

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv vstupního materiálu na výsledné vlastnosti tištěných
kovových dílů**

Autor: Bc. Martin HLISTA

Vedoucí práce: Ing. Ivana ZETKOVÁ, 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. Martin HLISTA**
Osobní číslo: **S18N0011K**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie – technologie obrábění**
Téma práce: **Vliv vstupního materiálu na výsledné vlastnosti tištěných kovových dílů**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Analýza vstupního materiálu
4. Výroba a testování zkušebních těles
5. Zhodnocení
6. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

- Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer, 2014. 498 s. 1493921134.
- Stephanie, T. 3D Printing: An Introduction. MERCURY LEARNING AND INFORMATION, 2019. 370 s. 9781683922094.
- Fiala, J., Mentl, V., Šutta, P. Struktura a vlastnosti materiálů. ACADEMICA, 2004. 561 s. 8020012230.
- Zetková, I. Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem. V Plzni 2017. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html>, Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- Hanzl, P. Využití metody spékání kovových prášků laserem pro konstrukci řezných nástrojů. V Plzni 2014. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html>, Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ivana Zetková, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění
Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**
Regionální technologický institut
Datum zadání diplomové práce: **16. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat Regionálnímu technickému institutu za tisk zkušebních těles, provedení mechanických zkoušek a ochotu při pomoci vytváření této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat paní Ing. Ivaně Zetkové, Ph.D. za odborné vedení práce.

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Hlista	Jméno Martin		
STUDIJNÍ OBOR	N2301 „Strojírenská technologie - technologie obrábění“			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetková, Ph.D.	Jméno Ivana		
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Vliv vstupního materiálu na výsledné vlastnosti tištěných kovových dílů			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	115	TEXTOVÁ ČÁST	99	GRAFICKÁ ČÁST	16
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

<p>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Diplomová práce obsahuje shrnutí o vlastnostech kovového prášku a jeho zpracování pro tisk kovových součástí. Jsou zde popsány hlavní parametry prášku a jeho hodnocení. Hlavní výzkumnou částí této práce je porovnání mechanických hodnot pro vytištěné vzorky z nového a přestetého prášku, a také pro hodnoty konvenčního materiálu. Je zde prozkoumáván vstupní prášek a následné vyhodnocení mechanických vlastností jednotlivých vzorků, které jsou zkoumány také fraktografickou analýzou. Výsledkem práce je porovnání mechanických vlastností mezi novým a použitým práškem při zachování stejného procesu výroby a zpracování.</p>
<p>KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Aditivní výroba, kovový prášek, MS1, mechanické vlastnosti, DMLS, mechanické zkoušky, fraktografie</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Hlista	Name Martin	
FIELD OF STUDY	B2301 "Department of Machining Technology"		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetková, Ph.D.	Name Ivana	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Influence of input material on resulting properties of printed metal parts		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	115	TEXT PART	99	GRAPHICAL PART	16
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>The diploma thesis contains a summary of metal powder and its processing for printing metal parts. The main parameters of the powder and its evaluation are described here. The main research part of this work is a comparison of mechanical values for new and sieved powder and also for values of conventional material. The input powder is examined and subsequently the evaluation of the mechanical properties of individual samples, which are next also examined by fractographic analysis. The result of the work is the evaluation of the mechanical properties between the new and used powder, while maintaining the same process of production and processing.</p>
KEY WORDS	Additiv Manufacturing, Metal powder, MS1, Mechanical properties, DMLS, Mechanical tests, Fractography

OBSAH

1	Úvod	10
2	Rozbor současného stavu	11
2.1	Hlavní metody 3D tisku	12
2.2	Vstupní materiál	13
2.3	Proces výroby prášku pro AM	14
2.3.1	Water Atomisation	15
2.3.2	Gas Atomisation (GA)	16
2.3.3	Induction Melted Bar Atomisation (EIGA)	16
2.3.4	Plasma Atomised Wire (PAW)	17
2.3.5	Plasma Rotating Electrode Process (PREP)	18
2.4	Ochranné atmosféry používané pro výrobu prášků	20
2.5	Popis a rozdělení prášku pro AM	21
2.5.1	Chemie	21
2.5.2	Rozdělení podle velikosti částic prášku	22
2.5.3	Počet částic	23
2.5.4	Specifikace PSD	23
2.6	Měření velikosti částic v prášku	24
2.6.1	Měření pomocí obrazovek Ro Tap	24
2.6.2	Laserové měření	24
2.7	Morfologie prášku	24
2.7.1	Zdánlivá hustota a tekutost prášku	25
2.8	Hustota balení a skladování prášku	26
2.9	Zpracování odpadního materiálu	26
2.9.1	Opětovné použití prášku	27
2.9.2	Recyklace prášku	28
2.9.3	Změny vlastností recyklovaného prášku z materiálu S17- 4 PH [14]	28
2.9.4	Změny vlastností recyklovaného prášku z materiálu Ti – 6AL – 4V [15]	29
2.9.5	Proces recyklace	29
2.10	Dopad AM na zdraví a životní prostředí	30
2.10.1	Nakládání s odpady	31
2.11	Shrnutí důležitých vlastností prášku ovlivňujících výsledné vlastnosti tisku ...	32
3	Analýza vstupního materiálu	34
3.1	Prášek MS1	34
3.1.1	Hodnocení tvaru a struktury nového prášku MS1	35
3.1.2	Hodnocení tvaru a struktury přeseťového prášku MS1	39

3.1.3	Zhodnocení vstupních materiálů pro tisk vzorků z nového a přesévaného prášku.....	40
4	Výroba a testování zkušebních těles.....	41
4.1	Popis technologie.....	41
4.1.1	Technologie DMLS	42
4.2	Navržení zmenšení pracovního prostoru platformy.....	43
4.2.1	Popis pracovního prostoru stroje	43
4.2.2	Okrajové podmínky stroje	44
4.2.3	Návrh přepažení pracovní komory	45
4.3	Konstrukce přepážky pro rozdělení pracovního prostoru.....	47
4.3.1	Průběh tisku se zmenšeným prostorem	50
4.4	Výroba zkušebních těles	51
4.4.1	Rozložení těles na platformu	51
4.4.2	Parametry pro tisk součástí.....	53
4.4.3	Zhodnocení vytištěných těles	53
4.5	Mechanické zkoušky těles	55
4.5.1	Zkouška tahem.....	56
4.5.2	Výsledky zkoušky tahem.....	57
4.5.3	Fraktografie lomových ploch u vzorků z nového prášku	59
4.5.4	Zkouška rázem v ohybu.....	59
4.5.5	Fraktografie lomu pro vzorek ze zkoušky rázem v ohybu	62
4.5.6	Cyklická únavová zkouška	63
4.5.7	Fraktografie lomu pro vzorky z cyklické únavové zkoušky.....	66
5	Zhodnocení	69
5.1	Sumarizace naměřených hodnot z tahové zkoušky	69
5.2	Sumarizace naměřených hodnot ze zkoušky rázem v ohybu.....	71
5.3	Sumarizace naměřených hodnot z cyklické únavové zkoušky	72
5.4	Shrnutí mechanických zkoušek.....	73
6	závěr.....	75
	Seznam použité literatury a zdrojů	77
	Seznam obrázků a tabulek	80
	Seznam zkratk.....	82
	Přílohy	84
	Vázané přílohy.....	84

1 ÚVOD

Aditivní technologie je proces, který je v dnešní době stále častěji využíván pro jeho komplexnost způsobu výroby tvarově náročných součástí a rychlosti procesu tisku bez nutnosti dalších mechanických zpracování. Tento proces má svá pozitiva, která vyčnívají nad procesy klasického zpracování a vyrábění strojních součástí. I přes to má tento proces svá negativa, která se projevují jak z hlediska náročnosti procesu výroby, tak na výsledných vlastnostech vyráběných součástí.

Aditivní výroba je proces, který je stále prozkoumáván a je nutné objevit cesty pro jeho zdokonalování a odstraňování negativní vlastností. Jedním z negativ aditivních technologií jsou dosahované výsledky mechanických zkoušek vytištěných součástí pro dynamické a cyklické namáhání. Tyto vlastnosti jsou v porovnání s konvenčně vyráběnými součástmi výrazně nižší a nedaří se těmto mechanickým vlastnostem dosáhnout. Vlivů na mechanické vlastnosti tištěných dílů je celá řada, a proto je nutné všechny tyto vlivy prozkoumat a zjistit, jaký mají podíl na ovlivnění těchto vlastností. Jedním z důležitých vlivů, který působí na samotný proces tisku i následné mechanické vlastnosti, je vstupní materiál.

Cílem této diplomové práce je zjištění mechanických vlastností tištěných vzorků pomocí technologie DMLS v závislosti na použitém vstupním materiálu. Hodnoty mechanických zkoušek, které budou zjišťovány na tělesech vytištěných z nového prášku MS1, budou dále porovnávány s hodnotami, které byly zjištěny u mechanických zkoušek pro několikanásobně přesévaný prášek MS1 a s hodnotami uváděnými pro konvenčně vyráběné materiály.

Je proto důležité prozkoumat vstupní materiál již od samotného začátku výroby kovových prášků. V diplomové práci tedy budou prozkoumány jednotlivé metody pro výrobu kovových prášků. Následně jsou prášky rozdělovány do procesů 3D tisku s analyzováním nejdůležitějších parametrů a vlastností, které by měly prášky splňovat. Tyto parametry je nutné nějakým způsobem zjišťovat a vyhodnocovat. Zjišťování parametrů proběhne analýzou vstupního materiálu pro tisk zkušebních vzorků. Prášek je zde hodnocen z hlediska tvaru, struktury a chemického složení. Výsledná analýza nového prášku je porovnávána s daty od výrobce prášku a s analýzou přesévaného prášku, která byla prováděna v dřívějších výzkumech.

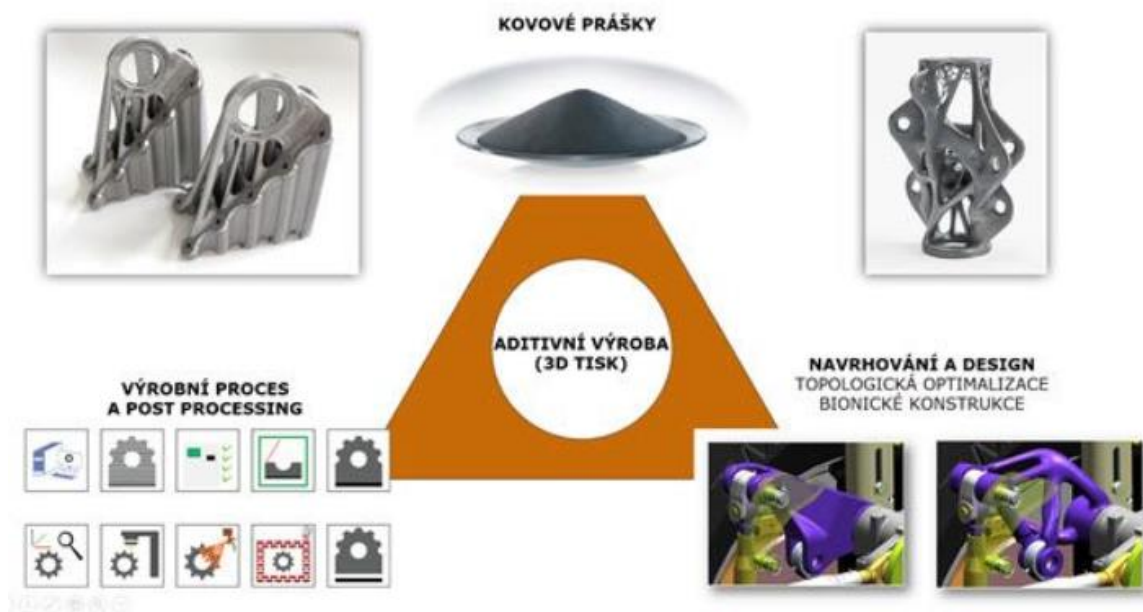
Dále se práce zabývá popisem zvolené technologie pro tisk zkušebních vzorků a problematikou spotřeby prášku pro tento proces. Z důvodu vysoké spotřeby prášku a vysokých pořizovacích nákladů je v diplomové práci vyhotoven návrh k redukci spotřeby pro tento proces v daném stroji, ve kterém budou tělesa tisknuta.

Po vytištění zkušebních těles následují samotné mechanické zkoušky, jejichž výstupy budou porovnávány s přesévaným práškem a s konvenčním materiálem. Po provedení zkoušek je nutné prozkoumat lomy vzorků pomocí fraktografie a vyhodnotit možné vlivy na dosažené výsledky.

2 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU

3D tisk kovů může být označen jako moderní technologie, která umožňuje přímou výrobu komplexních dílů a jejich konečné využití. Tato technologie se označuje jako aditivní a lze ji charakterizovat jako víceoborovou. Zahrnuje několik etap a procesů, které mohou ovlivnit konečnou podobu tištěných dílů. Mezi tyto etapy lze zahrnout tři základní procesy:

- prášková metalurgie: vývoj, výroba, testování,
- předvýrobní a výrobní etapa: návrh součástí s ohledem na topologickou optimalizaci a konstrukci potřebnou pro 3D tisk, příprava dat, příprava stroje a samotná výroba,
- postprocessing: tepelné zpracování, povrchové úpravy, dokončovací metoda, kontrola a měření, odstranění podpor. [7]



Obrázek 1 - Proces aditivní výroby [7]

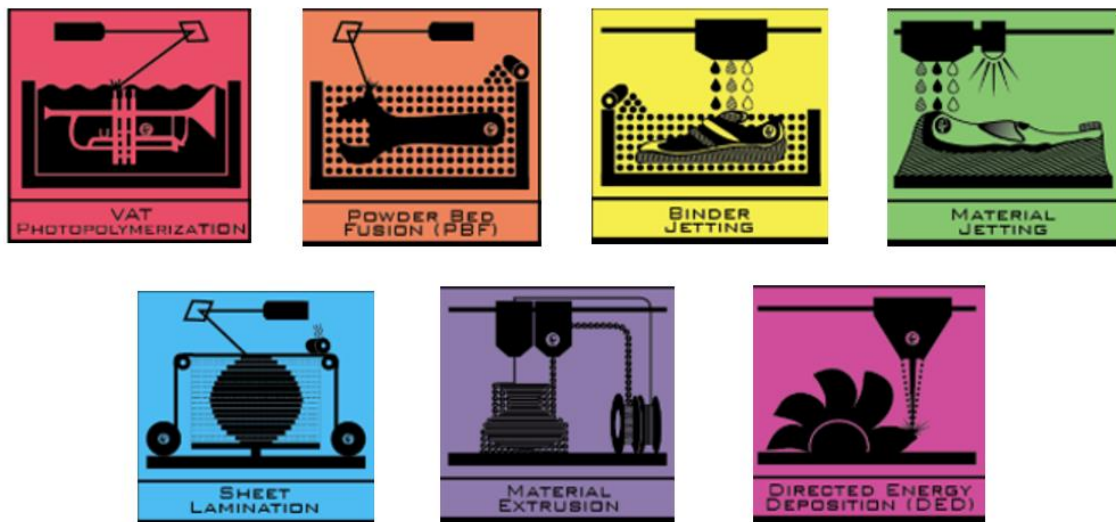
V dnešní době může být tato technologie aplikována jak v kusové, malosériové, tak i v hromadné výrobě. AD technologie umožňuje rychlé a relativně levné vytváření tvarově složitých výrobků, na kterých nemusí být použito několik strojů, nástrojů, přípravků atd. Lze říci, že výrobní proces daného výrobku je možno uskutečnit v jednom zařízení bez nutnosti dalších zdlouhavých procesů. Další nespornou výhodou AD je výroba několika dílů najednou v jednom výrobním procesu. Na druhou stranu přináší tato technologie nedostatky, které se projevují hlavně v úpravě povrchu po tisku, v přesnosti tisku, ve vytváření pomocných struktur a následné tvarové stabilitě dílu. [7]

2.1 Hlavní metody 3D tisku

Existuje celá řada aditivních technologií, které mají rozdílné požadavky na vstupní materiál pro 3D tisk. Zde je vybráno 7 základních metod AM:

- Powder Bed Fusion (PBF)
- Directed Energy Deposition (DED)
- Binder Jetting (BJ)
- Material Jetting (MJ)
- Sheet Lamination (SHL)
- Vat Photopolymerisation (VAT)
- Material Extrusion (ME)

Z těchto sedmi technologií AM mohou PBF, DED, BJ a ME využívat kovové částice neboli kovové prášky, které se u těchto typů AM mohou lišit. PBF a BJ vyžadují, aby byl prášek přemístěn ze zásobníků a rozprostřen na platformu, kde je vytvořena souvislá vrstva prášku, která je následně natavována laserem. V rámci PBF se používají jiné velikosti částic oproti většině laserových systémů. Velikost částic prášku budou popsány níže. Tato diplomová práce je zaměřena na vstupní materiál pro 3D tisk kovů, proto zde není vysvětlen princip jednotlivých metod. Základní metody pro AM proces jsou znázorněny na Obrázku 2. [11]



Obrázek 2 - Druhy procesů pro AD [11]

2.2 Vstupní materiál

Pro AM je velice důležitým prvkem vstupní materiál, který ovlivňuje jak samotný proces tisku, tak i výsledné vlastnosti vytištěného dílu. Tento materiál je vyráběn z prášku, který má určité vlastnosti. Mezi tyto vlastnosti patří například velikost částic prášku, tvar jednotlivých částic, tekutost prášku, chemie prášku a mnoho dalších. Tyto vlastnosti budou vysvětleny v dalších kapitolách této diplomové práce.

Vstupní materiál lze vyrábět různými způsoby, které musí splňovat určitou kvalitu prášku. Dnes máme velké množství materiálů, z nichž lze prášek vyrábět tak, aby splňovaly potřebné vlastnosti u tištěných produktů. Nejčastěji používané jsou uvedeny v Tabulce 1. [1]

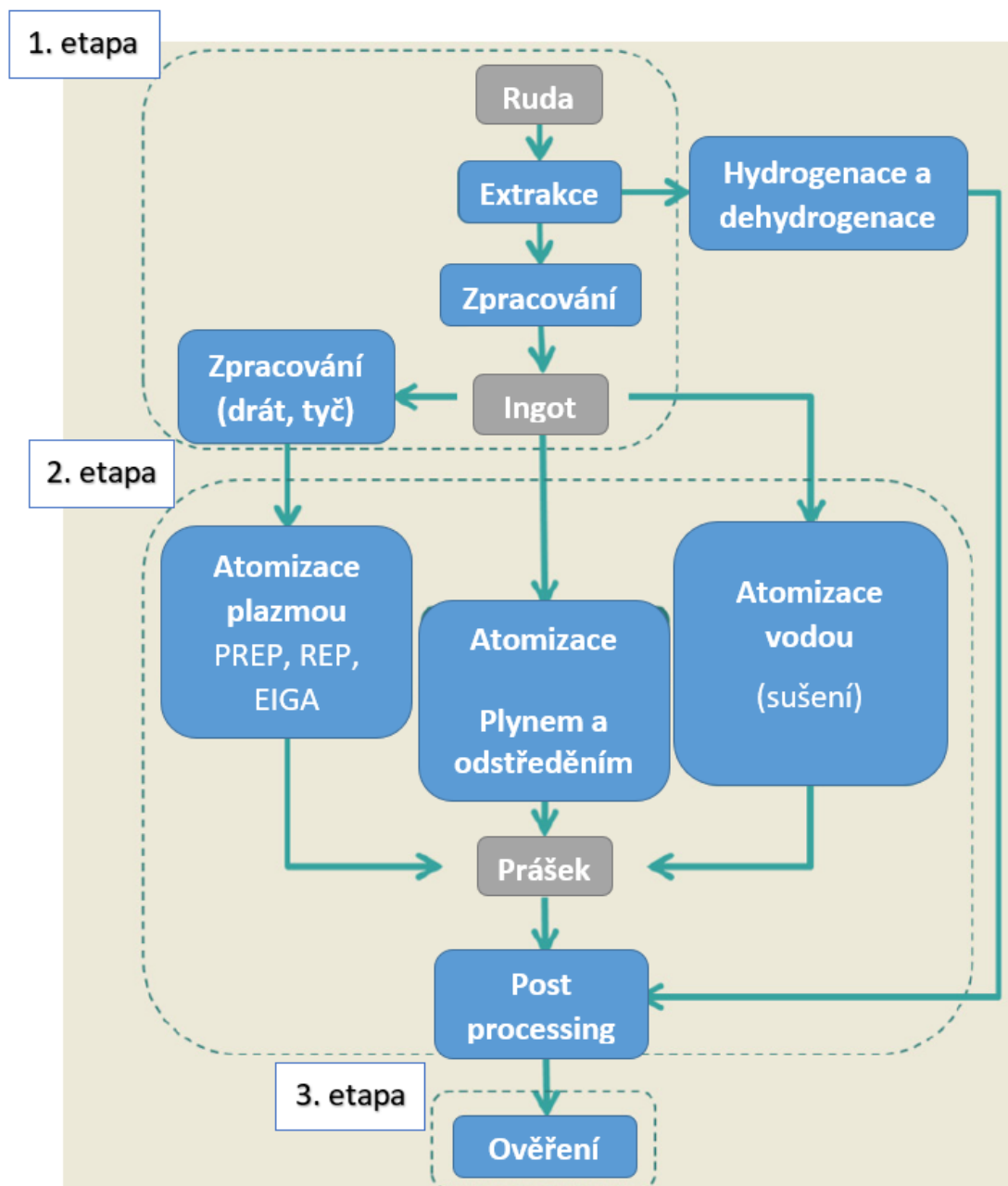
Tabulka 1 - Materiály pro AM [1]

	Materiál	DIN
Hliníkové slitiny	AlSi10Mg	3.2381
	AlSi7Mg	3.2371
	AlSi12	3.3581
Kobaltové slitiny	ASTM F75	2.4723
	CoCrWC	
Nástrojové oceli	AISI 420	1.2083
	Marage 300	1.2709
	H13	1.2344
	AISI D2	1.2379
	AISI A2	1.2363
	AISI S7	1.2357
Niklové slitiny	Inconel 718	2.4668
	Inconel 625	2.4856
	Inconel 713	2.4670
	Inconel 738	
	Hastelloy X	2.4665
Nerezové oceli	SS 304	1.4301
	SS 316 L	1.4404
	SS 410	1.4006
	SS 440	1.4110
	15-5 PH	1.4540
	17-4 PH	1.4542
Titanové slitiny	Titanium Grade 2	3.7035
	Ti6Al4V	3.7165
	Ti6Al4V ELI	3.7165 ELI
	TiAl6Nb7	
Drahé kovy	zlato	18 Carat
	stříbro	930 Sterling
Slitiny mědi	CC 480 K	2.1050

Kovové prášky se používají v široké škále průmyslových aplikací více než sto let. Aditivní výroba je nejnovějším odvětvím, které těží z technologie, jež se během této doby vyvinula. Kovové prášky se používají od nejběžnějších aplikací, kterými jsou například kyslíkové pohlcovače v potravinářských obalech, až po nejpokrokovější aplikace, jako jsou lopatky plynové turbíny ze slitiny niklu a kobaltu. [1]

2.3 Proces výroby prášku pro AM

Hlavními výrobními procesy pro výrobu prášků jsou atomizace plynem, indukční roztavená tyčová atomizace (EIGA), plazmatický atomový drát (PAW) a atomizace plazmatickou rotační elektrodou (PREP). Existuje mnoho dalších způsobů výroby prášku, které lze použít pro vybrané procesy AM, tyto procesy zahrnují hlavně atomizaci vody, drcení, sferoidizaci, srážení chemických roztoků a plynových fází. Na Obrázku 3 je vidět vývojový diagram výrobního postupu kovového prášku. [3]



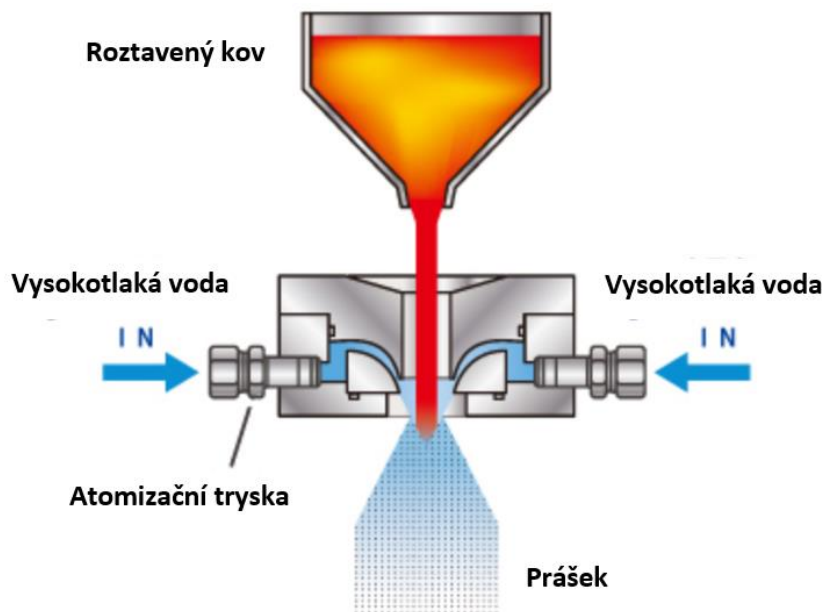
Obrázek 3 - Vývojový diagram výrobního postupu kovového prášku [3]

Výroba kovového prášku v AM se obecně skládá ze tří hlavních etap. V první etapě je zahrnuta těžba rudy, ze které je získán čistý nebo legovaný kovový produkt (ingot, drát tyčovina). Tato fáze je velmi důležitá pro následující etapu, pro kterou musí být připraveny polotovary pro jednotlivé procesy zpracování kovu a výrobu kovového prášku. Druhá etapa zahrnuje pouze zpracování a výrobu prášku. Tato etapa je rozdělena na tři základní druhy atomizace prášku. Jsou to atomizace plazmou, atomizace plynem/odstředivá atomizace a atomizace vodou. V poslední etapě je prášek klasifikován a ověřován z hlediska kvality pro další zpracování nejčastěji uváděnou hodnotou velikosti částic v prášku, která je udávána v mikrometrech. [3]

2.3.1 Water Atomisation

Obecně při atomizaci pomocí vody je surovina nejprve roztavena v peci. Pod pecí je umístěna pánev, která je ve tvaru nálevky. Pomocí nálevky je kontrolován průtok taveniny do rozprašovače. Tavenina vstupuje do rozprašovací komory shora a volně padá do dolní části rozprašovače, do něhož jsou připojeny symetricky umístěné vodní trysky kolem proudu taveniny. Do trysek je vháněna voda pod vysokým tlakem, která atomizuje s taveninou, a vytvářejí se tak malé částice prášku. Tyto částice jsou následně shromažďovány na dně komory. Prášek je nutné dále zpracovávat formou vysušování.

Prášek vyráběný touto metodou se vyznačuje nepravidelným tvarem částic, který není pozitivní pro balení prášku a pro tokové vlastnosti prášku. Proto je tato metoda spíše využívána pro výrobu železných a ocelových prášků, jež se zpracovávají lisováním, a pro AM se tato metoda nepoužívá. Metoda je znázorněna na Obrázku 4. [1], [3], [4]

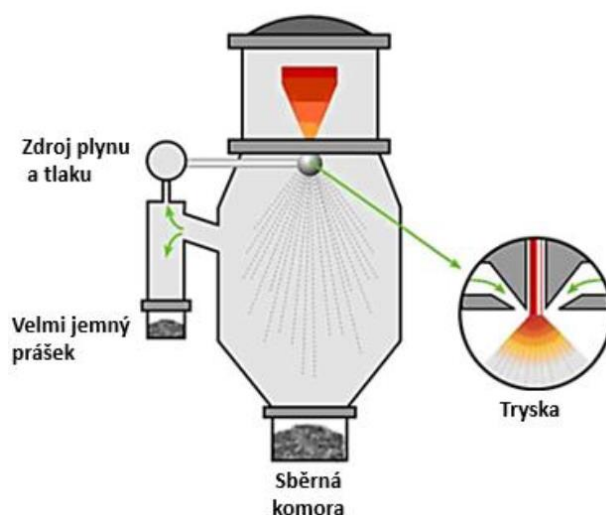


Obrázek 4 - Metoda Water Atomisation [6]

2.3.2 Gas Atomisation (GA)

U této metody se roztavený kovový proud rozpadá na kapičky, které po ztuhnutí tvoří částice prášku. Tento rozpad je tvořen působením proudu inertního vysokotlakého plynu, nejčastěji argonu či dusíku. Tyto plyny slouží nejen pro rozprašování kovu, ale také pro ochranu kovu proti oxidaci. Kapky kovu volně padají dovnitř věže, těsně před sběrnou komorou dojde k jejich ztuhnutí. Během volného pádu kovu dochází na kapičkách k povrchovému napětí, které přetvoří kapku na sférickou částici. Tavení výchozího materiálu se může provádět v otevřené atmosféře, pod ochranným plynem nebo ve vakuu. Metoda tavení a rozprašovací plyn mají významný vliv na náklady prášku, přičemž nejnákladnější variantou je tavení ve vakuu s atomizací argonem.

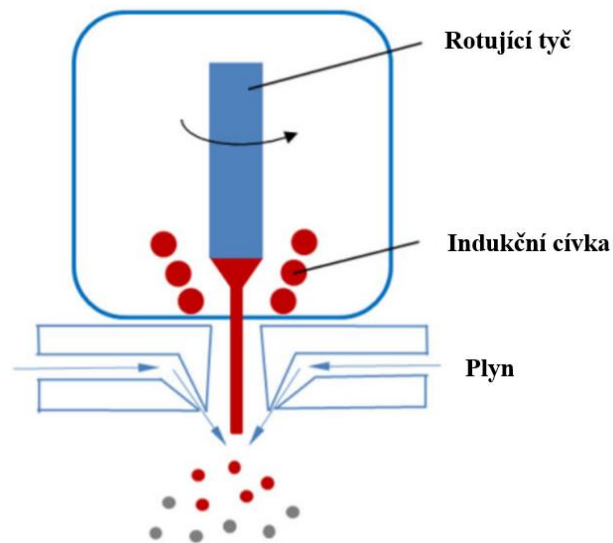
Tato metoda je v mnoha případech nejlepší technologií pro výrobu vysoce kvalitního prášku za rozumnou cenu. Slitina kovu je vyráběna v tavící peci, což dodává velkou flexibilitu složení. Prášek má velice vysokou čistotu a velmi dobrý průtok tryskou. Významným parametrem je zde velikost částic prášku. Ta je zde řízena úpravou průtoku kovu, tlakem a průtokem daného plynu a v neposlední řadě konstrukcí trysky. Je třeba zdůraznit, že prášky atomizované plynem byly použity při počátečním vývoji mnoha procesů v AM a jako takové poskytly základy pro tuto technologii. Technologie je znázorněna na Obrázku 5. [1], [3], [4]



Obrázek 5 - Metoda Gas Atomisation [1]

2.3.3 Induction Melted Bar Atomisation (EIGA)

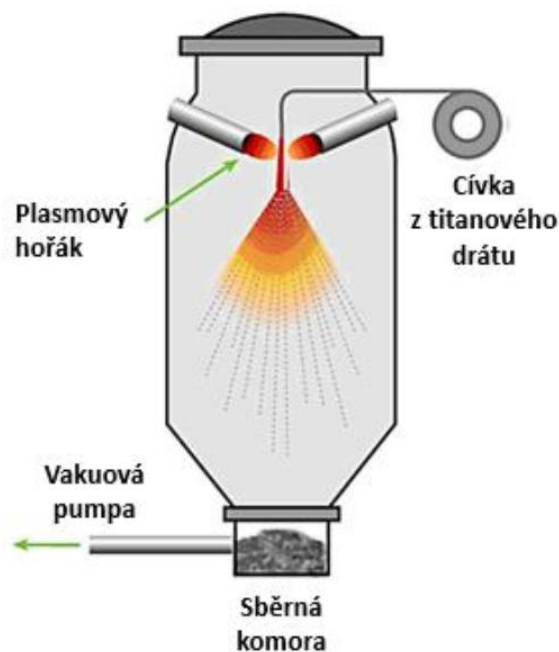
Tato metoda je další verzí plynové atomizace. Špička tyče o průměru 50 [mm] je zahřívána indukční cívkou. Po dostatečném zahřátí se vytvoří proud taveniny, který je následně rozprašován vysokotlakým plynem. Kvalita prášku je podobná prášku vyráběnému metodou GA. Avšak hlavní výhodou EIGA je to, že u předešlé metody může dojít ke kontaminaci roztaveného kovu, který se přelévá například uvolněním některých prvků z keramických kelímků nebo z trysky. Při této metodě je materiál taven přímo nad zařízením plynového rozprašovače, a tím se materiál nedostane do kontaktu s okolními materiály. Částečnou nevýhodou tohoto procesu je výchozí materiál. Jak bylo zmíněno výše, je potřeba vysoce kvalitní tyč, která značně omezuje výběr dané slitiny, a tím pádem zvyšuje náklady této metody. Princip metody je znázorněn na obrázku 6. [1], [3], [4]



Obrázek 6 - Metoda Induction Melted Bar Atomisation [4]

2.3.4 Plasma Atomised Wire (PAW)

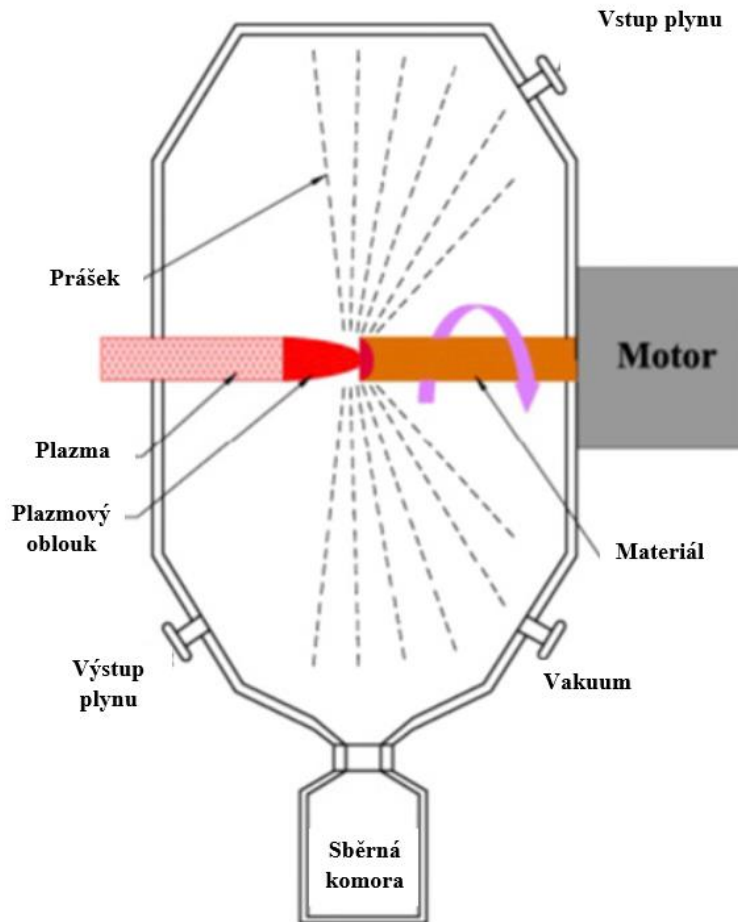
Tato metoda využívá k roztavení základního materiálu tzv. hořáky. Materiál je ve formě navinutého drátu, který se během procesu kontinuálně přidává do rozprašovací komory, ve které je roztaven a rozprášen plazmovým hořákem. Tento proces se primárně používá pro slitiny titanu. Prášky z této metody jsou velmi čisté a velmi kulovité s vynikajícím průtokem. Proces se vyznačuje vysokými výrobními náklady, kde hlavní příčinou jsou nízké výrobní rychlosti a omezená flexibilita slitin, které musí být dodávány jako drát. Princip metody je znázorněn na Obrázku 7. [1], [3], [4]



Obrázek 7 - Metoda Plasma Atomised Wire [1]

2.3.5 Plasma Rotating Electrode Process (PREP)

Tato metoda byla dlouho považována za nejrychlejší metodu procesu výroby prášku. Metoda spočívá ve vysokootáčkovém roztočení kruhové tyče, která je pomocí hořáků natavována. Vlivem odstředivých sil se začnou oddělovat kapičky roztaveného kovu, které následně ztuhnou. Díky tomuto procesu jsou částice prášku dokonale kulovité a prášek je velmi čistý. PREP je vhodná spíše pro hrubý prášek. Pro dosažení vhodnější velikosti částic lze zvyšovat otáčky rotující kruhové tyče. To má za následek zmenšení velikosti částic v prášku. Princip metody je znázorněn na Obrázku 8. [1], [3], [4]



Obrázek 8 - Metoda Plasma Rotating Electronic Process [8]

V Tabulce 2 je shrnutí všech zmíněných metod pro výrobu prášku pro AM proces. Každá metoda se vyznačuje specifickým dodáváním polotovaru do procesu. Výsledky jednotlivých metod výroby se vyznačují hlavně rozdílnými tvary jednotlivých částic prášku, velikostí částic atd. Další zmíněné výhody a nevýhody těchto procesů jsou zaměřeny na dodavatele polotovarů pro rozdílné procesy, kde ne každý dodavatel dokáže vytvořit polotovary v dostatečné kvalitě a s požadovanými vlastnostmi. V neposlední řadě je zde zmíněna také ekonomičnost procesu a samotné vlastnosti procesu, které jsou rozděleny do pozitivních a negativních propozic. [13], [14]

Tabulka 2 - Přehled metod výroby prášku pro AM [13]

Proces	Výhody	Nevýhody
Gas Atomisation (GA)	<ul style="list-style-type: none"> - Vynikající metalurgická kvalita - Velké průtoky prášku - Široký výběr slitin - Snadno vyrobit nové a modifikované slitiny - Velká zásobovací základna - Relativně nízké náklady - Velké objemy 	<ul style="list-style-type: none"> - Variabilita vlastností prášků od různých dodavatelů - Mnoho dodavatelů a zajímavých technologií, které mohou být matoucí - Reaktivní slitiny a slitiny s vysokou teplotou tání, nejsou dostupné - Málo společností v současné době zvládá atomizaci titanu
Induction Melted Bar Atomisation (EIGA)	<ul style="list-style-type: none"> - Vynikající metalurgická kvalita - Velké průtoky prášku - Lze zpracovávat reaktivní slitiny s vysokou teplotou tání - Dostupné slitiny titanu - Vysoká míra produkce 	<ul style="list-style-type: none"> - Omezená zásobovací nabídka - Lze zpracovávat slitiny dostupné jako tyčový polotovár - Vysoká cena
Plasma Atomised Wire Process (PAW)	<ul style="list-style-type: none"> - Vynikající metalurgická kvalita - Vysoké průtoky prášku - téměř dokonalé tvary částic - Lze zpracovávat reaktivní slitiny s vysokou teplotou tání - Dostupné slitiny titanu 	<ul style="list-style-type: none"> - Omezená zásobovací nabídka, nové patenty mohou blokovat nové dodavatele - Lze zpracovávat slitiny dostupné jako drát - Vysoká cena
Plasma Rotating Electrode Process (PREP)	<ul style="list-style-type: none"> - Vynikající metalurgická kvalita - Vysoké průtoky prášku - dokonalé tvary částic - Lze zpracovávat reaktivní slitiny s vysokou teplotou tání - Dostupné slitiny titanu 	<ul style="list-style-type: none"> - Omezená zásobovací nabídka - Jako výchozí materiál je potřeba vysoce kvalitní tyč - Vysoká cena

2.4 Ochranné atmosféry používané pro výrobu prášků

Při výrobě prášku pro AM je potřeba proces výroby provádět v kontrolovaném prostředí, aby docházelo k minimálnímu zanesení nečistot do materiálu. Použitím argonu a dusíku je vytvořeno prostředí, které je inertní, tzn. chemicky neaktivní, a tudíž je bez rizika kontaminace reaktivními plyny běžně se vyskytujícími ve vzduchu, kyslíkem a oxidem uhličitým. V tomto prostředí lze vyrábět kovové prášky, které splňují náročné normy požadované pro jednotlivé procesy výroby v AM. Plyny tedy mohou ovlivnit výsledné vlastnosti prášku a konečné vlastnosti vytištěného dílu. Přehled použití ochranných atmosfér pro kovové prášky, je zobrazen v Tabulce 3.

