBSD v rovinách YZX a XZY. Na přetržených vzorcích po mechanickém zkoušení bude následně provedena fraktografická analýza.

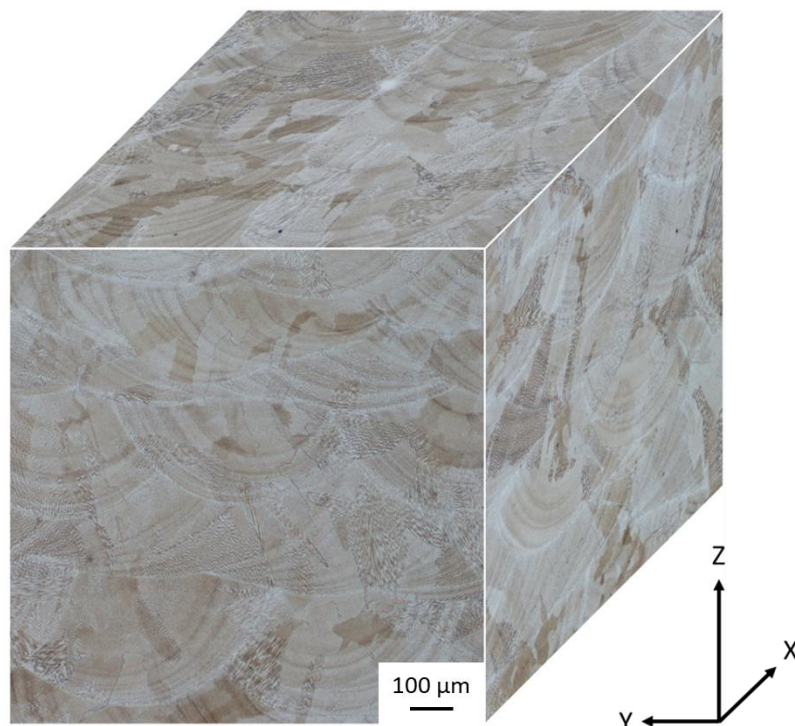
5.6.1 Světelná mikroskopie

Mikrostruktura vzorku byla vyvolána leptáním v činidle Glyceregia a zdokumentována pomocí optického mikroskopu NIKON EPIPHOT 200, který je vybaven softwarem pro digitální zpracování a analýzu obrazu NIS Elements 5.2. Mikrostruktura je tvořena austenitickou maticí

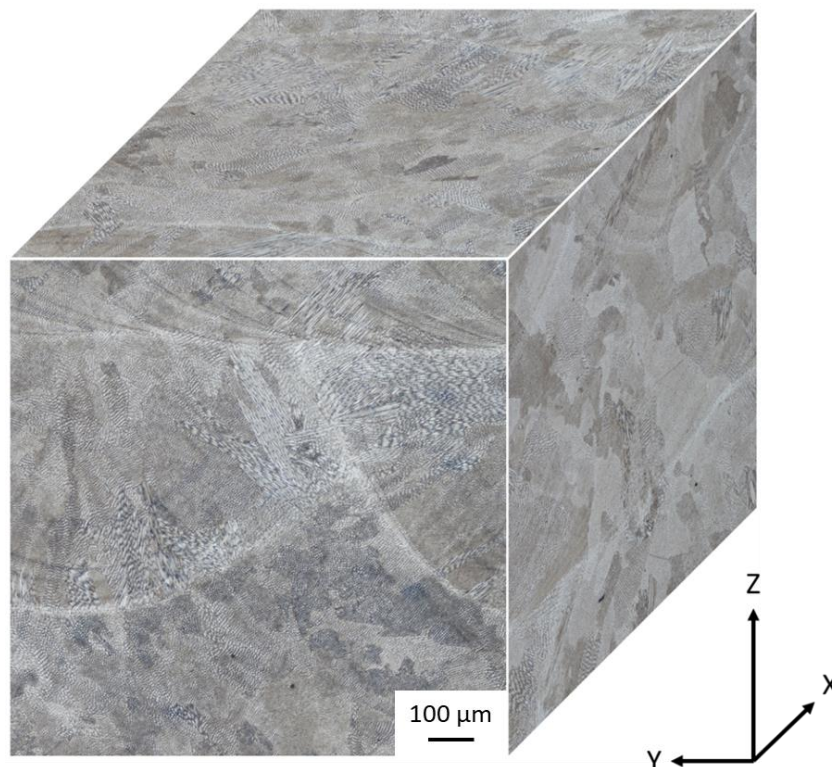
s jemnou buněčnou strukturou a rovnoosými, příp. kolumnárními zrny. Na vrcholcích buněčné substrukтуры byl vyloučen delta ferit, jehož podíl byl pomocí analýzy EBSD a RTG detekován pod 1 %.

V závislosti na strategii a módu tisku je růst zrn usměrněn. V případě použití hlavy SDM 800 jednotlivá zrna pokračují v růstu se stejnou orientací přes rozhraní (hranici ztavení). Použití hlavy SDM 1800 iniciovalo překrystalizaci v místech přechodu již předtím nanesené vrstvy. V místech jednotlivých hranic melt poolů a prvních fázích tuhnutí krystalizovala jemná rovnoosá zrna, na nichž pokračoval růst větších úzkých kolumnárních zrn. Zrna směřují až na výjimku módu Spiral dovnitř meltpoolů.

Tvar meltpoolů je také ovlivněn velikostí hlavy a použitou strategií tisku. Při pevném výkonu je tvar meltpoolů pravidelný, zatímco při použití DMT módu dochází k nerovnoměrnému protavování jednotlivých vrstev z důvodů nepřetržitého měnění výkonu laseru, aby byla zachována výška vrstvy. Výška a šířka jednotlivých melt poolů je rovněž odvislá od velikosti hlavy. Jak je z fotodokumentace patrné velikost buněk jsou při použití menší hlavy SDM 800 menší, ale mikrostruktura je v porovnání se vzorky, které byly vyrobeny hlavou SDM 1800 hrubozrnější. Pro ukázkou mikrostruktury byly vybrány reprezentativní součásti pro porovnání modulu SDM800 a SDM1800 (Součást 4 a Součást 8) **obr. 29 - 30**.

