

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** N0715A270011 – Obrábění, aditivní  
technologie a zabezpečování kvality

**Studijní specializace:** Bez specializace

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Zvyšování užitečných vlastností AM dílů pomocí tenkých vrstev

**Autor:** Bc. Zdeněk ŠÁLEK

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

Akademický rok 2020/2021

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Zdeněk ŠÁLEK**  
Osobní číslo: **S19N0011P**  
Studijní program: **N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**  
Studijní obor: **Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**  
Téma práce: **Zvyšování užitečných vlastností AM dílů pomocí tenkých vrstev**  
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

### Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Analýza současného stavu
3. Návrh vlastního řešení
4. Zhodnocení
5. Závěr

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

#### Seznam doporučené literatury:

- FUGES, C., M. PVD Coatings Solve Common 3D-Printed Mold and Part Problems. In *Additive Manufacturing Magazine* [online]. Copyright © Gardner Business Media, Inc. 2020 [cit. 20.10.2020]. Dostupné z: <https://www.additivemanufacturing.media/blog/post/pvd-coatings-solve-common-3d-printed-mold-and-part-problems>.
- FIORESE, A. Learn all about coating the additive manufactured Titanium64. In *Tav Vacuum Furnaces* [online]. [cit. 20.10.2020]. Dostupné z: <https://www.tav-vacuumfurnaces.com/blog/53/en/coating-titanium64-additive-manufacturing-1>.
- BOUZAKIS, Konstantinos-Dionysios a Nikolaos MICHAILIDIS. Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization. *CIRP Annals* [online]. 2012, 61(2), 703-723 [cit. 2020-10-20]. ISSN 0007-8506. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850612002053>.
- DENG, Yang, Wanglin CHEN a Bingxin LI. Physical vapor deposition technology for coated cutting tools: A review. *Ceramics International* [online]. 20120, 46(11, Part B), 18373-18390 [cit. 2020-10-20]. ISSN 0272-8842. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884220311123>.

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: **15. října 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**

L.S.

---

**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan

---

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

## **Prohlášení o autorství**

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

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

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval mé vedoucí Ing. Ivaně Zetkové, Ph.D. za poskytnutí podkladů, cenné rady a připomínky při realizaci diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat mému konzultantovi diplomové práce panu doc. Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D.

Největší poděkování patří celé své rodině za podporu během průběhu celého studia a samozřejmě i své přítelkyni za trpělivost, kterou se mnou měla.

Děkuji i spolužákům Bc. Marku Chýnovi, Bc. Šimonu Řezníčkovi a Bc. Petru Stejskalovi se kterými se při studiu výborně spolupracovalo.

Nakonec bych rád poděkoval kolegům z práce, za to, že mě při dokončování této práce nezasypali úkoly a nechali mě ji v klidu dokončit.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Šálek	<b>Jméno</b> Zdeněk	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	N0715A270011 – Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Zetková, Ph.D.	<b>Jméno</b> Ivana	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU – FST – KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Zvyšování užitečných vlastností AM dílů pomocí tenkých vrstev		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	67	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	43	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	24
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Tato práce se zabývá návrhem pístu pneumatické očišťovací pistole a zvýšení jeho užitečných vlastností pomocí tenké vrstvy. Vzorky podstoupily tepelné zpracování žíháním a vytvrzením a následně byly deponovány tenkou vrstvou TiAlSiN. Vzorky se zanalyzovaly z hlediska mikrostruktury, chemického složení, tvrdosti substrátu a nano tvrdosti vrstvy. Následně byly pomocí tribologické analýzy porovnány koeficienty úběru materiálu a tření mezi čistě tištěnými TZ vzorky a TZ vzorky s deponovanou vrstvou. V poslední části byl tištěný píst experimentálně ověřen z hlediska dynamických účinků. Měřil se průběh vibrací, hluku a teploty pro původní i nový píst.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p style="text-align: center;">3D tisk, AM, PBF, DMLS, MS1, TiAlSiN, tenká vrstva, tribologie, postprocessing, depozice, užitečné vlastnosti</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Salek	Name Zdenek		
<b>FIELD OF STUDY</b>	N0715A270017 - Machining, additive technology and quality assurance			
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetkova, Ph.D.	Name Ivana		
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO			
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Increasing the useful properties of AM parts using thin layers			

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machining Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2021
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	67	<b>TEXT PART</b>	43	<b>GRAPHICAL PART</b>	24
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>This paper deals with the design of the piston of a pneumatic cleaning gun and the increase of its useful properties by means of a thin layer. The samples underwent heat treatment by annealing and curing and were subsequently deposited with a thin layer of TiAlSiN. The samples were analysed for microstructure, chemical composition, substrate hardness and nano layer hardness. Subsequently, the coefficients of material removal and friction between cleanly printed TZ samples and TZ samples with a deposited layer were compared using tribological analysis. In the last part, the printed piston was experimentally verified in terms of dynamic effects. The course of vibrations, noise, and temperature for the original and the new piston was measured.</p>
<b>KEY WORDS</b>	3D printing, AM, PBF, DMLS, MS1, TiAlSiN, thin layer, tribology, postprocessing, deposition, useful properties

## Obsah

1 Úvod.....	13
1.1 Cíl práce.....	13
2 Analýza současného stavu .....	14
2.1 Aditivní výroba.....	14
2.2 Procesy a metody kovové aditivní výroby .....	14
2.2.1 Spékání práškové vrstvy (Powder Bed Fusion) .....	16
2.2.2 DMLS (Direct Metal Laser Sintering) .....	17
2.3 Kovy a slitiny používané pro AM .....	20
2.3.1 Vysokopevnostní maraging oceli .....	20
2.4 Postprocessing .....	23
2.4.1 Postprocessing povlakováním AM součástí.....	23
2.5 Současný stav problematiky povlaků .....	24
2.5.1 Materiály povlaků .....	24
2.5.2 TiAlSiN.....	26
2.6 Tenké vrstvy .....	26
2.6.1 Technologie vytváření tenkých vrstev .....	27
2.7 Vlastnosti tenkých vrstev.....	28
2.7.1 Tvrdost tenkých vrstev .....	28
2.7.2 Adheze tenkých vrstev .....	28
2.7.3 Tribologická analýza .....	29
3 Návrh vlastního řešení .....	30
3.1 MS1 prášek.....	30
3.2 Průmyslová 3D tiskárna EOS M 290 .....	31
3.3 Společnost SHM, s.r.o. ....	32
3.3.1 Portfolio SHM – Vrstva MARWIN SI.....	33



3.4 Tisknutá součást – vzduchový píst pneumatické očišťovací pistole .....	33
3.4.1 Konstrukční návrh .....	34
3.4.2 3D tisk .....	35
3.4.3 Postprocessing .....	37
3.4.4 Měření pnutí .....	38
3.5 MS1 vzorky po TZ .....	40
3.5.1 Tribologická analýza vzorků .....	41
3.6 MS1 vzorky po TZ s deponovanou vrstvou .....	45
3.6.1 Skenovací elektronový mikroskop (SEM) .....	45
3.6.2 Elektronově disperzní spektrometr (EDS) .....	47
3.6.3 Světelný mikroskop .....	48
3.6.4 Měření tvrdosti substrátu .....	49
3.6.5 Tribologická analýza vzorků po depozici vrstvy .....	51
3.7 Tvrdosti vrstvy a substrátu .....	53
3.8 Porovnání tribologické analýzy .....	54
3.8.1 Velikosti plochy průřezu drážky .....	54
3.8.2 Koeficient úběru materiálu .....	54
3.8.3 Průměrný koeficient tření .....	55
3.9 Experimentální ověření .....	56
3.9.1 Postup měření .....	56
3.9.2 Výsledky z termografie .....	59
4 Zhodnocení .....	60
5 Závěr .....	61
Seznam zdrojů .....	63
Přílohy .....	67