U výrobku může dojít ke změně fyzikálních vlastností, snížení pevnosti v tahu, zvýšení rizika křehkosti a snížení odolnosti vůči korozi.

Při výrobě prášku může dojít k větším odchylkám kulovitosti jednotlivých částic, snížení hustoty a zhoršení průtoku prášku. [1], [3]

Tabulka 3 - Použití ochranných plynů pro kovové prášky od firmy EOS GmbH [1]

Kovové prášky	Ochranné plyny	
	Dusík	Argon
DirectMetal 20	x	x
EOS CobaltChrome MP1	x	x
EOS CobaltChrome SP2	x	x
EOS MaragingSteel MS1	x	x
EOS NiCkelAlloy HX	x	x
EOS NiCkelAlloy IN625	x	x
EOS NiCkelAlloy IN718	x	x
EOS StainlessSteel 316L	x	x
EOS StainlessSteel GP1	x	x
EOS StainlessSteel PH2	x	x
EOS Aluminium AlSi 10Mg		x
EOS Titanium Ti64		x
EOS Titanium Ti64 ELI		x

2.5 Popis a rozdělení prášku pro AM

Každý prášek je nutné otestovat, aby splňoval dané vlastnosti správného použití jak pro jednotlivé vytištěné díly, tak pro zvolenou metodu AM. Mezi tyto vlastnosti patří hlavně chemie, rozdělení podle velikosti částic (PSD), zdánlivá hustota (AD), hustota balení prášku (PD) a tzv. Hallův průtok. Každý prášek je zdokumentován výrobcem pomocí certifikátu. Tento certifikát obsahuje výše uvedené informace a další specifikace prášku, které zaručují správnou kvalitu prášku.

U prášků je mnoho dalších důležitých vlastností, které nejsou z certifikátu zcela jasné. Mezi ně patří např. kruhovitost jednotlivých částí, ta výrazně ovlivňuje jak průtok, tak relativní hustotu. Důvodem, proč nejsou tyto informace na certifikátu je, že neexistuje analýza s přijatelnou kvalitou výsledků, ze které by bylo možné zjistit detailní tvar či morfologii jednotlivých částic prášku. V poslední době se však začaly používat technologie tzv. FEM obrázků umožňující základní analýzu kulatosti prášku. Technologii vlastní především výzkumná centra či vysoké školy, které se touto problematikou zabývají.

Používanějším způsobem pro měření vlastnosti prášku je přímá metoda, kde se zkoumá tok a chování prášku při balení. Je také doporučeno soustředit se spíše na měření dynamických vlastností než na statické měření. [3], [12], [13]

2.5.1 Chemie

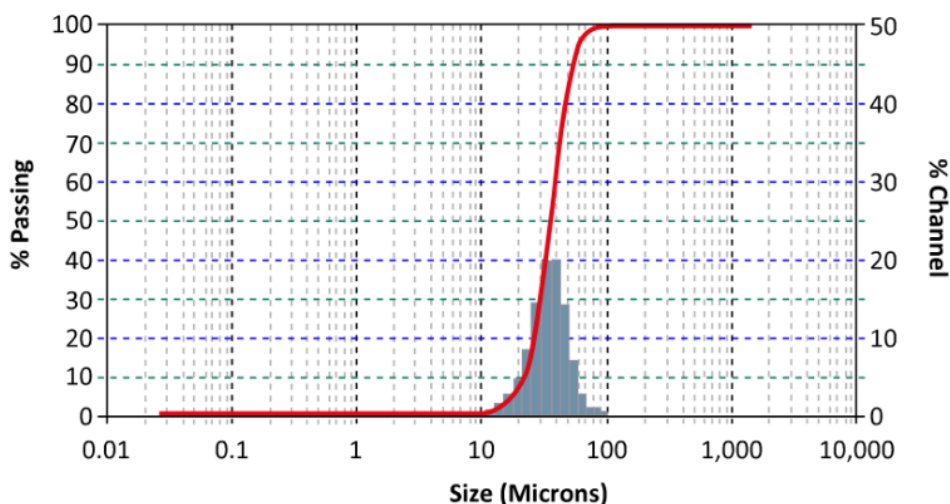
Chemie je nejdůležitějším aspektem prášku, protože definuje slitinu. Analýzou je specifikována s procentuálním rozsahem na každý prvek, který prášek obsahuje. Pro slitiny existují 3 druhy prvků, kterými jsou tvořeny. Mezi ně patří hlavní, vedlejší a stopové prvky. Jako příklad zde může být uvedena nerezová ocel 316L, která má Cr, Ni, Mo jako hlavní prvky, Si a Mn jako vedlejší prvky a C, S, P, N jako stopové prvky, zůstatek je Fe.

Hlavní prvky slitiny určují její nejdůležitější vlastnosti. Je nutno podotknout, že prvky mezi sebou interagují a pro některé slitiny musí být dodržovány jejich poměry z důvodu možné změny vlastností. Vedlejší prvky také ovlivňují fáze slitiny a mohou mít negativní vliv např. na svařitelnost či slinovací schopnost v AM. Stopové prvky mají zpravidla nastaveny pouze maximální limity v dané slitině. Mohou také mít velký účinek na náchylnost ke tvoření trhlin a ke snížení rázové houževnatosti. Některé z prvků mohou být také ovlivněny procesem AM, kde atmosféra musí být řádně kontrolována, protože zde může dojít např. k odpařování či vytváření oxidů a nitridů. Proto je většina standartních slitin rozdělena na lité a tvářené. Rozdělení slitin je uvedeno v normách ISO, ASTM a UNS. Pro prášky AM, ze kterých jsou vyráběny součásti, prakticky neexistuje žádná speciální specifikace práškové chemie. Chemie dané slitiny odkazuje na hotovou součást, kde uživatel očekává, že chemické složení dané součásti vyhovuje analýze, která určuje vlastnosti slitiny. Je tedy vždy lepší použít jako polotovary pro výrobu prášku slitinu, která poskytuje chemickou analýzu. Jak bylo zmíněno výše, během zpracování v AM se může mnoho hodnot změnit.

Výrobci součásti pomocí AM obecně uvádějí chemické hodnoty, protože není možné provést chemický test na daných součástech. Analýza chemie na jedné součásti se může na různých místech lišit v závislosti na tloušťce stěny. Proto je možné do sestavy při tisku přidat několik zkušebních kusů, které budou využity pro chemické a mechanické zkoušky. [3], [12], [13]

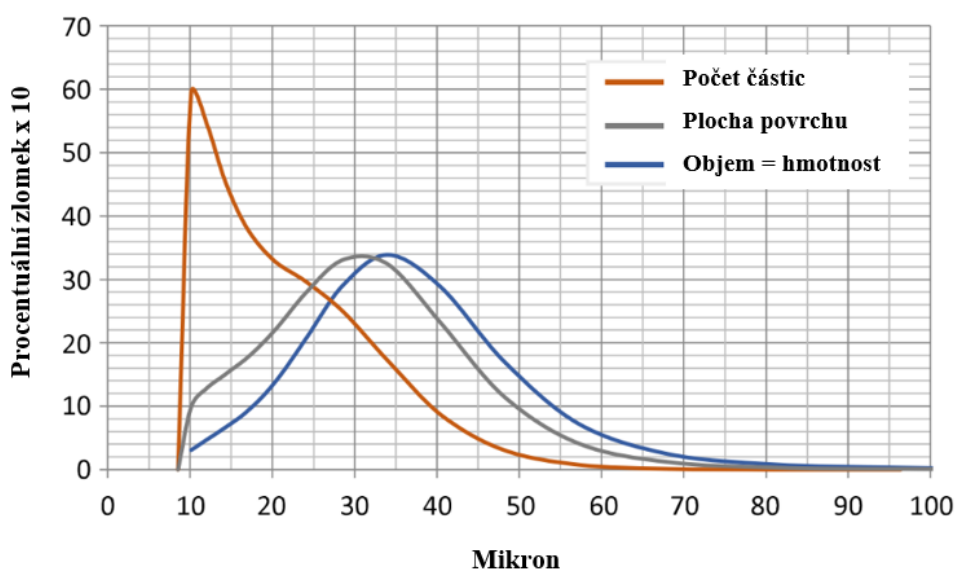
2.5.2 Rozdělení podle velikosti částic prášku

Všechny kovové prášky v AM jsou specifikovány podle velikosti částic (PSD). PSD je obvykle popisováno v percentilech D10, D50 a D90. D10 znamená, že 10 % hmotnosti prášku je jemnější než tato velikost mikronů. Velikost D90 znamená, že 10 % hmotnosti prášku je hrubší než tato velikost mikronů. D50 ukazuje střed velikosti částic. Výrobce prášku uvádí tyto základní tři hodnoty do protokolu, kde je na vyžádání možné získat kompletní PSD. Pokud ani tyto hodnoty nestačí, výrobce může zaslat zkušební vzorek prášku do nezávislé laboratoře k analýze. Na Obrázku 9 je vidět graf, který je přidán ke zprávě o PSD. [12]



Obrázek 9 - Logaritmické měřítko grafu objemových dat PSD [12]

Graf na Obrázku 9 je velmi obecný. Nemůžeme z něj vyčíst důležité informace, které jsou potřeba o daném prášku vědět. Je tedy nutné znázornit data podrobněji a ve zvoleném měřítku tak, aby vykreslené křivky a data odpovídaly co nejlépe realitě. Takový graf můžeme vidět na Obrázku 10. [12]



Obrázek 10 - PSD 15 - 45 mikronů pomocí přístroje Microtrac [12]

Na Obrázku 10 jsou vykresleny tři křivky, které byly vytvořeny analýzou PSD pro AM. Tyto křivky slouží ke znázornění posouzení velikosti prášku podle tří aspektů. Mezi nejčastěji posuzované patří objem.

Dále přístroje jako Microtrac a jiné laserové difrakční přístroje měří průměr částic a jejich počty pro dosažení potřebného rozdělení. Přístroje přepočítají z těchto informací plochu povrchu a objem, který je důležitý pro výsledný průtok prášku. [12]

2.5.3 Počet částic

Základem pro pochopení prášku jako takového je studium počtu částic. Pro představu 1 [kg] prášku typu 15 – 45 [μm] obsahuje 50 milionů částic. Z tohoto důvodu se u analýzy zkoumá pouze nepatrná část prášku a výsledné hodnoty a závěry mohou být pro konečný objem nesprávné. Velká část prášku je tvořena jemnými částicemi, které mohou mít významný vliv na proces AM. Tyto částice se rychleji taví než ostatní a může zde dojít k odpařování, čímž může dojít ke vzniku porozity. Další komplikací způsobenou jemnými částicemi prášku je změna charakteristiky průtoku. Malé množství jemných částic má tendenci zvyšovat jejich soudržnost a dochází tak ke snížení celkového průtoku.

2.5.4 Specifikace PSD

Charakterizace PSD v dávce prášku zajišťuje, že je použit optimální rozsah velikosti částic v každém procesu. Specifikace PSD je důležitá jak pro výrobce prášku, tak pro uživatele. Poskytuje přímou kontrolu dodávaného materiálu. Např. specifikace prášku velikosti 15 – 45 [μm] může být:

- D10: > 15 [μm]
- D50: 30 – 35 [μm]
- D90: < 45 [μm]

Tento popis je zcela nedostačující, protože ponechává horní a dolní hranici velikosti částic v prášku nedefinovanou. Používá se tedy více specifikovaný zápis:

- D10: 15 – 18 [μm]
- D50: 30 – 35 [μm]
- D90: 38 – 45 [μm]
- - 10 [μm]: 1 % max.
- + 53 [μm]: 1 % max.

PSD má tedy dopad na minimální tloušťku vrstvy prášku, která je nanášena na platformu, a tím i na rozlišení nejjemnějších detailů v komponentě. Proto použití nevhodné kombinace PSD a tloušťky vrstvy může vést k segregaci v důsledku opětovaného mechanického popotahování a vytlačování hrubších částic z vrstvy prášku, která je nanášena na lože. Segregace v tomto smyslu by mohla vést ke změně kvality spékání vrstev ve vertikálním směru. Dalším problémem je použití příliš jemných částic, které zvyšují riziko zdravotních a bezpečnostních problémů. Tyto obtíže platí zejména při zpracování reaktivních materiálů jako je titan, kde je pravděpodobné, že jemnější částice jsou hořlavější a výbušnější. [3], [12], [13]

2.6 Měření velikosti částic v prášku

Velikost prášku se měří fyzicky pomocí obrazovek (Ro Tap) nebo pomocí laserových difrakčních přístrojů (Microtrac, Malvern a dalších). Při měření jednotlivých částic prášku je nejdůležitějším elementem PSD, jak již bylo popsáno výše. Pro měření této hodnoty je dnes nejpoužívanější užití laserových difrakčních přístrojů. Měření pomocí obrazovek Ro Tap jsou sice přesnější, ale méně používané. [12], [19], [20]

2.6.1 Měření pomocí obrazovek Ro Tap

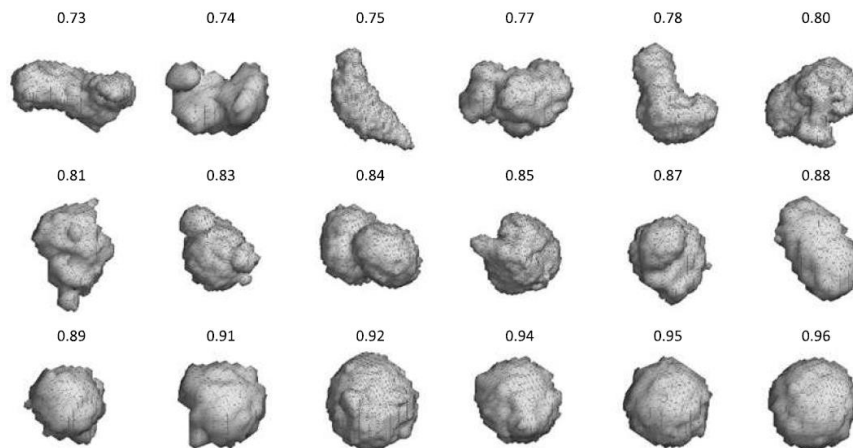
Měření pomocí obrazovek využívá opravdové fyzické měření prášku. Tyto hodnoty jsou velice přesné a mělo by se tedy využívat převážně této metody. Tato metoda je spolehlivější a přesnější pro hrubší části prášku jejichž velikost musí přesahovat 45 [μm]. V AM procesu proměřují velikosti částic, které jsou často menší než 45 [μm], proto je více využívána metoda laserového měření. [12], [19], [20]

2.6.2 Laserové měření

Laserové měření je na rozdíl od měření pomocí obrazovek funkční a neúčinnější při velikostech částic s maximální hodnotou 45 [μm] a s minimální hodnotou do několika mikronů. Z tohoto důvodu by neměly být měřeny částice větší než 45 [μm] pomocí laseru. Laserové měření obvykle vykazuje větší hodnotu skutečné velikosti, tudíž je v porovnání s měřením pomocí obrazovek méně přesné. Metoda zahrnuje detekci a analýzu úhlového rozložení rozptýleného světla vytvářeného laserovým paprskem procházejícím zředěnou disperzí částic. Plocha povrchu se vypočítá z rozložení průměru kulovitého tvaru částice. Tato metoda vyžaduje, aby částice byly dispergovány buď v kapalině nebo v suchém prostředí. [12], [19], [20]

2.7 Morfologie prášku

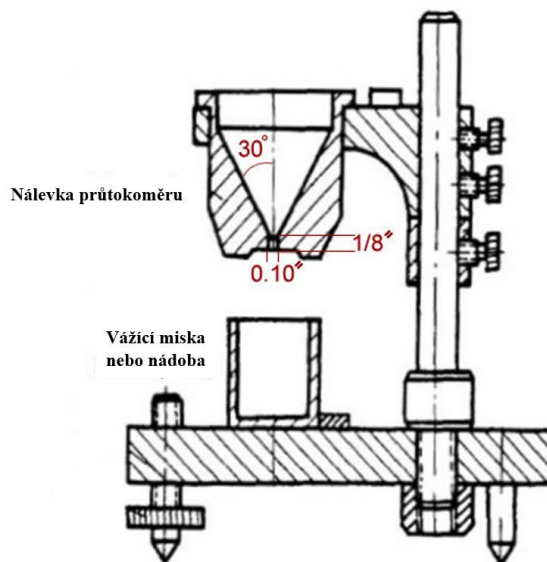
Na Obrázku 11 je znázorněn rozsah kruhovitosti jednotlivých částic prášku dosažitelných pro kovovou slitinu. Kruhovitost lze vypočítat jako ideální kruhová plocha ku skutečné povrchové ploše. Na obrázku níže je znázorněna kruhovitost od 0,73 do 0,96, kde 1 je dokonale kruhovitý tvar. V praxi je hodnota kruhovitosti 0,91 považována za velmi dobrou kruhovitost pro AM. Morfologie prášku má velký význam pro jeho balení a sypkost. Výzkum vlivu morfologie částic na AM proces ukázal, že morfologie může mít významný vliv na hustotu vrstvy na loži při AM procesu. Čím je nepravidelnější částice, tím je nižší hustota nanášená na lože. [13]



Obrázek 11 - Měření kruhovitosti pomocí CT [13]

2.7.1 Zdánlivá hustota a tekutost prášku

Zdánlivá hustota prášku (AD) se obvykle měří odebráním určitého množství prášku, který je nasypán do tzv. Hall Flowmeter, jenž je znázorněn na Obrázku 12. Do nálevky průtokoměru se nasype 25 [ml] prášku, který je následně pomocí gravitace přesypán do nádoby, v níž je zvážen. [13]



Obrázek 12 - Hall Flowmeter AS - 300 [9]

Tekutost prášku je jednou z nejdůležitějších technologických požadavků na prášky používané v AM. Homogenita hustoty konečné části závisí na tavení jednotlivých tenkých vrstev, které jsou tak již nanášeny pomocí podávacího zařízení prášku. Prášky, které vykazují špatné vlastnosti toku, budou problematičtější z hlediska získání homogenní hustoty po celé ploše vrstvy prášku. Oproti tomu prášky, které vykazují lepší tekutost, vykazují značně lepší hustotu, jež je konstantní po celé ploše vrstvy prášku.

Je velmi obtížné se zaměřovat na jeden parametr prášku, proto existují obecná pravidla, která lze používat pro zvolení správného prášku. Mezi zmíněná pravidla patří:

- Sférické částice obecně proudí s větší volností než nepravidelné či úhlové částice.
- Velikost částic má významný vliv na tok prášku (větší jsou obecně lepší pro volný tok než částice menší).
- Vlhkost v prášku může snižovat průtok kvůli kapilárním silám, které působí mezi jednotlivými částicemi prášku.
- Vlastnosti toku často vykazují závislost na hustotě balení v době měření. Prášky s vyšší hustotou balení jsou méně sypké než prášky s nižší hustotou balení.
- Přitažlivé síly krátkého dosahu, jako jsou např. van der Waalsovy a elektrostatické síly, mohou nepříznivě ovlivnit tok prášku a mohou způsobit aglomeraci částic (síly krátkého dosahu mají větší dopad na jemnější částice). [3], [12]

Hustota prášku v AM stroji s práškovým ložem je někde mezi zdánlivou hustotou a hustotou baleného prášku. Velký podíl na dané hustotě prášku ve stroji má konstrukce podavače a rozmetadla. Většina strojů využívá k rozprostření a k vyrovnání prášku dva způsoby, mezi které patří tzv. pravítko s ostrou hranou, a válec, který svým tvarem zajistí větší pěchování prášku, a tím i větší hustotu vrstvy. [3], [12], [13]

2.8 Hustota balení a skladování prášku

Hustota může být popsána zdánlivou hustotou nebo hustotou po poklepání. Mezi mnoho faktorů ovlivňujících hustotu patří kruhovitost částic prášku a PSD. Hustota balení se měří na stroji, na kterém jsou umístěny válcové nádoby, do nichž je nasypán prášek. Tyto nádoby konají rotační a lineární pohyby, pomocí nichž dochází ke zhuťování prášku a ke snížení jeho objemu na minimální hodnotu. Tato hodnota se označuje jako hustota klepnutí. Hustota klepnutí je kritická hodnota při vstřikovávání kovů, která určuje maximální obsah kovového prášku v organickém pojivu. [10], [13]

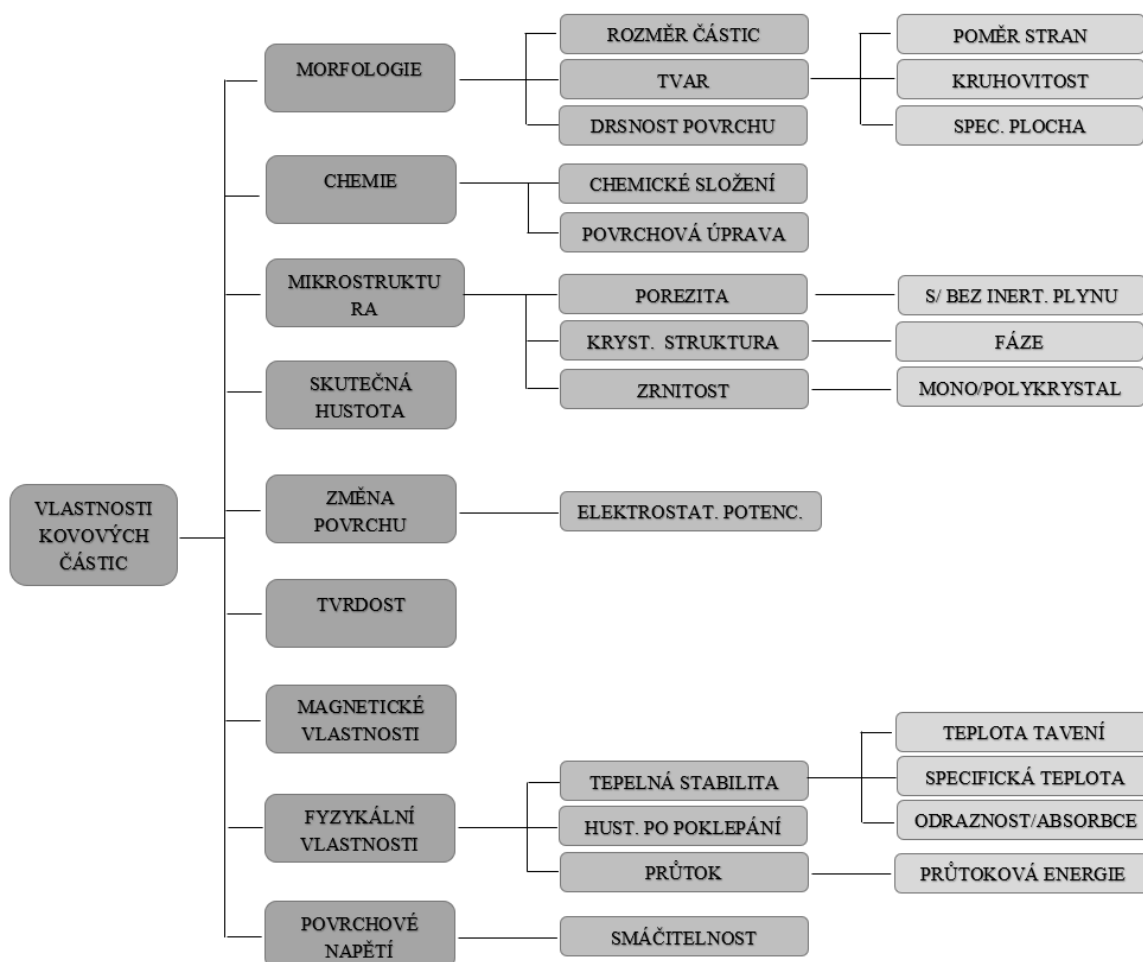
Prášky jsou přepravovány a baleny do barelů, které jsou zajištěny plombou. Přeprava a práce s barely je předepsána jednotlivými výrobci. Pro každý prášek, který je skladován, jsou předepsány skladovací podmínky. Během skladování musí být prášky v nádobách nebo v uzavíracích zásobnících v blízkosti stroje pro AM a ve správné skladovací atmosféře pro zabránění vstupu vlhkosti do prášku. S každým otevřením zásobníku vstupuje okolní vzduch a vlhkost, což má za následek ovlivnění chemických a fyzikálních vlastností prášku a vzniká tzv. stárnutí prášku. Stárnutím prášku také dochází ke snížení tekutosti prášku a zvýšení obsahu kyslíku, které není během procesu tisku žádoucí. Prášek, který je uložen v zásobnících, může také reagovat s atmosférou, která se nachází uvnitř. Některé společnosti již nabízejí zásobníky s jednotkou, která hlídá vlhkost uvnitř zásobníku a pomocí inertního plynu proplachuje prášek dle potřeby a zachovává tak správné vlastnosti prášku, které jsou velmi důležité pro samotný proces. [10], [13]

2.9 Zpracování odpadního materiálu

AM technologie se vyznačuje jako výroba dílů s minimálním nárokem na dokončovací operace. Komponenty jsou vyráběny velice přesně a jejich konečné tvary a rozměry jsou podobné konečné podobě. Tato výhoda vede jak ke snížení produkovaného výrobního odpadu, tak k vyšší energetické účinnosti. Odpady však v AM stále existují, v některých případech mohou lidské a strojové chyby vést ke zvyšujícímu se množství zbytkového materiálu. Ke zpracování odpadního materiálu vede pět základních postupů. Mezi tyto postupy patří: prevence, příprava k opětovnému použití, recyklace, další využití a likvidace. V případě AM je tvorba odpadu snížena například nastavením stroje či geometrickou úpravou pracovního prostoru. Jakmile se prášek použije a vznikne odpad, je první volbou pro snížení dopadu procesu na životní prostředí opětovné použití prášku. Po procesu je prášek proséván v sítích o určité velikosti. Tento proces je nazván jako prosévací fáze. Pokud je prášek silně znečištěn, nemůže být kvůli jeho degradaci znovu použit a musí být recyklován. Tento prášek je následně přetaven a po odpovídající úpravě složení se musí znovu rozmělnit, tím je získán nový prášek s požadovanými vlastnostmi. Tato možnost se v AM považuje za tzv. likvidaci materiálu. [16]

2.9.1 Opětovné použití prášku

Ekologický dopad AM procesů je velmi závislý na recyklaci a schopnosti opětovného použití materiálu. Proto byly zkoumány praktické metody recyklace nepoužitého prášku. Studie uvádějí, že pomocí AM lze zabránit více než 40 % odpadního materiálu a 95 % nepoužitého materiálu lze znovu použít. U procesů jako jsou např. SLM nebo EBM lze prášky recyklovat pouze na omezený stupeň, protože během procesu dochází k ovlivňování jeho vlastností. Lze říci, že kvalita recyklovaného prášku závisí na recyklační schopnosti daného prášku a počtu opakovaných použití. Známou informací u opětovného použití prášků je, že počet opakovaných použití vede k nárůstu obsahu kyslíku, a také částice nebyly tak sférické a docházelo ke shlukování částic. Výzkumy na opětovné použití prášků a výsledné vlastnosti komponent se velice liší. U některých materiálů jsou uváděny změny jak v samotném procesu, tak i ve výsledných mechanických zkouškách u zkušebních těles. Některé studie naopak uvádějí informace, že změny mezi novým a znovu použitým práškem jsou minimální či žádné. Klíčové vlastnosti kovových částic, které ovlivňují AM proces, jsou znázorněny na Obrázku 13. [16]



Obrázek 13 - Klasifikace klíčových vlastností kovových částic, které mohou ovlivnit kvalitu tvorby AM dílů [16]

2.9.2 Recyklace prášku

Použitý prášek může být ovlivněn během AM procesu působením teploty. Tento vliv způsobuje jak teplota v komoře, tak energie vytvářená laserem při slinovacím procesu. U takto použitého prášku se jednotlivé částice zvětšují a dochází jak k fyzikálním, tak k chemickým změnám. Dále mohou být změny v prášku způsobeny kontaminací prášku prostřednictvím nečistot, cizích těles nebo intersticiálních prvků v důsledku manipulace během předběžného zpracování či po následném zpracování. [14], [15]

Recyklace u jednotlivých druhů prášku, na které jsou vytvářeny studie, jsou zaměřovány na měření a zjišťování vlastností daného prášku a vyrobeného vzorku. Mezi základní vlastnosti prášku, jež byly zmíněny již výše, patří: zdánlivá hustota a tekutost prášku, hustota vrstvy prášku, mikrostruktura prášku, chemické složení, velikost a distribuce velikosti částic. Mezi vlastnosti vyrobených vzorků z recyklovaného prášku patří: povrchová drsnost, objemová hustota, tahová zkouška, modul pružnosti v tahu, tvrdost a chemické složení. [14], [15]

Pro představu je uveden souhrn změn vlastností dvou druhů prášků i vyrobených vzorků, na které byly vytvářeny studie. Mezi testované materiály patří S17 – 4 PH a Ti – 6Al – 4V. Závěry měření a testování recyklovaných prášků na dané vlastnosti se příliš neliší.

2.9.3 Změny vlastností recyklovaného prášku z materiálu S17- 4 PH [14]

Výsledné vlastnosti prášku:

- morfologie prášku se nezměnila,
- velikost jednotlivých částic nepřesáhla velikost 50 [μm],
- mikrostruktura recyklovaného prášku byla jemnější než u nového prášku,
- chemické složení bylo beze změny kromě navýšení procenta uhlíku,
- průtok prášku se zvyšoval s počtem recyklování prášku,
- zdánlivá hustota recyklovaného prášku vzrostla,
- hustota práškové vrstvy se zvýšila s počtem recyklačních cyklů prášku.

Výsledné vlastnosti vyráběného vzorku:

- drsnost vzorku se nezměnila,
- objemová hustota vzorků byla v toleranci s hodnotami udávanými výrobcem stroje,
- tvrdost recyklovaného vzorku byla výrazně vyšší,
- žádné výrazné změny v mechanických vlastnostech vyrobených vzorků.