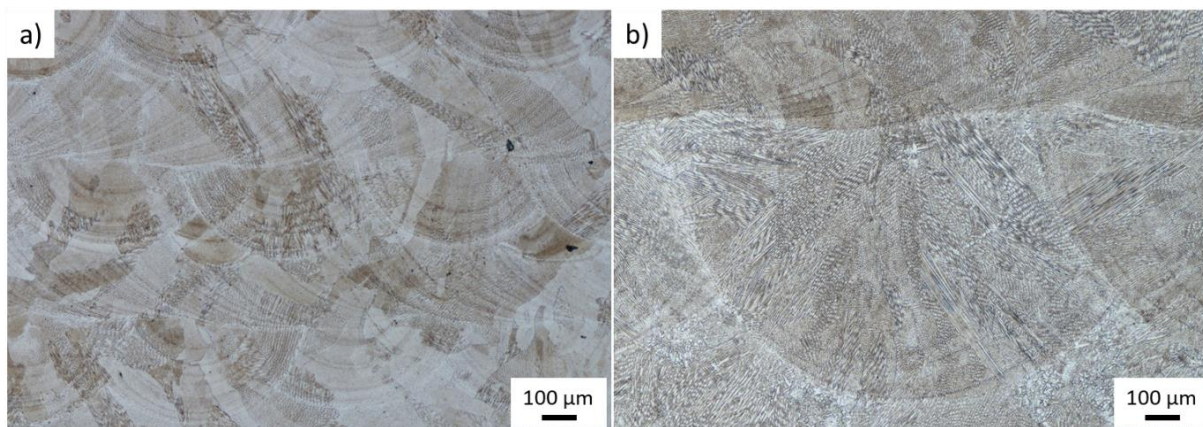


Obr. 29: 3D zobrazení mikrostruktury u Součásti 4

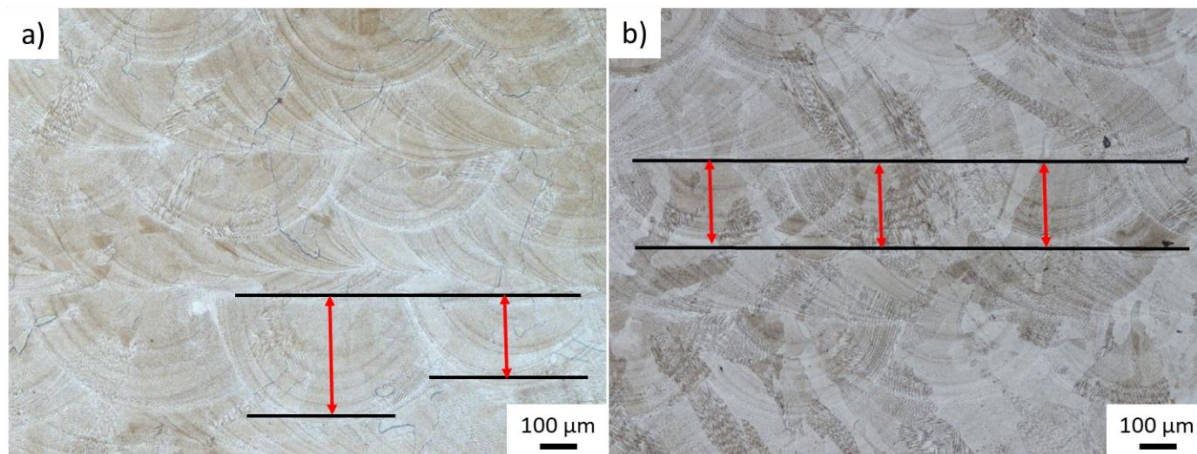


Obr. 30: 3D zobrazení mikrostruktury u Součásti 8

Na **obr. 31** je srovnání velikostí meltpoolů pro jednotlivé moduly. Velikosti meltpoolů jsou dány průměrem paprsku laseru a výškou jednotlivé vrstvy. Na **obr. 32** je ukázán rozdíl depozice pro DMT mód a Normal módu (depozice pod pevným výkonem). U pevného výkonu je velikost meltpoolů srovnatelná, zatímco u DMT módu vlivem změny výkonu laseru docházelo k různému protavování jednotlivých vrstev.



Obr. 31: Porovnání velikosti „meltpoolů“, a) SDM 800 (Součást 1), b) SDM 1800 (Součást 5)



Obr. 32: Porovnání výšky meltpoolů pro DMT módu a Normal módu, a) Součást 2 (ZigZag DMT), b) Součást 1 (ZigZag 500W)

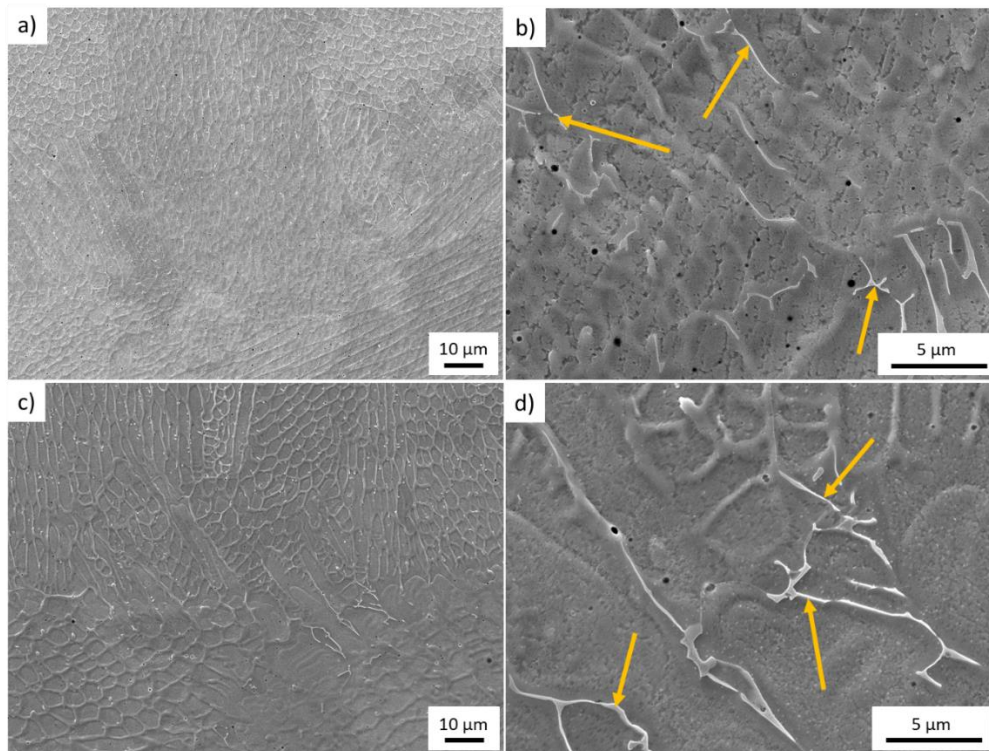
V mikrostruktuře byly pozorovány vměstky a póry. Detailní analýza vměstků byla provedena pomocí EDS analýzy a je uvedena v **kapitole 5.6.5**. Pozorované trhliny byly detekovány u vzorku S_SDM800_DMT a Z_SDM1800_DMT na rozhraní jednotlivých zrn a s největší pravděpodobností došlo k jejich vzniku v průběhu tuhnutí materiálu. Na **obr. 33** je zobrazeny vměstky a trhliny u Součásti 8



Obr. 33: Trhliny a vměstky u Součásti 8, zvětšení 50x

5.6.2 Elektronová mikroskopie

Elektronovou mikroskopií byl zachycen detail jednotlivých mikrostrukturních fází. Na detailních snímcích je patrná buněčná substruktura materiálu 316L s lokálním výskytem delta feritu (viz. **obr. 34 b) d)**)



Obr. 34: Buněčná struktura a lokální výskyt delta feritu (viz. šipky b) a d)), a) a b) Součást 8, c) a d) Součást 1