## Seznam použitých zkratk

PBF – powder bed fusion – spékání práškové vrstvy

DMLS – direct metal laser sintering – přímé laserové slinování

AM – additive manufacturing – aditivní výroba

TZ – tepelné zpracování

SM – světelná mikroskopie

SEM – Skenovací elektronový mikroskop

EDS – elektronově disperzní spektrometr

MS1 – maraging steel 1- prášek maraging oceli

PVD – physical vapor deposition – fyzikální depozice z plynné fáze

CVD – chemical vapor deposition – chemická depozice z plynné fáze

# Seznam obrázků, tabulek a grafů

## Seznam obrázků

Obrázek 1. Procesy a technologie kovové aditivní výroby [13] .....	15
Obrázek 2. Procesní parametry AM [7] .....	16
Obrázek 3. Schéma technologie DMLS [11] .....	18
Obrázek 4 Šrafovací strategie a procesní parametry [11] .....	19
Obrázek 5 DMLS Strategie [11] .....	19
Obrázek 6 Mikrostruktura maraging oceli 18Ni-300 vyrobena metodou PBF [14] .....	21
Obrázek 7 Tahové křivky PBF vysokopevnostní oceli 18Ni-300 před a po stárnutí při 460 °C po dobu 8 hodin [14] .....	22
Obrázek 8 Ilustrace AM procesů na bázi vrstev a souvisejícího efektu schodovitosti povrchu. a) CAD model, b) Krájení c) Skutečný výstup podle AM d) Efekt schodovitosti [18] .....	23
Obrázek 9 Nanosené vrstvy Ni a CrN na laserem slinuté součásti [19].....	24
Obrázek 10 Rozdělení metod vytváření tenkých vrstev.....	27
Obrázek 11 Analýza PIN on DISK [32].....	29
Obrázek 12 Tiskárna EOS M 290 [29].....	31
Obrázek 13 Logo firmy SHM [30].....	32
Obrázek 14 PVD Povlak MARWIN SI [30].....	33
Obrázek 15 Výkres pístu [34] .....	34
Obrázek 16 Vzniklé varianty vzduchového pístu [34].....	34
Obrázek 17 Průběh dynamických účinků [34] .....	35
Obrázek 18 Parametry 3D tisku .....	36
Obrázek 19 Rozložení na platformě.....	36
Obrázek 20 Vytisknuté písty a vzorky [34].....	36
Obrázek 21 Funkční vzorek pro zachování referenčního povrchu [34].....	37
Obrázek 23 Graf průběhu povrchového pnutí po 3D tisku [34] .....	39
Obrázek 24 Průběh povrchového pnutí 3D tištěného vzorku po broušení a leštění [34].....	39
Obrázek 25 Zkušební vzorky po TZ .....	40
Obrázek 26 Křivka rozpouštěcího žíhání .....	40
Obrázek 27 Vytvrzovací křivka .....	41
Obrázek 28 Tribometr Anton Paar TRB3 [31].....	41
Obrázek 29 SM vzorku č.1 - vrypová drážka.....	42

Obrázek 30 Velikost průřezu vrstvy u vzorku MS1-K-26 .....	42
Obrázek 31 Zkušební vzorky s vrstvou.....	45
Obrázek 32 SEM – Skenovací elektronový mikroskop [31].....	46
Obrázek 33 Detail vrstvy PVD 160°C .....	46
Obrázek 34 Detail vrstvy PVD 500°C .....	47
Obrázek 35 Fotka rozhraní substrát vrstva PVD 160°C .....	47
Obrázek 36 Prvkové zastoupení (Spectrum 3,4) a) ve vrstvě b) v substrátu .....	47
Obrázek 37 Fotka rozhraní substrát vrstva PVD 500 °C .....	48
Obrázek 38 Vybrané prvkové zastoupení (Spectrum 5,8) a) ve vrstvě b) v substrátu.....	48
Obrázek 39 Mikrostruktura vzorku s teplotou depozice PVD 500 °C.....	49
Obrázek 40 Mikrostruktura vzorku s teplotou depozice PVD 160 °C.....	49
Obrázek 41 Stopy po indentoru u vzorku MS1-K-22 .....	49
Obrázek 42 Stopy po indentoru u vzorku MS1-Z-18.....	50
Obrázek 43 Pažba pistole se snímačem [34].....	56
Obrázek 44 Spektrum vibrací – zrychlení – originální píst naprázdno [34] .....	57
Obrázek 45 Spektrum vibrací – zrychlení – upravený píst naprázdno [34].....	57
Obrázek 46 Snímek z termografické kamery .....	59

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Přehled kovů a slitin pro AM [12] .....	20
Tabulka 2 Rozdělení povlaků podle tvrdosti.....	25
Tabulka 3 Materiály povlaků .....	25
Tabulka 4 Rozdělení vrstev podle tloušťky vrstvy .....	27
Tabulka 5 Detaily prášku MS1.....	31
Tabulka 6 Technická specifikace EOS M 290 [29] .....	31
Tabulka 7 Přehled tisknutých vzorků.....	35
Tabulka 8 Kombinace použitých úprav .....	38
Tabulka 9 Podmínky experimentu .....	42
Tabulka 10 Průběh naměřených teplot.....	59

## Seznam grafů

Graf 1 Velikost obsahu průřezu drážky.....	43
Graf 2 Koeficient úběru materiálu .....	44
Graf 3 Průměrný koeficient tření.....	44

Graf 4 Průběh tvrdosti od povrchu substrátu u vzorku MS-K-22 .....	50
Graf 5 Průběh tvrdosti od povrchu substrátu u vzorku MS-Z-18 .....	51
Graf 6 Velikost obsahu průřezu drážky.....	52
Graf 7 Koeficient úběru materiálu .....	52
Graf 8 Průměrný koeficient tření.....	53
Graf 9 Průměrná tvrdost substrátu .....	53
Graf 10 Velikost obsahu průřezu drážky.....	54
Graf 11 Koeficient úběru materiálu .....	55
Graf 12 Průměrný koeficient tření .....	55
Graf 13 Zrychlení v oblasti 2-3 kHz .....	58
Graf 14 Rozdíl hluku.....	58
Graf 15 Průběh naměřených teplot [34].....	59

# 1 Úvod

Kovová aditivní výroba se stává nedílnou součástí metod a technologií využívaných v průmyslu. V automobilovém a leteckém průmyslu se již používá mnoho let a v současnosti prostupuje i do ostatních odvětví. Například ve strojírenství se používá pro vytváření nástrojů se složitou geometrií a chladicími kanálky a ve zdravotnictví pro tisk implantátů. Vývoj metod, technologií i materiálů jde stále dopředu. S novými materiály se rozšiřuje i oblast použití, avšak stále nejsou prozkoumány všechny možnosti zlepšení vlastností takto vyráběných součástí. Ty velmi často trpí nízkou kvalitou povrchu, ztrátou užitečných vlastností a vyšším pnutí. Je tedy v praxi snaha tyto problémy eliminovat ať už postprocessingem nebo TZ. Další možností, jak zvýšit užitečné vlastnosti AM dílů je depozice tenké vrstvy, což může velmi příznivě ovlivnit výsledné vlastnosti dané součásti. Touto problematikou se bude zabývat diplomová práce.

## 1.1 Cíl práce

Cílem práce bude ověřit vliv depozice tenkých vrstev na výsledné vlastnosti tištěných AM dílů z hlediska jejich praktického využití ve vybrané aplikaci. Testování užitečných vlastností vrstev proběhne při statickém, ale hlavně dynamickém zatěžování.

## **2 Analýza současného stavu**

### **2.1 Aditivní výroba**

Aditivní výroba – additive manufacturing (AM) nebo také additive layer manufacturing (AML) je způsob výroby objektů, při které dochází k digitálně řízenému přidávání materiálu podle 3D modelové předlohy. Jedná se o opak subtraktivní výroby, kdy se materiál odebírá, např. obráběním. Proces aditivní výroby se skládá z 8 navazujících kroků, a to vytvoření modelu pomocí CAD systému, převedení na STL, přenos souboru ke stroji, nastavení stroje, vytváření součásti, vyjmutí a očištění, post processing a aplikace [1, 2]

Můžeme se setkat i s termínem 3D tisk nebo rapid-prototyping, který je používán širší veřejností. Ačkoli se termíny 3D tisk a AM často používají zaměnitelně, 3D tisk je ve skutečnosti podmnožinou AM, ve které se součásti modelují od nuly pomocí výše uvedené techniky. AM však nezahrnuje jen techniky, jako je 3D tisk, ale také přidání materiálu ke stávajícím součástem nebo komponentům za účelem opravy, repasování nebo zlepšení vlastností. [3]