2.9.4 Změny vlastností recyklovaného prášku z materiálu Ti – 6AL – 4V [15]

Výsledné vlastnosti prášku:

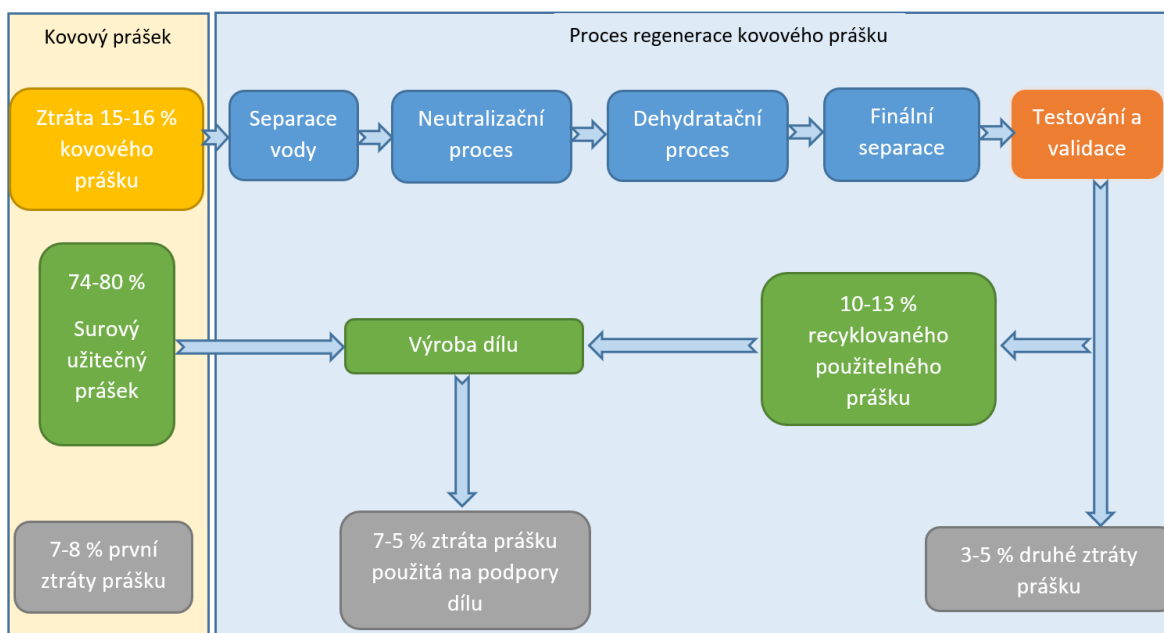
- zmenšení PSD elementu a soudržnosti prášku,
- zlepšení tekutosti prášku,
- zanedbatelné změny v mikrostruktuře prášku,
- žádné větší změny ve tvaru a velikosti zrn v prášku.

Výsledné vlastnosti vyráběného vzorku:

- žádné výrazné změny v mechanických vlastnostech vyrobených vzorků,
- výrazně delší únavová životnost,
- delší životnost v porovnání se vzorky vyrobenými z nového prášku.

2.9.5 Proces recyklace

Proces recyklace prášku je znázorněn na Obrázku 14. V první recyklační fázi se kovový prášek oddělí od vody pomocí odstředivého systému v kontrolovaných a řízených klimatických podmínkách. Druhá fáze spočívá v neutralizačním procesu, kde se odstraňují konglomerované nebo jiné specifické nečistoty. Třetí a čtvrtá fáze představuje specifický dehydratační proces v kontrolovaném prostředí, po kterém následuje ošetření proti ucpání a konečná separace pomocí kalibrovaných síťových zařízení. Výsledkem recyklačního procesu prášku je vznik 3 – 5 % neobnovitelného prášku. Dále 10 – 13 % získaného prášku může být znovu použito do běžného procesu 3D tisku pro nové díly či opravy. [5]



Obrázek 14 - Výsledky regeneračního procesu pro práškovou slitinu CoCr provedené národním institutem pro výzkum a vývoj v Bukurešti [5]

2.10 Dopad AM na zdraví a životní prostředí

Použití malých částic prášku představuje vážné nebezpečí pro lidské zdraví a prostředí. Z tohoto důvodu musí být prášky označeny informačním štítkem o možném riziku ohrožující lidské zdraví, které je klasifikováno do určitých tříd. Klasické velikosti částic se pohybují v rozmezí 45 – 150 [μm]. Jak bylo napsáno výše, může prášek obsahovat částice výrazně menší. Tyto částice mohou způsobovat mnoho zdravotních a enviromentálních problémů. Riziko způsobené práškem závisí hlavně na jeho složení, které určují tzv. expoziční limity. Klasifikace jednotlivých materiálů je znázorněna na Obrázku 15. [16]

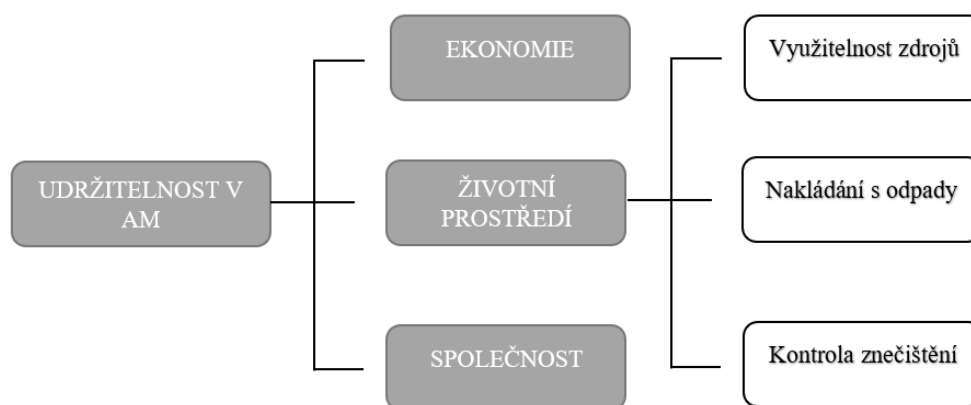
Material	Manufacturer	Main Composition (wt.%)	Classification
Inconel 718	Oerlikon Metco [66]	Ni: 53, Cr: 20, Fe: 17.4, Nb: 5.1, Mo: 3.1, Ti: 0.9, Al: 0.5	H317 H351 H372 H412
Titanium Ti6Al4V	LPW Technology [67]	Ti: 89.09, Al: 6.4, V: 3.9, Fe: 0.22, O: 0.07, C: 0.01	H315 H319 H334
AISI H13	FST [68]	Fe: 90.41, Cr: 5.12, Mo: 1.33, V: 1.13, Si: 0.8, C: 0.41, Mn: 0.5	H317 H351 H372 H412
AISI 316L	Eramet [69]	Fe: 67.5, Cr: 18.2, Ni: 11.8, Mo: 2.3, Si: 0.34, C: 0.03, Mn: 0.08	H317 H351 H372 H412
Stellite 6	Oerlikon Metco [66]	Co: 60.4, Cr: 28.5, W: 4.5, Si: 1.5, Fe: 1.5, C: 1, Mo: 1	H319 H334 H317 H361 H400 H410

Obrázek 15 - Složení materiálů a klasifikace pro AM proces [16]

Na Obrázku 15 je znázorněna klasifikace nebezpečnosti a mezní hodnoty podle španělského zákona o mezní hodnotě pro životní prostředí. Neposkytnuté informace od dodavatele prášku ohledně klasifikace materiálu lze najít v databázi Evropské chemické agentury.

Riziko práce s kovovým práškem je u pracovníků, kteří s ním přijdou do kontaktu. Proběhlo několik výzkumů. V jednom z nich byla použita tzv. gravimetrická analýza prostředí při práci s práškem. Závěry této analýzy jsou, že expozice prachu na pracovišti nepředstavuje inhalační problémy, ale také bylo zjištěno, že emise menších částic představují riziko pro lidské zdraví. Prášky obsahují těžké kovy, proto se studie zaměřují právě na tyto materiály. Ty nejmenší částice prášku mohou být rizikem v tzv. nanometrovém měřítku. Takové částice mohou být snadno absorbované do vlasových folikulů a do plic, přes které se dostávají dále do lidského těla. [16]

Transformace surovin na spotřební výrobky je zdrojem znečištění životního prostředí a v důsledku tohoto procesu vzniká odpad. Tento problém byl značně navýšen velice rychlým technologickým rozvojem v oblasti AM, ke kterému došlo v posledních desetiletích. Se vzrůstajícím rozvojem této technologie se také začalo dostávat do podvědomí zlepšování životního prostředí a větší využitelnost zdrojů pro AM. Přestože je AM považována za šetrnější k životnímu prostředí oproti tradiční výrobě, neexistuje v této době dostatek studií, které by to dokázaly. Některé články poukazují na problém s prosazováním této technologie jako velice pozitivní z hlediska výroby, ale bez přínosů k životnímu prostředí. Častokrát je přihlíženo spíše k ekonomickým aspektům a schopnosti dosažení výroby velmi složité 3D geometrie. Proto je zde riziko, že rozšířené využívání AM, jak v průmyslu, tak i na akademických výzkumných centrech, nemusí být připraveno čelit potenciálním enviromentálním a zdravotním problémům. Lze tedy říci, že k udržitelnosti AM ve strojírenství by měly být zváženy tři dimenze tohoto procesu, mezi které patří: ekonomika, životní prostředí a společnost. Spojení těchto tří aspektů s AM je znázorněno na Obrázku 16. [16]



Obrázek 16 - Udržitelnost v AM [16]

Ukázalo se, že procesy AM snižují dopad na životní prostředí v porovnání s tradičními procesy, zejména kvůli účinnějšímu využívání surovin. Aby však byl AM považován za plně šetrnou metodu k životnímu prostředí, je rovněž nutné účinně využívat energii, provádět odpovídající nakládání s průmyslovým odpadem, minimalizovat emise a toxické materiály a předcházet rizikům v oblasti zdraví a dbát na bezpečnost při práci. Bylo zjištěno, že ačkoli je AM považována za technologii šetrnou k životnímu prostředí, je nutné provést další studie zaměřené na: spotřebu zdrojů, využití zdrojů, znečištění, dopad na lidské zdraví, opakované použití prášku, správné návrhy součástí a mnoho dalších. [16]

2.10.1 Nakládání s odpady

Zbytky vzniklé během AM procesu, které již nelze dále využít, musí být zlikvidovány. Tato likvidace je ošetřena v souladu s rozhodnutím komise EU a se zákony o odpadu v příslušném státě. V případě odpadního materiálu z AM procesu zde nehrozí, vzhledem k velikosti použitých částic, nebezpečí při transportu, a proto jsou klasifikovány podle jejich povahy s nezávislostí na jejich formátu (velikost, tvar atd.). Odpady AM jsou tedy zpracovávány jako anorganické pevné látky. Společnost, která produkuje tento odpad, musí předložit a podrobně popsat svou aktivitu a chemické složení vzniklých odpadů, aby mohlo být uděleno povolení ke zpracování daného odpadu. [16]

2.11 Shrnutí důležitých vlastností prášku ovlivňujících výsledné vlastnosti tisku

Velikost částic prášku

- Tato vlastnost ovlivňuje vhodnost daných prášků pro jednotlivé technologie AM procesu, hustotu balení, tekutost prášku, vlastnosti výsledného produktu, pórovitost součásti.

Ochranné atmosféry

- Ochranné atmosféry mohou u výrobku ovlivnit změnu fyzikálních vlastností, snížit pevnost v tahu, zvýšit křehkost, snížit odolnost vůči korozi.
- Dále mohou ovlivnit odchylku od sférického tvaru částic, snížit hustotu prášku, snížit tok prášku při AM procesu.

Chemie prášku

- Chemie prášku má velký vliv při definici samotné slitiny a určení výsledných fyzikálních a mechanických vlastností. Ovlivňuje houževnatost, náchylnost ke tvoření trhlin, může výrazně snížit rázovou houževnatost či slinovací schopnost prášku při AM procesu.

Počet částic prášku

- Počet částic prášku je ovlivněn velikostí jednotlivých částic. Větší počet výrazně menších částic způsobuje rychlejší tavení těchto částic a může dojít k jejich odpařování a způsobení porozity ve vytištěném díle. Menší částice dále způsobují změnu charakteristiky průtoku prášku, a tím dochází k nerovnoměrně nanášené vrstvě na platformu během tisku. Dále ovlivňují změnu kvality jednotlivých spékaných vrstev a v neposlední řadě zvyšují riziko zdravotních a bezpečnostních problémů.

Tekutost prášku

- Tekutost prášku ovlivňuje výslednou hustotu jednotlivých nanášených vrstev na platformu a udává všeobecné informace a vlastnosti, mezi něž patří:
 - Sférické částice obecně proudí volněji než nepravidelné či úhlové částice.
 - Velikost částic má významný vliv na tok prášku (větší jsou obecně lepší pro volný tok než částice menší).
 - Vlhkost v prášku může snižovat průtok kvůli kapilárním silám, které působí mezi jednotlivými částicemi prášku.
 - Vlastnosti toku často vykazují závislost na hustotě balení v době měření. Prášky s vyšší hustotou balení jsou méně sypké než prášky s nižší hustotou balení.

Skladování prášku

- Vlivem působení okolní atmosféry dochází ke změnám chemických a fyzikálních vlastností prášku, což způsobuje jeho stárnutí. Vlivem stárnutí prášku se snižuje jeho průtok. To má za následek snížení hustoty vrstvy prášku, která je nanášena na platformu.

Morfologie prášku

- Morfologie prášku se zabývá zejména tvarem jednotlivých částic, kde platí obecné pravidlo, že méně sférické tvary jednotlivých částic způsobují horší vlastnosti pro balení prášku a jeho výslednou sypkost. To má významný vliv na hustotu vrstvy prášku, která je nanášena na platformu.

Recyklace prášku

- Recyklovaný prášek může být ovlivněn působením vysokých teplot při AM procesu a dochází ke změně jeho fyzikálních a chemických vlastností. Dále je prášek vystaven kontaminaci vlivem nečistot od cizích těles nebo intersticiálních prvků v důsledku manipulace. To může mít za následek změnu výsledných vlastností tištěných dílů.

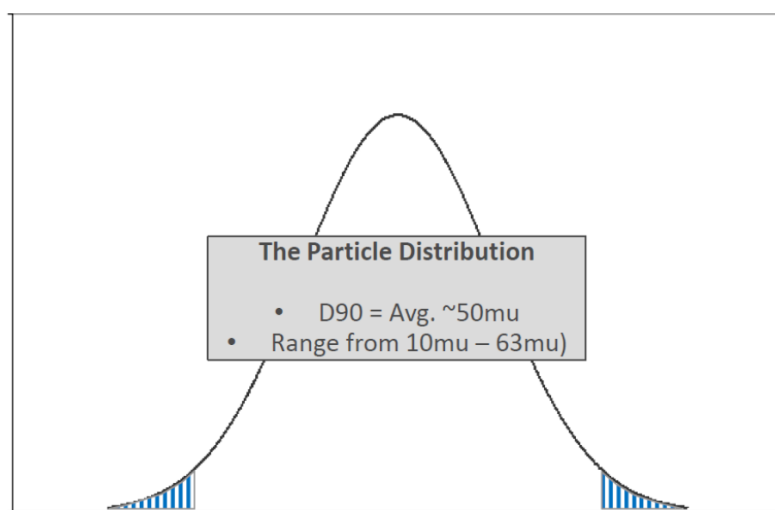
3 ANALÝZA VSTUPNÍHO MATERIÁLU

Předmětem této diplomové práce je určit mechanické vlastnosti prášku na vytištěných dílech z oceli, která nese obchodní označení MS1. Tato ocel je martenziticky vytvrditelná a konvenčně je označena jako W. Nr. 1.2709 (DIN X3NiCoMoTi18-9-5). Přesný popis konvenčně vyráběného materiálu je v Příloze č. 5. Podrobná data, která se týkají především vlastností kovového prášku MS1 spolu s informacemi pro nastavení stroje jsou v Příloze č.1 Pro výzkum budou porovnávány dva typy prášku. Tělesa se budou vyrábět z nového prášku od firmy EOS a následně budou porovnávána s několikanásobně přesévaným práškem téhož označení. Před vytištěním zkušebních těles je nutné prášek prozkoumat a zjistit parametry prášku pro zaručení správné kvality finálních těles. Výsledky analýzy jednotlivých prášků by měly obsahovat: velikost jednotlivých částic prášku, jeho chemické složení a EBSP analýzu. Tyto hodnoty obou prášků budou v závěru práce porovnány. [1]

3.1 Prášek MS1

Nový prášek oceli MS1 je dodáván firmou EOS, je speciálně upraven pro stroje a systémy EOS. Tento prášek je standardně dodáván v zaplombovaných barelech o hmotnosti 10 [kg]. Složení pro Evropskou klasifikaci odpovídá 1.2709. Tento druh oceli se vyznačuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi a je snadno tepelně zpracovatelný pomocí kalení za účelem získání vynikající tvrdosti a pevnosti. Tento materiál je hojně využíván pro vysoce výkonné průmyslové a inženýrské součásti v leteckém a automobilovém závodě. Po dokončení procesu lze snadno vytvrdit na 50 HRC při teplotě 490 [°C]. [17]

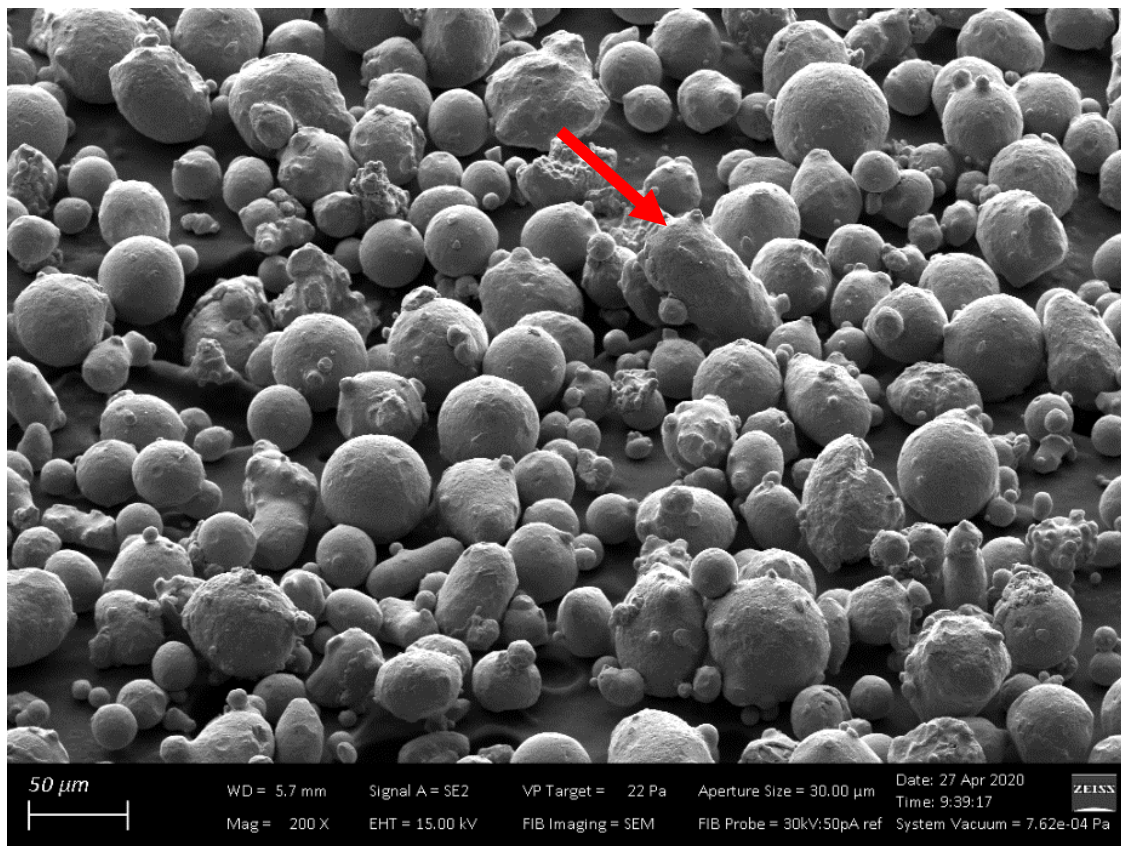
Dle popisu v Disertační práci [1] je tento prášek považován a označován výrobcem jako zdraví škodlivý z důvodu přítomnosti těžkých kovů. Proto je nutné zachovat bezpečnost práce při používání tohoto materiálu a využívat tak potřebné pracovní pomůcky při jakékoliv manipulaci s volným kovovým práškem. „Velikost a tvar jednotlivých částic prášku je dán jeho výrobou. Výrobce při školení udává, že distribuční rozdělení velikosti prášku je dle Gausse, přičemž 90 [%] prášku by mělo mít velikost cca 50 [μm], viz Obrázek 17, a zbývajících 10 [%] by mělo obsahovat prášek o velikosti 10–50 [μm] a 50–63 [μm]. Částice menší než 10 [μm] s sebou nesou vyšší zdravotní riziko, a to především z důvodu jejich snadného vdechnutí, které usnadňuje jejich nízká hmotnost.“ [1]



Obrázek 17 - Rozložení velikosti prášku z podkladů výrobce EOS [1]

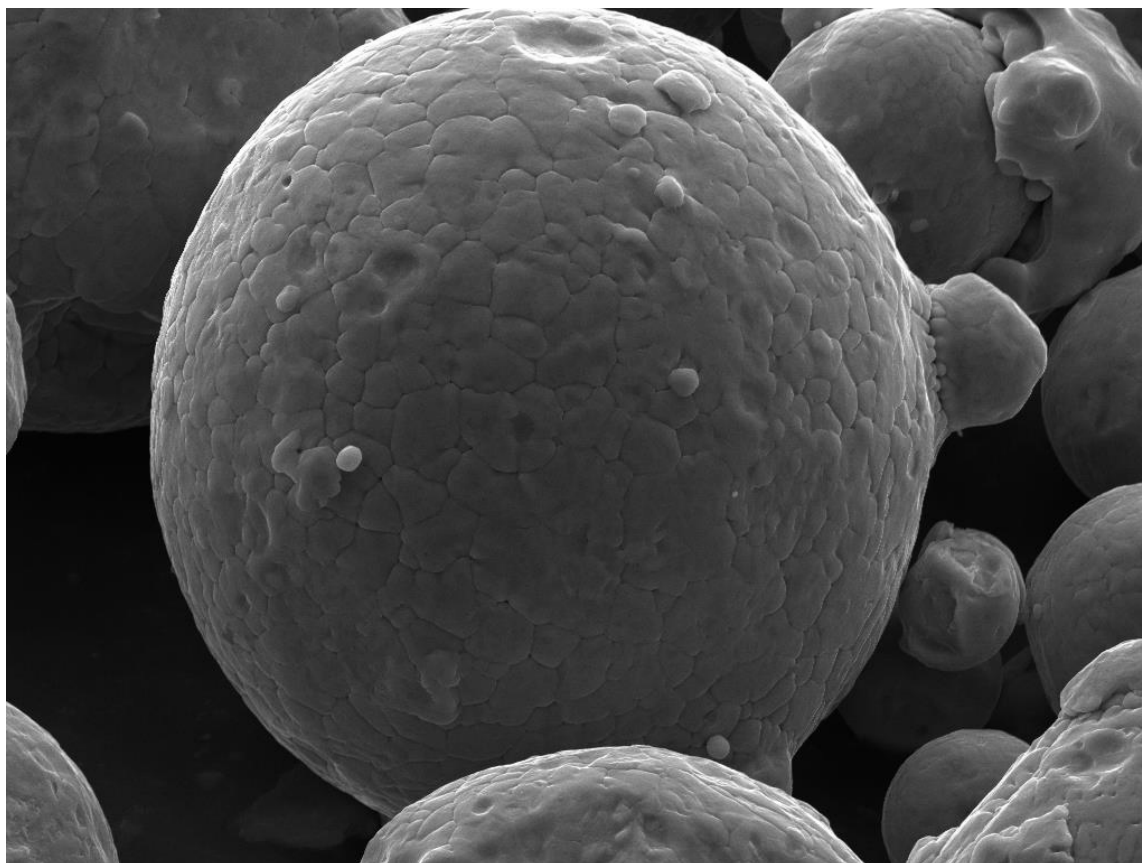
3.1.1 Hodnocení tvaru a struktury nového prášku MS1

Jako první se bude hodnotit tvar a velikost částic v novém prášku MS1. Na Obrázku 18 je detail těchto částic. Dle scanu je vidět, že většina částic má kulovitý tvar. Některé částice tvoří shluky, v kterých je nalepeno dohromady více částic o různé velikosti. Tyto shluky se nazývají satelity. Příčinou takto nalepených částic mohla být samotná výroba prášku. Jednotlivá zrna se od sebe nestihla oddělit vlivem brzkého zchlazení. Vliv rychlého ztuhnutí může naopak způsobovat změnu tvaru na oválnou částici (na Obrázku 18 vyznačeno šipkou). Nepravidelný tvar částic, které jsou pouze málo zdeformované, mohl být ovlivněn dalším zpracováváním prášku. Při manipulaci s práškem může vlivem tření mezi částicemi dojít k odlupování vrstev jednotlivých zrn, a tím dojde k deformaci či odpadnutí části od zrna.



Obrázek 18 - Scan nového prášku MS1 s detailním pohledem na částice

Detailnější pohled na částici kovového prášku je na Obrázku 19. Jak vidíme, na zrně je specifický povrch, který je v Disertační práci [1] označován jako „sloní kůže“, tzv. šupinovitá struktura. Tento povrch je na většině částic prášku. Důvodem vzniku této struktury je, že dendrity prorůstají na povrch a vytvářejí tak šupinovitý povrch. Tento růst je nepravidelný díky použití dané metody pro výrobu kovového prášku. Metoda Gas atomization používá pro výrobu prášku rozstříkávání plynem, který způsobuje nepravidelný růst dendritů a následný vznik tohoto povrchu.

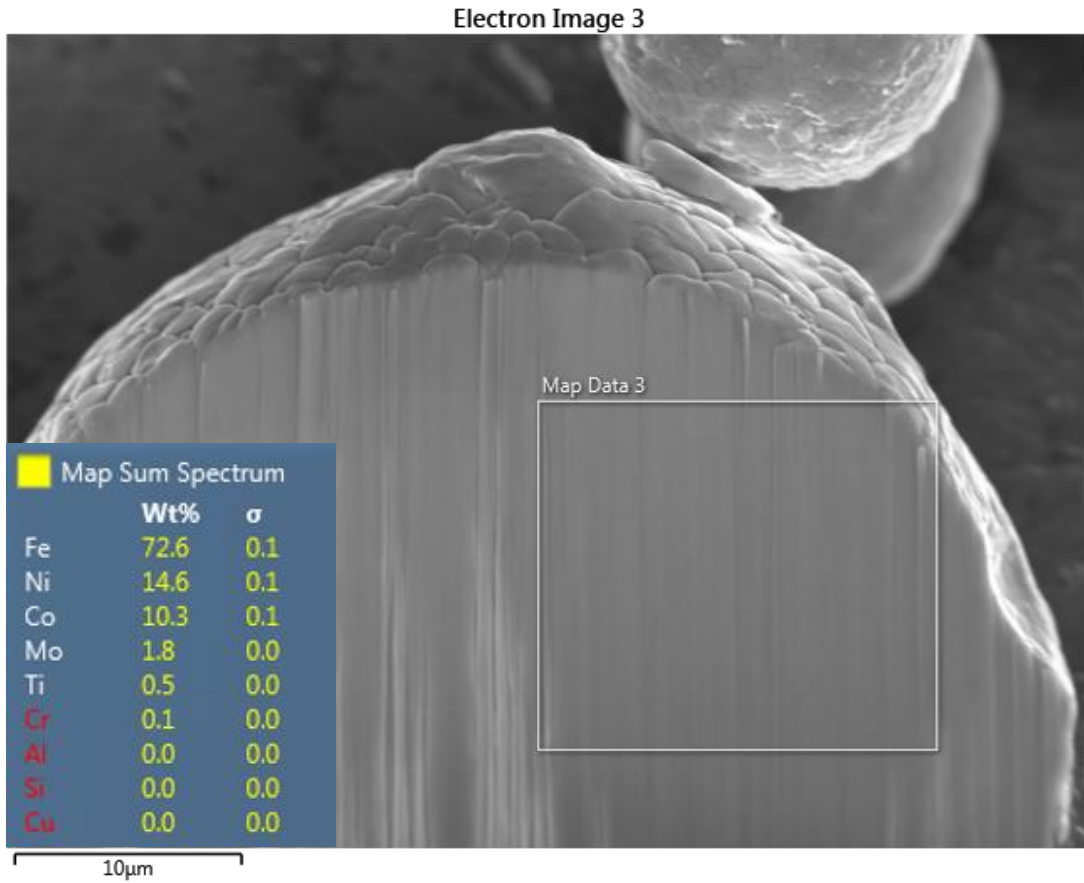


Obrázek 19 - Detailní pohled na zrnو nového kovového prášku MS1

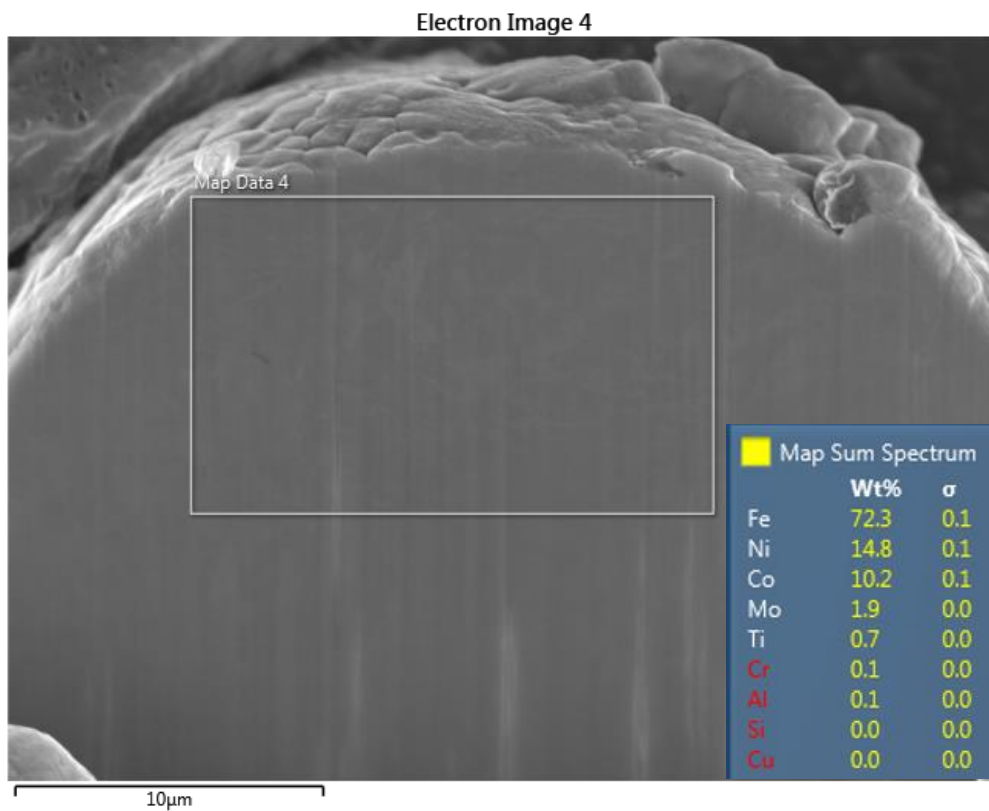
U těchto částic byly provedeny dva výbrusy, u kterých se zjistilo dané chemické složení uvnitř zrn. U obou částic vyšlo chemické složení velmi stabilní a jeho hodnoty jsou stejné. Tento výbrus je znázorněn na Obrázku 20 a na Obrázku 21 s procentuálním rozložením jednotlivých prvků, které zrnو v dané oblasti obsahuje. Je vidět, že hodnoty jednotlivých prvků si jsou velice podobné. Odchytky jsou zde pouze v řádech desetin procent.

Dále proběhlo vyšetřování chemického složení na povrchu dvou částic ve vybrané oblasti. Na Obrázku 22 a Obrázku 23 jsou tyto částice s procentuálními hodnotami jednotlivých prvků. Hodnoty chemického složení na povrchu obou částic jsou totožné s drobnými odchylkami v řádech desetin procent stejně, jako je tomu u hodnot, které byly zjištěny uvnitř částice.

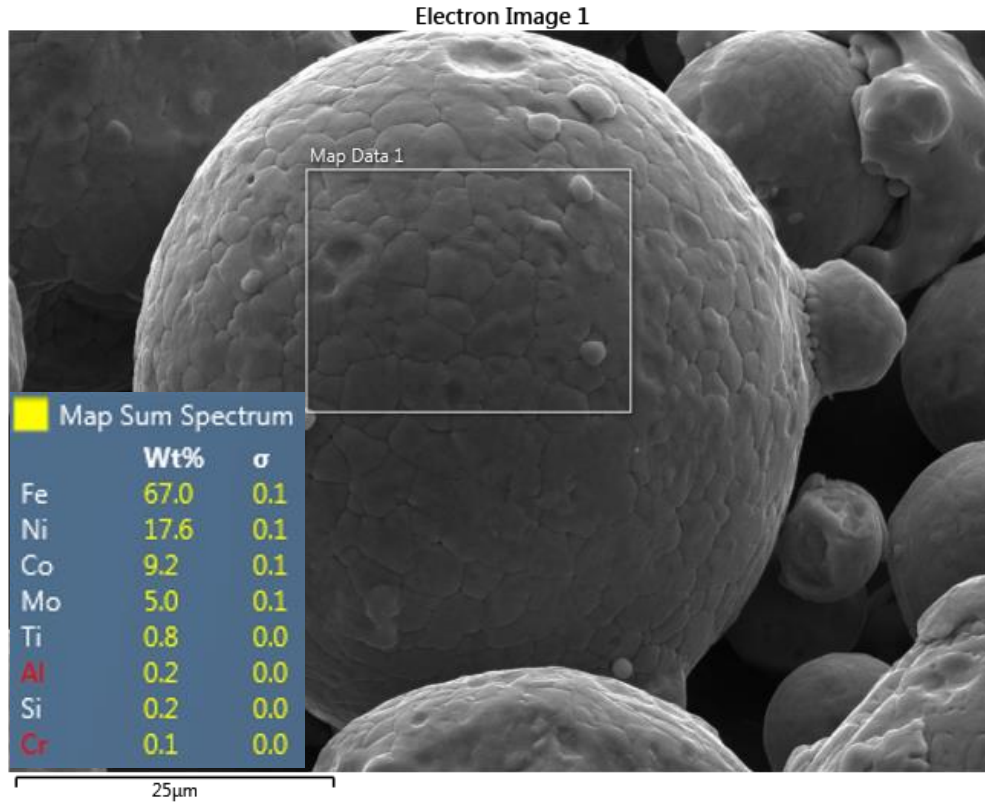
Avšak chemické složení uvnitř a na povrchu zrna je rozdílné. Hlavní odchylky jsou ve množství železa a molybdenu. Ostatní prvky jsou srovnatelné a vykazují podobné hodnoty. Dle materiálového listu od výrobce prášku v Příloze 1. jsou kromě železa všechny doplňující prvky v řádech procent nad stanovenou hodnotu.