5.6.3 Pórovitost

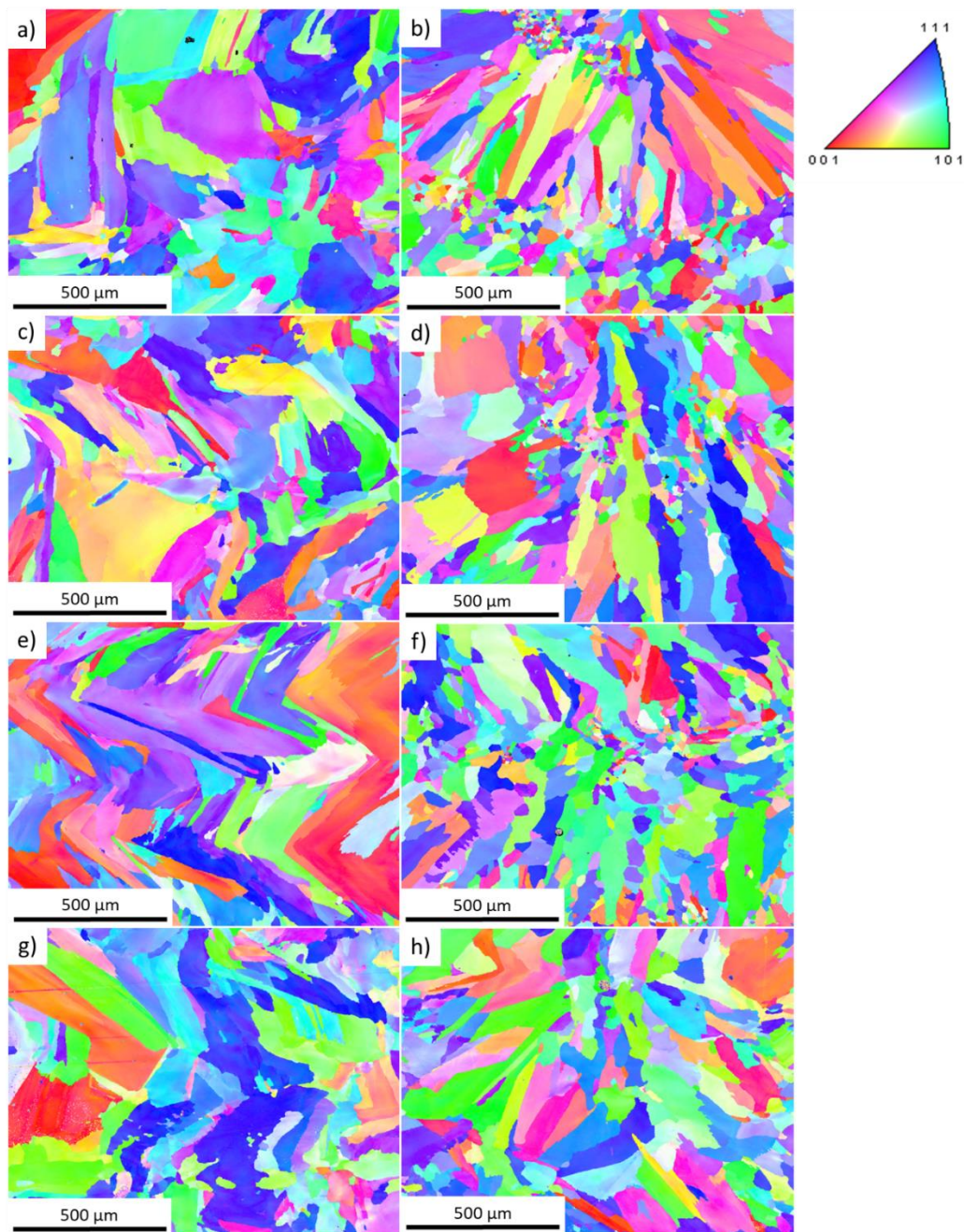
Měření pórovitosti proběhlo na vyleštěných vzorcích v rovině YZ pomocí plně motorizovaného stolku mikroskopu NIKON EPIPHOT 200 se zvětšením 50x. Frakce pórů byla vyhodnocena pomocí softwaru 5.2 NIS-Elements pro digitální zpracování a analýzu obrazu. V **tab. 12** jsou naměřené hodnoty pro jednotlivé součásti. Zvýšená porozita u modulu SDM 1800 nemá zásadní vliv na mechanické vlastnosti sledovaných součástí.

Tab. 12: Naměřené hodnoty pórovitosti

Modul	Součást	Pórovitost [%]	Modul	Součást	Pórovitost [%]
SDM 800	Součást 1 (ZigZag 500W)	0,003	SDM 1800	Součást 5 (ZigZag 1000W)	0,083
	Součást 2 (ZigZag DMT)	0,009		Součást 6 (ZigZag DMT)	0,150
	Součást 3 (Spiral DMT)	0,017		Součást 7 (Spiral DMT)	0,221
	Součást 4 (Zig DMT)	0,016		Součást 8 (Zig DMT)	0,032

5.6.4 EBSD – difrakce zpětně odražených elektronů

EBSD analýza byla realizována EBSD kamerou - EDAX Hikari Super, která je instalována na elektronový mikroskop JEOL IT 500 HR. Tato analýza umožňuje realizovat posouzení textury materiálu pomocí difrakce zpětně odražených elektronů. Kamera má možnost EDS a EBSD sběru dat zároveň. EBSD analýza byla provedena při velikosti kroku 1 μm , velikost analyzované oblasti 1280 x 999 μm , urychlovací napětí 20kV, rychlost skenování činila 80 - 100 difraktogramů za sekundu. EBSD mapy byly nasnímány v rovině YZ a zpracování naměřených dat bylo realizováno pomocí OIM softwaru. Během postakvizičního zpracování byla provedena filtrace dat (neighbour CI correlation a algoritmus dilatace zrna). Na **obr. 35** jsou zobrazeny mapy inverzního pólového obrazce (Inverse Pole Figure - IPF) pro reprezentativní součásti s barevným kódováním orientací zrn. Vývoj mikrostruktury jednotlivých strategií tisku prokázal výskyt nepravidelných zrn, jejichž orientace je závislá na teplotním gradientu při rychlém laserovém snímání při DED depozici. Pravidelná polygonální zrna byla pozorována v oblastech na hranicích melt poolů, kde byla iniciována následná krystalizace kolumnárních zrn v případě použití hlavy SDM 1800.



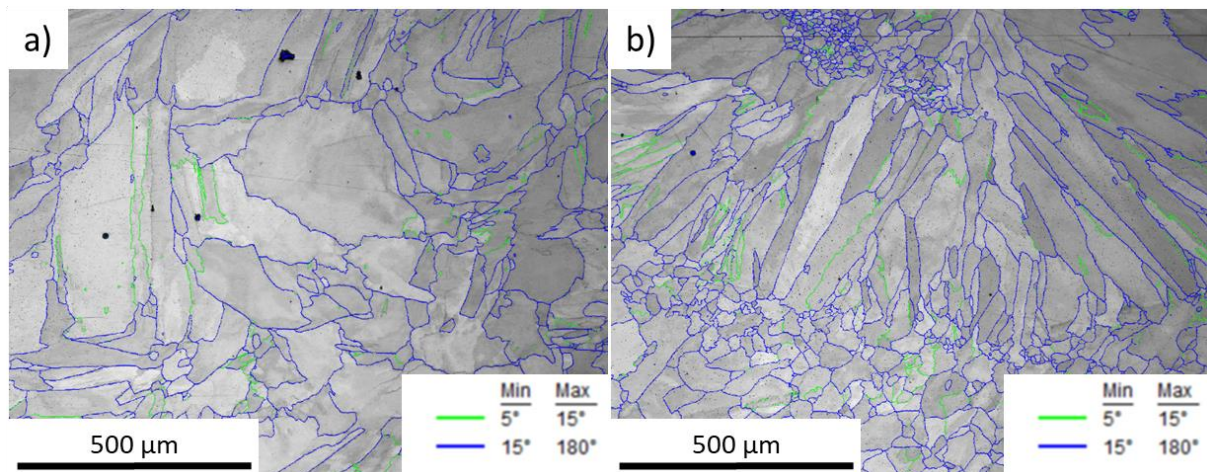
Obr. 35: Krystalová orientační IPF mapa, a) Součást 1 (ZigZag 500W SDM 800), b) Součást 5 (ZigZag 1000W SDM 1800), c) Součást 2 (ZigZag DMT SDM 800), d) Součást 6 (ZigZag DMT SDM 1800), e) Součást 3 (Spiral DMT SDM 800), f) Součást 7 (Spiral DMT SDM 1800), g) Součást 4 (Zig DMT SDM 800), h) Součást 8 (Zig DMT SDM 1800)