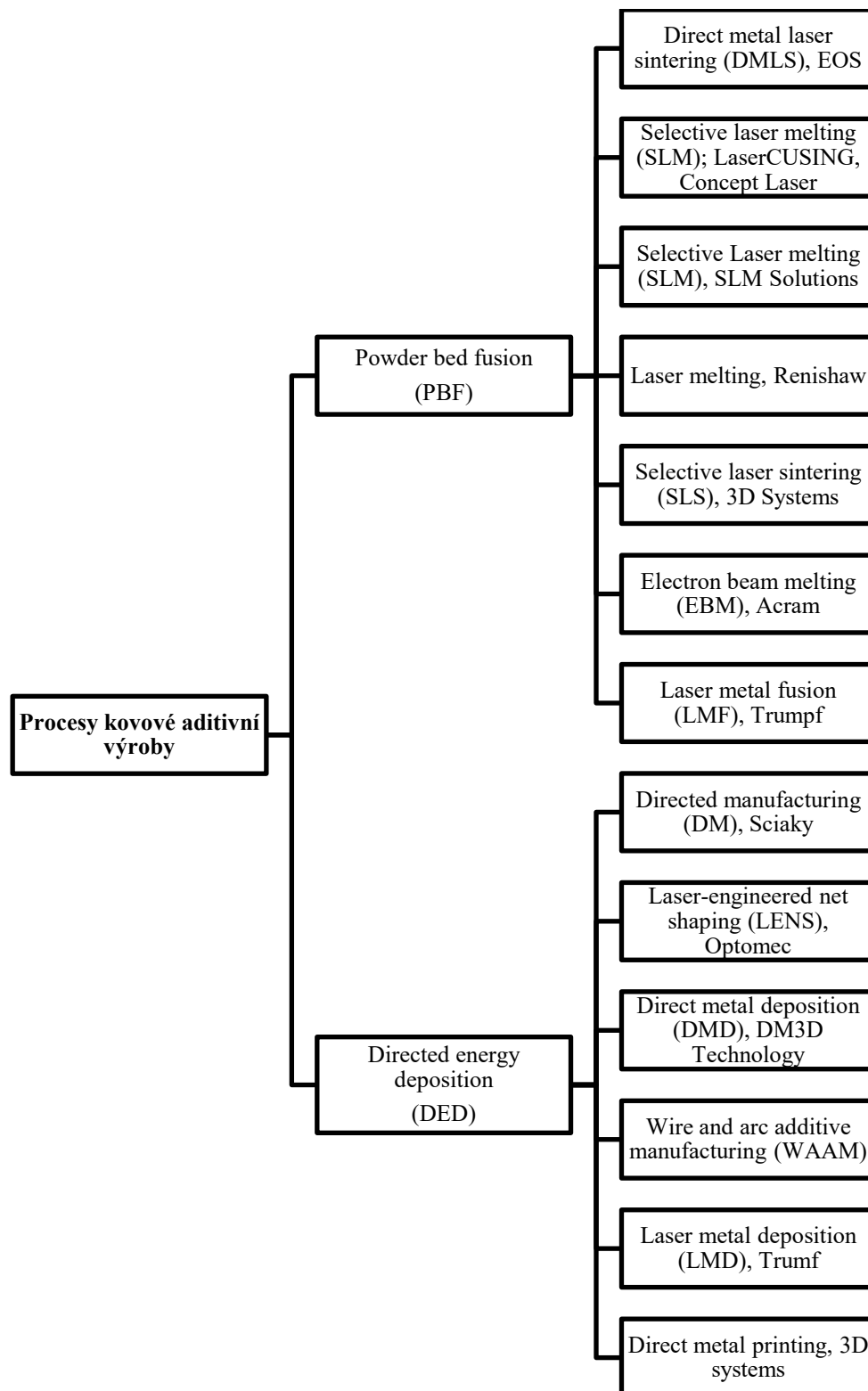
I když se jedná o aditivní výrobu, ne vždy tento proces vypadá jako běžný „tisk“ součásti. Výstupem AM je hotový výrobek, nikoliv prototyp. Výhod AM je mnoho. Možnost výroby součástí se složitou geometrií, které by nebyly vyrobitelné konvenčními technologiemi. Dochází ke snížení nákladů díky absenci nástrojů nebo forem. Dalším významným faktorem je menší hmotnost způsobena snížením objemu materiálu např. pomocí FEM analýzy, která prokáže, kde je materiál přebytečný. Sestavu o více prvcích můžeme díky této technologii nahradit jedním složitějším dílcem. Nevýhodou je velká vstupní investice, nároky na přípravu součásti a zacházení s práškem. [1, 2, 3, 4, 5]

Spektrum využití AM je široké, letecký, strojírenský průmysl v auto motivu, dokonce i v zdravotnickém průmyslu. Aditivní výroba z kovů je velmi často používána v malosériové výrobě. Setkáváme se i s návrhem a výrobou nové generace rezných nástrojů, která těží z výhod tohoto procesu. Předpokládá se, že v budoucnosti bude AM nedílnou součástí všech druhů průmyslu. [4, 5]

### **2.2 Procesy a metody kovové aditivní výroby**

AM lze klasifikovat podle způsobu dodání materiálu do systému na bázi kapalin, pevných látek a prášků. [6] Nedávné recenze kovových AM procesů zvyrazňují některé rozdíly mezi

různými procesy. Obrázek 1. ukazuje dvě hlavní kategorie kovových AM procesů, spékání práškové vrstvy (PBF) a přímého nanášení (DED), společně s aktuálně dostupnými AM technologiemi a jejich poskytovateli. [13]



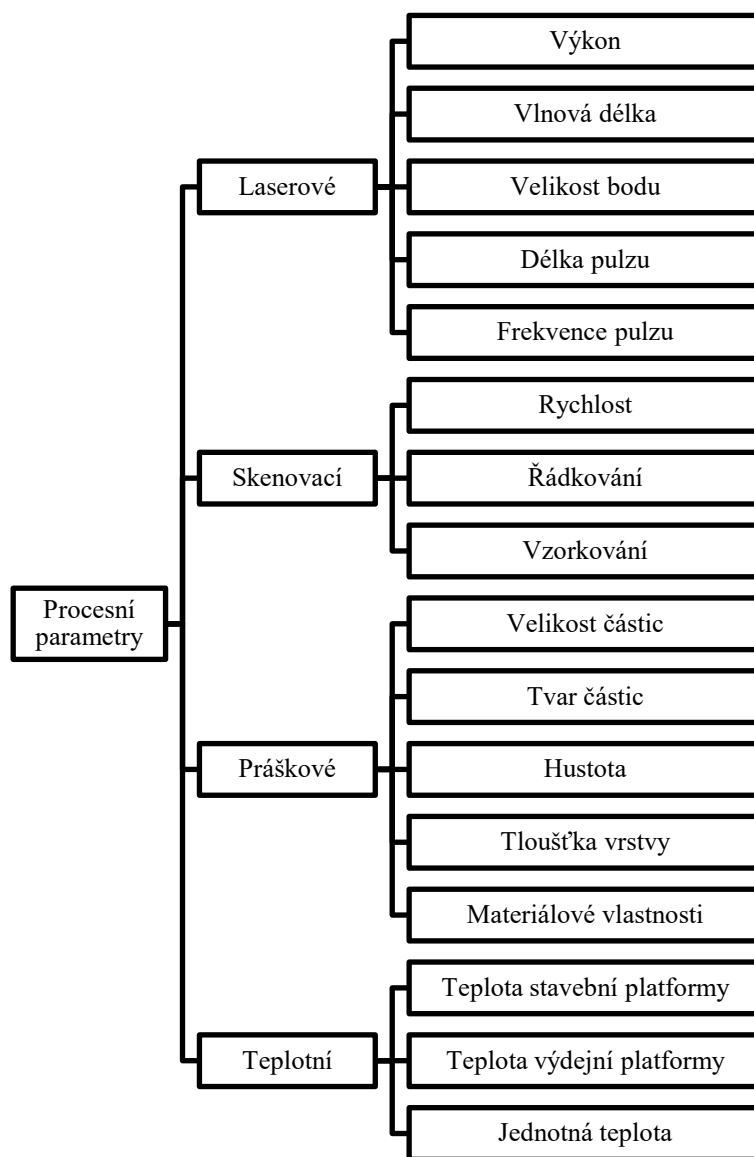
Obrázek 1 Procesy a technologie kovové aditivní výroby [13]



### 2.2.1 Spékání práškové vrstvy (Powder Bed Fusion)

Proces aditivní výroby PBF spočívá ve vyzařování tepelné energie z laserového nebo elektronového paprsku, který postupně spéká vrstvu prášku. Nejznámější technologie využívající tento proces jsou DMLS, SLM, SLS, EBM. [6]

Parametry v procesech spékání práškové vrstvy jsou: tloušťka vrstvy ( $t$ ), výkon laseru ( $P$ ), rychlost laserového skenování ( $v$ ) a strategie skenovací dráhy, šrafovací prostor ( $h$ ) a velikost laserového bodu ( $d$ ), velikost a distribuce částic, teplota předehřevu platformy a strategie skenování laserovým paprskem a další (obrázek 2.). [7]



Obrázek 2 Procesní parametry AM [7]