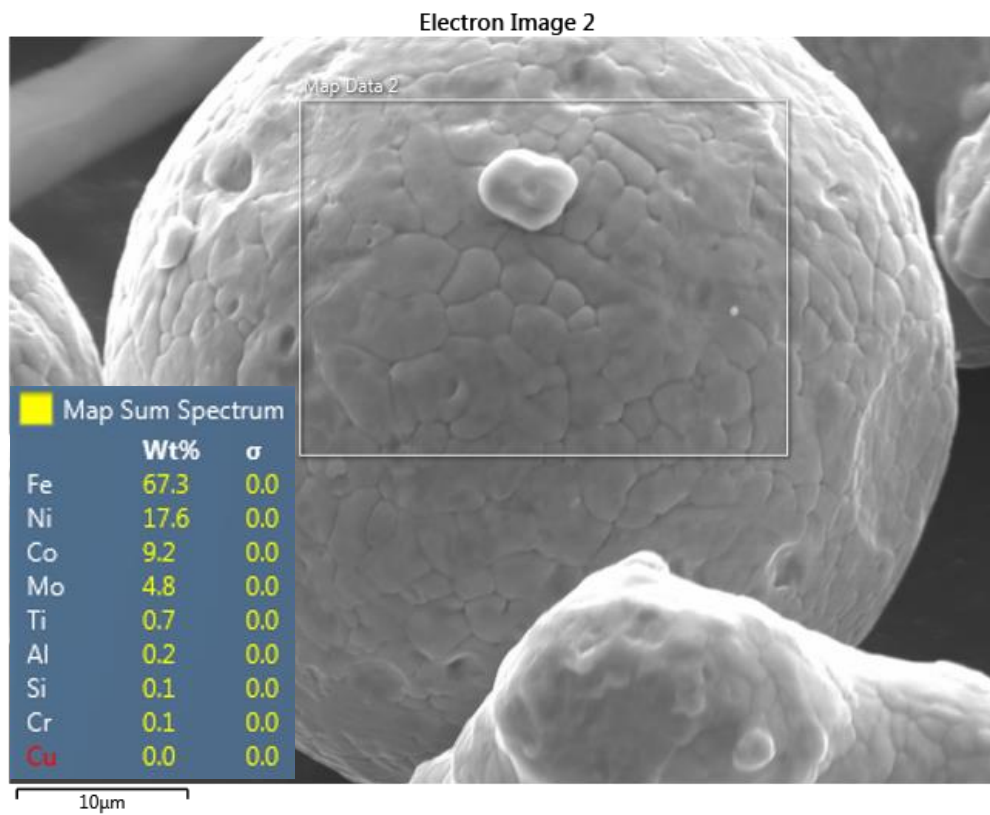
Obrázek 20 - Materiálový výbrus první částice z nového prášku MS1



Obrázek 21 - Materiálový výbrus druhé částice z nového prášku MS1



Obrázek 22 - Chemické složení na první částici z nového prášku MS1



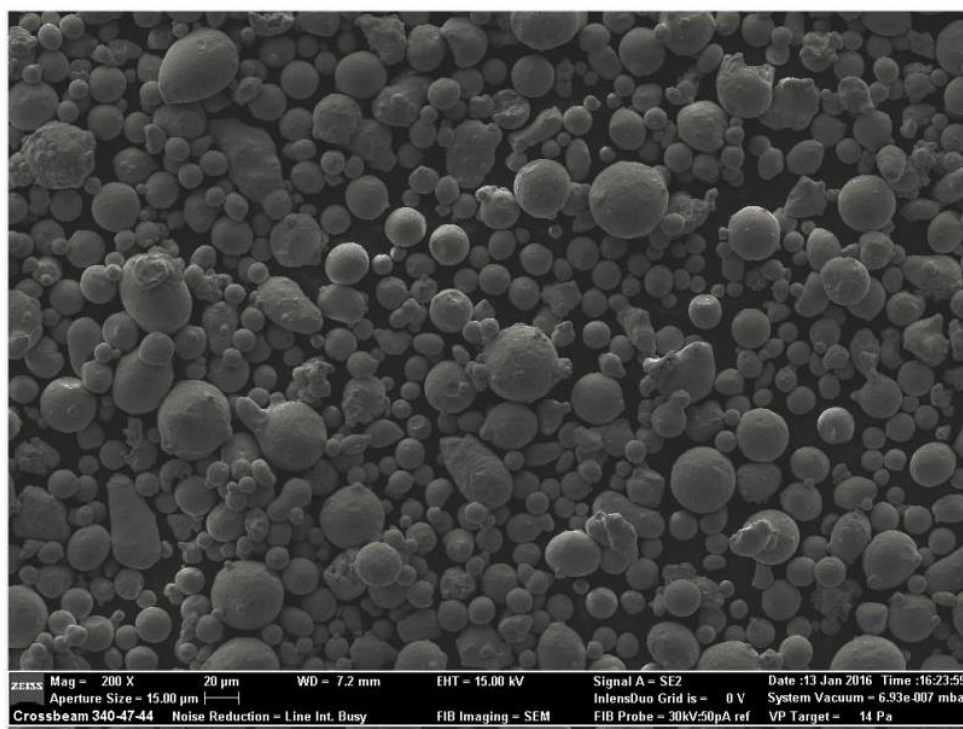
Obrázek 23 - Chemické složení na druhé částici z nového prášku MS1

Dalším zkoumaným aspektem je velikost jednotlivých částic v novém prášku. Dle dodavatele by mělo být v prášku 90 % částic o velikosti 50 [μm]. Ze vzorků, které byly odebrány pro měření velikosti částic prášku, lze říci, že průměrná hodnota velikosti částic je menší než 30 [μm]. Prášek také obsahuje částice, které jsou menší než 10 [μm]. Je nutné zmínit, že dodavatel používá k měření částic metodu laserové difrakce, a pro měření prášku v této práci bylo využito scanu prášku. Tyto metody se od sebe výrazně liší a výsledky naměřených velikostí částic mohou být zkresleny. Velikosti částic u zkoumaného prášku tedy neodpovídají hodnotám, které výrobce udává.

3.1.2 Hodnocení tvaru a struktury přisetého prášku MS1

U přisetého prášku je vidět, že zrna mají také kulovitý tvar s občasným shlukováním částic. Především jsou menší částice přitahovány k mnohem větším částicím. Jak je uvedeno v Disertační práci [1], nepravidelný shluk částic a velikost jednotlivých zrn, která jsou prokazatelně větší než u nového prášku, je způsobeno kontaminací prášku během spékání. Během procesu také naopak dochází k vytváření zrn mnohonásobně menších, která mohou způsobovat problémy při tisku. Scan přisetého prášku je na Obrázku 24.

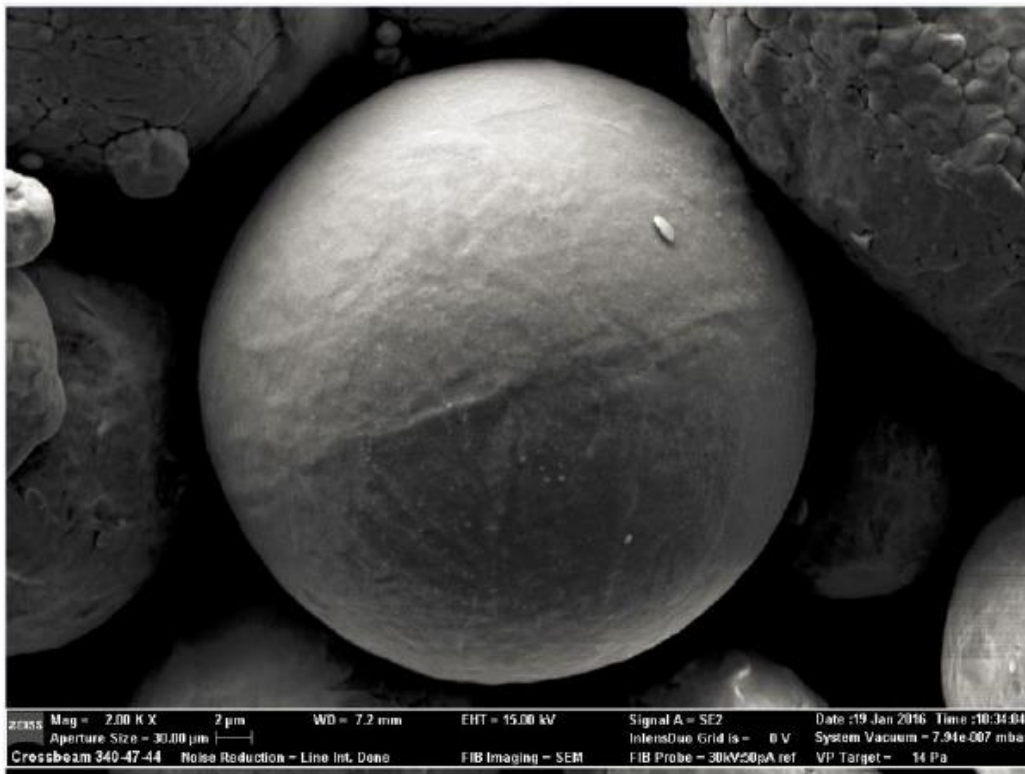
V přisetém prášku dosahovaly nejmenší částice velikosti 30 [μm] a méně. Naopak největší naměřené částice přesahovaly 80 [μm].



Obrázek 24 - Scan přisetého prášku MS1 [1]

Struktura prášku byla vyhodnocena z hlediska povrchu částic jako šupinová. Po provedení metalografického výbrusu zrn bylo zjištěno, že zrna mají zachovanou dendritickou mikrostrukturu, která je tvořena měkkým tuhým roztokem. Dále se u přisetého prášku na některých částicích objevila odlišná povrchová struktura. Tyto částice jsou dokonale vyhlazené a není zde žádný náznak šupin, jak je tomu u ostatních částic. Tato částice je zobrazena na Obrázku 25 uprostřed.

Vysvětlením změny povrchu částice během procesu tisku je, že dendrit nedoroste směrem k povrchu částice, kterým je tvořena. Ostatní částice okolo mají šupinový povrch, a v prášku je těchto částic většina. Hladkých částic v prášku je minimálně, chemické složení těchto částic je shodné s chemickým složením částic u nového prášku, až na povrch částice, kde je zvýšené procento prvků Co a Ti. [1]



Obrázek 25 - Zrno přeseťého prášku bez dendritické struktury (sloní kůže)

3.1.3 Zhodnocení vstupních materiálů pro tisk vzorků z nového a přesévaného prášku

V této kapitole proběhlo prozkoumání vstupního materiálu v podobě nového a přesévaného kovového prášku MS1. Byl zde zjišťován aspekt tvaru a velikosti jednotlivých částic, které dané prášky tvoří. Z hlediska tvaru částic se potvrdila shoda mezi novým a přesévaným práškem, kde jednotlivé částice lze rozdělit do tří skupin. První skupina je dle hodnocení v Kapitole 2.6 nejlepší možnou variantou, kde částice jsou takřka dokonale kulovité. Druhou skupinou jsou částice lehce deformované či odlomené připomínající kruhovitý tvar. Poslední skupinou jsou částice, které se shlukují, a spojené částice, kterým se nepodařilo oddělit při výrobě prášku. Tyto patvary ve větších rozměrech absolutně nevyhovují pro tisk a mohou ovlivňovat výsledné mechanické vlastnosti vytištěných dílů.

U velikosti jednotlivých částic byl potvrzen fakt, že přesévaný prášek obsahuje řádově větší částice než prášek nový. V průměru jsou si však velikosti částic velice podobné a pohybují se v hodnotách 30 [µm]. Tyto hodnoty odporují tvrzení výrobce, že průměrná velikost je tvořena 90 % částic o velikosti 50 [µm] v prášku. V obou prášcích byly také naměřeny částice o velikosti menší než 10 [µm]. To však dle Disertační práce [1] způsobuje zdravotní potíže při práci s práškem, a v prášku by se tedy neměly vyskytovat.

Je nutné zohlednit způsob měření velikosti částic, kdy výrobce používá měření dle ISO normy, při které může docházet k přehlédnutí menších částic, oproti metodě, která byla využita pro měření prášku zkoumaného v této diplomové práci.

4 VÝROBA A TESTOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Tato diplomová práce je zaměřená na porovnání mechanických vlastností tištěných vzorků ze dvou druhů prášku jednoho typu materiálu. Bude vytištěno celkem 20 kusů testovacích vzorků z nového prášku MS1 pro statické, dynamické a cyklické zkoušky. Mechanické vlastnosti budou porovnávány se vzorky, které byly vytisknuty z téhož prášku, jenž byl ale již několikrát přeséváný.

Technologie, která je vybraná pro tento tisk, je velice energeticky náročná jak při tisku, tak i při zpracování použitého materiálu kovového prášku. Proto se tato diplomová práce zkusí také zaměřit na změnu náročnosti tohoto procesu. Jedná se o optimalizaci, která je u ostatních způsobů tisku již vyzkoumána a využívá různá vylepšení pro úpravu spotřeby vstupního materiálu. Jedním z těchto vylepšení je úprava pracovního prostoru stroje tak, aby došlo ke snížení spotřeby prášku. Pro tento typ metody tisku a tento typ stroje není známo, jak redukovat množství prášku upravením pracovního prostoru, a proto tato skutečnost může být důležitým krokem tohoto výzkumu.

4.1 Popis technologie

Tisk zkušebních těles bude proveden ve stroji od firmy EOS s pracovním názvem EOS M290. Stroj má pracovní prostor o velikosti 250 x 250 x 325 [mm]. Tento prostor se řadí do střední třídy mezi velikosti jednotlivých strojů, které výrobci nabízejí. Stroj je znázorněn na Obrázku 26 i s popisem svého vnitřního prostoru. Vnitřek stroje se skládá ze tří základních komor. První komora je navržena jako zásobník prášku. Před naplněním zásobníku je nutné pracovní prostor vyčistit od předešlého tisku, a poté nasypat nový pracovní prášek. Dále je uprostřed komora, která je ve stroji jako pracovní. Poslední komora je tzv. přepadová, slouží pro nadbytečný prášek, který je zde odsouván nanášecím pravítkem. Tisk proběhne v laboratoři Regionálního technologického institutu při Fakultě strojní na Západočeské univerzitě v Plzni, která má s tiskem bohaté zkušenosti a dlouhodobě provádí výzkum s využitím tohoto stroje a spolupracuje s firmou EOS. Na tomto stroji již probíhalo několik výzkumů změřených na materiál MS1.

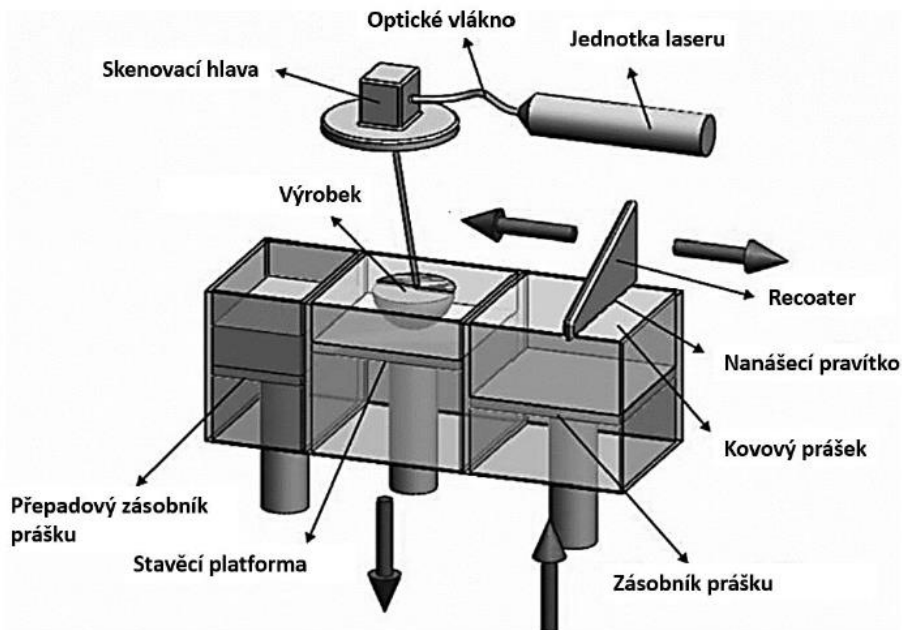
Tento stroj využívá technologii DMLS (Direct Metal Laser Sintering) založenou na principu postupného spékání tenkých vrstev prášku pomocí laserového paprsku. DMLS je velice využívanou technologií, kde v jednom procesu lze vyrobit několik tvarově odlišných dílů najednou. Tato technologie je schopna stavět nové díly, ale je také schopna opravovat formy, což je velkým přínosem z hlediska efektivity a rychlosti celého procesu.



Obrázek 26 - Stroj EOS M 290 a jeho vnitřní složení [1]

4.1.1 Technologie DMLS

Jak bylo zmíněno výše, jedná se o metodu nanášení tenké vrstvy kovového prášku ze zásobníku o velikosti 20 až 100 [μm] na stavěcí platformu pomocí recoater, což je nanášecí pravítko. Na nanesenou vrstvu začne působit energetický laserový paprsek, který roztavuje vrstvu prášku dle tvaru navrženého výrobku, jenž je přenesen do stroje jako vygenerovaný průřez modelu z CAD dat, a z těchto průřezů jsou tvořeny jednotlivé vrstvy. Postup spékání jednotlivých vrstev je opakován až do vytvoření konečného tvaru součásti. Po tomto procesu se doporučuje u některých materiálů použití tepelných úprav pro snížení pnutí, které je do výrobku vnášeno laserem. Na Obrázku 27 je tento proces znázorněn a jsou zde popsány hlavní části této metody. [17], [1]



Obrázek 27 - Princip technologie DMLS [1]

Princip DMLS je vhodný pro tento výzkum díky možnosti tisku několika rozdílných tvarů jednotlivých zkušebních těles najednou. Nevýhodou této metody je, že vždy bude nanášena vrstva na celou pracovní plochu platformy, která je dána výrobcem na 250 x 250 [mm]. Z tohoto důvodu vzniká velké množství prášku, které není využito a je ovlivněno procesem. Tento prášek se musí následně prosévat a čistit.

4.2 Navržení zmenšení pracovního prostoru platformy

Nanášením jednotlivých vrstev prášku na celou plochu pracovní platformy stroje (v tomto případě 250 x 250 [mm]) je spotřeba prášku velice vysoká. Dalším důvodem pro zmenšení pracovního prostoru je nutnost mít velké množství prášku v zásobníku. Jak bylo uvedeno v teoretické části, je u této technologie odzkoušeno, že pro 3 [cm] prášku naneseného na platformě je potřeba mít k dispozici v zásobníku stroje alespoň 5 [cm] prášku. Všeobecně tedy platí, že je v zásobníku trojnásobné množství prášku, než je výška tisknutého tělesa. Z těchto důvodů je nutné poměrně velké množství skladovaného prášku, při kterém dochází k tzv. opotřebením prášku, který ztrácí své mechanické vlastnosti, viz rešeršní část této práce. Z těchto důvodů je nutné navrhnout takový přípravek, který by byl schopný zmenšit pracovní prostor stroje, a tím dosáhnout úspory prášku na vytištění různých součástí, které plně nevyužijí celý prostor pracovní platformy.

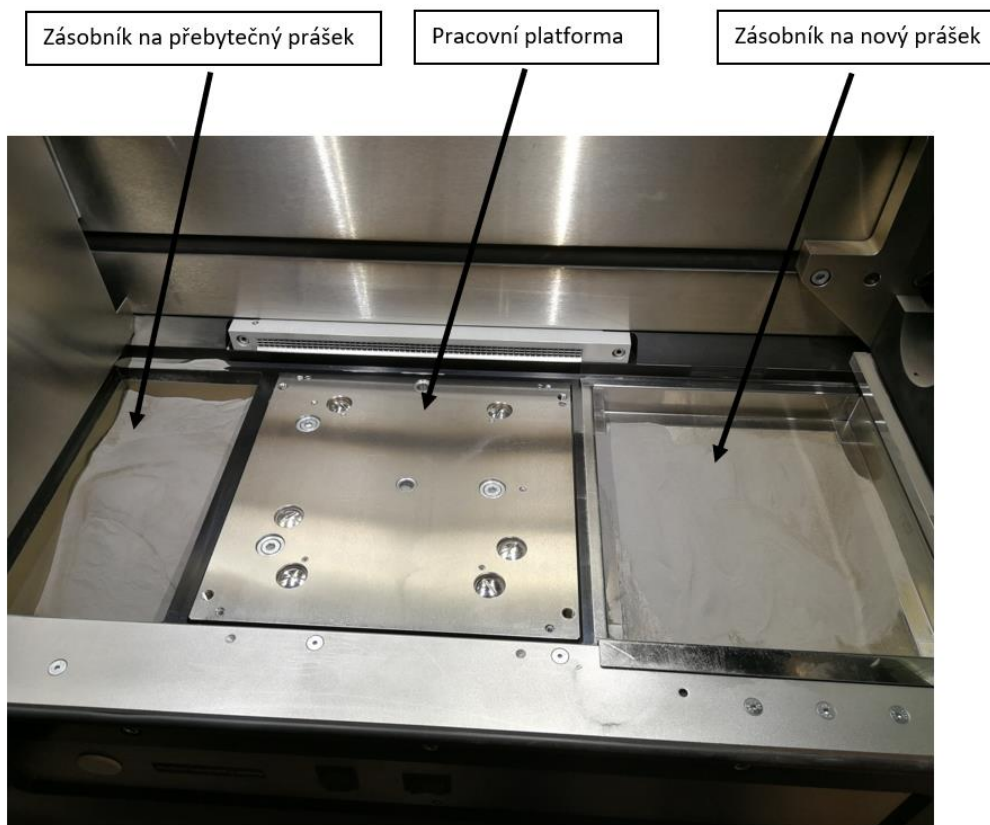
V této DP bude přípravek navržen pro další rozvoj AM se zaměřením na vlastnosti recyklovaného prášku MS1 a jeho vliv na mechanické vlastnosti vytištěných těles. Recyklovaný prášek je vlivem složité úpravy velice finančně náročný, a proto zde bude vhodné použít přepážku pro rozdělení pracovního prostoru. Jedna z mnoha náročných podmínek pro vytvoření přípravku je, že na stroji nesmí být prováděny žádné úpravy. Musí být tedy navržen takový přípravek, který je z hlediska zástavby do stroje zcela nezávislý vůči stroji, a pokud možno co nejjednodušší z hlediska nastavení a upevnění.

Rozdělení pracovního prostoru přinese velkou úsporu prášku, který nebude muset být přeséván, a bude moci být znovu použit bez dalších úprav. Tím se celý AM proces urychlí a bude eliminováno častější přesévání prášku, které je velice energeticky náročné. Dále se sníží celkové pořizovací náklady na nákup kovového prášku a prášek, který bude ušetřen, se může dále použít pro další rozvoj a výzkum v aditivní výrobě. Díky zmenšení prostoru mohou být testovány nové druhy prášku, u kterých je pořizovací cena velmi vysoká, a tím lze získat důležité projekty, které by pomohly jak rozvoji RTI, tak Západočeské univerzitě v Plzni.

AM je v této době hojně zkoumaná metoda z hlediska dopadu na životní prostředí a z hlediska náročnosti likvidace odpadu z procesu. Tímto návrhem lze přispět do dalších průzkumů či návrhů, jak snížit náročnost procesu v AM.

4.2.1 Popis pracovního prostoru stroje

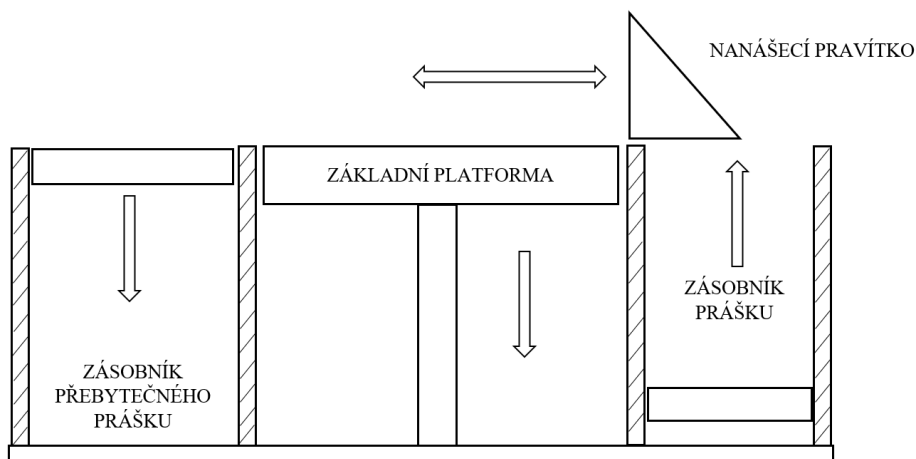
Jak bylo zmíněno v Kapitole 4.1, je pracovní prostor rozdělen na tři komory. Nad všemi těmito komorami přejíždí nanášecí pravítko. Pro přípravek je nejdůležitější pracovní komora, kterou je nutné rozdělit nejlépe na dvě poloviny. Pro platformu, která je umístěna v pracovní komoře, jsou navrženy rozměry 250 x 250 [mm]. V našem případě je požadavek rozdělení pracovní platformy na polovinu, tudíž by měl mít finální pracovní prostor rozměry 125 x 250 [mm]. Výška pracovního posunu platformy je dle výrobce 325 [mm]. Dle zkušeností ve výzkumném centru je potřebný pracovní posun zadán na necelou polovinu této hodnoty, tedy 162 [mm]. Další kritéria nejsou zadána a přípravek je ovlivněn pouze strojem a jeho součástmi, které udávají jednotlivé okrajové podmínky pro navržení přípravku. Velkou nevýhodou jsou neznámé informace ohledně vnitřního prostoru stroje, např. druh materiálu a tloušťka jednotlivých komponent, které výrobce neposkytl a které jsou pro návrh velice důležité. Proto musí být přípravek navržen tak, aby jednotlivé součásti nebyly poškozeny. Bylo by vhodné vytvořit takový přípravek, u kterého lze redukovat uchycení do stroje tak, aby bylo nastavitelné.



Obrázek 28 - Pracovní prostor stroje EOS M 290

4.2.2 Okrajové podmínky stroje

Jak je vidět na Obrázku 28, prostoru pro ustavení přepážky není mnoho. Přípravek musí být přichycen v oblasti, kde se pohybuje základní platforma. Nemůže být uchycen nad okrajem jednotlivých konců stěn (v horní části), protože by do přípravku naráželo nanášecí pravítko. Další nevýhodou pracovního prostoru je, že jsou všechny části uvnitř komor v pohybu. Přípravek bude muset být přichycen do vnitřních prostor pracovní komory, ve které se pohybuje základní platforma. Vnitřní prostor pracovní komory je tvořen pouze třemi částmi. Mezi tyto části patří: pracovní platforma, pohybový šroub a komora, která je tvořena hladkými plechovými stěnami. Na Obrázku 29 jsou znázorněny základní pohyby uvnitř stroje.



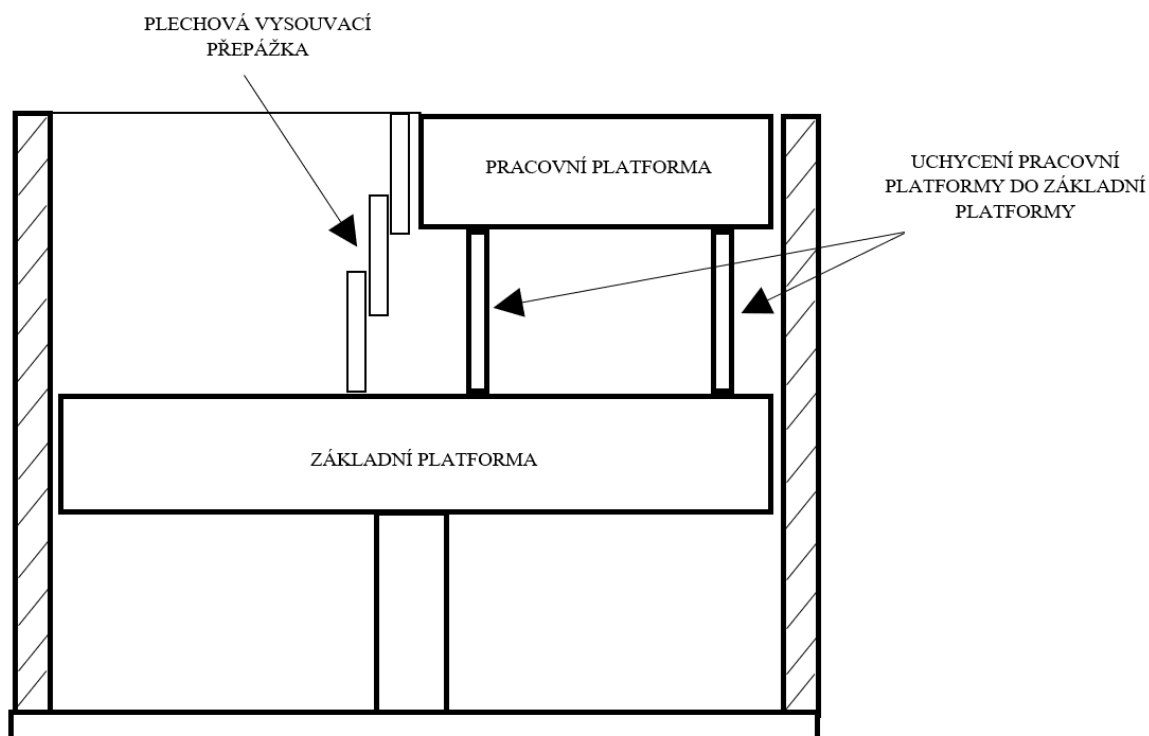
Obrázek 29 - Hlavní pohyby částí pracovního prostoru

4.2.3 Návrh přepažení pracovní komory

Proběhlo navržení dvou variant pro přepažení pracovního prostoru. Každá z variant využívá základní platformy jako ustavení přepážky do pracovního prostoru a opěrné uchycení za vnitřní stěny pracovní komory. Na Obrázku 30 a Obrázku 31 můžete vidět schéma obou variant. Tyto varianty musí mít vyrobenou novou pracovní platformu, která odpovídá počátečním podmínkám zmenšení pracovního prostoru na 125 x 250 [mm]. Tato nová pracovní platforma musí být propojena s hlavním pohybovým ústrojím pracovního prostoru, aby se kontinuálně pohybovala v rámci ostatních částí systému stroje. Nabízí se tedy možnost využít základní platformu stroje a upevnit novou platformu na ní v obou variantách.

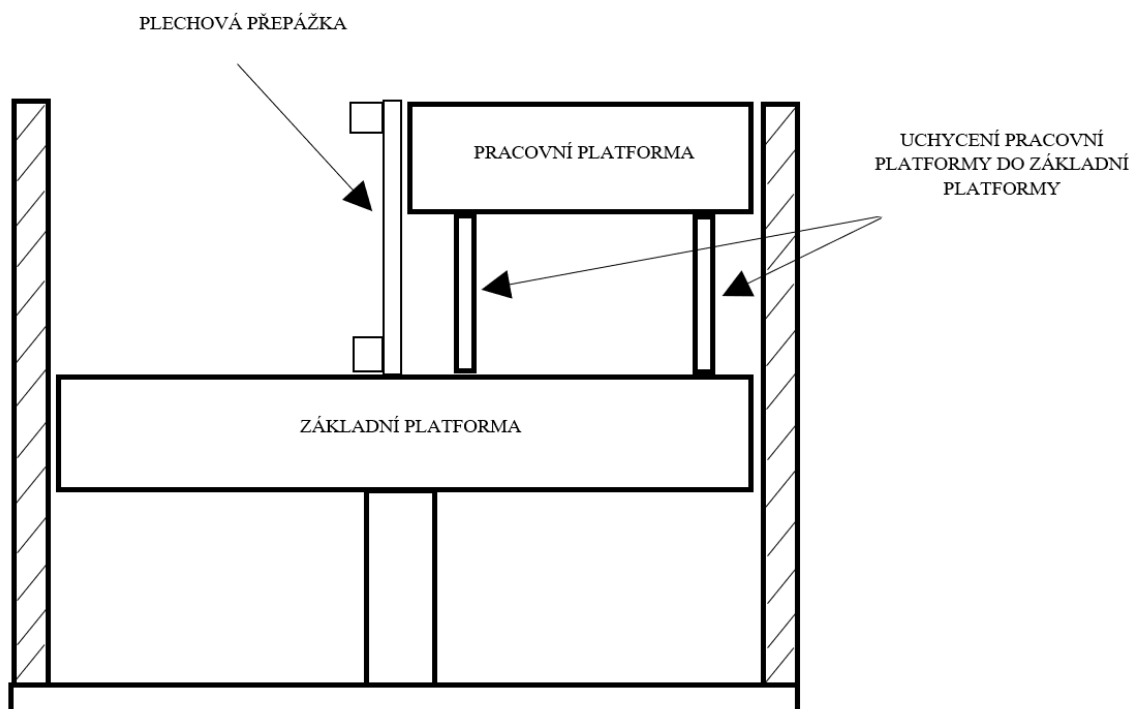
První varianta je zobrazena na Obrázku 32 a využívá přepažení pracovního prostoru pomocí za sebou naskládaných plechů, kde koncový plech je připevněn na základní platformu, která svým pohybem pomalu rozvíjí plechovou přepážku a zabraňuje tak průchodu prášku. Horní část přepážky je připevněna na stěnu komory, která zajišťuje stabilitu celého přípravku.

Výhodou tohoto přípravku je jednoduchost a hmotnost. Celý systém je složen pouze z plechů a upínací lišty. Naopak velkou nevýhodou a obavou je kontakt jemného prášku s tímto mechanismem. Mezi jednotlivými plechy musí být mezery, aby docházelo k volnému pohybu jednotlivých částí. Tyto mezery mohou být po dobu tisku zaplněny práškem a mohlo by tedy dojít k zadření plechů a následnému stržení přepážky z ustavovací lišty nebo ohnutí celého systému. Další komplikací této varianty je odstupňování jednotlivých plechů. Při posunu a rozvíjení plechů dochází k odskočení směrem od pracovní platformy. To by mohlo způsobovat propouštění prášku do vnitřního prostoru pracovní komory. Tento problém by způsoboval nestabilní vrstvení prášku na pracovní platformu, což by mohlo nést komplikace ve formě výsledné kvality vytištěných vzorků a finálních výsledků mechanických zkoušek. Dále by přepážka nebyla účinná z hlediska úspory prášku, protože by se kontaminovaný prášek dostával do čistého a následně by se pak musel prosévat.



Obrázek 30 - Schéma první varianty pro zmenšení pracovního prostoru

Druhá varianta se skládá z přepažení pomocí jednoho kusu plechu. Plech je našroubován na dvě vodící lišty, které jsou ustaveny pomocí okolních stěn pracovní komory. Tato varianta eliminuje odskoky, které vznikaly v první variantě vlivem vysunování plechů. Také zde nejsou žádné pohyblivé části přepážky, které by se mohly během procesu vlivem působení prášku přidřít. Přepážka je tedy složena z jedné hladké stěny, která udává konstantní vzdálenost od pohyblivé pracovní platformy. Nemělo by zde docházet k narušení jednotlivých vrstev prášku a měla by být zachována kvalita a konzistence prášku na pracovní platformě po celou dobu tisku. Pro tištěné díly by byly zachovány stejné pracovní podmínky jako za normálních okolností tisku při použití základní platformy stroje, a tím i udávané údaje a nastavení stroje, které zaručuje výrobce. Oproti první variantě je zde nárůst hmotnosti přípravku.