5.6.4.1 IQ mapy

Na **obr. 36** jsou zobrazeny distribuce hranic zrn austenitické oceli 316L v mapách kvality (IQ) s vyznačenými vysokoúhlovými (modrá barva) a nízkoúhlovými (zelená barva) hranicemi zrn pro reprezentativní součásti. Při porovnání IQ map je patrné, že struktura byla v případě malé

hlavy tvořena hrubšími zrny, zatímco v případě velké hlavy byly na přechodu mezi jednotlivými meltpools přítomné jemnozrné oblasti.

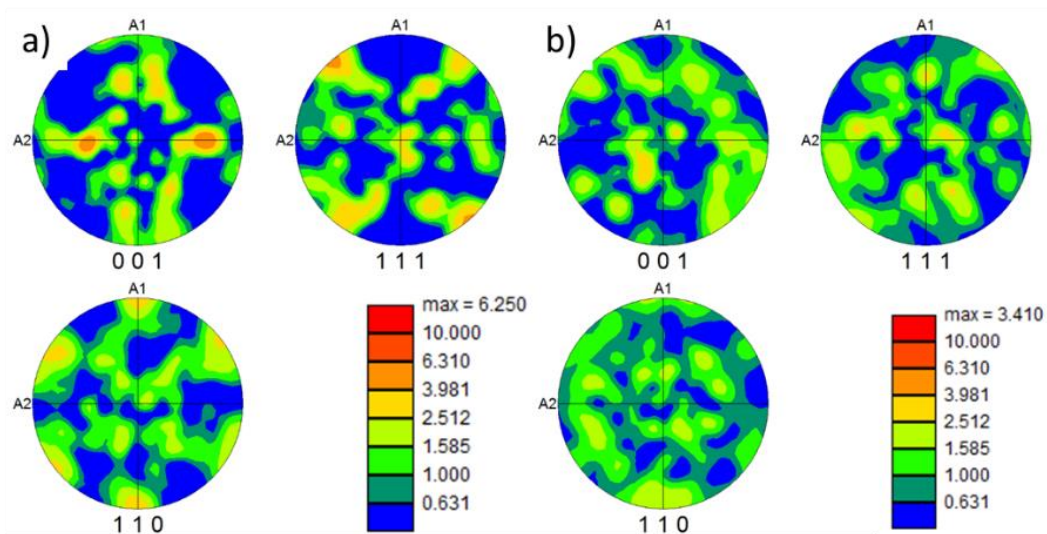
Analýzou bylo prokázáno, že převažovaly hranice s dezorientací větší než 15° , tzn. vysokoúhlové hranice zrn. Jednotlivé datové body byly sdružovány do zrn v případě, že kritický dezorientační úhel mezi dvěma sousedními pixely uvnitř zrna nepřekročil 5° a minimální počet pixelů tvořících zrna činil 2.



Obr. 36: Mapa distribuce hranic zrn austenitické oceli 316L, a) Součást 1 (ZigZag 500W SDM 800), b) Součást 5 (ZigZag Z 1000W SDM 1800)

5.6.4.2 Pólové obrazce

Pólové obrazce studovaných vzorků umožňující přehledně zobrazit přednostní orientaci v analyzovaném materiálu (**obr. 37**) vykazovaly při vzájemném porovnání podobný trend. Z rozložení intenzity v pólových obrazcích je zřejmé, že během aditivní výroby metodou DED nevznikla výrazná textura. Vyšších intenzit bylo dosaženo v případě hlavy SDM 800, nejvyšší jmenovitě při strategii tisku Spiral. Je nutné ale brát v úvahu velikost zrn, které mohou ovlivňovat míru intenzity v pólovém obrazci a tím zkreslovat výsledky analýzy.

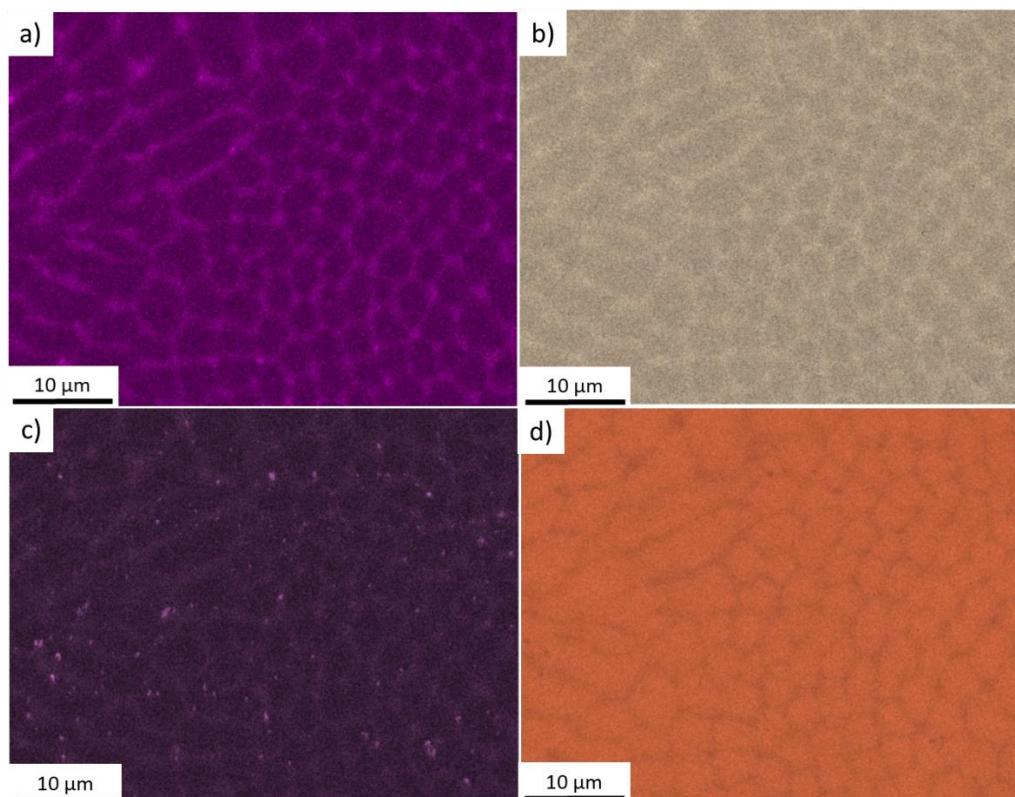


Obr. 37: Pólové obrazce rovin pro jednotlivé součásti, a) Součást 1 (ZigZag 500W SDM 800), b) Součást 5 (ZigZag 1000W SDM 1800)

5.6.4.3 EDS analýza

EDS analýza prokázala segregaci zejména Si, Mo a Cr v buněčné substruktuře materiálu 316L.