## 2.2.2 DMLS (Direct Metal Laser Sintering)

Přímé kovové laserové slinování (DMLS) vyvinuly společně firmy Rapid Product Innovations (RPI) a EOS (Electro Optical System – Německo), počátkem roku 1994, jako první komerční metoda rychlého prototypování k výrobě kovových dílů v jediném procesu. DMLS technologie je dobře známá jako přední technologie přímo produkující nástroje s požadovanými vlastnostmi. [8]

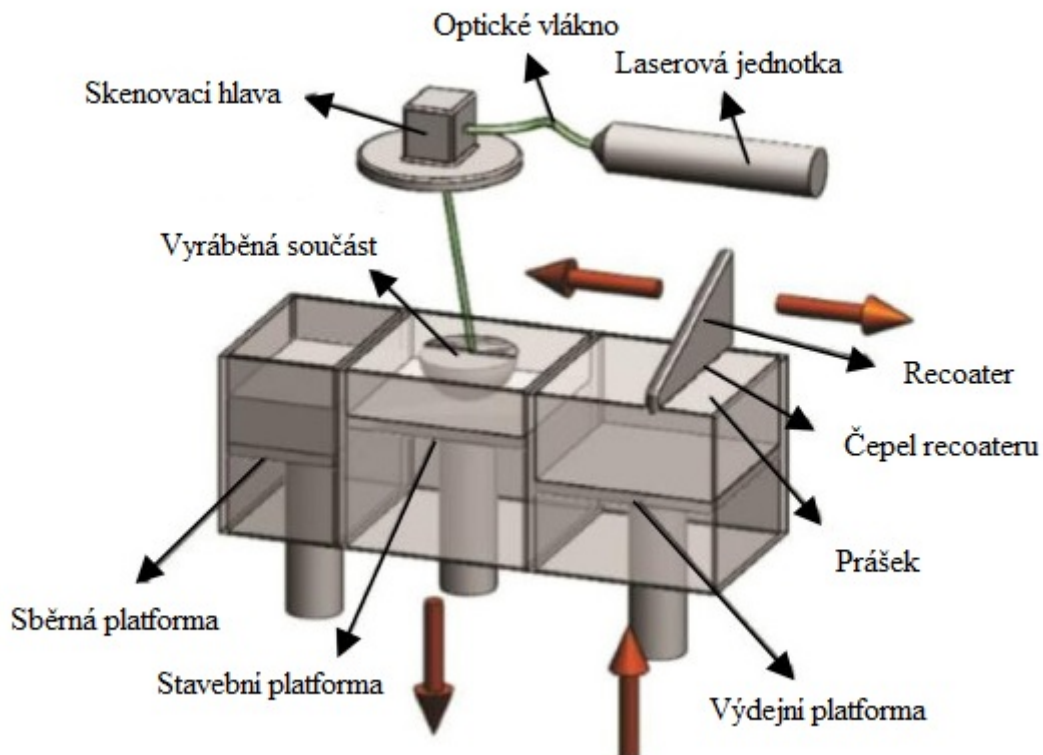
Technologie DMLS se používá téměř pro všechny kovové slitiny, je tak jednou z nejefektivnějších AM technologií. Její princip spočívá v rozprostření tenké vrstvy prášku, který je následně slinován laserem. Tento proces způsobí, že částice prášku se spojí, avšak nedochází k překročení teploty tání kovu. Následně je znovu nanášena vrstva prášku a proces se opakuje vrstva po vrstvě. Po dokončení tisku se součást nechá zchladnout, vyjme se a očistí se od kovového prášku. Zbytkový prášek může být recyklován a znovu použit pro tisk další součásti. Nesmírnou výhodou této technologie je absence zbytkových napětí a vnitřních defektů, které jsou běžným problémem konvenčně vyráběných součástí. Tyto vlastnosti jsou nejvýznamnější pro součásti, které budou zatíženy extrémním namáháním například v leteckém, vesmírném nebo automobilovém průmyslu. Nevýhodou této metody jsou velké vstupní i provozní náklady. [9]

Pomocí DMLS lze zpracovat téměř všechny kovy. Avšak doba a jejich složitost zpracování se může lišit kvůli rozdílům v chemickém složení, absorpci laseru, povrchovému napětí a vedení tepla. [10]

### 2.2.2.1 Princip DMLS

Na obrázku 3 je schéma principu DMLS. Pro tisk součásti musí stroj vykonat následující kroky. Stavební a výdejní platforma se sníží o velikost jedné vrstvy, aby se recoater mohl vrátit do výchozí pozice. Dále se zvýší výdejní platforma, čímž poskytne dostatek prášku pro novou vrstvu. Recoater se pak přesune z výchozí pozice doleva a rovnoměrně distribuuje prášek z výdejní platformy na stavební platformu. Přebytečný prášek spadne do sběrné platformy. Následuje pohyb skenovací hlavy, která vede laser po požadované trajektorii. Laser je velmi přesně aktivován a deaktivován na určitých místech. Laserem vyzářená energie je poté absorbována kovovým práškem, u kterého dochází ke spékání s předchozími vrstvami. Tento proces se opakuje po vrstvách, dokud není součást dokončena. Stroj může v závislosti na materiálu a procesních parametrech vyprodukovat za několik hodin 3D součást s vysokou komplexitou a přesností. Vyrobené součásti mají vlastnosti porovnatelné s konvenčními

způsoby výroby, nicméně v návaznosti na použití je potřeba dodatečný postprocessing, tepelné zpracování případně aplikace povlaku. [11]

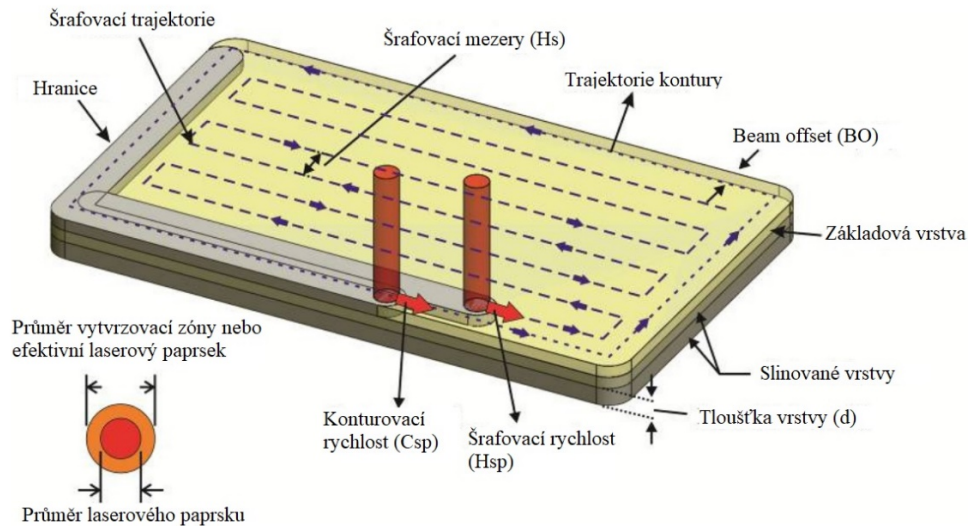


Obrázek 3. Schéma technologie DMLS [11]