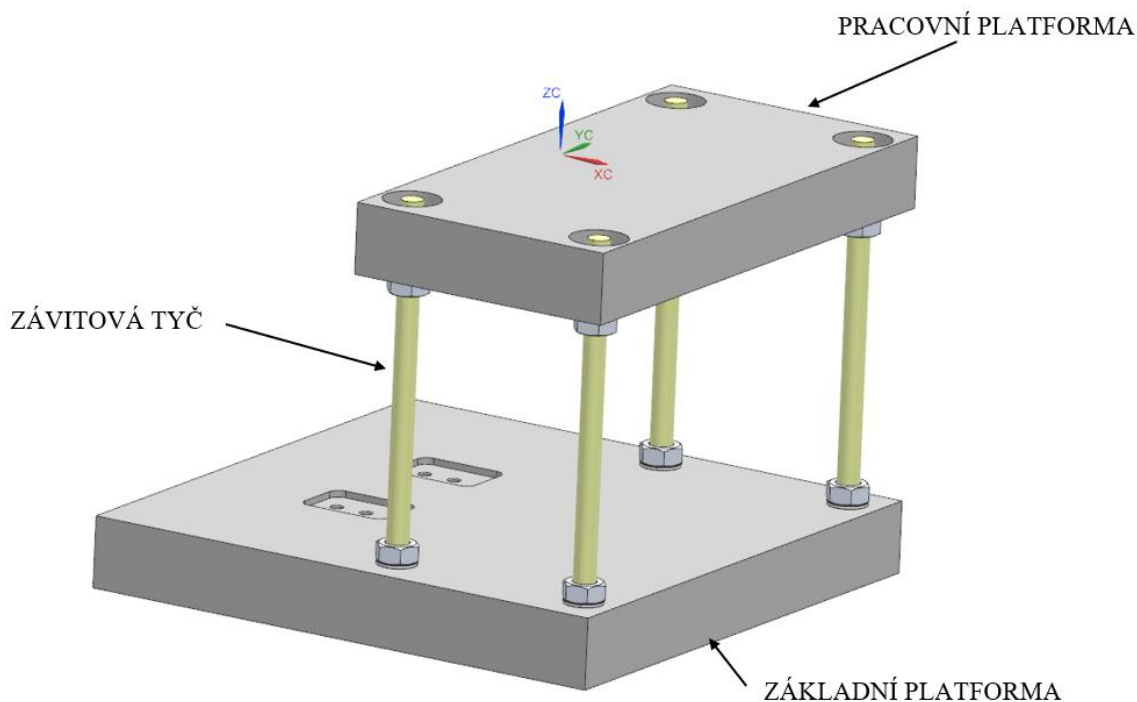


Obrázek 31 - Schéma druhé varianty pro zmenšení pracovního prostoru

Z hlediska funkčnosti přepážky a zachování podmínek tisku dle výrobce je vhodnější variantou přepážka č. 2. Její velikou výhodou je, že přepážka není rozdělena a nekoná další pohyby, které by se mohly během procesu tisku pokazit. Také disponuje konstantní mezerou od pracovní platformy, což je obrovská výhoda pro zachování konstantní vrstvy nanášeného prášku. Simuluje klasické stěny pracovní komory po celém rozsahu, který je nastavený dle počátečních podmínek na 162 [mm]. Systém tvoří jeden kompaktní celek oddělený od základní platformy, a proto není ovlivněn pohyblivým se systémem pracovního stroje. Varianta vyhovuje všem zadaným okrajovým podmínkám a bude tedy zkonstruována a vyhotovena jako přepážka pro zmenšení pracovního prostoru stroje EOS M 290.

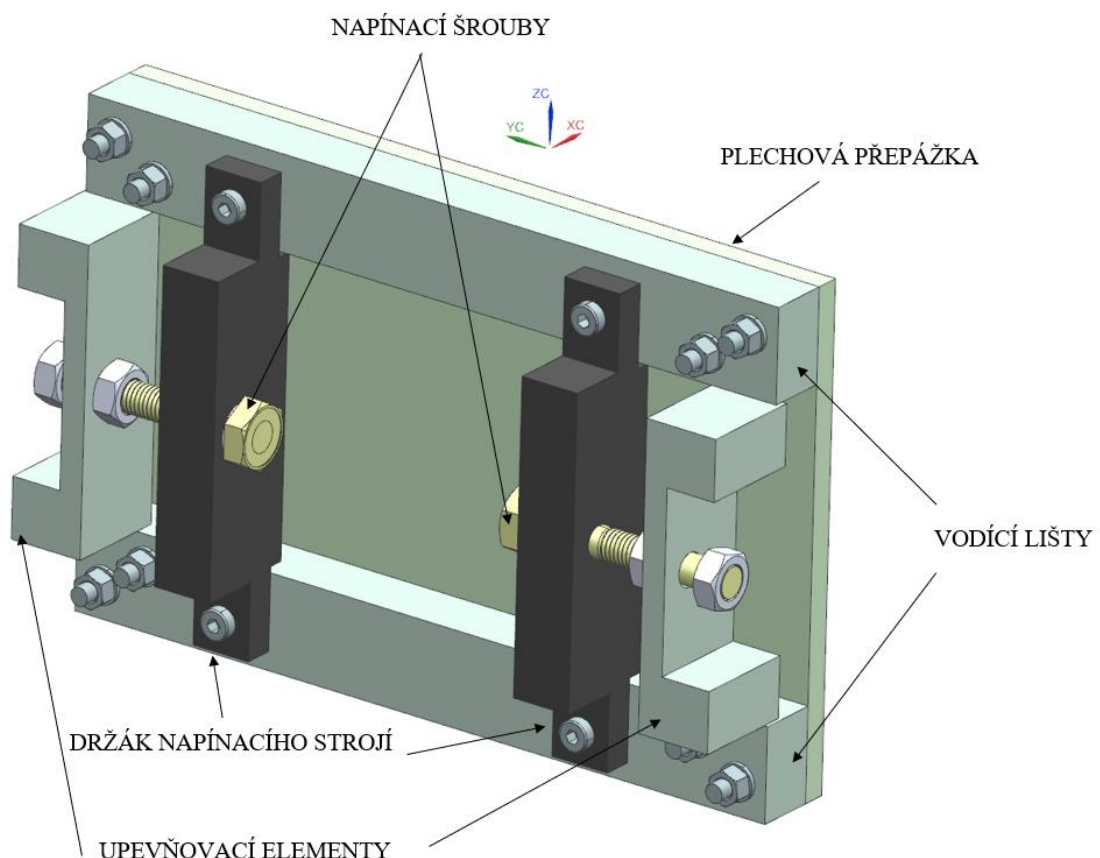
4.3 Konstrukce přepážky pro rozdělení pracovního prostoru

Prvním konstrukčním uzlem je propojení nové pracovní platformy s pohybujícím se mechanismem stroje. Nejjednodušší variantou je propojení pracovní platformy se základní. Základní platforma je důležitá z hlediska upevnění na pohybový šroub ve stroji, díky jemuž dochází k pohybu platformy. Další výhodou propojení obou platform je, že před procesem tisku je základní rovina vyrovnávána na setiny milimetru tak, aby bylo dosaženo předepsané kvality tisku a také přesnosti výsledného výrobku. Důležitým parametrem je schopnost výškového nastavení pracovní platformy od platformy základní. Po každém dokončeném procesu se musí pracovní platforma zbrousit řádově o desetiny milimetru. Z tohoto důvodu jsou využity k propojení závitové tyče M10, které jsou našroubovány do základní platformy, ve níž jsou vyvrtány čtyři otvory se závity. Závitové tyče v základní platformě jsou zajištěny maticemi, aby nedocházelo k jejich povolení během tisku. V horní části je pracovní platforma nasunuta na závitové tyče, na kterých jsou našroubované matice do stejné výšky. Na tyto matice je položena pracovní platforma, která je dotažena maticemi. Tento konstrukční celek je založen na jednoduchosti z hlediska montáže a na jednoduchosti následného nastavení vzdálenosti mezi pracovní a základní platformou, které lze jednoduše měnit pomocí matic. Schéma toho konstrukčního celku je popsáno na Obrázku 32.



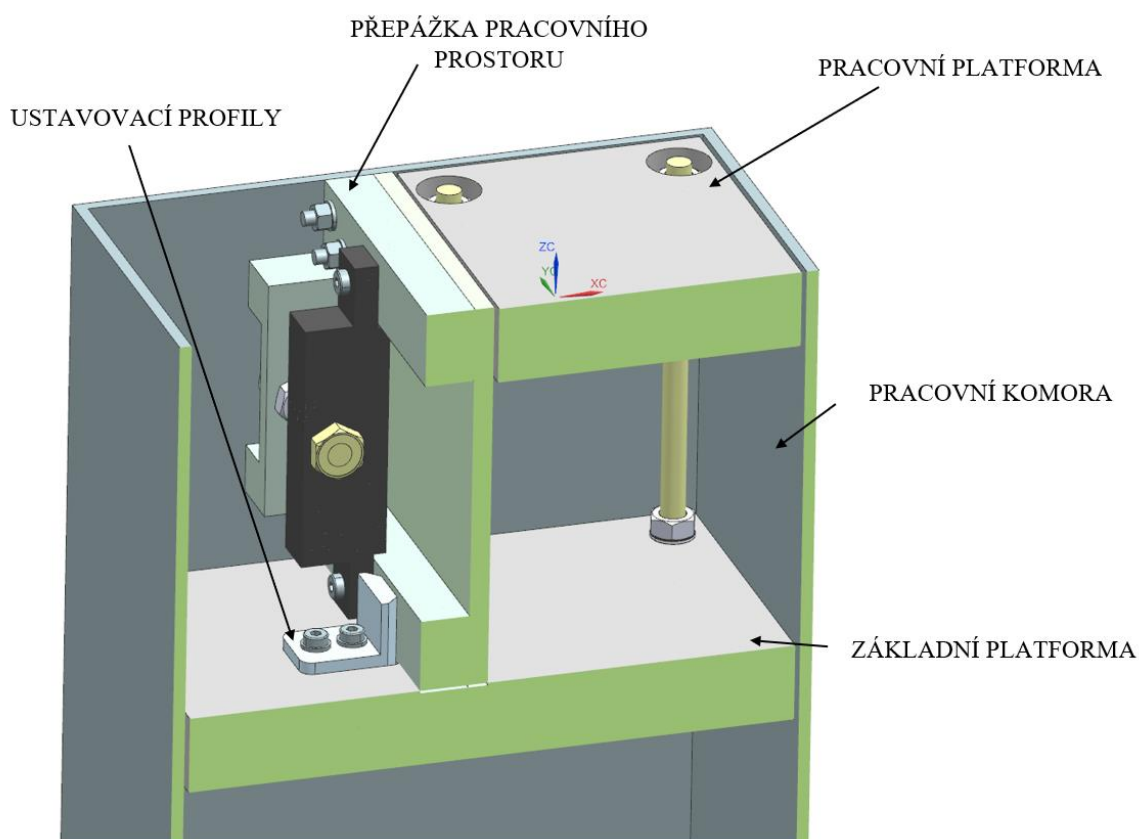
Obrázek 32 - Schéma konstrukčního celku propojení základní a pracovní platformy

Druhým konstrukčním uzlem je samotná přepážka, která rozděluje pracovní prostor na polovinu. Jak bylo popsáno výše, pro správnost procesu tisku byla zvolena varianta 2. Z hlediska konstrukce je důležité upevnit přepážku do pracovního prostoru tak, aby nedocházelo ke kolizím s ostatními částmi stroje a nedošlo k jejich zničení. Upevnění přepážky do pracovní celku je zvoleno pomocí napínacích elementů, které jsou přitlačovány na stěny pracovního prostoru. Jak je vidět na Obrázku 33 plechová přepážka je sešroubována s vodíci lištami, které jsou nosnými prvky pro napínací mechanismus. Do napínacích lišt jsou našroubovány držáky napínacího ústrojí, do kterých jsou vyvrtané otvory se závity. Do těchto otvorů jsou našroubovány napínací šrouby, na nichž jsou nasazeny upevňovací elementy zajištěné maticemi. Z důvodu časové náročnosti je přepážka navržena tak, aby výroba a smontování zabíraly co nejméně času a nebyly příliš náročné. Proto je celá přepážka smontována pomocí šroubových spojení, která jsou snadno demontovatelná, a lze tak jednotlivé části upravit či zcela vyměnit. Na přepážku během procesu není vyvíjeno téměř žádné namáhání, tudíž hlavním smyslem je oddělit pracovní prostor, a přitom během procesu udržet vlastní konstrukci na správném místě. Rozpínací mechanismu je velice jednoduchý a používaný v mnoha případech strojírenství. Zajištění mechanismu proti povolení je provedeno pomocí kontra matic, což je spolehlivé a při kontaktu s práškem nedojde k jeho poškození a uvolnění.



Obrázek 33 - Schéma konstrukčního celku přepážky pro rozdělení pracovního prostoru

Jednotlivé konstrukční uzly je nutné spojit tak, aby dohromady fungovaly jako konstrukční jednotný celek. Na Obrázku 34 již vidíme schéma propojení těchto uzlů dohromady. Pro vymezení důležitých mezer mezi přepážkou a pracovní platformou jsou navrženy díly ve tvaru L-profilů, které vždy zajistí správné umístění přepážky vycentrováním na svíslou plochu profilů. Dále je velice důležité zarovnat horní plochu přepážky s horizontální plochou pracovní platformy tak, aby nedocházelo při přejíždění nanášecího pravítka k zadrhávání či úplnému zaseknutí. K tomu nám slouží základní platforma, na kterou položíme přepážku, která je zarovnána s upínací lištou, a opět pomocí L-profilů a spodní plochou přepážky je vycentrována a správně slícována s pracovní platformou v celém pracovním systému. Jednotlivé detaily konstrukce a výroby zde nejsou zmíněny z důvodu jiného zaměření této diplomové práce.



Obrázek 34 - Hlavní sestava se zmenšením pracovního prostoru pomocí přepážky

Tato přepážka splňuje všechny požadavky a okrajové podmínky, které jsou sepsány výše v této diplomové práci. Vzhledem k časové náročnosti by mohl být mechanismus propracován do větších detailů a mohl by se např. zaměřit na lepší ustavení pracovní platformy či zlepšení napínacího mechanismu. Tato přepážka bude otestována při tisku jiných částí při výzkumu na RTI z důvodu většího využití pracovního prostoru stroje a ověří se, zda je tento návrh vyhovující a především funkční. Pokud přepážka vydrží proces AM, může být aplikována i na jiné projekty a šetřit tak množství prášku, které může být použito efektivněji.

4.3.1 Průběh tisku se zmenšeným prostorem

Jak bylo zmíněno výše, testování přípravku do tiskárny bude odzkoušeno na jiném tištěném díle než na vzorcích, které jsou určeny pro DP. Výhoda vyzkoušení přípravku na vyšším tělese je ta, že přepážka bude více zatěžována vyšší vrstvou prášku v pracovním prostoru a otestuje se tak její funkčnost při rozdělení pracovního prostoru se zachováním konstantní nanášené vrstvy prášku na platformu.

Před začátkem tisku je nutné vyladit platformu tak, aby byla připravená rovina pro tisk v řádech setin milimetru. S tím je spojené také vyladění přepážky, která musí být v té samé rovině. Tudíž je tento proces velice zdoluhavý na přípravu daných parametrů před započítím tisku.

Během procesu tisku nedošlo k žádným komplikacím. Během tisku byla zachována tloušťka nanášené vrstvy. Prášek byl ze strany přepážky dokonale utěsněn z důvodu zachování konstantní mezery mezi pracovní platformou a přepážkou. Přepážka byla nastavena tak, že nedošlo ke kolizi s nanášecím pravítkem. Do rozděleného pracovního prostoru za přepážku prášek přepadl bez výrazné kumulace na hraně přepážky. Prášek tedy nebyl ovlivněn samotným procesem tisku. Může být však možné, že vlivem působení laseru mohlo dojít k odlétávání částic prášku přes přepážku do zmenšeného pracovního prostoru, a tím dojde ke kontaminaci prášku. K eliminaci tohoto problému by bylo možné přidělat krycí plech, který by byl namontován na vršek přepážky. Po tomto plechu by byl prášek přetahován do sběrné komory a tím by nebyl ovlivněn procesem.

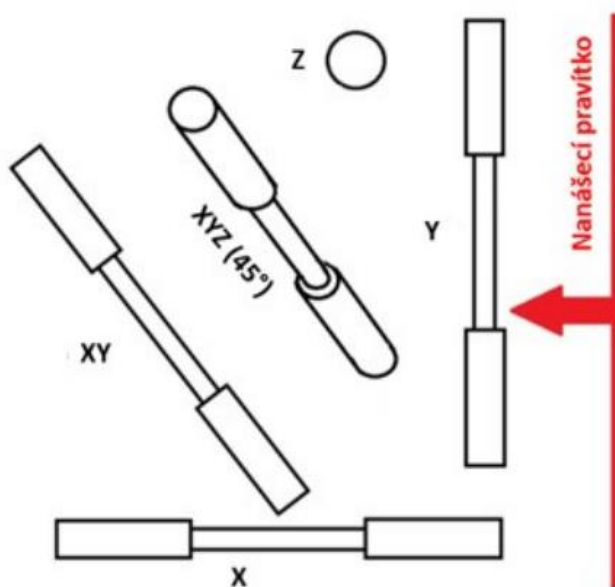
4.4 Výroba zkušebních těles

Výroba zkušebních těles by měla probíhat se stejnými podmínkami jako u těles z přisetého prášku. Využijí se stejné parametry pro tisk součástí se zachováním stejného směru nanášení prášku na platformu. Celkem bude vytištěno dvacet těles, která musí rozměrově odpovídat dané normě jednotlivých zkoušek. Těchto rozměrů se docílí mechanickým zpracováním vytištěných těles. Na připravených tělesech budou prováděny zkoušky tahové, zkoušky rázem v ohybu a na závěr cyklické zkoušky. Zkouška tahem bude prováděna na třech zkušebních vzorcích, zkouška rázem v ohybu bude provedena na pěti vzorcích a cyklická zkouška bude provedena na dvanácti zkušebních vzorcích. Tyto zkoušky budou porovnávány s již odzkoušenými vzorky z přisetého prášku, jehož výsledky jsou obsaženy v Disertační práci [1], a s konvenčně vyráběným materiálem s názvem VACO 180, jehož vlastnosti jsou v Příloze č. 5.

4.4.1 Rozložení těles na platformu

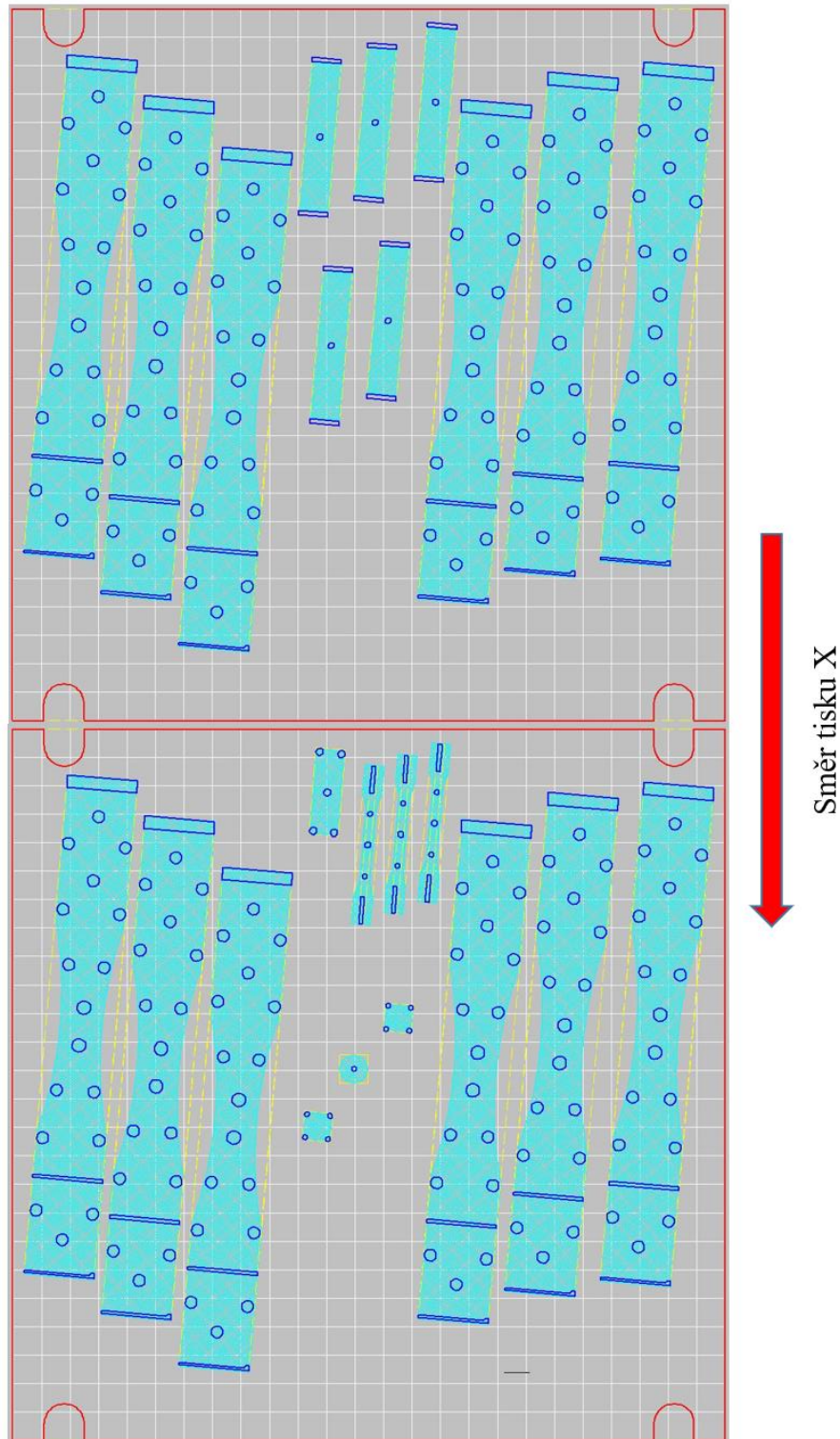
Důležitým parametrem při rozložení těles na platformu je jejich směr tisku. Základní směry uložení těles na platformu jsou X, Y, Z. Tyto směry, jak již bylo zmíněno výše, velice ovlivňují výsledné vlastnosti vytištěných těles. Dále ovlivňují spotřebu prášku, protože na příklad ve směru Z je prokázáno, že jsou výsledky mechanických vlastností nejlepší, ale v tomto případě je spotřeba prášku vyšší než u ostatních dvou směrů. Spotřeba prášku je zde myšlena jako množství prášku, které je ovlivněné procesem tisku. Jednotlivé možnosti směru tisku jsou na Obrázku 35.

V tomto případě jsou vytištěna všechna tělesa ve směru nanášení prášku X z jedné dávky prášku tak, aby bylo zajištěno co nejméně chyb, např. rozdílné struktury vzorků. Rozdělení jednotlivých vzorků na platformu bylo zvoleno co nejpodobněji vzorkům, které jsou již vytištěny a otestovány z přisetého prášku. Tím bude dosaženo srovnatelné kvality pro provedení mechanických zkoušek. Rozložení těles na platformě je vidět na Obrázku 36.



Obrázek 35 - Možnosti rozložení zkušebních těles na pracovní platformě [1]

Tělesa byla umístěna na dvě platformy z jedné várky prášku. Z Obrázku 36 je vidět, že jsou tělesa mírně pootočená. Důvodem jsou zásady tisku, které je nutné dodržet při AM procesech, čímž nedojde k možnému zaseknutí pravítka a následnému případnému zkroucení součástí na platformě vlivem působícího tepla z laseru. Natočením těles na platformě se toto riziko snižuje. Všechna tělesa jsou natočená do směru nanášení prášku v ose X a připravená pro tisk.



Obrázek 36 - Rozvržení těles na platformách

4.4.2 Parametry pro tisk součástí

Parametry pro tisk ve většině udává výrobce stroje tak, aby bylo dosaženo dobré a deklarované kvality tisku výrobcem. Tiskárna EOS M290 má defaultně přednastavené parametry tisku pro vnitřní objem tištěného tělesa. Tyto parametry lze však upravovat dle zkušenosti uživatele. V případě našeho tisku ale budou parametry zachovány z důvodu porovnání výsledků jednotlivých zkoušek s výsledky udávanými výrobcem. Mezi hlavní parametry nastavované pro tento proces patří:

Defaultně přednastavené parametry:

- skenovací rychlost laseru = 960 [mm/s],
- výkon laseru = 285 [W],
- vzdálenost mezi jednotlivými přejezdy = 0,11 [mm],
- překrytí jednotlivých stop laseru = 0,08 [mm],
- tloušťka spékané vrstvy = 0,04 [mm].

Parametry pro konturu tištěné součásti:

- skenovací rychlost = 960 [mm/s],
- výkon laseru = 285 [W],
- tloušťka spékané vrstvy = 0,04 [mm].

Úkolem konturovacího přejezdu laseru je zajištění požadovaného rozměru a tvaru součástí a požadované drsnosti povrchu. Parametry pro konturu lze nastavovat podle předepsaných vlastností, které má výrobek splňovat.

4.4.3 Zhodnocení vytištěných těles

U vytištěných zkušebních těles se musí pohledem zkontrolovat několik aspektů, podle nichž se určí základní kvalita tisku, a dále se rozhodne, zda mohou být tělesa dále zpracována.

Mezi první aspekty patří kontrola součástí z hlediska pokroucení vzorků. U vzorků, které byly vytištěny, se tyto tvarové nedostatky neprojeví. Tělesa na pohled držela svůj tvar, vlivem chladnutí nedošlo k odtržení těles od platformy. Další vizuální kontrola se zaměřovala na tvorbu prasklin na povrchu vzorků během chladnutí jednotlivých vrstev nanášeného materiálu. U všech vzorků se žádné praskliny nenašly. Dále byla kontrolována také drsnost a deformace povrchu u vytištěných vzorků, nebyly zjištěny žádné odchylky. Tělesa po odříznutí z platformy jsou znázorněna na Obrázku 37 a Obrázku 38.

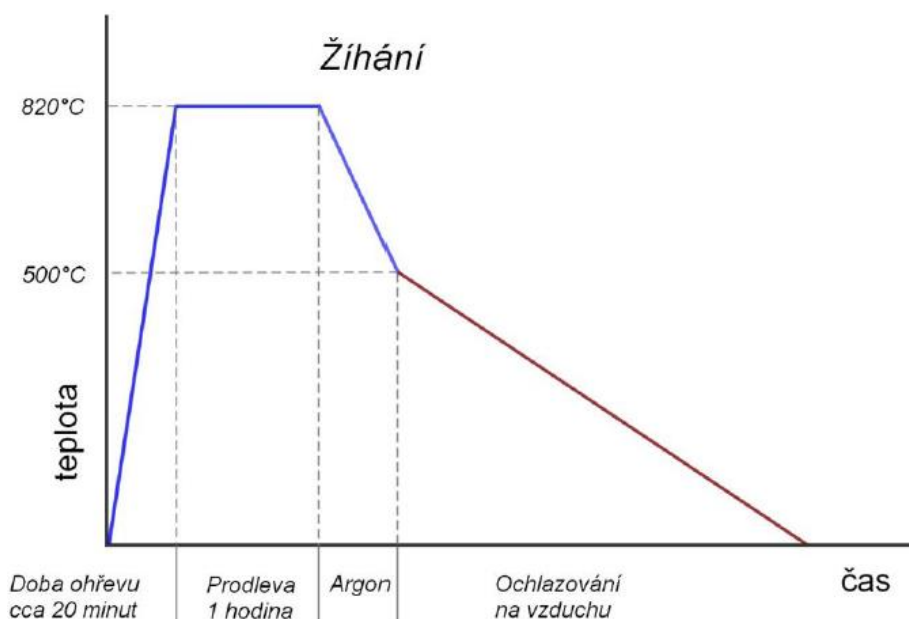


Obrázek 37 - Vytíštěná tělesa na platformě pro cyklickou zkoušku a zkoušku rázem v ohybu



Obrázek 38 - Vytíštěná tělesa na platformě pro cyklickou a tahovou zkoušku

Při zachování parametrů tisku dle výrobce a dle Disertační práce [1] se podařilo vytisknout vzorky bez jakýchkoliv vizuálních deformací, které by mohly značně ovlivnit výsledky mechanických zkoušek, které budou prováděny na tělesech. Pro snížení pnutí u vzorků, které budou mechanicky zkoušeny, doporučuje výrobce rozpouštěcí žihání. Výrobce prášku definuje teplotu, na kterou musí být vzorky vyžehány, tj. na 820 [C°] v ochranné atmosféře v Ar po dobu jedné hodiny a následně prudce ochlazeny v Ar pod 500 [C°] s dochlazením na vzduchu. Tímto procesem se zabrání pochybení při primární vizuální kontrole vzorků, u nichž mohlo dojít k nevýrazné deformaci, která nemusela být pouhým okem odhalena. Vlivem žihání pro snížení pnutí lze očekávat pokles meze kluzu, jak bylo ověřeno v Disertační práci [1]. Průběh rozpouštěcího žihání pro vytištěná tělesa je znázorněn na Obrázku 39.



Obrázek 39 - Rozpouštěcí žihání dle výrobce a úpravy vzorku z přisetého prášku [1]

4.5 Mechanické zkoušky těles

Pro získání důležitých vlastností a informací o vytištěných vzorcích z kovového prášku pomocí metody DMLS je důležité udělat mechanické zkoušky. Jak bylo zmíněno výše, byly vybrány tři základní mechanické zkoušky (zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu a cyklická zkouška), které se aplikují řadu let na konvenčně vyráběné a testované materiály ve strojírenství. Proto je vhodné tyto zkoušky aplikovat pro AM, abychom dostali výsledky, které je možné porovnat jak se vzorky vyrobenými pomocí aditivní výroby, tak se vzorky vyrobenými pomocí konvenční výroby. Zkoušky se provádějí za stejných podmínek, které jsou určeny podle stanovených norem. Dodržením těchto norem jsou výsledky porovnatelné a mohou být užitečné pro další zpracování v oblasti a vývoji v AM procesu. Navíc bylo provedeno stejné rozpouštěcí žihání vzorků podle doporučení výrobce jak pro vzorky z nového prášku, tak i pro vzorky z přisetého prášku, které zaručí objektivitu výsledných hodnot.

Dosažené podmínky pro testování z hlediska technologie:

- použití stejné velikosti platformy a směru tisku při stejných parametrech tisku,
- stejné tepelné zpracování vzorků,
- stejné opracování vzorků před mechanickými zkouškami,
- provedení stejných mechanických zkoušek.

Jednotlivé zkoušky budou prováděné na Západočeské univerzitě v Plzni ve spolupráci s RTI. Tyto zkoušky již byly v RTI prováděny pod dohledem zkušených odborných pracovníků s využitím materiálu MS1. Lze tedy výsledky zkoušek srovnávat s hodnotami, které udává výrobce prášku, a také s hodnotami, které byly zjištěny při výzkumu na RTI a jsou uvedeny v Disertační práci [1].

4.5.1 Zkouška tahem

Statická zkouška tahem byla provedena na třech vytištěných vzorcích s hlavním směrem nanášeného prášku v ose X. Zkušební tělesa byla vytištěna dle výkresu pro zkušební válcovou tyč, která je v Příloze 2. Všechna tělesa byla obrobena pro odstranění vrubů, které vznikají nanášením jednotlivých vrstev materiálu při tisku, a tím byla získána správná drsnost povrchu.

Základními rozměry válcové zkušební tyče jsou průměr zkoušené části 4 [mm] a celková délka 55 [mm]. Z důvodu zamezení proklouznutí vzorků v čelistech stroje a pro umístění extenzometrů pro měření prodloužení vzorků je vyřezán na obou koncích závit M8. Tyto hodnoty vzorků jsou srovnatelné s hodnotami pro vzorky vyráběné konvenčním způsobem. Na Obrázku 40 jsou zachycena tělesa pro tahovou zkoušku.



Obrázek 40 - Zkušební tělesa pro tahovou zkoušku

Statická zkouška tahem byla provedena na zkušebním stroji ZWICK/ROELL Z250 dle ISO 6892-1:2009 za pokojové teploty, konstantní rychlostí posuvu 0,00025 [l/s] v oblasti Hookeova zákona. Následně byly vzorky zatěžovány až do meze kluzu rychlostí 0,006 [l/s] s pokračováním až do lomu. Silová kapacita stroje je do 250 [kN]. Upnutý vzorek do stroje je vidět na Obrázku 41.



Obrázek 41 - Zkouška tahem (upnutí zkušebního vzorku)

4.5.2 Výsledky zkoušky tahem

Cílem tahové zkoušky bylo ověřit hodnoty tištěných vzorků z nového prášku a vytištěných vzorků z Disertační práce [1], kde byl použit přesěvaný prášek. U obou druhů vzorků bylo použito rozpouštěcí žíhání bez chemického zpracování. U obou vzorků byl použit také stejný směr nanášení prášku v ose X s tím, že vzorky byly vytištěny vždy v jedné várce. Oba druhy vzorků byly dále obrobeny pro správné rozměry zkoušeného tělesa dle výkresu v Příloze 2.

V Tabulce 4 je vidět, že hodnoty smluvní meze kluzu jsou si velice podobné. Vzorek č. 2 a č. 3 mají stejné hodnoty a vzorek č. 1 se celkově liší o 5 [MPa]. Celkové hodnoty u konvenčního materiálu i přesetého prášku jsou vyšší než u prášku nového, a to cca o 100 [MPa]. Také v porovnání s hodnotami výrobce prášku byly všechny výsledky pod minimální hranicí 950 [MPa].