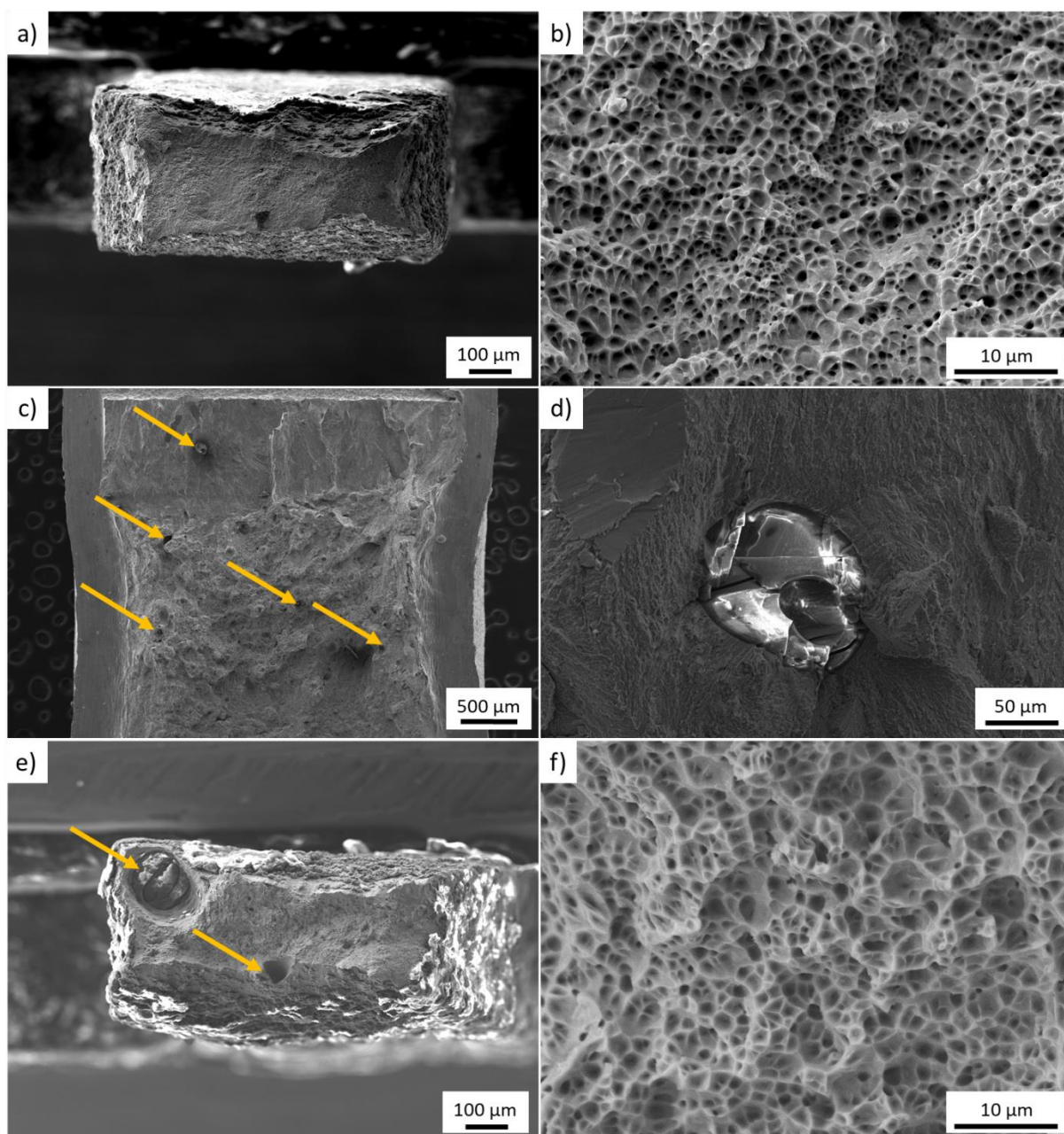
Na **obr. 38** jsou jednotlivé zobrazení daných prvků u Součásti 7.



Obr. 38: EDS mapa rozložení prvků pro Součást 7 (Spiral DMT SDM 1800), a) Mo, b) Cr, c) Si, d) Fe

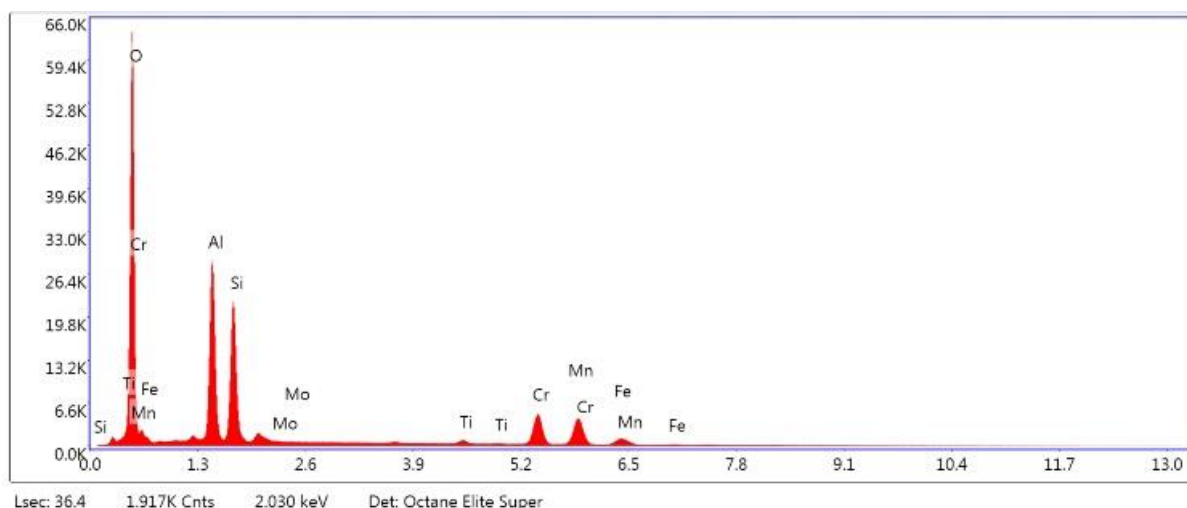
5.6.5 Fraktografie

Fraktografie byla provedena na vzorcích MTT a MCT pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu JEOL IT 500 HR. Pozorování bylo prováděno pod sekundárními elektrony (SED) a zpětně rozptýlenými elektrony (BED-C). Na **obr. 39** jsou uvedeny ukázky lomů vybraných vzorků. Lomy vykazují tvárné porušení s jamkovou morfologií. Lomové plochy vzorků na modulu SDM 1800 vykazují přítomnost vměstků na bázi Al a Si (chemická analýza viz **obr. 40**), které byly změřeny pomocí EDS analyzátoru Octane Elite Super.