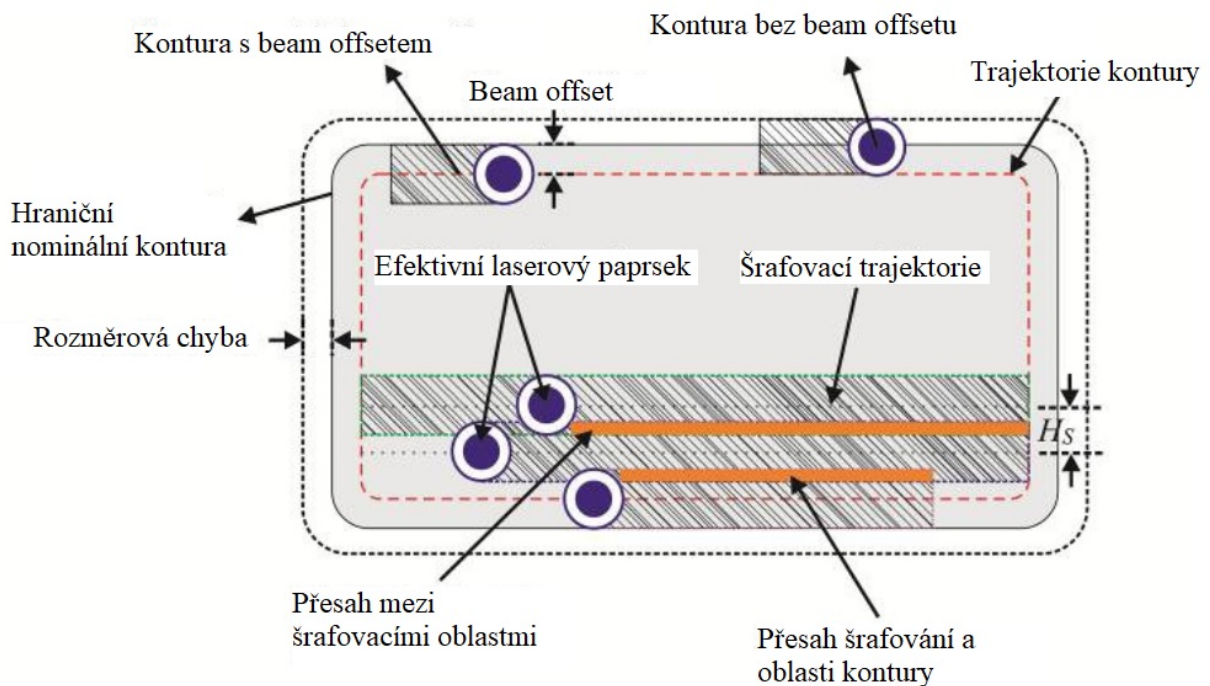
#### 2.2.2.2 Skenovací strategie

Obrázek 4. ukazuje laserové skenování horního povrchu tenké práškové vrstvy pro vytvoření obrysově oblasti rozvrstvené součásti. Zpočátku je celý obrys struktury vrstvy vystaven laserovému výkonu ( $L_{pw}$ ) a obrysově rychlosti ( $C_{sp}$ ). Protože průměr slinuté zóny je obvykle větší než průměr laseru, efektivní průměr laseru nebo vytvrzovací zóna, je nutné kompenzovat rozměrovou chybu a laserový paprsek musí být posunut o polovinu vytvrzovací šířky z obrysu dovnitř, aby se zajistilo, že obrys pozdější část bude přesně odpovídat původním CAD datům. Tato korekce polohy se nazývá Beam Offset (BO). Během šrafování se laserový paprsek několikrát pohybuje řádek po řádku, aby bylo zajištěno, že se proces slinování může úplně rozvinout. Vzdálenost mezi řádky se nazývá šrafovací vzdálenost ( $H_s$ ) a je nastavena přibližně na jednu čtvrtinu průměru laserového paprsku. Zde je opět definována hodnota Beam Offset s ohledem na okraj hranice a pokud je tato hodnota vyšší nebo menší než správná hodnota, částice ozářeného regionu nemusí být slinuty nebo naopak slinuty nadměrně. Dalším důležitým parametrem, který může vést ke zkreslení součásti nebo přerušení procesu, je tloušťka vrstvy. Pokud je hodnota příliš vysoká, nelze dosáhnout

optimální adheze mezi jednotlivými vrstvami, protože hloubka vytvrzování není dostatečná, a navíc může být touto vrstvou generováno mechanické napětí, které může vést k oddělení vrstvy níže. Pokud je daná hodnota menší, může dojít k odtržení struktury během procesu přidávání další vrstvy, protože recoaterem a jeho ostrím jsou zasaženy slinuté částice. [11]



Obrázek 4 Šrafovací strategie a procesní parametry [11]



Obrázek 5 DMLS Strategie [11]

## 2.3 Kovy a slitiny používané pro AM

Aditivní výroba je dynamický proces závisící na dostupných materiálech a jejich ceně. K dispozici je již velká škála různých kovových materiálů a jejich slitin. Nepřestává jich přibývat, a proto je snaha o standardizaci, lepší a rychlejší uvedení na trh. Některé z nich jsou uvedeny v tabulce 1. Větší spektrum materiálů zpřístupňuje nové možnosti a dosažení požadovaných vlastností finálního výrobku. Aby se využily výhody AM naplno, bude nutné vyvinout slitiny nové. Ti-6Al-4V byla zdaleka nejrozsáhleji zkoumána. To lze připsat silné obchodní poptávce pro složité titanové díly s nízkým objemem výroby. [12]

Tabulka 1 Přehled kovů a slitin pro AM [12]

Titan a jeho slitiny	Hliníkové slitiny	Nástrojové a maraging oceli	Super slitiny	Nerezové oceli	Žárovzdorné kovy
Ti-6Al-4V	Al-Si-Mg	H13	IN625	316 & 316L	MoRe
ELI Ti	6061	Maraging 300 (1.2709)	IN718	420	Ta-W
CP Ti	AlSi12	Cermety	Stellite	PH 15-5	CoCr
$\gamma$ -TiAl				PH 17-4	Alumina

### 2.3.1 Vysokopevnostní maraging oceli

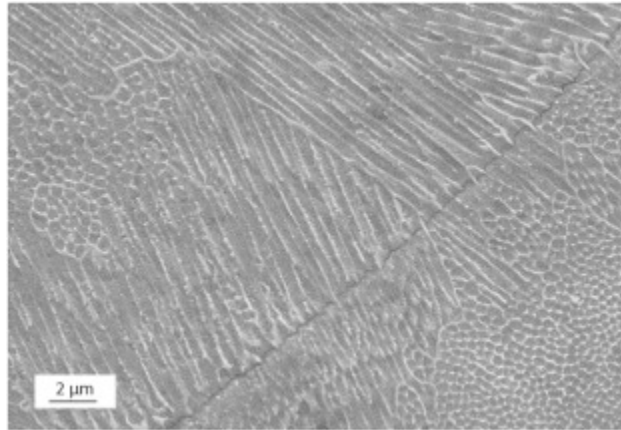
Neboli martenziticky stárnuté oceli, disponují vysokou pevností, houževnatostí a stabilitou při stárnutí. Od běžných ocelí se liší tvrzením metalurgickou reakcí, která neobsahuje uhlík. Spočívá v precipitaci sloučenin bohatých na nikl, kobalt a molybden. Díky velkým možnostem vytvrzení a odolnosti vůči abrazi jsou tyto oceli vhodné pro mnoho nástrojových aplikací například pro vstřikovací formy, tlakové licí formy apod. Dále se používají pro vysoko výkonné průmyslové součásti v leteckém a automobilovém průmyslu. [5, 14]

Pro vysokopevnostní oceli je nejpoužívanější slitina v AM 18Ni-300 (1.2709, X3NiCoMoTi 18-9-5) [14]

#### 2.3.1.1 Mikrostruktura

Pomocí metody PBF můžeme dosáhnout oceli s hustotou and 99 %, avšak oproti konvenčně vyrobeným plně martenzitickým ocelím je zásadní rozdíl v mikrostrukturu. [14, 15] Mají mikrostrukturu zrnitého / dendritického tuhnutí s velikostí zrn přibližně 0,3–2  $\mu\text{m}$ . V rámci této mikrostruktury tuhnutí dochází k martenzitické fázové transformaci. Výsledná mikrostruktura vypadá poněkud odlišně od konvenčně vyráběných vysokopevnostních ocelí: bloky martenzitových jehlic se nacházejí hlavně v jednotlivých solidifikačních zrnech,

protože jsou často (ne vždy) omezeny zadrženým austenitem podél hranic zrn. Zadržený austenit je důsledkem obohacení legujících prvků v inter dendritické (mezibuněčné) oblasti mikro segregací během tuhnutí. Obohacení Ni stabilizuje austenit na pokojovou teplotu. Proto vysokopevnostní oceli vyráběné AM obsahují značné množství austenitu (6–11 %, v závislosti na podmínkách zpracování). [14,15,16,17]



Obrázek 6 Mikrostruktura maraging oceli 18Ni-300 vyrobena metodou PBF [14]

### 2.3.1.2 Tepelné zpracování

Zrnitá mikrostruktura je zachována při stárnutí při běžných teplotách (490–530 °C). Při vyšších teplotách stárnutí, například 600 °C, dochází k podstatné reverzi austenitu. Buněčná mikrostruktura po ošetření roztokem zcela zmizí (obvykle mezi 815 a 840 °C, kde je ocel plně austenitická) a po kalení je nahrazena plně martenzitickou, ale s hrubší mikrostrukturou. To vede ke snížení tvrdosti a pevnosti ve srovnání s vyrobeným stavem. Jak již bylo zmíněno, důvodem pro vynikající kombinaci pevnosti a houževnatosti vysokopevnostních ocelí je vytvrzení martenzitické mikrostruktury intermetalickými precipitáty během stárnutí. Za podmínek produkce pomocí metody PBF se v 18Ni-300 nenacházejí žádné precipitáty ani malé shluky atomů, což naznačuje dostatečně vysokou rychlost ochlazení k potlačení precipitace. [14]