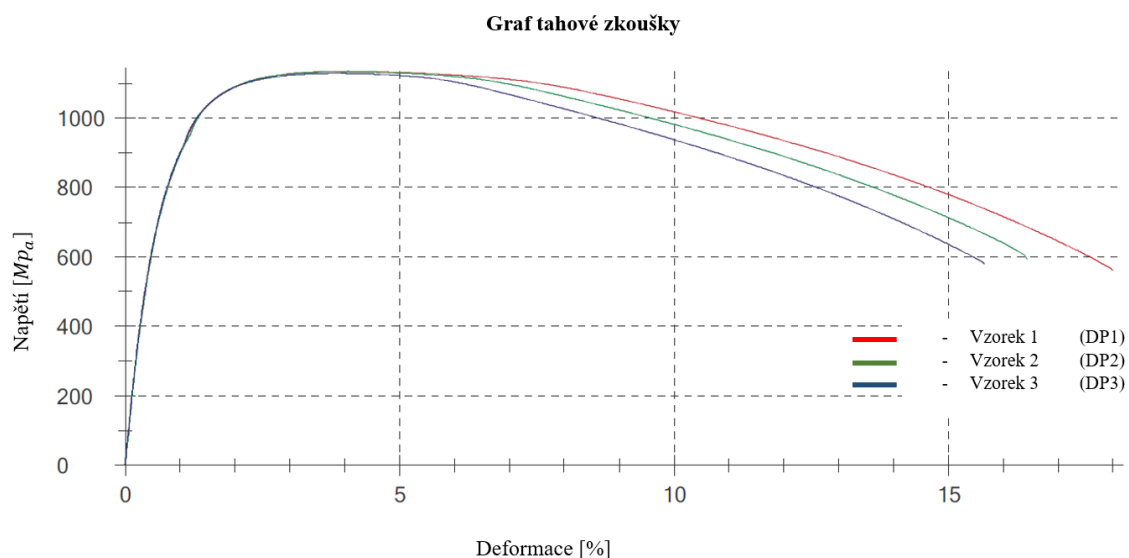
Modul pružnosti v tahu se u všech vzorků pohyboval v rozmezí 153 ÷ 169 [GPa]. S konvenčními hodnotami je modul velice podobný pro nový i přesetý prášek a výsledky jsou v rozmezí, které udává výrobce prášku. Z výsledků pro vzorky vyrobené z nového prášku, z přesěvaného prášku a hodnoty, které udává výrobce prášku je patrné, že hodnoty meze pevnosti u nového prášku v porovnání s hodnotami udávanými výrobcem jsou

v nižších hodnotách, kde spodní hodnota udávaná výrobcem prášku ve směru X je 1100 [MPa]. Mez pevnosti u konvenčního materiálu je dle tabulek 1030 [MPa] a u vzorků testovaných v Disertační práci [1] to je 1030 [MPa] a 1060 [MPa]. V porovnání s hodnotami vzorků z nového prášku a konvenčními vzorky lze říci, že si hodnoty odpovídají a liší se jen minimálně. Porovnáním nového prášku s přesévaným práškem jsou hodnoty podobné, kde největší rozdíl v hodnotách je u vzorku č. 3, a to o 21 [MPa]. Tyto hodnoty neodpovídají tvrzení, že výtisky z nového prášku by měly dosahovat lepších vlastností než u prášku přesévaného. Všechny hodnoty meze pevnosti, které jsou určeny pro vzorky vytištěné z prášku dle výrobce, splňují dané parametry, avšak záleží na zadání směrnice křivky pro provedení tahové zkoušky, která může ovlivnit výsledná data.

Tabulka 4 - Výsledky tahové zkoušky pro nový a přesetý prášek materiálu MS1

ZKOUŠKA TAHEM - NOVÝ PŘÁŠEK						
ČÍSLO VZORKU	OZNAČENÍ	d0 [mm]	E [Gpa]	Rp 0,2 [Mpa]	Rm [Mpa]	A [%]
1	DP-1	4	153	731	1134	17,1
2	DP-2	4	165	736	1134	16
3	DP-3	4	169	736	1129	15,3
ZKOUŠKA TAHEM - PŘESETÝ PŘÁŠEK						
ČÍSLO VZORKU	OZNAČENÍ	d0 [mm]	E [Gpa]	Rp 0,2 [Mpa]	Rm [Mpa]	A [%]
-	Výrobce 3D tisk - směr X,Y	4	160 ± 30	1050 ± 100	1200 ± 100	13 ± 4
-	Výrobce 3D tisk - směr Z	4	150 ± 30	870 ± 100	1100 ± 100	12 ± 4
-	Konvenční 1.2709 dle tabulek	4	180	950	1030	min. 12
34-4	Konvenční_1	4	146	823	1030	16,4
35-4	Konvenční_2	4	144	818	1160	16,6
6-4	0_X_1	4	165	829	1140	14,8
7-4	0_X_2	4	157	811	1150	16,4

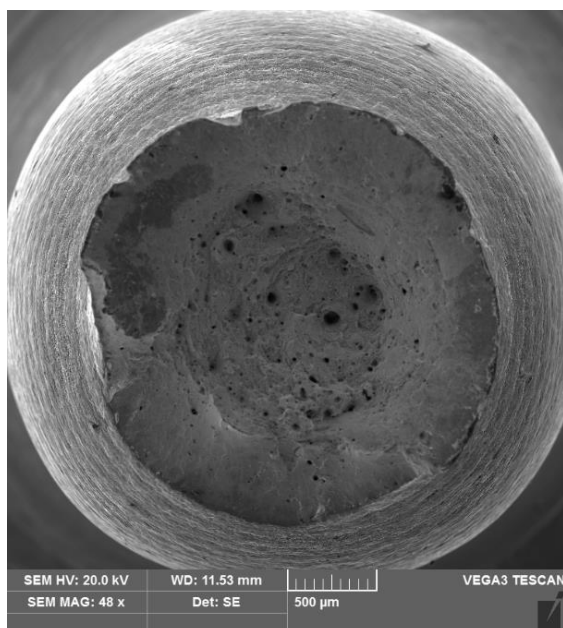
Na Obrázku 42 je výsledný graf z tahové zkoušky vzorků vytisknutých z nového prášku. Celkově lze z grafu vidět, že počátek zatěžování zkušebních vzorků byl až do meze kluzu velmi podobný. Hodnoty vyplývající z tahové zkoušky jsou si velice podobné a nevykazují významné odchylky mezi jednotlivými zkoušenými materiály.



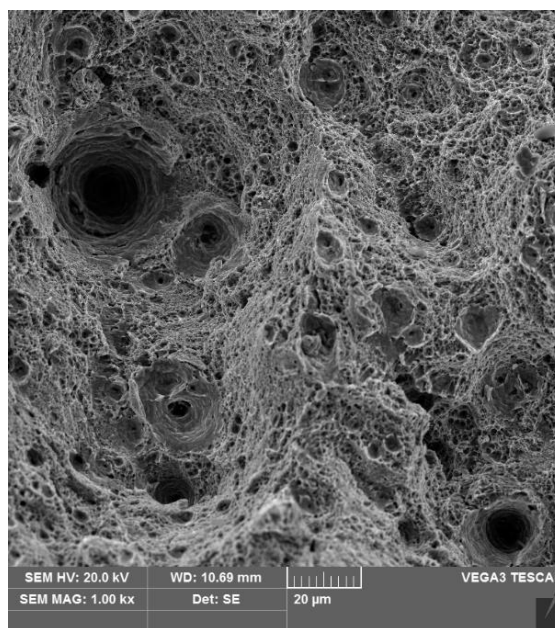
Obrázek 42 - Průběh tahové zkoušky pro nový prášek MS1

4.5.3 Fraktografie lomových ploch u vzorků z nového prášku

Fraktografická analýza lomu byla provedena na zkušebním vzorku č. 2. Z interní zprávy bylo zjištěno, že se jedná o kališkový lom, který je pro tištěnou ocel MS1 typický. K iniciaci poškození dochází v centrální oblasti lomové plochy (tj. na dně kališku). Lom je tvárný s jamkovou morfologií, která je dobře patrná na detailu z centrální oblasti. Na lomové ploše jsou jamky různých velikostí, na dně některých větších jamek jsou vidět zbytky hrubších částic nebo vměstků, velmi často se jedná o oxidy Ti nebo Fe. Detail lomové plochy je na Obrázku 43 a na Obrázku 44.



Obrázek 43 - Přehledový snímek lomové plochy vzorku 2 po zkoušce tahem



Obrázek 44 - Detail centrální oblasti, ve které došlo k iniciaci poškození

4.5.4 Zkouška rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu byla provedena na pěti vytištěných vzorcích s hlavním směrem nanášení prášku v ose X. Zkušební vzorky byly vytištěny dle výkresu pro zkušební tyče podle ČSN ISO 148-1, která je v Příloze 3. Základní rozměry zkušební tyče jsou 10 x 10 x 55 [mm]. Na tyči je uprostřed vrub tvaru V s hloubkou 2 [mm]. Vzorky byly vytištěny a následně mechanicky opracovány s vytvořením daného vrubu a hladkého povrchu vzorku. Zkušební vzorky nesmí mít viditelné povrchové vady, které by mohly ovlivnit zkoušku. Na vytištěných vzorcích nebyly tyto vady nalezeny. Vyrobená zkušební tělesa jsou na Obrázku 45.



Obrázek 45 - Zkušební tělesa pro zkoušku rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu byla provedena na ZWICK ROELL RKP 450 s nárazovou rychlostí 5,23 [m/s] a za pokojové, tedy normální, teploty, která je označována normou ČSN 0381. Po kontrole zkušebních vzorků zaměřených na vrub a kontrole povrchu byly vzorky proměřeny a ustaveny do zkušebního stroje. Dále byla provedena zkouška, u které došlo k přeražení všech vzorků pomocí volně padajícího kyvadlového kladiva. Zkoušky byly provedeny jako instrumentované. Uložený vzorek ve stroji je vidět na Obrázku 46.



Obrázek 46 - Uložený vzorek pro zkoušku rázem v ohybu

V Tabulce 5 jsou naměřené hodnoty provedené zkoušky. Všechna tělesa byla přeražena bez komplikací a v místě vrubu. Z výsledků provedené zkoušky je vidět, že celková nárazová práce u všech těles se pohybovala v rozmezí 86 – 105,29 [J], kde nejnižší hodnota byla u vzorku č.1 a nejvyšší nárazová práce byla u vzorku č. 5. U vzorku č. 3 a vzorku č. 4 byla naměřena hodnota velice podobná, liší se o 1 [J]. Vzorek č. 1 a č. 2 vykazují také podobné, a to 86 [J]. Přesetý i nový prášek v porovnání s konvenčním materiálem, který se pohybuje v průměru okolo hodnoty 227 [J], jsou v průměru o 40 [%] horší než konvenční materiál.

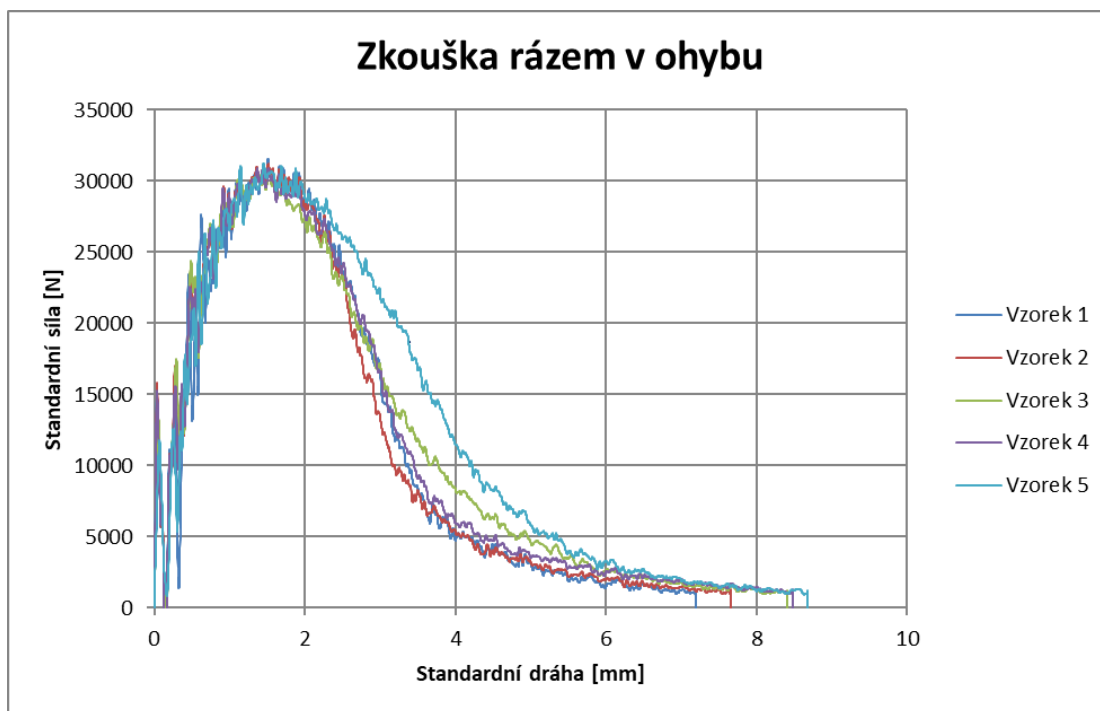
Hodnoty vrubové houževnatosti (KC) jsou u vzorků č. 1 a č. 2 podobné a jejich hodnoty jsou 107 [J.cm²]. Hodnoty vzorků č. 3 až č. 5 vykazují lepší vrubovou houževnatost, která se pohybuje od 117 do 131 [J.cm²], nejvyšší hodnotu vykazuje vzorek č. 5. U konvenčního materiálu se hodnoty vrubové houževnatosti pohybují od 255,4 do 314,4 [J.cm²].

V porovnání s hodnotami naměřenými u přasetého prášku, které jsou také v Tabulce 5, je vidět, že celková nárazová práce je u nového prášku v průměru vyšší. Nejvyšší hodnota 105,29 [J] je u nového prášku a u přasetého prášku 112,95 [J]. Tak si lze všimnout, že hodnoty u nového prášku se pohybují stabilně okolo 90 [J] bez výrazného rozptylu, až na vzorek č. 5. U přasetého prášku si lze všimnout velkých skoků jednotlivých výsledků nárazové práce, což by mohlo být způsobeno znečištěním přasetého prášku či změnou velikosti jednotlivých částic. Díky těmto výsledkům by bylo možné říci, že použitím nového prášku lze dosáhnout lepších výsledků u mechanické zkoušky rázem v ohybu. Avšak toto tvrzení se nepodařilo potvrdit u zkoušky tahem, tudíž by bylo vhodné tato tvrzení dále testovat.

Tabulka 5 - Výsledné hodnoty ze zkoušky rázem v ohybu pro nový prášek MS1 a hodnoty pro přasetý prášek

Ráz v ohybu- Nový prášek					
ČÍSLO VZORKU	TYP VRUBU	HLOUBKA VRUBU [mm]	PRŮŘEZ V MÍSTĚ VRUBU (S0) [cm ²]	CELKOVÁ NÁRAZOVÁ PRÁCE [J]	VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST [J . Cm ²]
1	V	2,0	0,8	85,99	107,49
2	V	2,0	0,8	86,08	107,60
3	V	2,0	0,8	93,90	117,38
4	V	2,0	0,8	92,74	115,93
5	V	2,0	0,8	105,29	131,61
Ráz v ohybu- Přasetý prášek / konvenční materiál					
ČÍSLO VZORKU	TYP VRUBU	HLOUBKA VRUBU [mm]	PRŮŘEZ V MÍSTĚ VRUBU (S0) [cm ²]	CELKOVÁ NÁRAZOVÁ PRÁCE [J]	VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST [J . Cm ²]
1	V	2,0	0,8	86,08	107,60
2	V	2,0	0,8	48,64	60,80
3	V	2,0	0,8	112,95	141,19
4	V	2,0	0,8	76,05	95,06
KŽ-1	V	2,0	0,8	224,32	280,40
KŽ-2	V	2,0	0,8	204,31	255,39
KŽ-3	V	2,0	0,8	251,55	314,44

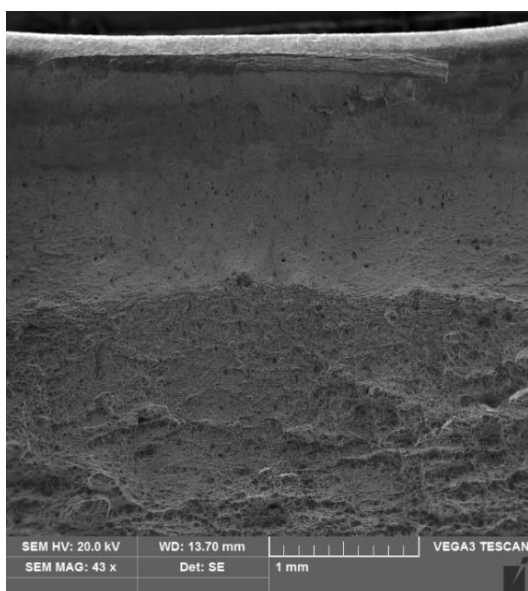
Na Obrázku 47 je graf zobrazující jednotlivé křivky průběhu zkoušky rázem v ohybu v závislosti síly na dráze šíření trhliny. Z grafu lze vyčíst, že tvar jednotlivých křivek je stejnorodý a u všech vzorků vyznačují křivky specifický tvar, ze kterého lze vyvodit, že došlo ke stabilnímu šíření trhliny ve všech případech. Dále lze určit maximální zatěžovací sílu, která se pohybovala okolo 30 [kN].



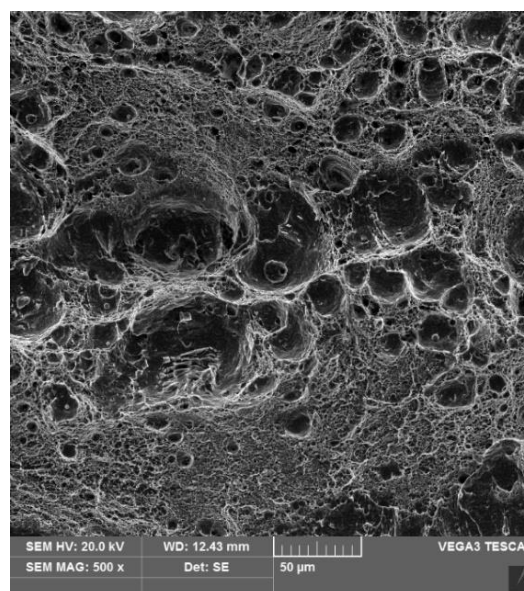
Obrázek 47 - Výsledný graf ze zkoušky rázem v ohybu pro vzorky z nového prášku MS1

4.5.5 Fraktografie lomu pro vzorek ze zkoušky rázem v ohybu

Pro fraktografickou analýzu lomu byl vybrán vzorek č. 5. Z interní zprávy bylo zjištěno, že celkový charakter lomu je houževnatý s dobře patrnými oblastmi smykového dolomení na okrajích. Lomová plocha odpovídá předchozím lomům po zkoušce rázem v ohybu tištěné oceli MS1. Lomové plochy vzorku č. 5 jsou vyobrazeny na Obrázku 48 a Obrázku 49.



Obrázek 48 - Přehledový snímek lomové plochy po zkoušce rázem v ohybu s vrubem nahore



Obrázek 49 - Detail středové oblasti lomové plochy s tvárným lomem s jamkovou morfologií

4.5.6 Cyklická únavová zkouška

Cyklická únavová zkouška byla provedena na dvanácti zkušebních vzorcích. Vzorky byly vytisknuty ve stejném směru nanášeného prášku v ose X společně s ostatními vzorky. V Příloze 3 je podrobný výkres vzorku, který byl po vytisknutí obroběn, aby povrch vzorků dosahoval potřebné drsnosti. Pro zkoušku se stanovily čtyři stupně zatěžování, aby byly výsledky více přehledné a porovnatelné. Po zjištění maximálního napětí u vzorků ze zkoušky tahem, se pro vzorky zkoušené na cyklickou únavu určí zatěžovací hladiny, které jsou zvoleny od 800 do 500 [MPa] vždy po třech kusech na každé hladině. Cílem této zkoušky bylo zjistit data o šikmé SN křivce se zatěžovacím cyklem $R=0$ vyjadřující sinusový průběh na stroji Inova FU 250 s maximální zatěžovací silou 250 [kN] při stálé frekvenci 15 [kHz] v hladkých upínacích čelistech.

Před zahájením zkoušky byly vzorky důkladně vizuálně prohlédnuty a proměřeny, aby nedošlo k ovlivnění výsledků. Následně proběhlo upnutí vzorku do čelistí a byl vystředěn tak, aby byl v jedné ose se strojem. Dále byly zadány požadované parametry řídicího programu a byla spuštěna zkouška. První tři vzorky byly zatěžovány nejvyšší zvolenou hladinou 800 [MPa]. Zkouška trvala tak dlouho, dokud nedošlo k lomu vzorku nebo dokud nebylo dosaženo potřebného počtu cyklů. Poté následovaly zkoušky pro ostatní hladiny, které byly nastaveny na 700 [MPa], 600 [MPa] a 500 [MPa]. Stroj s upnutým vzorkem je zachycen na Obrázku 50.



Obrázek 50 - Zkušební stroj Inova FU 250

Výstupem této zkoušky by mělo být prozkoumání části Wöhlerovy křivky tzv. SN křivky s určením maximálního počtu cyklů zatěžovaného vzorku do jeho porušení. Pro vyhodnocení dat byla použita norma ČSN ISO 12107 Kovové materiály – Zkoušení únavy – Statické plánování a analýza údajů. Matematické popsání tvaru křivky je znázorněno níže.

Střední SN křivka s tvarem:[23]

$$\hat{Y}_i = q - mX_i,$$

Kde \hat{Y}_i je predikovaná hodnota závislé proměnné $X_i = \log \sigma_i$ a $Y_i = \log N$. Číslo vzorku i nabývá hodnot $i = 1, \dots, n$, kde n je počet vzorků. Jedná se o proložení experimentálně zjištěných bodů přímkou s minimálním rozptylem

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n-2}.$$

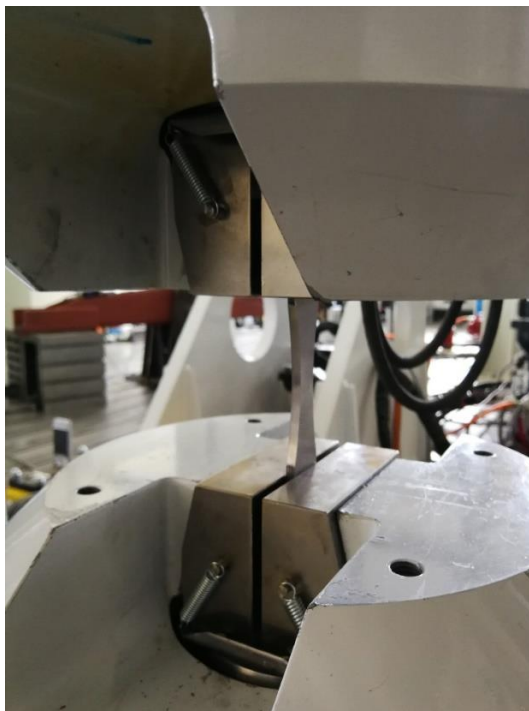
Vztahy pro získání q a m jsou:

$$m = - \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{\sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n}}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n}},$$

$$q = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - b_1 \sum_{i=1}^n X_i}{n}.$$

Dosazením vypočtených parametrů q a m do rovnice $\hat{Y}_i = q - mX_i$ je získána rovnice pro střední SN křivku, která odpovídá 50% pravděpodobnosti porušení. Parametr m vyjadřuje sklon SN křivky, jedná se o podstatnou materiálovou charakteristiku.

Během zkoušky nedošlo k poruše vzorku mimo zkoušenou oblast, nedošlo také k vytržení vzorků z čelistí, proto jsou všechny výsledky všech vzorků platné a porovnatelné s výsledky uvedenými v Disertační práci [1]. Upnutý zkušební vzorek ve stroji je vyfocen na Obrázku 51.



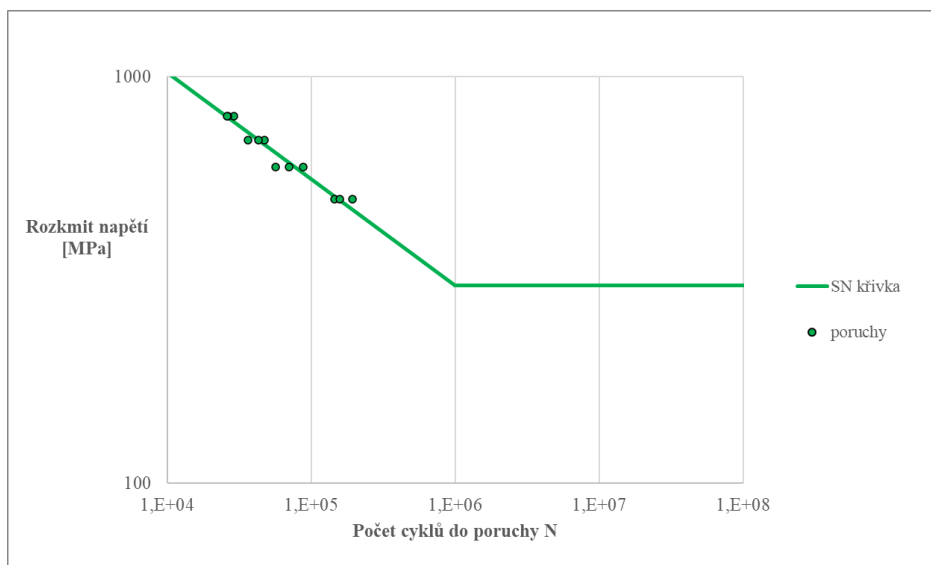
Obrázek 51 - Upnutý zkušební vzorek pro cyklickou únavovou zkoušku materiálu MS1

Výsledky zkoušky jsou shrnuty v Tabulce 6. V tabulce je znázorněno, že se vzrůstajícími hladinami počet cyklů lineárně klesá. Rozdíly v počtu cyklů v jedné hladině nejsou stabilní a hodnoty jsou odlišné. Pro hladinu s napětím 500 [MPa] se počet cyklů do porušení vzorku pohyboval mezi 145 895 a 192 713, což je rozdíl o cca 46 000 cyklů. V ostatních hladinách jsou tyto rozdíly podobné, avšak největší rozdíly v počtu dosažených cyklů jsou právě v hladině s napětím 500 [MPa]. Tyto výsledky potvrzují, že dynamické zatěžování těles vytištěných z kovového prášku nejsou stabilní a že lepší výsledky dosahují při statickém zatěžování.

Tabulka 6 - Výsledky cyklické únavové zkoušky pro nový prášek materiálu MS1

CYKlická ÚNAVOVÁ ZKOUŠKA - NOVÝ PRÁŠEK					
ČÍSLO VZORKU	PARAMETR ASYMETRIE - R	σ_a [MPa]	SÍLA [K_N]	N_f	f [Hz]
1	0	500	18,3	1,93E+05	15
2	0	500	18,3	1,58E+05	15
3	0	500	18,3	1,46E+05	15
4	0	600	22,0	5,65E+04	15
5	0	600	22,0	8,82E+04	15
6	0	600	22,0	7,05E+04	15
7	0	700	25,6	4,29E+04	15
8	0	700	25,6	3,63E+04	15
9	0	700	25,6	4,73E+04	15
10	0	800	29,3	2,61E+04	15
11	0	800	29,3	2,63E+04	15
12	0	800	29,3	2,92E+04	15

Na Obrázku 52 vidíme tvar SN křivky v závislosti rozkmitu napětí na počtu cyklů do poruchy vzorku. Pro vzorky tištěné z nového prášku při počtu cyklů 10^6 a frekvenci 15 [Hz] má smluvní mez únavy hodnotu 306 [MPa]. V Tabulce 7 jsou hodnoty smluvní meze únavy pro 10^6 cyklů a životnost rozkmitu napětí pro hladinu 500 [MPa]. Pro tyto hodnoty jsou zde znázorněny výsledky pro konvenční materiál, pro přeseťovaný prášek a pro nový prášek. Konvenční materiál dosahuje nejlepších výsledků. Smluvní mez únavy je 480 [MPa] při životnosti 731 848 cyklů. Přeseťovaný prášek se pohybuje v hodnotách, kde smluvní mez únavy dosahuje 291 [MPa] při životnosti, která je nižší než u konvenčního materiálu s hodnotou 119 587 cyklů. U vzorků z nového prášku se hodnota přiblížila k přeseťovanému prášku. Smluvní mez únavy je 306 [MPa] s životností 496 352 cyklů. Zajímavým výsledkem je, že u nového a přeseťovaného prášku je mez únavy rozdílná o 7 [MPa], ale životnost je rozdílná o 376 765 cyklů, což je markantní rozdíl.



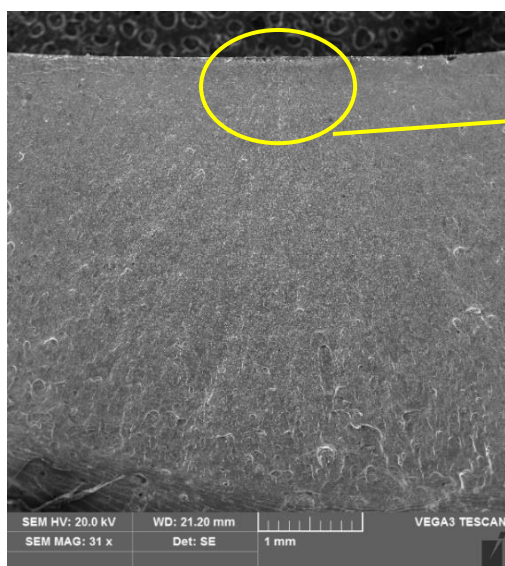
Obrázek 52 - SN křivka pro nový prášek materiálu MS1

Tabulka 7 - Rozdíl v únavové životnosti a pevnosti

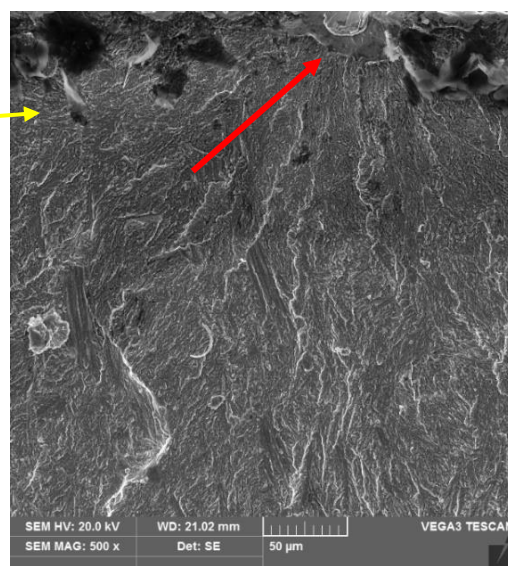
CYKlická Únavová Zkouška - PŘESETÝ PRÁŠEK A KONVENČNÍ MATERIÁL	Konvenční materiál	3D tisk v ose X - nový prášek	3D tisk v ose X - přeseťý prášek
Smluvní mez únavy pro 10^6 cyklů	480 MPa	306 MPa	291 MPa
Životnost pro rozkmit napětí 500 MPa	731 848 cyklů	496 352 cyklů	119 587 cyklů

4.5.7 Fraktografie lomu pro vzorky z cyklické únavové zkoušky

Pro fraktografickou analýzu byly vybrány vzorky č. 1 a č. 12, které zastupují nejnižší a nejvyšší hladinu napětí, která byla při mechanické zkoušce použita. Oblast iniciace únavového lomu pro vzorek č. 1 je znázorněna na Obrázku 53 a na Obrázku 54.

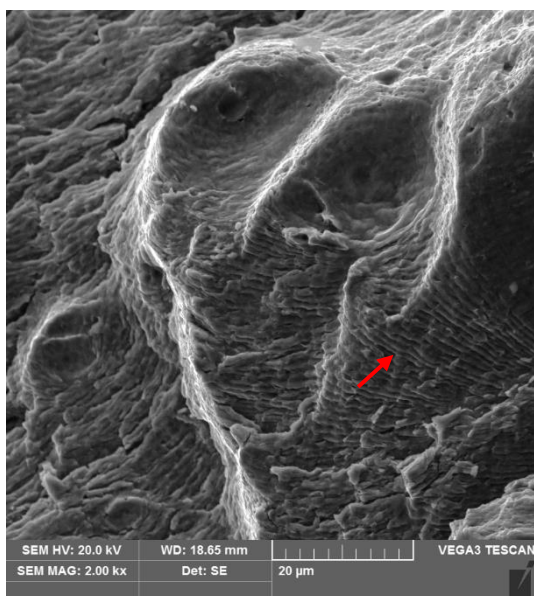


Obrázek 53 - Přehledový snímek oblastí iniciace únavového lomu (iniciace nahoře uprostřed) – vzorek 1

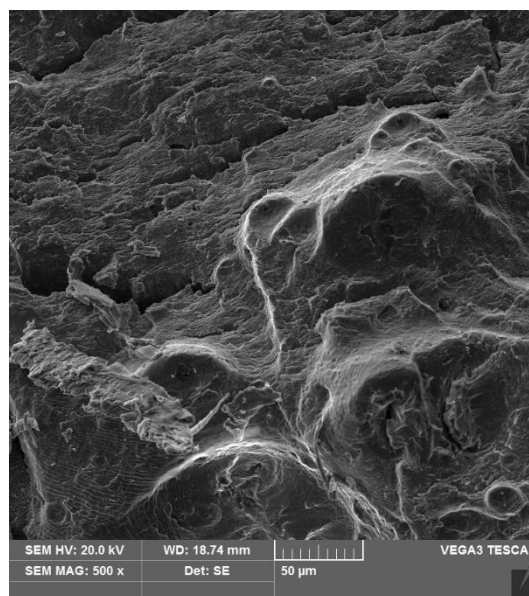


Obrázek 54 - Detail z oblasti iniciace lomu – vzorek 1

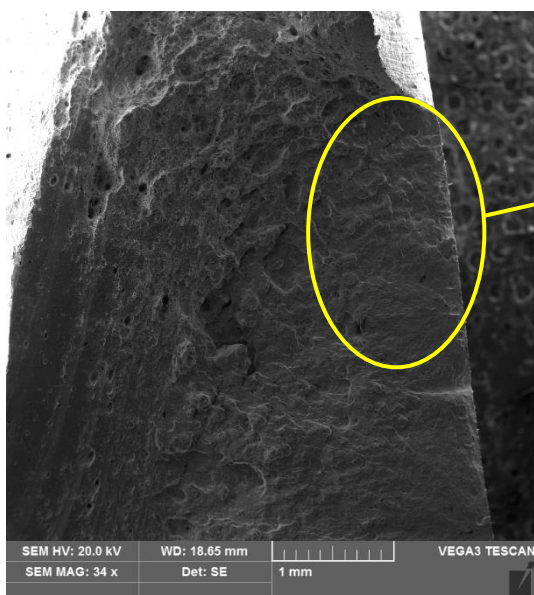
Z interní zprávy bylo zjištěno, že lomová plocha vzorku č. 1 vykazovala oblasti odpovídající jednotlivým stádiím únavového porušení. Iniciace únavového lomu byla na povrchu vzorku a oblast postupného šíření únavové trhliny zaujímalu většinu lomové plochy viditelné na Obrázku 53 a Obrázku 54. Pouze v okrajové části vzorku byla patrná oblast dolomení. Charakter lomové plochy odpovídá předchozím únavovým lomům tiskové oceli MS1. V oblasti šíření únavové trhliny jsou viditelné striace (postupové čáry šíření únavového lomu), můžeme vidět na Obrázku 55. Přechod z oblasti šíření únavového lomu s oblastí dolomení je znázorněn na Obrázku 56.