Obr 39: Lomové plochy vzorku MTT a MCT– a) ZZ_SDM800_500W_Y2 (Součást 1), b) Detail lomové plochy s jamkovou morfologií - ZZ_SDM800_500W_Y2 (Součást 1), c) Ukázka

vměstků označené šipkami - vzorek MCT – S_SDM1800_Z2 (Součást 7), d) Detail vměstku - vzorek MCT - S_SDM1800_Z2 (Součást 7), e) Ukázka vměstků označené šipkami - vzorek MTT - ZZ_SDM1800_Y2 (Součást 6) f) Detail lomové plochy s jamkovou morfologií - ZZ_SDM1800_Y2 (Součást 6)



Obr. 40: Chemická analýza vměstku pomocí analýzy EDS

6 Diskuze výsledků

Součásti deponované metodou DED PB z materiálu 316L byly předmětem zkoumání stanovení vlivu různých depozičních parametrů na výslednou mikrostrukturu a mechanické vlastnosti. Sledováno bylo chování vzorků na celkem 8 součástech vytvořených s využitím různých depozičních parametrů, kdy depozice probíhala pod dvěma moduly (SDM800 a SDM1800), třemi strategiemi depozice (ZigZag, Spirál a Zig) a dvěma módy depozice (DMT mód a Normal mód). Mikrostruktura deponovaných součástí byla sledována pomocí světelné mikroskopie, skenovací elektronové mikroskopie a také byly provedeny mikrostrukturní analýzy EBSD a fraktografie. Pro posouzení mechanických vlastností byly provedeny zkoušky tahem, lomové houževnatosti a tvrdosti. Tyto zkoušky proběhly za pokojových teplot.

Zkoušky tahem byly provedeny na miniaturních zkušebních tělesech typu MTT v různých orientacích (ve směru depozice a dva na sebe kolmé směry, kolmé ke směru depozice). Ze zkoušek tahem vyplývá, že aditivně vytvořené součásti vykazují anizotropii mechanických vlastností. Hodnoty meze pevnosti a meze kluzu jsou nižší pro sledovaný materiál než hodnoty presentované v jiných publikacích [29, 30], na druhou stranu jsou naměřené výsledky v intervalu hodnot pro „bulk“ materiál. Všechny součásti vykazují obdobný trend pro mez pevnosti a mez kluzu ve směrech $X \rightarrow Y \rightarrow Z$ (seřazeno od nejvyšších hodnot po nejnižší) pro

modul SDM 800 a $Y \rightarrow X \rightarrow Z$ pro modul SDM1800. Hodnoty tažností vykazují opačný trend. U meze pevnosti v tahu jsou nejmenší rozdíly v hodnotách odchylek u součástí deponovaných v Normal módu – obdobné velikosti meltpoolů a ve směru Z a to z důvodu, že testované oblasti jsou si podobné. U modulu SDM 1800 jsou odchylky vyšší, protože se v materiálu vyskytovaly defekty. Vyšší hodnota odchylek ve směru X a Y pro všechny součásti deponované v DMT módu jsou z důvodu, že v DMT módu dochází k různému protavení vrstev a vzorky MTT, které mají testovaný průřez $1 \times 0,5$ mm jsou citlivé na umístění vzorku v součásti (výskyt defektů v materiálu a různorodé oblasti). U modulu SDM 800 zasahuje několik vrstev do testovaného průřezu, ale u modulu SDM 1800 to jsou jen dvě vrstvy s tím, že po hranicích meltpoolů se vyskytují jemnozrné oblasti. Anizotropické chování materiálu je zapříčiněno podlouhlým růstem zrn ve směru Z, kdy pohyb dislokace je snadnější a nemá překážky v podobě většího počtu hranic zrn než ve směrech X a Y. U depoziční strategie Zig, u které je depoziční čas mnohem delší než u ostatních strategií a dochází k rovnoměrnějšímu prostupu tepla součástí a tím i k možné relaxaci materiálu. Díky tomu se zlepšují výsledné vlastnosti materiálu a vzrostla smluvní mez kluzu, kdy u této strategie dosahovala nejvyšších hodnot ze všech testovaných vzorků. Možná relaxace má za následek nejnižší zbytkové napětí v materiálu.

Zkoušky lomové houževnatosti byly provedeny na miniaturních zkušebních tělesech typu 0,16T-CT ve stejných orientacích jako zkoušky tahem. Vyhodnocení lomové houževnatosti proběhlo pomocí J-R křivek. Vzorky 0,16T-CT mají větší testovaný průřez než vzorky MTT a tím jsou méně citlivé na defekty v materiálu a jejich umístěním. U modulu SDM 800 jsou hodnoty lomové houževnatosti nižší než u modulu SDM 1800. Nejvyšších hodnot lomové houževnatosti u modulu SDM 800 dosahovali vzorky strategie Zig. Dále u tohoto modulu je obdobný trend ve výsledcích, pro směr depoziční YX a ZY. U modulu SDM 1800 a strategie Zig vzorky nevykazovaly anizotropické chování a dosahovaly hodnot srovnatelných s modulem SDM 800. Nejvyšších hodnot dosahovala strategie Spiral, což může být zapříčiněno umístěním testovaných vzorků.

Zkouška tvrdosti dle Vickerse proběhla v ploše YZ v horní části součásti. Z výsledků je patrné, že nejvyšších tvrdostí dosahovaly součásti deponované na modulu SDM 800. Tvrdosti ukazují následující trend vzhledem ke strategii depoziční: Zig \rightarrow Spiral \rightarrow ZigZag (seřazeno od nejvyšších hodnot po nejnižší), u obou modulů. Tyto výsledky korespondují s výsledky zkoušky tahem, kdy u metody Zig je mnohem delší čas depoziční a tím i prostor materiálu

k relaxaci. U modulu SDM 1800 bylo dosaženo obdobné tvrdosti jako u modulu SDM 800 pro strategii depozice Zig.

Z výsledků světelné mikroskopie vyplývají rozdíly ve velikosti meltpoolů pro jednotlivé moduly, což se pojí s průměrem paprsku a výšky vrstvy u jednotlivých modulů. Další rozdíly ve velikosti meltpoolů bylo v rámci módu, kdy u depozice v DMT módu je vidět nerovnoměrné protavení meltpoolů, vlivem změny výkonu laseru v průběhu depozice. U depozice pod pevným výkonem jsou výšky jednotlivých meltpoolů obdobné. V závislosti na strategii a módu tisku je růst zrn usměrněn. V případě použití modulu SDM 800 jednotlivá zrna pokračují v růstu se stejnou orientací přes rozhraní (hranici ztavení). Použití modulu SDM 1800 iniciovalo překrystalizaci v místech přechodu již předtím nanesené vrstvy. V místech jednotlivých hranic melt poolů a prvních fázích tuhnutí krystalizovala jemná rovnoosá zrna, na nichž pokračoval růst větších úzkých kolumnárních zrn. Dále bylo u modulu SDM 1800 pozorována přítomnost vměstků, pórů a trhlin.

Z měření pórovitosti vyplývá, že nejvyšších hodnot vykazoval modul SDM 1800 pro strategii Spiral. Porozita u modulu SDM 800 dosahovala řádově nižších hodnot. Naměřené hodnoty jsou velice nízké.

V rámci elektronové mikroskopie bylo ukázáno na buněčnou substrukturu materiálu s lokálním výskytem delta feritu (pod 1%) na vrcholcích buněčné substruktury. To je způsobeno chemickým odmíšením jednotlivých prvků hlavně chromu jako feritotvorného prvku, které nám ukázala EDS analýza.

EBSA analýza ukázala vývoj mikrostruktury pro jednotlivé strategie depozice a prokázala výskyt nepravidelných zrn, jejichž orientace je závislá na teplotním gradientu při rychlém laserovém snímání při DED depozici. U modulu SDM 800 a strategii Spiral docházelo k růstu zrn, který sledoval tepelný tok nanášených vrstev. U modulu SDM 1800 byla pozorována jemnozrná struktura v oblasti hranic meltpoolů a růstem podlouhlých zrn směrem do středu meltpoolu. Dále bylo zjištěno pomocí IQ map, že u všech součástí převažují vysokoúhlové hranice zrn. Pólové obrazce ukázali, že v případě DED technologie nevznikla v materiálu výrazná struktura.