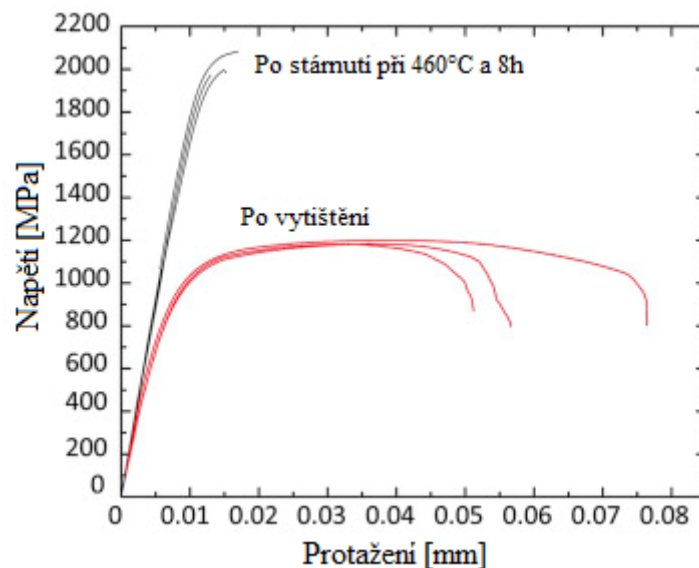
Precipitační sekvence při tepelném zpracování stárnocích vzorků vyrobených metodou PBF je srovnatelná s konvenčně vyráběnými vysokopevnostními ocelmi: nejdříve se vytvoří sférické precipitáty  $Ni_3X$  (fáze  $\eta$ ), kde X je Ti, Al, Mo následovány precipitací  $Fe_7Mo_6$  ( $\mu$ -fáze). [15, 16]

### 2.3.1.3 Mechanické vlastnosti v tahu

Celkově jsou mechanické vlastnosti vysokopevnostní oceli vyráběné AM srovnatelné s konvenčně vyráběným materiálem, ale nejsou zcela identické. Materiál vyrobený PBF

vykazuje stejný nebo mírně vyšší výdrž a konečnou pevnost v tahu ve srovnání s konvenčně vyráběným materiálem v nestárnoucím stavu, a to i přes jemnější mikrostrukturu vyplývající z výroby metodou PBF. Po tepelném zpracování stárnutím (před i po aplikaci roztoku) je pozorováno významné zvýšení tvrdosti (např. z 381 na 645 HV) a pevnosti v tahu doprovázené snížením tažnosti, podle očekávání. [15,16]

Na obr. 7. jsou uvedeny výsledky zkoušek tahem před a po stárnutí. Bylo zjištěno, že zadržovaný austenit nehraje klíčovou roli v procesu lomu a že reverze austenitu hraje podružnou roli ve srovnání se zesilujícím účinkem intermetalických precipitátů, z čehož vyplývá, že ošetření vzorků produkovaných PBF roztokem není nutné a součásti mohou být přímo stárnuty. [14, 17]



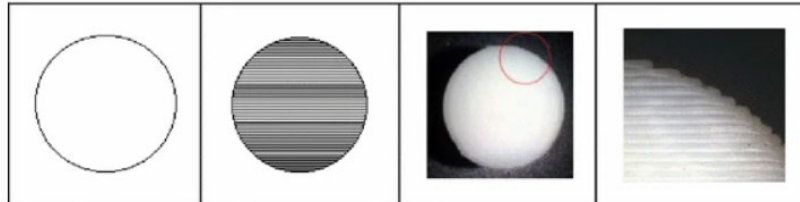
Obrázek 7 Tahové křivky PBF vysokopevnostní oceli 18Ni-300 před a po stárnutí při 460 °C po dobu 8 hodin [14]

#### 2.3.1.4 Únavové vlastnosti

Únavové vlastnosti jsou izotropní s mezí únavy 600 MPa (tj. 1/3 statické meze kluzu, v souladu s výsledky pro běžně vyráběnou vysokopevnostní ocel). Izotropie je způsobena slabou strukturou v tomto materiálu v důsledku transformace martenzitické fáze, jak je vysvětleno výše. Navzdory vzorkům, které jsou prakticky bez vad, je tažnost a chování při lomu stále silně ovlivněno vlastnostmi jakýchkoli defektů zbývajících v materiálu, tj. jejich orientací, morfologií, uspořádáním atd. [16, 17]

## 2.4 Postprocessing

Procesy AM jsou nejvhodnější pro součásti, které jsou obecně konstrukčně složité s křivkami, tvarovými prvky a mají pouze omezené procento rovných povrchů. Hlavním problémem komerčního využití je však špatná povrchová úprava způsobená „efektem schodovitosti povrchu“, který je znázorněn na obr. 8. [18]



Obrázek 8 Ilustrace AM procesů na bázi vrstev a souvisejícího efektu schodovitosti povrchu. a) CAD model, b) Krájení c) Skutečný výstup podle AM d) Efekt schodovitosti [18]

Po procesu slinování je třeba provést další dodatečné zpracování slinovaných součástí, aby se dosáhlo přiměřené drsnosti povrchu a zlepšení tvrdosti. Následné zpracování zahrnuje brokování ocelovými kuličkami ke zvýšení tvrdosti povrchu a sražení ostrých rohů jemným keramickým médiem pro odlehčení napětí. Ruční broušení a leštění se provádí za účelem zlepšení kvality povrchu se zvláštním důrazem na svislé stěny a štěrby; a následně druhé brokování jemným keramickým médiem k vyvolání tlakového napětí na povrch. [19]

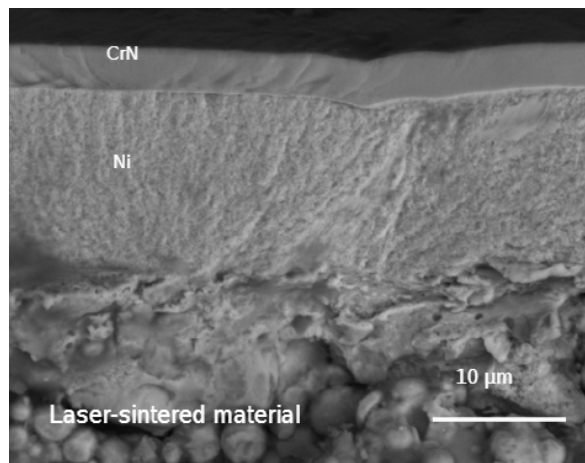
Technologie DMLS poskytuje surový povrch modelu ve srovnání se běžně soustruženým povrchem s drsností povrchu přibližně Ra 8,75  $\mu\text{m}$ . Tuto drsnost povrchu lze vylepšit až na Ra 0,025  $\mu\text{m}$ , což se kvalifikuje jako super zrcadlový povrch. Existuje několik procesů, které lze použít k dosažení požadované drsnosti povrchu nebo povrchové úpravy součástí vyrobených pomocí DMLS, a to abrazivní tryskání (dřev a keramika), brokování, leštění, elektrochemické leštění, optické leštění (ruční dokončování), CNC dokončování / obrábění, proces mikro obrábění (MMP), obrábění abrazivním tokem (extrudovaný ostřík). Další metodou je laserové leštění pomocí CO2 nebo Nd: YAG laserů. [18, 19]

### 2.4.1 Postprocessing povlakováním AM součástí

Vlastnosti laserem slinutých dílů lze významně zlepšit nanášením tvrdých povrchových vrstev. Tvrdé povrchové úpravy mají tendenci zlepšovat odolnost vůči opotřebení a tepelné vlastnosti slinutých dílů. Některá nedávná šetření týkající se nanášení různých povlaků se zaměřila na zlepšení životnosti nástroje a použití slinutých dílů pro formování abrazivních materiálů a materiálů s vysokým zatížením. Bylo zjištěno, že nanášením tvrdého niklu je možné vyplnit dutiny a trhliny slinutého materiálu a také zlepšit drsnost povrchu nástroje.