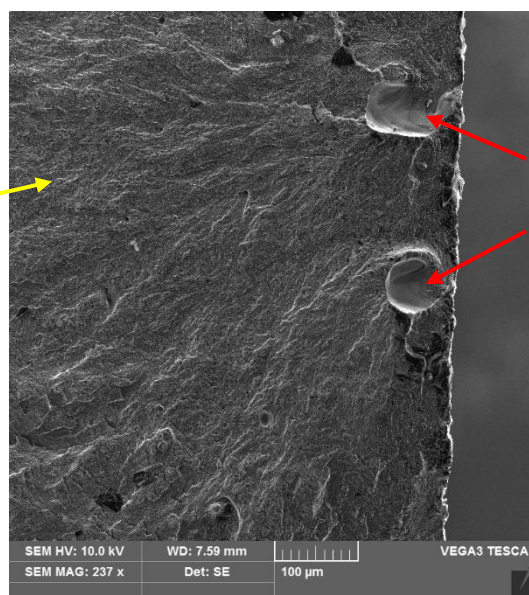
Obrázek 55 - Oblast šíření únavové trhliny – vzorek 1



Obrázek 56 - Přechod z oblasti šíření únavového lomu do oblasti dolomení – vzorek 1



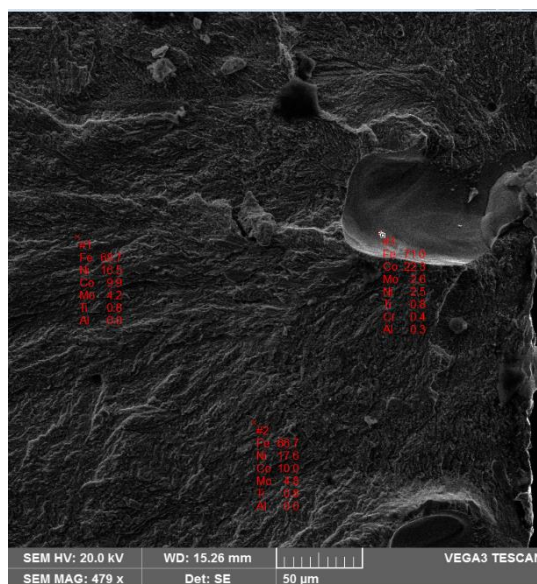
Obrázek 57 - Přehledový snímek oblasti iniciace únavového lomu – vzorek 12



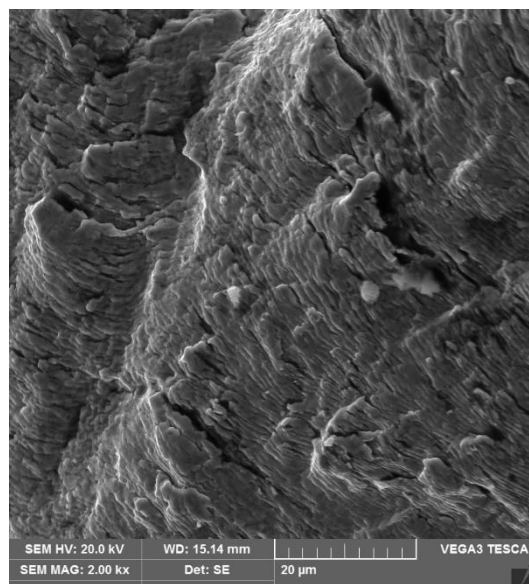
Obrázek 58 - Detail z oblasti iniciace únavového lomu (iniciace na pod-povrchových mat. vadách) – vzorek 12

Z interní zprávy bylo zjištěno, že lomová plocha vzorku č. 12 zobrazená na Obrázku 57 a Obrázku 58 odpovídala v makroskopickém pohledu předchozím únavovým lomům tištěné oceli MS1. Oblast šíření únavového lomu byla menší než u vzorku č. 1, ale stále dobře patrná. Již při menších zvětšeních optického mikroskopu byly viditelné velké pravidelné útvary v povrchové oblasti iniciace lomu.

Z detailů pořízení na SEM je patrné, že se jedná o poměrně velké materiálové vady přímo spojené s okolním materiálem (tj. nedostaly se na lom dodatečně jako nečistota po přetržení vzorků). Tyto vady jsou viditelné na Obrázku 59 a na Obrázku 60. Na jejich povrchu není patrná žádná struktura a jejich chemické složení (viz EDS analýza) odpovídá oceli MS1 se zvýšeným obsahem Fe a Co. Tento typ vad nebyl zatím v tištěné oceli MS1 detekován. Nejedná se o klasické tiskové vady typu oxidů Ti nebo Fe, neodpovídají jim tvarem ani chemickým složením. Nejedná se ani o zrna neroztaveného prášku, která jsou občas v tištěných kovech pozorována, ale která jsou pravidelného sférického tvaru a na jejich povrchu je patrná dendritická struktura.



Obrázek 59 - Bodové chemické složení měřené metodou EDS (2x matrice, 1x vada) – vzorek 12



Obrázek 60 - Oblast šíření únavového lomu – striace – vzorek 12

5 ZHODNOCENÍ

V první řadě byl prozkoumán vstupní prášek pro tisk vzorků. Nový prášek byl porovnán s přesévaným práškem, kde byl hodnocen tvar, struktura, velikost částic a chemické složení. Po porovnání byly provedeny tři základní mechanické zkoušky na vytištěných tělesech z kovového prášku MS1 stejně tak jako u těles z několikanásobně přesévaného prášku ze stejného materiálu a se stejným směrem nanášením prášku v ose X. Provedením stejného postupu při výrobě těles a při zkouškách byla zajištěna validita výsledků. Po provedení zkoušek byl zkoumán lom u vybraných vzorků a následně byl porovnán s lomy vzorků vyrobených z přesévaného prášku.

Zkoumáním vstupního materiálu bylo zjištěno, že vnitřní struktura ani tvar jednotlivých částic u obou porovnávaných prášků nejsou rozdílné. Rozdíl byl zjištěn v povrchové struktuře částic, kde u přesévaného prášku vlivem procesu jsou vytvářeny částice s odlišnou povrchovou strukturou nazývanou „sloní kůže“. Tato povrchová struktura obsahuje vyšší procento Ni a Mo. Tyto prvky mají odlišnou teplotu tavení než ostatní částice a dochází tak k nedokonalému roztavení částice, která je zapečena do vytištěné součásti. To může způsobovat problém při mechanických zkouškách, kde ve většině případů je zkoušený vzorek porušen právě v místě, kde se daná částice vyskytuje.

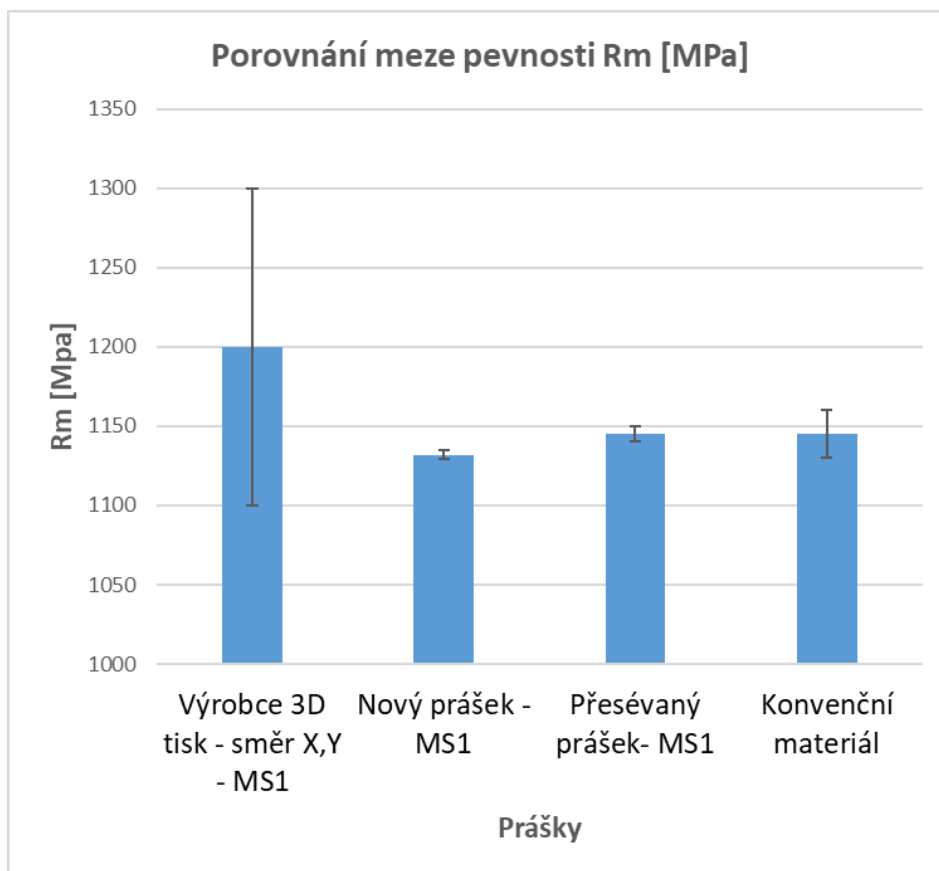
Zjištěné rozdíly byly zaznamenány u velikosti jednotlivých částic, kde u přesévaného prášku bylo o poznání větší procento částic větších než 80 [μm]. Naopak u obou prášků byly objeveny částice o velikostech menších než 10 [μm], které by se dle výrobce prášku neměly vůbec vyskytovat. Důvodem výskytu takto malých částic v prášku může být použití dané metody (laserové difrakce) při měření velikosti částic. Při této metodě jsou takto malé částice obtížně zjištělné. V Disertační práci [1] bylo zjištěno, že se v balení prášku vyskytuje 10 – 15 [%] částic o velikosti pod 10 [μm]. Tyto částice mohou výrazně ovlivnit tzv. průtok prášku a tím i samotnou kvalitu tisku.

5.1 Sumarizace naměřených hodnot z tahové zkoušky

Tahová zkouška proběhla dle ISO 6892-1:2009 za pokojové teploty a na Obrázku 61 je výsledné porovnání hodnot meze pevnosti pro konvenční materiál, pro nový prášek a pro přesévaný prášek. Ve výsledném zhodnocení je zanesen rozptyl naměřených hodnot. Nejmenší rozptyl hodnot v měření je u nového prášku. Jak je vidět v grafu, hodnoty, které výrobce udává, jsou ve velkém rozptylu a lze říci, že pokud zkušební tělesa nebudou obsahovat nějaké vnitřní vady, pak je velká pravděpodobnost, že se do tohoto rozptylu vejdou. Pro lepší výstup a zhodnocení hodnot ze zkoušky je tedy vhodnější porovnání s tělesy odzkoušenými z výzkumů. Tyto výsledky jsou překvapující tím, že nový prášek dosahuje hodnot menších, než je tomu u prášku přesévaného a u konvenčního materiálu. To odporuje tvrzením, že nový prášek by měl dosahovat lepších hodnot, než jakých je dosaženo u přesévaného prášku. Hodnoty pro přesévaný prášek a pro konvenční materiál byly získány z práce [1] a jejich rozptyl je větší než u nového prášku. Zvláště u konvenčního materiálu dosahují spodní hodnoty na úroveň průměrné hodnoty meze pevnosti u nového prášku, což lze považovat za dobrý výsledek. Ostatní hodnoty zjištěné ze zkoušky tahem jako modul pružnosti v tahu, smluvní mez kluzu a tažnost jsou mezi jednotlivými materiály srovnatelné. Liší se v řádech jednotek a splňují udávané hodnoty, které udává výrobce.

Možností pro zdůvodnění výsledku, že přesěvaný prášek dosahuje lepších hodnot než nový prášek, může být důvod faktoru chybovosti v samotném procesu přípravy tisku či zpracování vzorků před mechanickými zkouškami. Mezi tyto faktory zejména patří příprava prášku do zásobníku stroje tak, aby prášek obsahoval stejný poměr velikosti jednotlivých částic a docházelo k rovnoměrnému nanášení stejného množství prášku jedné vrstvy na pracovní platformu. Jak bylo dříve vyzkoumáno v práci [1], při převozu a manipulaci s barely s práškem dochází ke sklepávání menších částic do spodních hladin barelů, a tím dochází k nerovnoměrnému rozložení částic v prášku, který je nasypáván do zásobníku stroje. Řešením tohoto problému by byla možná standardizace postupu pro zpracování vstupního materiálu a standardizace samotného procesu tisku tak, aby nedocházelo k následné chybovosti výstupů. Jak bylo psáno v dřívějších kapitolách, tak AM proces je teprve v začátcích objevování správných postupů a návyků pro zaručení kvality výstupů s minimální chybovostí způsobenou lidským faktorem. Ten může zapříčínovat také další chyby vznikající během tepelného a mechanického zpracování vytištěných součástí.

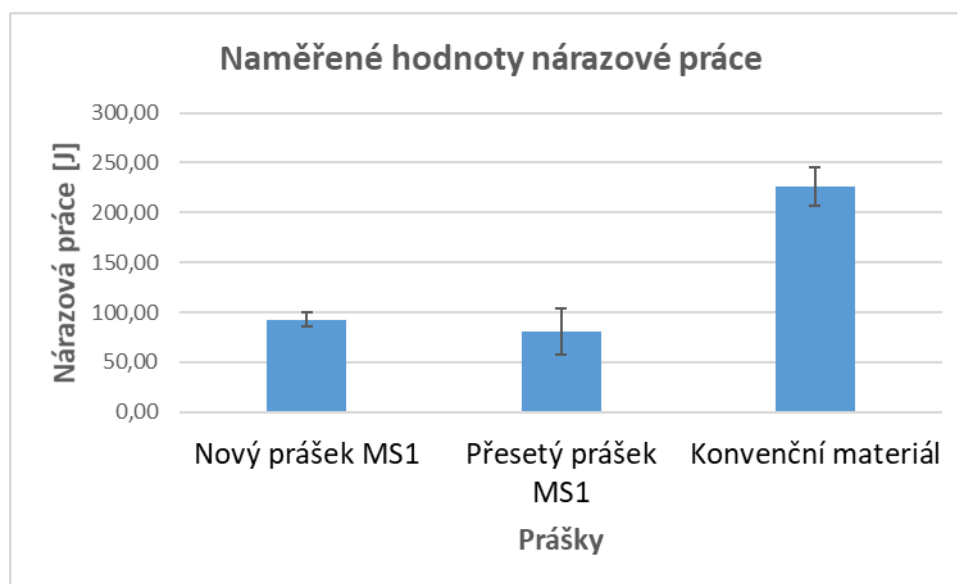
Jako další faktor, který má vliv na rozdíl hodnot, lze také uvést způsob měření při mechanické zkoušce. Všechna tělesa byla zkoušena na stejném stroji za použití stejného softwaru. Avšak mohla být nastavena rozdílná směrnice přímky v elastické části grafu. Přímku lze nastavit třemi způsoby prokládání naměřených bodů. Křivku protínající body lze nastavit jako tečnu, sečnu či regresi. Rozdílné nastavení těchto parametrů by mohlo být důvodem dosažení nižších hodnot u nového prášku oproti prášku přesěvanému. Tudíž by bylo vhodné zkoušku tahem opakovat a zajistit stejné nastavení parametrů softwaru, čímž by se toto tvrzení potvrdilo.



Obrázek 61 - Porovnání meze pevnosti po provedení zkoušky tahem

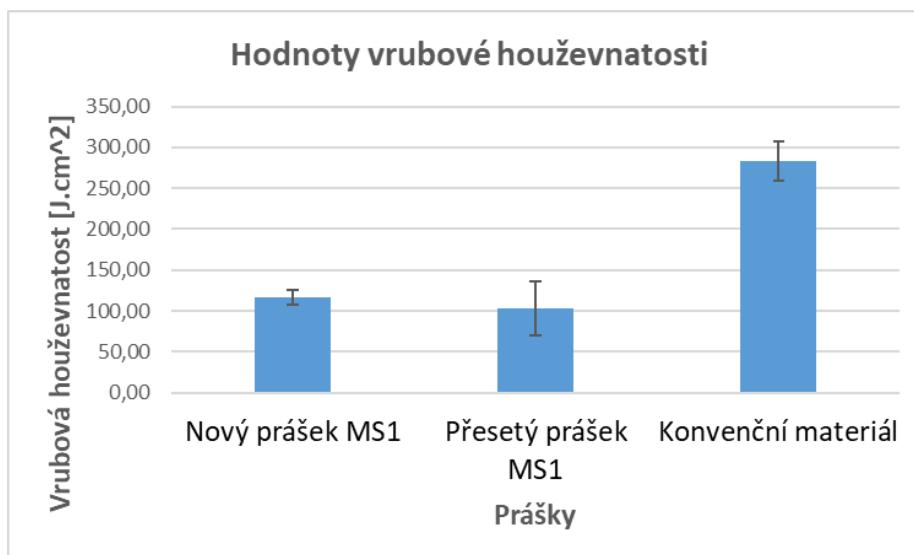
5.2 Sumarizace naměřených hodnot ze zkoušky rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu proběhla na pěti vzorcích za pokojové teploty. Hlavním výstupem zkoušky pro porovnání hodnot mezi novým a přeseťým práškem a konvenčním materiálem byla nárazová práce a vrubová houževnatost. Na Obrázku 62 vidíme graf s porovnávanými hodnotami pro nový prášek, přeseťý prášek a konvenční materiál v závislosti na dosažení potřebné nárazové práce pro přeražení zkušebních vzorků. Z grafu je patrné, že nárazová práce pro nový prášek dosahuje vyšších hodnot než u prášku přeseťovaného. Tyto hodnoty jsou v průměru určeny na 92,8 [J]. Lze také určit nejmenší chybovost výsledků, která je zjištěna u nového prášku, jejíž výsledky se pohybovaly ve velmi malém rozmezí. Jak bylo psáno výše, výsledky, které dosahuje konvenční materiál, jsou až o 40 [%] lepší než u kovových prášků. Z vytvořených výzkumů, které jsou dostupné veřejnosti, nejsou známa fakta, jež by dokazovala podobné výsledky kovových prášků jako jsou u konvenčního materiálu. V odborných člancích je kovový prášek MS1 vyzdvihován zejména v jednoosém statickém namáhání a u dynamických zkoušek jsou výsledky rozporuplné.



Obrázek 62 - Porovnání nárazové práce u nového a u přeseťého prášku

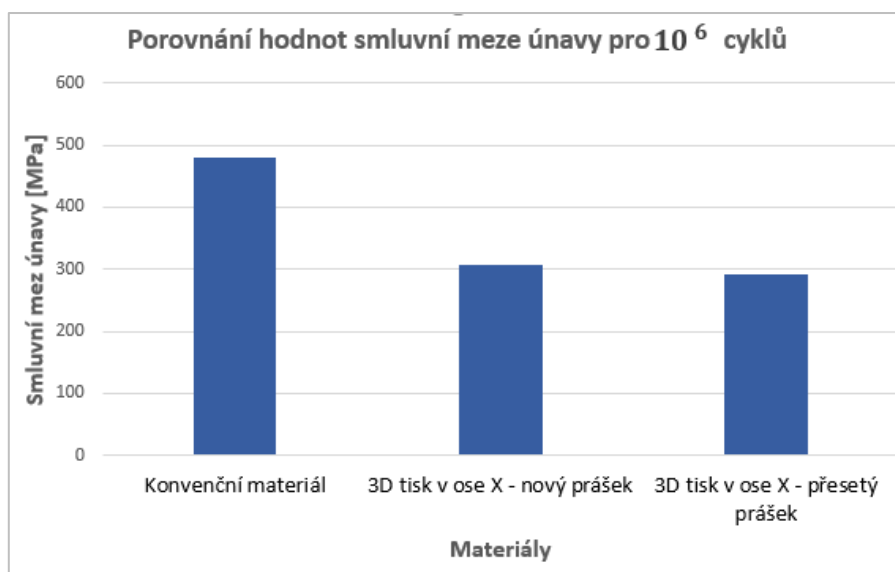
Na Obrázku 63 je graf dosažené vrubové houževnatosti pro oba prášky a pro konvenční materiál. Z grafu vyplývá, že i vrubová houževnatost u nového prášku dosahuje vyšších hodnot než u prášku přeseťovaného. Důvodem lepších výsledků u nového prášku může být vliv procesu tisku zkušebních vzorků či vliv větších částic u prášku přeseťovaného (viz Disertační práce [1]). V návaznosti na graf se podařilo dosáhnout průměrné hodnoty vrubové houževnatosti u nového prášku na 116 [$J \cdot cm^2$]. Tato hodnota je v porovnání s hodnotou u konvenčního materiálu o 167 [$J \cdot cm^2$] menší. Proto je důležité provádět další výzkumy, které by se zaměřily na problém při dynamickém zatěžování těles vytištěných z prášku MS1.



Obrázek 63 - Hodnoty vrubové houževnatosti pro nový a přesévaný prášek

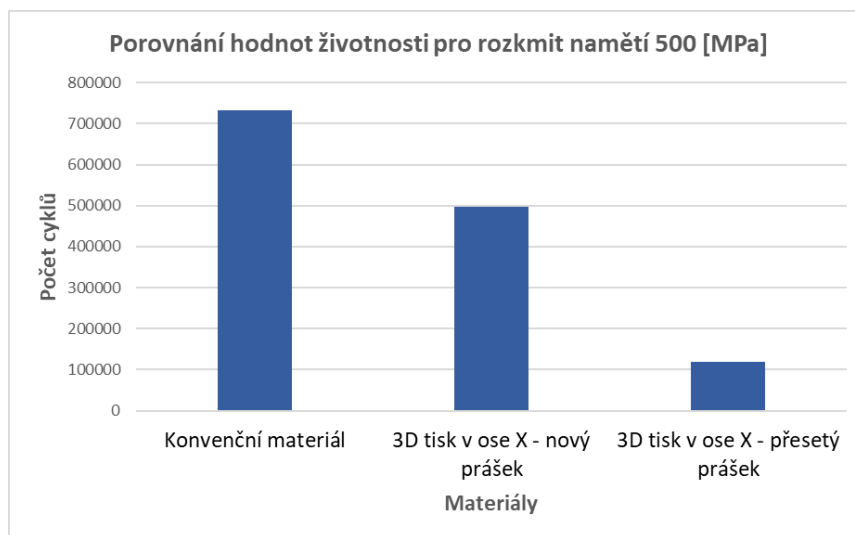
5.3 Sumarizace naměřených hodnot z cyklické únavové zkoušky

Cyklická zkouška proběhla na dvanácti vzorcích, u kterých bylo potřeba prověřit část Wählerovy křivky a získat tak výsledky pro porovnání smluvní meze únavy pro 10^6 cyklů a životnost pro rozkmit napětí 500 [MPa]. Na Obrázku 64 vidíme graf s porovnáním dosažených hodnot. Stejně jako u zkoušky rázem v ohybu zde byly očekávány hodnoty, které nebudou totožné s hodnotami konvenčního materiálu. To se splnilo a smluvní mez kluzu pro nový prášek dosáhla hodnot 306 [MPa], což je o 174 [MPa] méně než u konvenčního materiálu. Lze si všimnout, že u zkoušky rázem v ohybu bylo dosaženo podobného procentuálního rozdílu mezi novým práškem a konvenčním materiálem. Proto ani cyklické zatěžování u materiálu MS1 stále nevychází ideálně tak, aby byly hodnoty srovnatelné, a bylo možné konvenční materiál nahradit. Podařilo se však dosáhnout velmi stabilního výsledku s práškem přesévaným, kde nový prášek dosáhl o 15 [MPa] lepších výsledků. S těmito hodnotami lze říci, že při této mechanické zkoušce jsou výsledky obou prášků velice vyrovnané. Nový prášek dosáhl lepších hodnot, ty však jednoznačně neprokazují markantní zlepšení v dosažení lepší smluvní meze kluzu než u prášku přesetého.



Obrázek 64 - Porovnání smluvní meze únavy pro 10^6 cyklů pro nový a přesetý prášek

Naopak tomu je při zjištění životnosti vzorků pro daný rozkmit napětí 500 [MPa], ze kterého lze určit počet cyklů do lomu daného vzorku. Na Obrázku 65 je graf s těmito hodnotami. U nového prášku se podařilo dosáhnout velice pozitivních výsledků oproti přeseťmu prášku. U nového prášku se projevilo zlepšení o 76 [%] s hodnotou 496 352 cyklů a přeseť prášek dosáhl hodnot 119 587 cyklů. U těchto hodnot lze říci, že nový prášek dosáhl skutečně velkého zlepšení a přiblížil se více ke konvenčnímu materiálu dosahujícímu 731 848 cyklů. Stále je zde velký rozdíl dosahující 235 496 cyklů, což je 32 [%]. Jak bylo psáno výše, je zde velký potenciál k výzkumu vytisknutých částí tak, aby byly hodnoty mechanických zkoušek porovnatelné s konvenčními materiály.



Obrázek 65 - Životnost pro rozkmit napětí 500 [MPa] pro konvenční materiál, nový a přeseť prášek

5.4 Shrnutí mechanických zkoušek

Výsledky dosažených zkoušek jsou věrohodné z hlediska použití stejného prášku MS1 zpracovaného procesem, který byl prováděn stejným způsobem pro nový i přeseťvaný prášek. Bylo použito stejného stroje a velice podobného rozložení zkušebních těles na platformu se zachováním stejného směru nanášení prášku v ose X a se stejnými parametry tisku. U těles došlo ke stejnému tepelnému i mechanickému zpracování před provedením jednotlivých mechanických zkoušek. Mechanické zkoušky byly provedeny dle norem pro všechny zkoušené vzorky vyrobené z nového prášku, přeseťého prášku, ale i pro vzorky vyráběné z konvenčního materiálu. Dále byla provedena u vybraných vzorků fraktografická analýza lomu, se zaměřením na iniciaci lomu u daných vzorků, u kterých nebylo zjištěno výrazné odchylky oproti jiným zkoumaným lomům stejného prášku MS1. Výjimkou byl vzorek č. 12 z cyklické únavové zkoušky, kde byly zjištěny podpovrchové vady, které mohly mít vliv na výsledky zkoušky.

Bylo tedy dosaženo maximálního možného způsobu zachování zpracování vstupního materiálu (nového i přeseťého prášku). Zkušební tělesa byla vytištěna za stejných podmínek tisku s následným tepelným zpracováním, čímž bylo dosaženo objektivních výsledků, které mezi sebou lze porovnávat a hodnotit. I přes zachování dílčích částí procesu mohlo dojít k tzv. lidské chybě, kde mezi jednotlivými procesy zpracování mohlo dojít k nedodržení daného postupu, např. ke špatnému pýchování prášku ve stroji, k nesprávnému tepelnému zpracování vzorků nebo chybě při mechanickém zpracování zkušebních vzorků. Bylo by tedy dobré vytvořit přesně daný postup zpracování vstupního materiálu, který by byl dán např. normou

procesu jako je tomu např. u mechanických zkoušek. Tím by bylo dosaženo výsledků, se kterými by se dalo pracovat a využívat je pro další výzkumy v AM procesu.

Tato diplomová práce se zaměřovala na vlastnosti vstupního materiálu pro vytištěná zkušební tělesa, která byla vytisknuta ve směru nanášení prášku X. Jak uvádí odborné články a výzkumy [1], [10], [12] a [23], vliv nemá pouze vstupní materiál do procesu tisku, ale také samotný tisk, uložení těles na platformu a mnoho dalších faktorů. Dalším přínosem pro zkoumání AM procesu pro kovový prášek MS1 by byla např. standardizace procesu pro tento druh prášku a tím vytvoření postupu pro jeho zpracování a pokusu o zlepšení hodnot mechanických zkoušek zejména v dynamickém a cyklickém zatěžování, kde tento prášek oproti konvenčnímu materiálu dosahuje zhruba 60 [%] hodnot.

6 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo porovnání mechanických vlastností vzorků vytištěných z nového a přisetého prášku MS1 s konvenčně vyráběným materiálem. Na začátku práce byla objasněna výroba prášku a jednotlivé způsoby výroby. Dále byly vysvětleny parametry prášku, podle kterých je jako vstupní materiál pro tisk posuzován. Popsány byly i dopady na samotné výstupy z procesu tisku a jeho další zpracování. Byla zde také objasněna problematika spotřeby vstupního materiálu s ohledem na jeho recyklaci a další opětovné použití s dopadem na životní prostředí, popřípadě i na samotnou likvidaci prášku.

Po objasnění problematiky prášku a jeho vlastností došlo k analýze vstupního prášku pro samotný tisk zkušebních těles. Prášek byl posuzován podle tvaru jednotlivých částic, podle velikosti částic a chemického složení. Proběhlo tedy prozkoumání nového i přisetého prášku a následovalo konečné zhodnocení. Při přezkoumání prášku se zjistilo, že mezi novým a přisetým práškem, až na několik detailů, není příliš markantní rozdíl, a že by tento rozdíl neměl ovlivňovat zkoušky mechanických vlastností vzorků v konečné fázi za předpokladu, že zjištěné specifické částice nebudou zapečeny do zkušebních vzorků a neovlivní tak průběh mechanických zkoušek.

Hlavní kapitolou práce byla výroba a testování zkušebních těles, kde proběhlo vysvětlení samotné technologie procesu tisku v daném stroji s dodržением parametrů tisku a uložení těles na platformu. V práci byl vytvořen návrh pro zmenšení pracovního prostoru stroje, který by přinesl velkou úsporu prášku, a zamezilo by se tím i kontaminaci prášku během tisku. Tyto úpravy by měly přispět do dalšího výzkumu v procesu DMLS a jeho náročnosti z hlediska spotřeby energií, spotřeby prášku a nakládání s odpady s ohledem na životní prostředí. Po vytisknutí zkušebních vzorků proběhlo zhodnocení úspěšnosti a kvality tisku. Následovalo tepelné zpracování vzorků s následným mechanickým opracováním nezbytným pro provedení zkoušek na tělesech. V této kapitole se pokračovalo mechanickými zkouškami, u kterých byl jasně stanovený postup provedení jednotlivých zkoušek. Následovalo celkové zhodnocení dosažených výsledků těles vytištěných z nového prášku a finální porovnání s přisetým práškem a konvenčním materiálem.

U zkoušky tahem bylo pro nový prášek dosaženo menších hodnot, než bylo prokázáno u přisetého prášku. Tento rozdíl nebyl nijak markantní, ale přesto se vyvrátila tvrzení, že nový prášek by měl dosahovat lepších vlastností než prášek přesévaný. Tento výsledek by bylo vhodné ověřit opakováním zkoušky tahem pro tyto materiály se shodným nastavením softwaru stroje. U zkoušky rázem v ohybu bylo dosaženo u nového prášku výsledků pozitivnějších, když byly hodnoty nárazové práce i vrubové houževnatosti prokazatelně vyšší než u prášku přesévaného. Velikost zlepšení mechanických vlastností však není tak zratelná, aby bylo možno jednoznačně říci, že je to zapříčiněno použitím nového prášku. Při cyklické únavové zkoušce bylo dosaženo opravdu pozitivních výsledků, podařilo se naměřit hodnoty životnosti pro rozkmit napětí 500 [MPa], tedy o 76 [%] vyšší než u přesévaného prášku.

Jednotlivé výsledky zkoušek byly také porovnávány s hodnotami dosaženými u konvenčního materiálu. Lze jednoznačně říci, že u zkoušky tahem bylo dosaženo dobrých výsledků a hodnoty jsou srovnatelné s konvenčním materiálem. U zkoušky rázem v ohybu i u cyklické únavové zkoušky bylo dosaženo cca 60 [%] hodnot, kterých dosahuje konvenční materiál. Finální částí této kapitoly byla fraktografická analýza lomových ploch u zkoušených vzorků, u kterých nebyly zjištěny výrazné rozdíly mezi novým a přesévaným práškem.

V poslední části diplomové práce proběhlo finální zhodnocení dosažených výsledků a sumarizace hodnot, jež byla rozřazena do přehledných grafů, které mohou být dále využívány pro výzkum kovového prášku MS1 a ke zlepšování procesu tisku.

Tato diplomová práce pomohla objasnit a ověřit vliv vstupního materiálu pro kovový prášek MS1 na výsledné mechanické vlastnosti vytištěných vzorků. Je nutné podotknout, že v této práci bylo provedeno zkoumání pouze u vzorků, které byly vytištěny v ose nanášení prášku X. Jak bylo psáno v teoretické části, vliv na mechanické vlastnosti nemá jen vstupní materiál, ale i rozložení těles na pracovní platformě, směry tisku, samotný proces tisku a zpracování výstupů z tiskárny. Pro další výzkum prášku MS1 lze dále prozkoumávat další dva směry tisku těles s novým práškem a porovnat je s přesévaným práškem. Po získání dostatečného množství dat by bylo možné navrhnout standardy snižující chybovost vznikající během procesu aditivní technologie.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ

[1] Zetková, I. *Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem*. V Plzni 2017. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html?>, Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.

[2] Hanzl, P. *Využití metody spékání kovových prášků laserem pro konstrukci řezných nástrojů*. V Plzni 2014. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html?>, Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.