Fragtografická analýza ukázala, že lomy vykazují mechanismus transkrystalického tvárného porušení s jamkovou morfologií. U vzorků deponovaných na modulu SDM1800

lomové plochy vykazovaly přítomnost vměstků. Pomocí EDS analýzy bylo zjištěno, že vměstky jsou na bázi Al a Si.

Pro zvolený materiál mají různé strategie depozice jen minimální vliv na mez pevnosti. V případě smluvní meze kluzu bylo dosaženo nejvyšších hodnot u strategie Zig. Výrazné rozdíly v mechanických vlastnostech nejsou patrné ani u použitého depozičního módu. Znatelné rozdíly jsou však u použití dvou různých modulů, kde u modulu SDM 800 jsou větší rozdíly v anizotropii, kdy ve směru X a Y materiál vykazoval obdobné chování, v případě směru Z byly tyto rozdíly největší. Dále u modulu SDM 1800 bylo dosaženo vyšších hodnot lomové houževnatosti než v případě modulu SDM 800. Z metalografického hlediska bylo dosaženo výrazných změn v materiálu jen v případě použití rozdílných modulů, kdy u modulu SDM 1800 byly sledovány vměstky a trhliny. Dále byl sledován rozdíl ve velikosti zrn, kdy u modulu SDM 1800 byly zaznamenány jemnozrné oblasti na hranicích meltpoolů s růstem kolumnárních zrn do středu meltpoolu. Z těchto výsledků plyne, že největší vliv na výsledné vlastnosti materiálu má použitý modul.

7 Závěr

Práce se zabývala vlivem technologických parametrů na výsledné mechanické vlastnosti deponovaných součástí vytvořených pomocí metody práškové přímé depozice. Jako experimentální materiál byla zvolena korozivzdorná ocel 316L. Byly použity dva depoziční moduly a tři různé strategie depozice, které byly realizovány ve dvou depozičních módech – což vedlo k celkově 8 zkoumaným kombinacím depozičních parametrů, jež byly zkoumány pro sledovaný materiál. Pro veškeré tyto deponované vzorky experimentálního materiálu byla sledována také směrová závislost mechanických charakteristik.

K posouzení mechanických vlastností byly využity zkoušky tahem, lomové houževnatosti na miniaturních zkušebních vzorcích a zkoušky tvrdosti. Celkem bylo vyzkoušeno 120 vzorků při zkouškách tahem a 54 vzorků pro vyhodnocení lomové houževnatosti. Tyto zkoušky byly doplněny o metalografické analýzy ve formě světelné a elektronové mikroskopie, EBSD a fraktografie. Všechny analýzy a zkoušky byly provedeny v deponovaném stavu materiálu.

Výsledky práce lze shrnout v následujících bodech:

- Pro vyhodnocení lokálních vlastností deponovaných součástí lze úspěšně použít miniaturní zkušební vzorky, kdy výhodou je postihnutí anizotropie materiálu a vyšší citlivost na přítomnost defektů v materiálu

- Výsledky zkoušek poukazují na anizotropii mechanického chování materiálu, což je dáno rozdílnou orientací deponovaných vzorků.
- Změny strategie depozice mají minimální vliv na mez pevnosti v tahu, naopak u smluvní meze kluzu jsou již patrné významné rozdíly.
- Výsledky zkoušek lomové houževnatosti ukazují na rozdílné chování materiálu pro oba moduly, kdy modul SDM 1800 dosahoval vyšších hodnot. V případě strategie depozice Zig nevykazoval materiál anizotropní chování při depozici modulem SDM 1800 na rozdíl od modulu SDM 800.
- Měření tvrdosti poukázala na vyšší tvrdosti pro modul SDM800, což je v souladu s výsledky zkoušek tahem.
- U modulu SDM 800 byla naměřena řádově nižší porozita než u modulu SDM 1800 s tím, že u těchto vzorků byly zaznamenány i trhliny a vměstky. I přes tento fakt jsou tyto naměřené hodnoty velice nízké.
- Rozdíly v chování vzorků deponovaných v módech Normal a DMT jsou pouze minimální.
- Z naměřených hodnot lze říci, že nejvyšších hodnot dosahovala strategie Zig, nevýhodou této depoziční strategie je několikanásobně delší čas depozice.

Z mechanických vlastností a metalografických analýz lze usoudit, že největší vliv na výsledné vlastnosti sledovaného materiálu má použitý modul. Použitý depoziční mód a strategie již nemají zásadní vliv na výsledné mechanické vlastnosti materiálu.

Vzhledem k výsledkům práce lze navrhnout i další analýzy s použitím miniaturních vzorků. Technologie DED má svoje opodstatnění a využití v průmyslu, nejen v oblasti výroby různých komponent, ale i v rámci využití navařování a oprav součástí. Při výrobě součástí umožňuje tato technologie kombinaci různých materiálů pro výrobu unikátních slitin nebo heterogenních součástí. Volené depoziční parametry se budou vztahovat na velikost a tvar deponované součásti, z důvodu dosažení co nejlepších mechanických vlastností. Z ekonomického hlediska bude sledován čas depozice, protože každý modul a strategie depozice mají různé časy depozice celé součásti. Hlavním ekonomickým faktorem bude rozdíl ceny součásti vyrobené konvenčními způsoby z bulkového materiálu ve srovnání s cenou výroby součástí pomocí aditivních technologií.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ

- [1] 3DTISKNAZAKAZKU.CZ. *Historie 3D tisku* [Online] [Citace: 6. 11 2019.] Dostupné z: https://3dfactory.cz/2017/10/27/historie/?fbclid=IwAR0XD8WM7V5-mLJcUsSaOnRzcFXxZT0ofO_rXidjew095Jf5_xxJZWxgvCc
- [2] HODEK, Josef. *Aditivní technologie. Zpráva o stavu 3D tisku pro Českou technologickou platformu STROJÍTENSTVÍ, o.s.* [Online] [Citace: 6. 11 2019.] Dostupné z: <http://docplayer.cz/18792004-Aditivni-technologie-zprava-o-stavu-3d-tisku-pro-ceskou-technologickou-platformu-strojitenstvi-o-s-josef-hodek.html>
- [3] ENNOMOTIVE [Online] [Citace: 10. 11 2019.] Dostupné z: <https://www.ennomotive.com/beyond-rapid-prototyping-with-3d-printing/>
- [4] HYBRID MANUFACTURING TECHNOLOGIES. *7 Families of Additive Manufacturing* [Online] [Citace: 25. 2 2020.] Dostupné z: https://www.additivemanufacturing.media/cdn/cms/7_families_print_version.pdf
- [5] YANG, Li, HSU, Keng, BAUGHMAN, Brian, GODFREY, Donald, MEDINA, Francisco, MENON, Mamballykalathil, WIENER, Soner. *Additive manufacturing of metals: The Technology, Materials, design and Production*. 2017. ISBN 978-3-319-55128-9
- [6] 3D Wiser. *Markforged Metal X*. [Online] [Citace: 6. 11 2019.] Dostupné z: <https://3dwiser.com/3d-tiskarny/3d-tisk-kovu/markforged-metal-x/>
- [7] SAMES, W.J., LIST, F. A., PANNALA, S., DEHOFF, R. R. a BABU, S. S.. *The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing*. 2016. ISSN: 1743-2804 (Online) Journal homepage: <http://www.tandfonline.com/loi/yimr20> [Online] [Citace: 20. 11. 2019.] Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09506608.2015.1116649>
- [8] NEXTEMA. *Selective Laser Melting (SLM)* [Online] [Citace: 28. 11. 2019.] Dostupné z: <http://www.nextema.com/en/selective-laser-melting/>
- [9] ARCAM EBM. *Welcome to manufacturing unbound*. [Online] [Citace: 28. 11. 2019.] Dostupné z: <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/arcamebm-corp-brochure-fnlv3.pdf>
- [10] GRAF, Benjamine, AMMER, Stefan, GUMENYUK, Andrey, RETHMEIER, Michael. *Design of Experiments for Laser Metal Deposition in Maintenance, Repair and Overhaul Applications*. (2013) [Online] [Citace: 28. 11. 2019.] Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Laser-metal-deposition_fig1_273536418