Kromě dodatečného nanášení vrstvy CrN (pro lití hliníku) nebo TiN (pro vstřikování abrazivních plastů) lze kromě zlepšení tepelného odporu dosáhnout také vysoké povrchové tvrdosti (obr. 9). [19]



Obrázek 9 Nanesené vrstvy Ni a CrN na laserem sli nuté součásti [19]

Výhodou povlakování AM součástí je změna povrchové charakteristiky, a to odolnost proti tření, opotřebení, vysokým teplotám a chemická odolnost. Součást může být vytisknuta jako odlehčená a pomocí tvrdého povlaku o velikosti několik mikronů zcela splnit svou funkci. Metoda PVD se používá zejména díky vcelku neomezeným možnostem povlakových a povlakovaných materiálů. Součásti vyrobené pomocí AM mají většinou velmi složitou geometrii, např. chladicí kanálky nástroje nebo reliéf vstřikovací formy. Další benefit metody PVD je u těchto složitých tvarů, kde lze bezproblémově nanést povlak např. odolný vůči korozi, zaručující těsnost nebo tvrdost. Při rozhodování, jaký povlak použít a jakou metodou ho aplikovat potřebujeme nejdříve vědět, jaké vlastnosti povrchu požadujeme. Cílem je dosáhnout takové charakteristiky povrchu, která zaručí správnou funkčnost součásti. Povlakování má své limity, záleží na připravenost povrchu, procesních parametrech pro optimální adhezi, které jsou jiné pro každou velikost substrátu, tvar a materiál. U běžných povlakových materiálů jsou parametry již známé, nicméně u nových materiálů musí proběhnout empirické testování a podle něj se volí optimální parametry. [20, 26, 28]

## 2.5 Současný stav problematiky povlaků

### 2.5.1 Materiály povlaků

Povlak můžeme definovat jako vrstva materiálu, která je nanesena na materiál substrátu. Povlaky lze zjednodušenou formou rozdělit na tvrdé a měkké, kdy dělicí hodnotou je tvrdost 10 GPa, tabulka 2.

Tabulka 2 Rozdělení povlaků podle tvrdosti

měkké <10GPa	tvrdé > 10GPa
polymery	oxidy
měkké kovy	karbidy
sulfáty	nitridy
alkalické kovy	boridy
halogenidy	na bázi uhlíku

Povlakování řezných nástrojů je v dnešní době velmi rozšířené. S rostoucími nároky na produktivitu výroby je to metoda snížení nákladů za dodržení procesních parametrů a v mnoha případech i jejich zvýšení či zlepšení. Příkladem aplikace jsou řezné nástroje a VBD. Povlaky poskytují elegantní řešení proti účinkům opotřebení, teplotnímu namáhání, provoznímu tření a korozi ať už se jedná o fyzikálně či chemicky aplikované povlaky. Super tvrdé povlaky jako jsou diamantové, nano kompozitní nebo KNB dosahující tvrdosti 40–70 GPa svou tloušťkou neovlivňují geometrii nástroje, zároveň zvyšují jeho životnost a umožňují pracovat při vyšších řezných rychlostech. Náklady na tyto tenké vrstvy jsou obvykle minimální oproti ceně nástroje, a proto se jejich aplikace velmi vyplatí při jakémkoliv použití. Povlak se může skládat i z více vrstev, kdy každá vrstva propůjčuje speciální vlastnosti. Mezi parametry výběru povlaku spadá materiál povlaku, jeho tloušťka, tvrdost, složení substrátu a metoda povlakování. Vždy se musíme rozhodnout, jakou bude povlak vykonávat roli, např. odolnost vůči opotřebení, fyzikální, či chemická odolnost nebo i typ nástroje a jeho řezné podmínky. Nejčastěji používané povlaky jsou uvedeny v tabulce 3. [21, 22, 24, 26, 28]

Tabulka 3 Materiály povlaků [24]

Typ vrstvy	Složení	Barva	Tloušťka [μm]	Tvrdost [GPa]	max. teplota použití	koefficient tření proti oceli
TiCN MP	TiCN multi	bronzově hnědá	1-4	33	400	0,20
TiCN	TiCN	šedá	1-4	37	400	0,20
TiN	TiN	zlatá	1-7	25	600	0,55
CrN	CrN	stříbrně šedá	1-4/10	18	700	0,30
TiAlN	TiAlN multi	fialová	1-4	30	800	0,40
AlTiN	AlTiN	černá	1-4	38	800	0,70
AlTiCrN	AlTiCrN	tmavě šedá	1-4	40	900	0,55
CrTiN	CrTiN	zlatá	1-4	30	600	0,40
AlXN3	---	černá	3-5	32	1000	0,40

cVlc	TiCN/DLC	černo šedá	1-3	37	450	0,15
CROMVIc2	CrN/DLC2	černá	1-5	25	700/450	0,1
nACo	---	fialově modrá	1-4	45	1200	0,45
nACRo	---	modro šedá	1-4	40	1100	0,35
DLC	---	černá	1	18	400	0,15
DLC2	---	černá	01.III	25	450	0,1
MoS2	MoS2	černá	0,5-1	-	400	0,1
nACo3	TiN+AlTiN+AlTiSiN	fialově modrá	01.IV	45/34	1200/900	0,45

## 2.5.2 TiAlSiN

Za účelem zlepšení řezného výkonu a prodloužení životnosti řezných nástrojů se povlak TiAlN široce používá v oblasti obtížně obrobitelných materiálů, jako je slitina titanu a žáruvzdorné slitiny. Díky své extrémní tvrdosti, vysoké odolnosti proti opotřebení a odolnosti proti oxidaci při vysokých teplotách nad 800 °C. Avšak pro podmínky vysokorychlostního obrábění a obrábění za sucha, je nutné jeho vlastnosti ještě zlepšit, aby byly splněny požadavky vysoké produktivity, kvality a šetrnosti k životnímu prostředí. [33]

Přidání nekovového prvku Si do povlaku TiAlN může bránit růstu sloupcových krystalů povlaku a vytvářet nanokrystalickou vrstvu TiAlN pokrytou amorfni sloučeninou Si – N, což vede ke zlepšení tvrdosti, oxidační odolnosti a tepelné stability povlaku. Hlavní funkce přidání prvku Si je zlepšení tvrdosti povlaku. Když se do povlaku TiAlN přidá Si prvek, objeví se mikrostruktura nanokrystalického nc-TiAlN pokrytého amorfni fází a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, která může bránit růstu zrn. To zvýší počet hranic zrn a také povede k optimalizaci textury, čímž se zvýší tvrdost povlaku TiAlSiN na více než 40 GPa. Dále se zlepší tepelná stabilita a oxidační odolnost povlaku. Amorfni fáze Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> může inhibovat tvorbu fáze h-AlN a zlepšit tepelnou stabilitu povlaku TiAlSiN. Kromě toho Si prvek inhibuje transformaci TiO<sub>2</sub>, čímž zlepšuje oxidační odolnost povlaku TiAlSiN (nad 1000 °C). Vyšší zbytkové napětí a generovaná křehká fáze Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> však výrazně snižují adhezi povlaku TiAlSiN. Proto je zásadní zlepšit adhezi na základě zachování vysoké tvrdosti a oxidační odolnosti povlaku TiAlN při vysoké teplotě. [33]

## 2.6 Tenké vrstvy

Tenká vrstva je definována jako látka nanosená na povrch substrátu o velikosti několika mikrometrů až nanometrů. Účelem tenkých vrstev je zlepšit vlastnosti materiálu např. tvrdost,

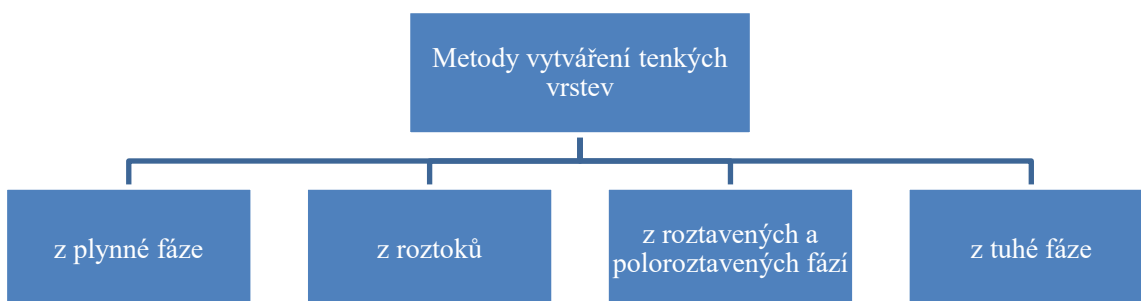
odolnost vůči opotřebení a životnost součásti, materiálově mají totiž mnohem lepší vlastnosti než jejich konvenční využití. Vrstvy lze rozdělit například podle tloušťky, tabulka 4. Přejít mezi vrstvou a základním materiálem může být gradientní neboli difuzní, bez difuzní a s ostrým rozhraním mezi vrstvou a substrátem. Povlak může mít heterogenní i homogenní fáze, různé krystalické struktury a počet vrstev. Povlaky z více vrstev jsou aplikovány tam, kde je několik rozdílných požadavků na finální vlastnosti součásti. Další možností jsou gradientní povlaky, kde se mění vlastnosti a chemické složení povlaku postupně od substrátu až k povrchu vrstvy. [23, 24, 25, 27]