[3] Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain | Johnson Matthey Technology Review. *Johnson Matthey Technology Review* [online]. Copyright © Johnson Matthey 2020 [cit. 12.02.2020]. Dostupné z: <https://www.technology.matthey.com/article/59/3/243-256/>

[4] Review of the Methods for Production of Spherical Ti and Ti Alloy Powder | SpringerLink. *Home - Springer* [online]. Copyright © 2019 Springer Nature Switzerland AG. Part of [cit. 12.02.2020]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-017-2513-5>

[5] Sustainability | Free Full-Text | A Deep Look at Metal Additive Manufacturing Recycling and Use Tools for Sustainability Performance | HTML. *MDPI - Publisher of Open Access Journals* [online]. Copyright © 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution [cit. 12.02.2020]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/19/5494/htm>

[6] Water Atomization Equipment - Sugino Machine Official Website. *スギノマシン公式ウェブサイト HOME* [online]. Dostupné z: <https://www.sugino.com/site/water-atomization-equipment-e/>

[7] Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM) – Konstrukter.cz. *Konstrukter.cz – CAD/CAM, 3D tisk a konstruování výrobků* [online]. Copyright © 2019 [cit. 12.02.2020]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>

[8] Microstructural characterization and properties of Ti-28Ta at.% powders produced by plasma rotating electrode process - ScienceDirect. *ScienceDirect.com / Science, health and medical journals, full text articles and books*. [online]. Copyright © 2017 Elsevier B.V. All rights reserved. [cit. 12.02.2020]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838817313944>

[9] AS-300 Hall Flow Meter/Flowmeter Funnel by AimSizer(id:6256125) Product details - View AS-300 Hall Flow Meter/Flowmeter Funnel by AimSizer from AimSizer Scientific Ltd. - EC21. *AimSizer Scientific Ltd. - particle size analyzer, surface area analyzer, fisher sub sieve sizer, tap density tester, scott volumeter* [online]. Dostupné z: https://aimsizer.en.ec21.com/AS_300_Hall_Flow_Meter--4628668_6256125.html

[10] Inert Gas in Metal 3D Printing, Materials and Postprocessing : Additive Manufacturing Magazine . *Additive Manufacturing Magazine* [online]. Copyright © Gardner Business Media, Inc. 2020 [cit. 12.02.2020]. Dostupné

z: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/gas-the-silent-enabler-of-additive-manufacturing->

[11] Hybrid Manufacturing Resources - Hybrid Manufacturing Technologies. *Hybrid Manufacturing Technologies - Home* [online]. Copyright © [cit. 12.02.2020]. Dostupné z: <http://www.hybridmanutech.com/resources.html>

[12] Metal Additive Manufacturing, Vol. 4 No. 2 Summer 2018. *Metal Additive Manufacturing - the leading source on industrial 3D printing* [online]. Copyright © Inovar Communications Ltd, 11 Park Plaza, Battlefield Enterprise Park, Shrewsbury SY1 3AF, United Kingdom [cit. 12.02.2020]. Dostupné z: <https://www.metal-am.com/metal-additive-manufacturing-magazine-archive/metal-additive-manufacturing-vol-4-no-2-summer-2018/>

[13] Metal Additive Manufacturing, Vol. 5 No. 3 Autumn 2019. *Metal Additive Manufacturing - the leading source on industrial 3D printing* [online]. Copyright © Inovar Communications Ltd, 11 Park Plaza, Battlefield Enterprise Park, Shrewsbury SY1 3AF, United Kingdom [cit. 12.02.2020]. Dostupné z: <https://www.metal-am.com/metal-additive-manufacturing-magazine-archive/metal-additive-manufacturing-vol-5-no-3-autumn-2019/>

[14] Effects of powder recycling on stainless steel powder and built material properties in metal powder bed fusion processes | NIST. *National Institute of Standards and Technology / NIST* [online]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/publications/effects-powder-recycling-stainless-steel-powder-and-built-material-properties-metal>

[15] An investigation on the effect of powder recycling on the microstructure and mechanical properties of AISI 316L produced by Directed Energy Deposition - ScienceDirect. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books*. [online]. Copyright © 2019 The Authors. Published by Elsevier B.V. [cit. 02.03.2020]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509319311463>

[16] Metals | Free Full-Text | Study of the Environmental Implications of Using Metal Powder in Additive Manufacturing and Its Handling. *MDPI - Publisher of Open Access Journals* [online]. Copyright © 1996 [cit. 04.03.2020]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/2/261>

[17] [online]. Dostupné z: http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/1af123af9a636e61/042696652ecc69142c8518dc772dc113/EOS_MaragingSteel_MS1_en.pdf

[18] *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Copyright © [cit. 08.03.2020]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41825

[19] Particle Size Distribution and Its Measurement | LLS Health CDMO. *CDMO Experts In Drug Research, Development, & Delivery - LLS Health CDMO* [online]. Copyright © 2020, Lubrizol Life Science [cit. 09.03.2020]. Dostupné z: <https://lubrizolcdmo.com/technical-briefs/particle-size-distribution-and-its-measurement/>

[20] Characterization of Metal Powders Used for Additive Manufacturing. *National Center for Biotechnology Information* [online]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4487284/>

[21] Materials | Free Full-Text | Relationship between the Size and Inner Structure of Particles of Virgin and Re-Used MS1 Maraging Steel Powder for Additive Manufacturing |

HTML. MDPI - *Publisher of Open Access Journals* [online]. Copyright © 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution [cit. 26.03.2020]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/4/956/htm>

[22] *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Copyright © [cit. 26.03.2020]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=25137

[23] ZETKOVÁ, I., KEPKA, M. Systematický aplikovaný výzkum materiálových vlastností martenzitické oceli W-Nr. 1.2709 vyrobené 3D tiskem technologií DMLS s uplatněním výsledků výzkumu v praxi. *Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2019*. Plzeň ZČU-FST, 2019, projekt TJ01000161 - TA ČR Starfos.

[24] Material data sheet – EOS MaragingSteel MS1 [online]. Dostupné z https://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/1af123af9a636e61/042696652ecc69142c8518dc772dc113/EOS_MaragingSteel_MS1_en.pdf

[25] *3ddruckdirekt - Home* [online]. Copyright © [cit. 23.07.2020]. Dostupné z: https://3ddruckdirekt.de/images/material/material_08_4GKN_Datasheet_Maraging_Steel_EN.pdf

[26] *Bohdan Bolzano* [online]. Copyright ©, [cit. 23.07.2020]. Dostupné z: <https://bolzano.cz/wp-content/uploads/2020/01/Vaco-1801.pdf>

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázek 1 - Proces aditivní výroby [7]	11
Obrázek 2 - Druhy procesů pro AD [11]	12
Obrázek 3 - Vývojový diagram výrobního postupu kovového prášku [3]	14
Obrázek 4 - Metoda Water Atomisation [6]	15
Obrázek 5 - Metoda Gas Atomisation [1]	16
Obrázek 6 - Metoda Induction Melted Bar Atomisation [4]	17
Obrázek 7 - Metoda Plasma Atomised Wire [1]	17
Obrázek 8 - Metoda Plasma Rotating Electronic Process [8]	18
Obrázek 9 - Logaritmické měřítko grafu objemových dat PSD [12]	22
Obrázek 10 - PSD 15 - 45 mikronů pomocí přístroje Microtrac [12]	22
Obrázek 11 - Měření kruhovitosti pomocí CT [13]	24
Obrázek 12 - Hall Flowmeter AS - 300 [9]	25
Obrázek 13 - Klasifikace klíčových vlastností kovových částic, které mohou ovlivnit kvalitu tvorby AM dílů [16]	27
Obrázek 14 - Výsledky regeneračního procesu pro práškovou slitinu CoCr provedené národním institutem pro výzkum a vývoj v Bukurešti [5]	29
Obrázek 15 - Složení materiálů a klasifikace pro AM proces [16]	30
Obrázek 16 - Udržitelnost v AM [16]	31
Obrázek 17 - Rozložení velikosti prášku z podkladů výrobce EOS [1]	34
Obrázek 18 - Scan nového prášku MS1 s detailním pohledem na částice	35
Obrázek 19 - Detailní pohled na zrno nového kovového prášku MS1	36
Obrázek 20 - Materiálový výbrus první částice z nového prášku MS1	37
Obrázek 21 - Materiálový výbrus druhé částice z nového prášku MS1	37
Obrázek 22 - Chemické složení na první částici z nového prášku MS1	38
Obrázek 23 - Chemické složení na druhé částici z nového prášku MS1	38
Obrázek 24 - Scan přisetého prášku MS1 [1]	39
Obrázek 25 - Zrno přisetého prášku bez dendritické struktury (sloní kůže)	40
Obrázek 26 - Stroj EOS M 290 a jeho vnitřní složení [1]	41
Obrázek 27 - Princip technologie DMLS [1]	42
Obrázek 28 - Pracovní prostor stroje EOS M 290	44
Obrázek 29 - Hlavní pohyby částí pracovního prostoru	44
Obrázek 30 - Schéma první varianty pro zmenšení pracovního prostoru	45
Obrázek 31 - Schéma druhé varianty pro zmenšení pracovního prostoru	46
Obrázek 32 - Schéma konstrukčního celku propojení základní a pracovní platformy	47
Obrázek 33 - Schéma konstrukčního celku přepážky pro rozdělení pracovního prostoru ..	48
Obrázek 34 - Hlavní sestava se zmenšením pracovního prostoru pomocí přepážky	49
Obrázek 35 - Možnosti rozložení zkušebních těles na pracovní platformě [1]	51
Obrázek 36 - Rozvržení těles na platformách	52
Obrázek 37 - Vytištěná tělesa na platformě pro cyklickou zkoušku a zkoušku rázem v ohybu	54
Obrázek 38 - Vytištěná tělesa na platformě pro cyklickou a tahovou zkoušku	54
Obrázek 39 - Rozpouštěcí žíhání dle výrobce a úpravy vzorku z přisetého prášku [1]	55
Obrázek 40 - Zkušební tělesa pro tahovou zkoušku	56
Obrázek 41 - Zkouška tahem (upnutí zkušební vzorku)	57
Obrázek 42 - Průběh tahové zkoušky pro nový prášek MS1	58
Obrázek 43 - Přehledový snímek lomové plochy vzorku 2 po zkoušce tahem	59
Obrázek 44 - Detail centrální oblasti, ve které došlo k iniciaci poškození	59
Obrázek 45 - Zkušební tělesa pro zkoušku rázem v ohybu	60

Obrázek 46 - Uložený vzorek pro zkoušku rázem v ohybu	60
Obrázek 47 - Výsledný graf ze zkoušky rázem v ohybu pro vzorky z nového prášku MS1	62
Obrázek 48 - Přehledový snímek lomové plochy po zkoušce rázem v ohybu s vrubem nahoře	62
Obrázek 49 - Detail středové oblasti lomové plochy s tvárným lomem s jamkovou morfologií	62
Obrázek 50 - Zkušební stroj Inova FU 250	63
Obrázek 51 - Upnutý zkušební vzorek pro cyklickou únavovou zkoušku materiálu MS1 ..	64
Obrázek 52 - SN křivka pro nový prášek materiálu MS1	66
Obrázek 53 - Přehledový snímek oblasti iniciace únavového lomu (iniciace nahoře uprostřed) – vzorek 1	66
Obrázek 54 - Detail z oblasti iniciace lomu – vzorek 1.....	66
Obrázek 55 - Oblast šíření únavové trhliny – vzorek 1	67
Obrázek 56 - Přejít z oblasti šíření únavového lomu do oblasti dolomení – vzorek 1 ...	67
Obrázek 57 - Přehledový snímek oblasti iniciace únavového lomu – vzorek 12.....	67
Obrázek 58 - Detail z oblasti iniciace únavového lomu (iniciace na pod-povrchových mat. vadách) – vzorek 12.....	67
Obrázek 59 - Bodové chemické složení měřené metodou EDS (2x matrice, 1x vada) – vzorek 12	68
Obrázek 60 - Oblast šíření únavového lomu – striace – vzorek 12.....	68
Obrázek 61 - Porovnání meze pevnosti po provedení zkoušky tahem.....	70
Obrázek 62 - Porovnání nárazové práce u nového a u přeseťového prášku	71
Obrázek 63 - Hodnoty vrubové houževnatosti pro nový a přeseťovaný prášek	72
Obrázek 64 - Porovnání smluvní meze únavy pro 10^6 cyklů pro nový a přeseťovaný prášek..	72
Obrázek 65 - Životnost pro rozkmit napětí 500 [MPa] pro konvenční materiál, nový a přeseťovaný prášek.....	73
Tabulka 1 - Materiály pro AM [1].....	13
Tabulka 2 - Přehled metod výroby prášku pro AM [13]	19
Tabulka 3 - Použití ochranných plynů pro kovové prášky od firmy EOS GmbH [1].....	20
Tabulka 4 - Výsledky tahové zkoušky pro nový a přeseťovaný prášek materiálu MS1	58
Tabulka 5 - Výsledné hodnoty ze zkoušky rázem v ohybu pro nový prášek MS1 a hodnoty pro přeseťovaný prášek.....	61
Tabulka 6 - Výsledky cyklické únavové zkoušky pro nový prášek materiálu MS1	65
Tabulka 7 - Rozdíl v únavové životnosti a pevnosti	66

SEZNAM ZKRATEK

Zkratka	Význam	Jednotky
3D	Tří rozměrný obraz / vnímání	-
AD	Apparent powder density- zdánlivá hustota prášku	[kg.m ³]
AM	Additive manufacturing- aditivní výroba	-
ASTM	American Society for Testing and Materials – Americká společnost pro zkušebnictví a materiály	-
BJ	Binder Jetting – tryskání pojiva	-
CAD	Computer Aided Design – počítačem podporované projektování	-
C	Uhlík	-
Co	Kobalt	-
ČSN	České normy	-
DED	Directed Energy Deposition – přímé energetické nanášení	-
DIN	Deutsches Institut für Normung – Německý ústav pro průmyslovou normalizaci	-
DMLS	Directed Metal Selective Laser Melting – přímé kovoé laserové spékání	-
E	Yangův modul	[GPa]
EIGA	Induction Melted Bar Atomisation -	-
EU	Evropská unie	-
EOS	Electro Optical Systems – elektrooptické systémy	-
FEM	Finite Element Method – metoda konečných prvků	-
GA	Gas Atomisation – atomizace plynem	-
GmbH	Gesellschaft deposition modeling – společnost s ručením omezeným	-
ISO	International standard organization – mezinárodní organizace pro normalizaci	-
ME	Material Extrusion – vytlačování materiálu	-
MJ	Material Jetting – nanášení materiálu tryskáním	-
Mn	Mangan	-
Mo	Molybden	-
Ni	Nikl	-
PAW	Plasma Atomised Wire – plazmová atomizace drátu	-
PBF	Powder Bed Fusion – spékání práškové vrstvy	-
PD	Powder distribution – hustota balení prášku	[kg.m ³]
PREP	Plasma Rotating Electrode Process – plazmový rotační elektrodový proce	-
PSD	Powder Size Distribution – rozdělení podle velikosti částic v prášku	[µm]
RTI	Regionální technologický institut	-
S	Síra	-
Si	Křemík	-
SEM	Scanning electron microscope- skenování elektronovým mikroskopem	-

SHL	Sheet Lamination – laminace plátů	-
Ti	Titan	-
UNS	Unified Numbering System – Jednotný systém číslování	-
V	Vanad	-
VAT	Vat Photopolymerisation – fotopolymerizace	-
W	Wolfram	-
WA	Water Atomisation – vodní atomizace	-

PŘÍLOHY

Vázané přílohy

Příloha č. 1 – Materiálový list pro kovový prášek EOS MS1 [24]

Příloha č. 2 – Výkres zkušební válcové tyče pro tahovou zkoušku

Příloha č. 3 – Výkres zkušební tělesa pro zkoušku rázem v ohybu

Příloha č. 4 – Výkres zkušební tělesa pro cyklickou zkoušku

Příloha č. 5 – Materiálový list martenziticky vytvrditelné ocele W. Nr. 1.2709 [25]

Příloha č. 6 – Materiálový list nástrojové ocele VACO 180 [26]

Příloha č. 1

Materiálový list pro kovový prášek EOS MS1 [24]

Material data sheet

Technical data

General process data

Typical achievable part accuracy [1]	
- small parts (< 80 x 80 mm)	approx. $\pm 20 \mu\text{m}$ approx. $\pm 0.8 \times 10^{-3}$ inch
- large parts	approx. $\pm 50 \mu\text{m}$ approx. ± 0.002 inch
Age hardening shrinkage [2]	
	approx. 0.08 %
Min. wall thickness [3]	
	approx. 0.3 - 0.4 mm approx. 0.012 - 0.016 inch
Surface roughness (approx.) [4]	
- as manufactured	
MS1 Surface (20 μm)	R_a 4 μm ; R_z 20 μm R_a 0.16 $\times 10^{-3}$ inch, R_z 0.78 $\times 10^{-3}$ inch
MS1 Performance (40 μm)	R_a 5 μm ; R_z 28 μm R_a 0.19 $\times 10^{-3}$ inch, R_z 1.10 $\times 10^{-3}$ inch
MS1 Speed (50 μm)	R_a 9 μm ; R_z 50 μm R_a 0.47 $\times 10^{-3}$ inch, R_z 2.36 $\times 10^{-3}$ inch
- after shot-peening	R_a 4 - 6.5 μm ; R_z 20 - 50 μm R_a 0.16 - 0.26 $\times 10^{-3}$ inch R_z 0.78 - 1.97 $\times 10^{-3}$ inch
- after polishing	R_z up to < 0.5 μm R_z up to < 0.02 $\times 10^{-3}$ inch (can be very finely polished)

Material data sheet

Physical and chemical properties of parts

Material composition	Fe (balance) Ni (17 - 19 wt-%) Co (8.5 - 9.5 wt-%) Mo (4.5 - 5.2 wt-%) Ti (0.6 - 0.8 wt-%) Al (0.05 - 0.15 wt-%) Cr, Cu (each \leq 0.5 wt-%) C (\leq 0.03 wt-%) Mn, Si (each \leq 0.1 wt-%) P, S (each \leq 0.01 wt-%)
Relative density	approx. 100 %
Density	8.0 - 8.1 g/cm ³ 0.289 - 0.293 lb/in ³

Mechanical properties of parts at 20 °C (68°F)

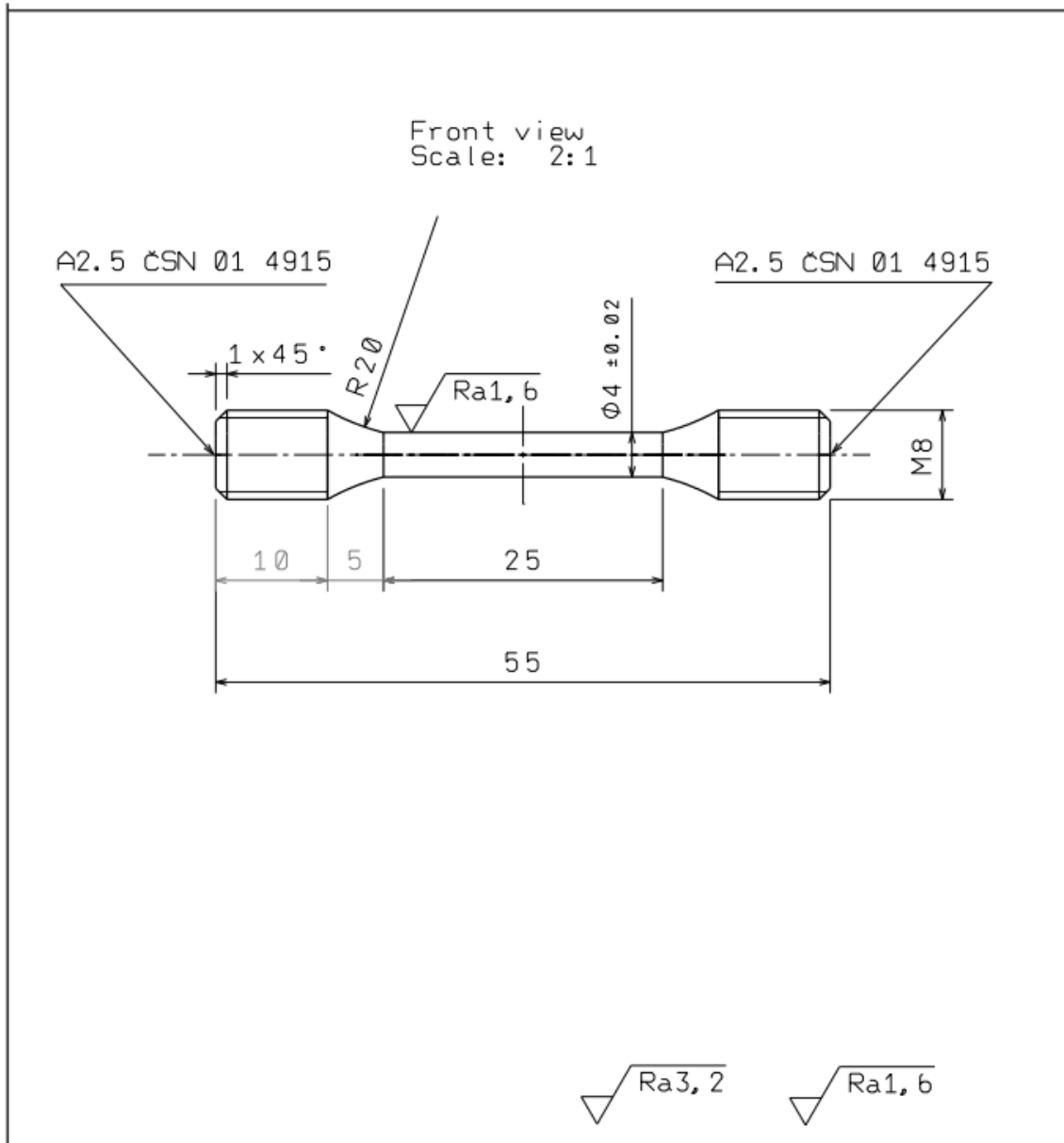
	As built	After age hardening [2]
Tensile strength [6]		min. 1930 MPa min. 280 ksi
- in horizontal direction (XY)	typ. 1100 ± 100 MPa typ. 160 ± 15 ksi	typ. 2050 ± 100 MPa typ. 297 ± 15 ksi
- in vertical direction (Z)	typ. 1100 ± 100 MPa typ. 160 ± 15 ksi	
Yield strength (Rp 0.2 %) [6]		min. 1862 MPa min. 270 ksi
- in horizontal direction (XY)	typ. 1050 ± 100 MPa typ. 152 ± 15 ksi	typ. 1990 ± 100 MPa typ. 289 ± 15 ksi
- in vertical direction (Z)	typ. 1000 ± 100 MPa typ. 145 ± 15 ksi	
Elongation at break [6]		min. 2 %
- in horizontal direction (XY)	typ. (10 ± 4) %	typ. (4 ± 2) %
- in vertical direction (Z)	typ. (10 ± 4) %	
Modulus of elasticity [6]		
- in horizontal direction (XY)	typ. 160 ± 25 GPa typ. 23 ± 4 Msi	typ. 180 ± 20 GPa typ. 26 ± 3 Msi
- in vertical direction (Z)	typ. 150 ± 20 GPa typ. 22 ± 3 Msi	
Hardness [7]	typ. 33 - 37 HRC	typ. 50 - 56 HRC
Ductility (Notched Charpy impact test)	typ. 45 ± 10 J	typ. 11 ± 4 J


[6] Tensile testing according to ISO 6892-1:2009 (B) Annex D, proportional test pieces, diameter of the neck area 5mm (0.2 inch), original gauge length 25mm (1 inch).

[7] Rockwell C (HRC) hardness measurement according to EN ISO 6508-1 on polished surface. Note that measured hardness can vary significantly depending on how the specimen has been prepared.

Příloha č. 2

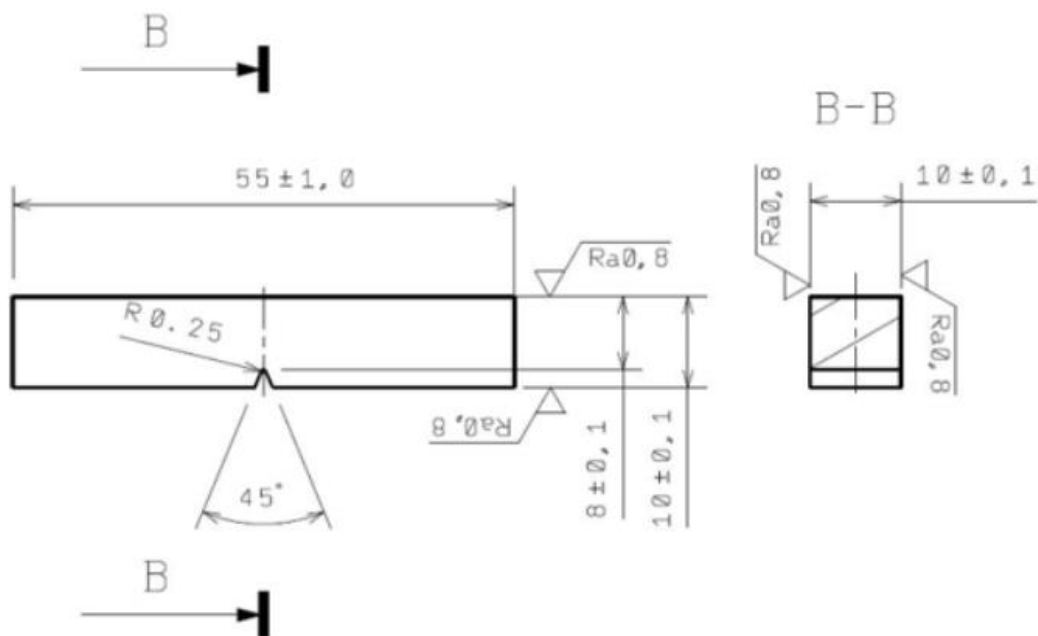
Výkres zkušební válcové tyče pro tahovou zkoušku



 FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI		REGIONÁLNÍ TECHNOLOGICKÝ INSTITUT	
		REGIONÁLNÍ TECHNOLOGICKÝ INSTITUT NÁZEV VÝKRESU TAHOVKA 3D TISK-M8x4	
KRESLIL DAŇA	DATUM 30. 8. 2016	ČÍSLO VÝKRESU 16-3D-002	
MATERIÁL 1. 2709	POČET	PŘESNOST ISO 2768 m K	TOLERANCE ISO 8015
POLOTOVAR	LIST A4	SCALE 2:1	HMOTNOST (kg) 0,016

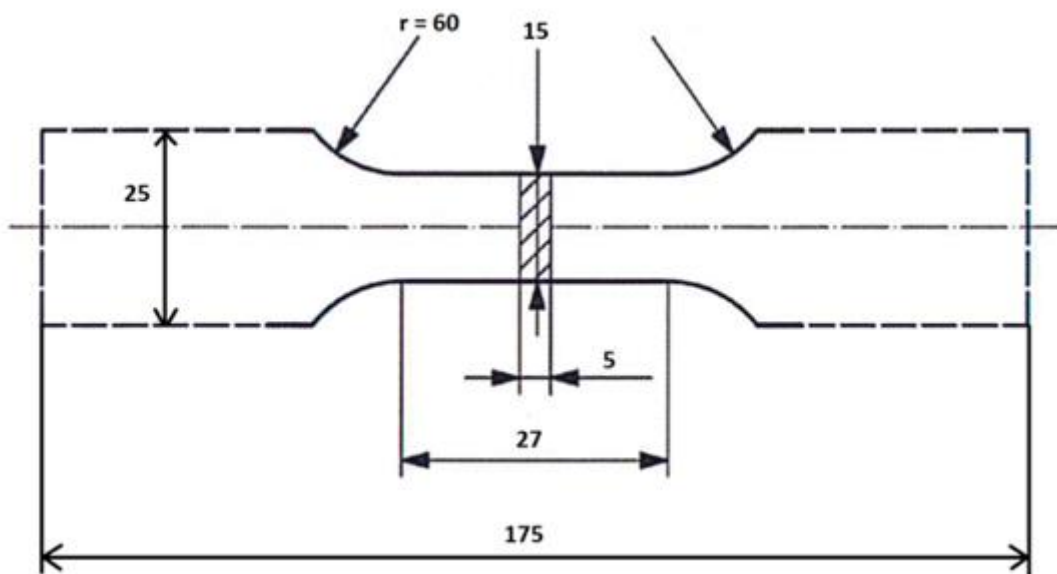
Příloha č. 3

Výkres zkušebního tělesa pro zkoušku rázem v ohybu



Příloha č. 4

Výkres zkušebního tělesa pro cyklickou zkoušku



Příloha č. 5

Materiálový list martenziticky vytvrditelné ocele W. Nr. 1.2709 [25]

DATA SHEET: MARAGING STEEL (MATERIAL 1.2709)

Utilization

Mould and die casting, Prototypes, Serial parts, Springs, etc.

Material Properties

Martensite hardening steel, low warping, very good toughness properties, high extension limit and tensile strength. Uniform contraction (0,09%)

Physical Properties

Thermal conductivity: 14,2 W/mK at 20 °C
19,0 W/mK at 500 °C
21,0 W/mK at 600 °C
28,6 W/mK at 1300 °C

Coefficient of thermal expansion: $10,3 \times 10^{-6}$ m/mK at 20°C to 100°C

Tensile strength: ≈ 1100 N/mm² (directly after the generative process) max. ≈ 2050 N/mm² (heat treated at 510 °C)

Yield point Rp 0,2: ≈ 2000 N/mm² (heat treated at 510 °C)

Elongating at fracture: $\approx 11\%$ (directly after the generative process) $\approx 4\%$ (heat treated at 510 °C)

Hardness: ≈ 35 HRC (directly after the generative process) ≈ 52 HRC (heat treated at 510 °C)

Special Properties using generative manufacturing

Surface roughness: depending to the used layer thickness min. Rz 40-60 μ m

(without finishing)

Density: in average 99,9 % (8,1 kg/dm³)

Minimum wall thickness: $\approx 0,5$ mm (depending to the geometry)

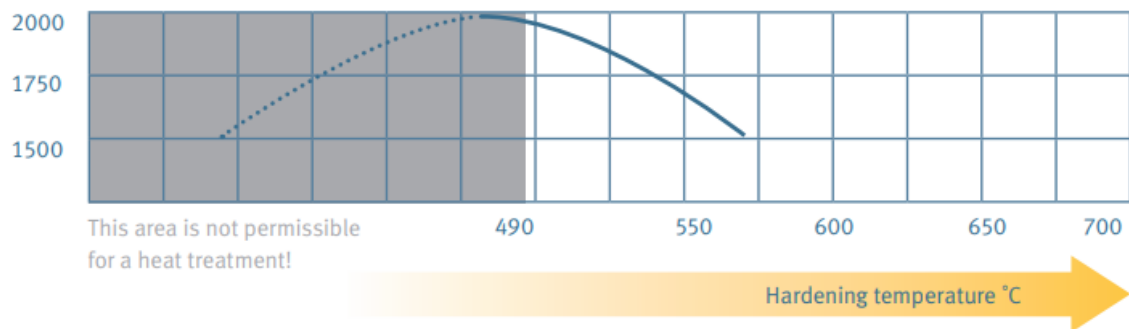
Part accuracy: max. $\pm 0,05$ mm (depending to the geometry)

Chemical composition:											
Element	C	Si	Mn	Ni	MO	Ti	Co	Al	P	S	Cr
Volume %	max. 0,03	max. 0,1	max. 0,1	17 -19	4,5-5,2	max. 0,8	8,5-9,5	max. 0,1	max. 0,01	max. 0,01	max. 0,5

(double checked for each lot by spectral analyzing)

DATA SHEET: MARAGING STEEL (MATERIAL 1.2709)

Tensile strength



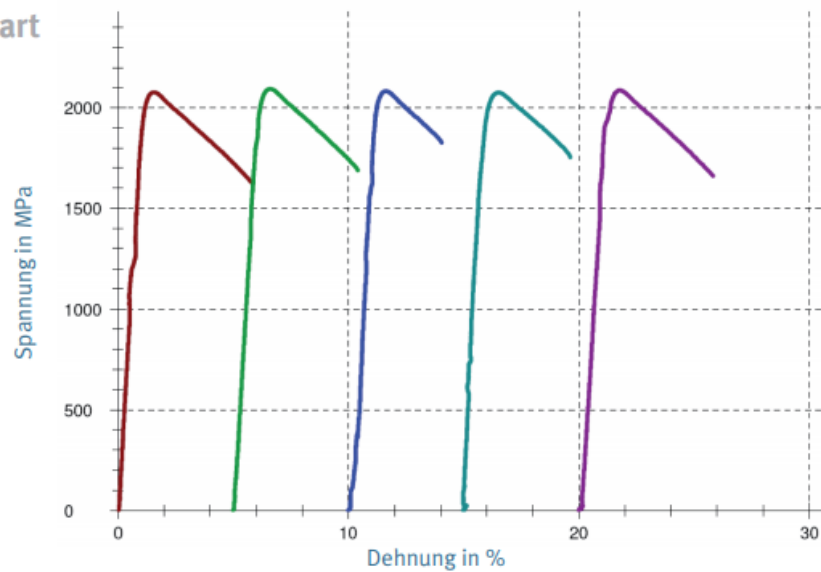
Results:

Nr	S0 mm ²	Rp 0.2 MPa	Rm MPa	ε-Bruch %
1	28,27	2052,81	2076,54	5,85
2	28,65	2064,74	2092,90	5,42
3	28,46	2074,70	2081,98	4,05
4	28,94	1973,67	2074,89	4,64
5	28,75	2040,16	2085,71	5,82

Statistic:

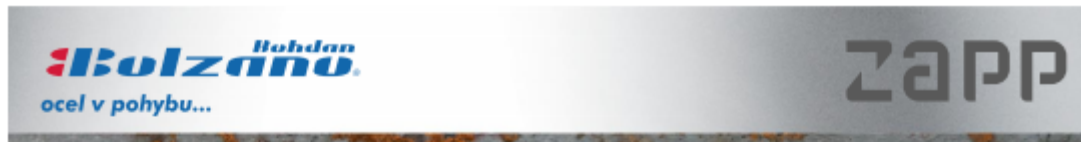
Serie n = 5	Rp 0.2 MPa	Rm MPa	ε-Bruch %
x	2041,22	2082,40	5,15
s	39,91	7,28	0,79
min	1973,67	2074,89	4,05
max	2074,70	2092,90	5,85

Serial chart



Příloha č. 6

Materiálový list nástrojové ocele VACO 180 [26]



NÁSTROJOVÁ OCEL VACO 180

CHEMICKÉ SLOŽENÍ					
C	Co	Mo	Ni	Ti	Ostatní
< 0,03%	9,0%	5,0 %	18.5%	0,75%	Al, B, zr

VACO 180

Vysoce pevná, martenziticky vytvrditelná ocel, optimální kombinace velmi vysoké pevnosti v tahu a houževnatosti.

Vaco 180 je označení Zapp Materials Engineering GmbH

Obdobné jakosti jsou 1.2709, DIN X3NiCoMo 18 9 5 nebo ~ Afnor Z 2 NKD 18-09

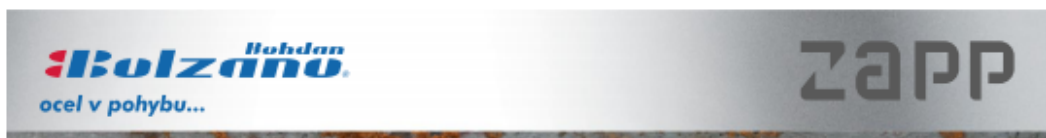
Stav dodání:

žiháno, tvrdost max. 350 HV

Typické oblasti použití

Mechanicky namáhané nástroje, pro které je nutno volit materiál s nejvyššími mezemi pevnosti a kluzu a které musí být současně houževnaté a málo citlivé na eventuálně vzniklé vruby, a to vše i za zvýšených teplot. Typické oblasti použití jsou například zápustky pro tváření za studena, jádra, šoupátka, rozdělovače jakož i formy pro tlakové lité pro slitiny těžkých i lehkých neželezných kovů s nižšími teplotami tavení. Trny poutnických stolic při výrobě trubek.

TVÁŘENÍ ZA TEPLA A TEPEČLNÉ ZPRACOVÁNÍ		
Kování, válcování	1200-850°C	vzduch
Žihání	820°C	vzduch
Vytvrzování	490°C, 6 hodin	Ochlazení na klidném vzduchu
Tvrdost	54-56 HRC	Ve vytvrzeném stavu



Výhody vytvrzování:

- Materiál má stejné mechanické vlastnosti prakticky v celém průřezu.
- Protože probíhá při relativně nízkých teplotách (480-520°C), nedochází při něm k výraznému okujení povrchu dílce ani v pecích bez ochranné atmosféry nebo vakua.
- Vytvrditelné oceli mají velmi nízký obsah uhlíku.
- Proces je pomalý, bez prudkých změn teplot – snížené riziko prnutí a deformací.

Mechanické vlastnosti

VZOREK	MEZ KLUŽU	PEVNOST V TAHU	TAŽNOST (LO = 5DO)	KONTRAKCE	VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST (ISO V)	LOMOVÁ PEVNOST KT ~ 4	TVRDOST HV
	MPA MIN.	MPA MIN.	% MIN.	% MIN.	J MIN.	N/MM2	
žiháno	640	930-1130	12	60	55		<350
vytvrzeno	podélně	1910	1960	7	35	9	2450
vytvrzeno	příčně	1910	1960	6	25	6	2450
zkušební teplota °C							
200	1810	1910	7,5	40			
250	1770	1860	6,5	35			
300	1670	1770	5,5	30			
350	1620	1720	5,5	30			