- [11] CARLOTA, V. *The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing*. (2019) [Online] [Citace: 30. 11. 2019.] Dostupné z:
<https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/>
- [12] GU, Dongdong. *Laser Additive manufacturing of High-Performance Materials*. Čína, 2015. ISBN 978-3-662-46089-4
- [13] ADDITIVE MANUFACTURING. *The Possibilities of Electron Beam Additive Manufacturing* [Online] [Citace: 28. 11. 2019.] Dostupné z:
<https://www.additivemanufacturing.media/articles/the-possibilities-of-electron-beam-additive-manufacturing>
- [14] SANGWOO, Nam, HEEWON, Cho, CHEOLHEE, Kim, YOUNG-MIN, Kim. 2018 *Effect of Process Parameters on Deposition Properties of Functionally Graded STS 316/Fe Manufactured by Laser Direct Metal Deposition*. 8, 607, DOI: 10.3390/met8080607 [Online] [Citace: 14. 3. 2020.] Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/326875859_Effect_of_Process_Parameters_on_Deposition_Properties_of_Functionally_Graded_STS_316Fe_Manufactured_by_Laser_Direct_Metal_Deposition
- [15] DZUGAN J., SEIFI M., PROCHAZKA R., RUND M., PODANY P., KONOPIK P. a LEWANDOWSKI J. J. *Effects of thickness and orientation on the small scale fracture behaviour of additively manufactured Ti-6Al-4V*. *Materials Characterization*. 2018, 143, 94-109. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.04.003. ISSN 10445803. [Online] [Citace: 4. 3. 2020.] Dostupné také z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580317328802?via%3DiHub>
- [16] SKÁLOVÁ J., KOVAŘÍK R. a BENEDIKT V. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-7043-417-1.
- [17] DŽUGAN J., PROCHÁZKA R. a KONOPIK P. *Micro-Tensile Test Technique Development and Application to Mechanical Property Determination*. SOKOLOV, Mikhail A. a Enrico LUCON, ed. *Small Specimen Test Techniques: 6th Volume* [online]. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 2015, 2015-04-28, s. 12-30 [citace 8.4.2020]. DOI: 10.1520/STP157620140022. ISBN 978-0-8031-7597-6. [Online] [Citace: 27. 3. 2020.] Dostupné z:
https://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/STP/PAGES/STP157620140022.htm

[18] DŽUGAN J., KONOPIK P., RUND M. a PROCHÁZKA R. *Determination of Local Tensile and Fatigue Properties With the Use of Sub-Sized Specimens*. Volume 1A: Codes and Standards. ASME, 2015, 2015-7-19, 709, V01AT01A066-. DOI: 10.1115/PVP2015-45958. ISBN 978-0-7918-5692-5. ISSN 1742-6588. [Online] [Citace: 1. 4. 2020.] Dostupné také z: <https://asmedigitalcollection.asme.org/PVP/proceedings-abstract/PVP2015/56925/V01AT01A066/283256>

[19] PROCHÁZKA R., DŽUGAN J. a KÖVER M. *Miniature specimen tensile testing of AZ31 alloy processed by ECAP*. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2015, 2015-7-19, 76(2), 134-139. ISBN 978-0-7918-5692-5. [Online] [Citace: 1. 4. 2020.] Dostupné také z: http://www.amse.acmsse.h2.pl/vol76_2/7625.pdf

[20] SUZUKI S., SATO S., SUZUKI M., KINOSHITA H., SATO S., JITSUKAWA S. a TANIGAWA H. *Influence of Surface Roughness on Tensile Strength of Reduced-Activation Ferritic/Martensitic Steels Using Small Specimens*. SOKOLOV, Mikhail A. a Enrico LUCON, ed. *Small Specimen Test Techniques: 6th Volume* [online]. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 2015, 2015-04-28, s. 1-9 [citace 8.4.2020]. DOI: 10.1520/STP157620140019. ISBN 978-0-8031-7597-6. Dostupné z: https://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/STP/PAGES/STP157620140019.htm

[21] DŽUGAN, Jan, KONOPIK, Pavel, RUND, Martin. *Fracture Toughness Determination with the Use of Miniaturized Specimens*, Contact and Fracture Mechanics, Pranav H. Darji and Veera P. Darji, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.73093. [Online] [Citace: 13. 4. 2020.] Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/contact-and-fracture-mechanics/fracture-toughness-determination-with-the-use-of-miniaturized-specimens>

[22] LIČKOVÁ, Dagmar. *Vlastnosti a zkoušení materiálu: Zkouška tahem*. [Online] [Citace: 24. 4. 2020.] Dostupné z: http://home1.vsb.cz/~lic098/files/3.cviceni_VZM.pdf

[23] GDOUTOS E. E. *Fracture mechanics: an introduction*. Boston: Kluwer Academic Publishers, c1993. ISBN 0-7923-1932-x

[24] MELZER, Daniel. *Lokální mechanické vlastnosti kovových materiálů vyrobených aditivními technologiemi*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2019 [Online] [Citace: 5. 5. 2020.] Dostupné z:

https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/37621/1/Diplomova%20prace_Melzer%20Daniel_2019.pdf

[25] ASTM Standard E 1820 – 11, *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*, 2011

[26] ODDĚLENÍ POVRCHOVÉHO INŽENÝRSTVÍ, *Zkoušky tvrdosti*. Plzeň: Západočeská univerzita [Online] [Citace: 7. 5. 2020.] Dostupné z:

https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf

[27] INSSTEK. *DMT Technology* [Online] [Citace: 9. 5. 2020.] Dostupné z:

http://www.insstek.com/content/dmt_tech

[28] INSSTEK. *MX-600 Technical Data* [Online] [Citace: 9. 5. 2020.] Dostupné z:

<http://www.insstek.com/content/standard/mx600>

[29] MUKHERJEE, Monideepa. *Effect of build geometry and orientation on microstructure and properties of additively manufactured 316L stainless steel by laser metal deposition* Materialia, Volume 7, 2019, 100359, ISSN 2589-1529 [Online] [Citace: 27. 6. 2020.] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589152919301553>

[30] FEENSTRA, D.R., CRUZ, V., GAO, X., MOLOTNIKOV, A., BIRBILIS, N.. *Effect of build height on the properties of large format stainless steel 316L fabricated via directed energy deposition* Additive Manufacturing, Volume 34, 2020, 101205, ISSN 2214-8604 [Online] [Citace: 27. 6. 2020.] Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860420305777>