Tabulka 4 Rozdělení vrstev podle tloušťky vrstvy

$t < 100 \text{ nm}$	$t = 1 \text{ až } 100 \text{ }\mu\text{m}$	$t = 0,1 \text{ až } 1 \text{ mm}$
ultratenké vrstvy	tenké vrstvy	tlusté vrstvy

### 2.6.1 Technologie vytváření tenkých vrstev

Existuje několik metod depozic povlaků a vrstev. Jejich použití závisí zejména na vlastnostech substrátu, materiálu tenké vrstvy a tloušťce vrstvy. Obrázek 10 ukazuje základní rozdělení metod vzniku tenkých vrstev. [24, 25, 26]



Obrázek 10 Rozdělení metod vytváření tenkých vrstev

Dvě nejčastější metody nanášení jsou PVD (physical vapor deposition) a CVD (chemical vapor deposition). Tloušťka povlaků se PVD pohybuje kolem 1–5  $\mu\text{m}$ , kdežto u CVD je o několik mikrometrů 4–20  $\mu\text{m}$  větší. Nejvýznamnějším rozdílem je teplota depozice, která se u PVD pohybuje okolo 300–600  $^{\circ}\text{C}$ , kdežto u CVD je mnohonásobně vyšší až 1000  $^{\circ}\text{C}$ . Mezi výhody CVD patří rovnoměrné povlakování součástí se složitými tvary, protože tato metoda je založena na povrchově kontrolovatelné chemické reakci.

PVD je "line-of-sight" technika čili plocha na kterou je tenká vrstva deponována musí být otočená k zdrojovému terči. První významnou výhodou PVD technologie jsou nízké depoziční teploty, které umožňují deponovat tenké vrstvy ze širokého intervalu materiálů s nízkou teplotou popouštění. Druhou výhodou PVD technik je možnost deponovat metastabilní fáze, tedy materiálové kompozice a / nebo fáze, které nejsou termodynamicky stabilní. Třetí, důležitou výhodou PVD technik je možnost depoziční kontrolovat parametry vnitřního napětí v tenkých vrstvách. Např. v systému TiN / TiC / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> povlaku naneseném na nástroji z cementování oceli technikou CVD jsou vnitřní napětí vždy tahové. Ale při stejném materiálu naneseném PVD technikou je zbytkové vnitřní napětí tlakové. [24, 26, 27, 28]

## **2.7 Vlastnosti tenkých vrstev**

Pro zlepšování mechanických vlastností povrchů obráběcích nástrojů je potřeba funkční plochy deponovat tzv. tvrdými a super tvrdými vrstvami. Charakteristickými vlastnostmi tenkých vrstev používaných pro zlepšení mechanických vlastností jsou vysoká mikro tvrdost a výborná adheze k substrátu, odolnost vůči korozi a nízký koeficient tření. Typickými představiteli tvrdých vrstev jsou povlaky karbidů, nitridů a přechodových kovů např.: TiN, WC ale i elektricky nevodivé materiály, např. diamant, SiC, a oxidové vrstvy Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. [22, 23, 24]

### **2.7.1 Tvrdost tenkých vrstev**

Tvrdost patří mezi základní charakteristiku mechanické vlastnosti systému. Její zkoušení nám dává informace o elastickém a plastickém chování materiálu v měřené oblasti. Tvrdost můžeme definovat jako odpor materiálu proti plastické deformaci, vyvolané zátěží tělesa např. indentoru. Při měření mikro a nano tvrdosti tenkých vrstev se volí hodnoty zatížení tak, aby nedošlo k proniknutí přes vrstvu do substrátu. Maximální průnik indentoru smí být 1/8 tloušťky dané vrstvy se zatížením max 200 g. Super tvrdé vrstvy mají tvrdost od 40 do 80 GPa a dále se dělí na extrinsicky super tvrdé a intrinsicky super tvrdé materiály. [23, 24]

### **2.7.2 Adheze tenkých vrstev**

Jednou z nejdůležitějších vlastností vrstev je jejich schopnost spojení s materiálem substrátu i při pracovních podmínkách – adheze. Tato pevnost vazby závisí na několika parametrech. Např. stav vrstvy a substrátu, kde vzniká napětí, a proto je třeba ho snižovat.

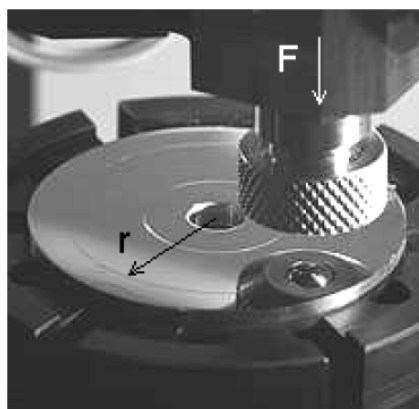
Dalšími ovlivňujícími faktory jsou podmínky depozice, konkrétně teplota, délková roztažnost vrstvy i substrátu a tloušťka vrstvy. Čím je vrstva tlustší, tím se zvyšuje napětí ve vrstvě. Před aplikací povlaku je vždy třeba povrch dokonale očistit ať už chemicky tak vývojem a vyleštit. [23, 24]

### 2.7.3 Tribologická analýza

Hlavní náplní tribologické analýzy je zjištění koeficientu tření a jeho průběhu při kontaktu dvou materiálů, a to hodnoceného materiálu a tělesa předepsaných vlastností neboli PINu. Díky kontaktu tělesa s povrchem vzniká stopa opotřebení. Ta se dále měří profilometrem a získáme cenné informace o procesu opotřebení a chování rozhraní mezi substrátem a vrstvou. Tribologické metody dělíme podle vzájemného pohybu materiálu a tělesa, způsobu kontaktu a geometrického tvaru tělesa. Jedna z nejpoužívanějších tribologických metod je analýza pin on disk. [32]

#### 2.7.3.1 Princip metody pin on disk

Tato analýza spočívá v přiložení PIN tělesa na vzorek ve tvaru disku ve vzdálenosti  $r$  od středu. Disk se otáčí určenou rychlostí a PIN je zatížen požadovanou silou, čímž vzniká na povrchu disku vrypová stopa. Disk vykoná požadovaný počet cyklů otočení. Vrypová stopa se poté analyzuje z hlediska hloubky, tvaru, okolí, plochy průřezové vrstvy. Mezi parametry ovlivňující rozsah opotřebení patří zatěžující síla, velikost kontaktní plochy, počet cyklů, relativní rychlost pohybem mezi tělesem a materiálem, teplotě povrchu, použití mazací látky, kvalita a stav povrchu, fyzikální a mechanické vlastnosti tělesa a testovaného materiálu. Materiál tělesa musí být tvrdší než testovaný materiál. Nejčastějším PINem bývá kulička o průměru 6 mm z oxidové keramiky  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . [32]



Obrázek 11 Analýza PIN on DISK [32]

### 3 Návrh vlastního řešení

Pro aplikaci pneumatické očišťovací pistole (jehlový oklepávač) byl navržen píst se speciální interní strukturou pro aditivní výrobu z maraging oceli. Tisknutá součást bude upravena postprocessingem a podstoupí TZ. V důsledku této aplikace se zvýšenými nároky na odolnost vůči opotřebení povrchu a požadavku pro co nejmenší koeficient tření, kvůli kontaktu pístu s dalšími funkčními plochami a eliminaci vibrací bylo rozhodnuto, že na píst bude deponována tenká vrstva.

Ověření vlivu tenké vrstvy na vlastnosti součásti bude spočívat ve vytištění vzorků z maraging oceli MS1 pomocí technologie DMLS na průmyslové 3D tiskárně EOS M 290. Vzorky podstoupí tepelné zpracování žháním a vytvrzením a následně budou deponovány tenkou vrstvou MARWIN SI od firmy SHM, s.r.o., která se specializuje na super tvrdé průmyslové povlaky. Vzorky se zanalyzují z hlediska mikrostruktury, chemického složení, tvrdosti substrátu a nano tvrdosti vrstvy. Následně budou pomocí tribologické analýzy porovnány koeficienty úběru materiálu a tření mezi „as built“ TZ vzorky a TZ vzorky s deponovanou vrstvou.

V poslední části bude tištěný píst experimentálně ověřen z hlediska dynamických účinků. Měřit se bude průběh vibrací, hluku a teploty pro původní i nový píst.

#### 3.1 MS1 prášek

Díly vyrobené z EOS Maraging Steel MS1 mají chemické složení podle americké klasifikace 18% Ni Maraging 300, evropské 1.2709 a německé X3NiCoMoTi 18-9-5. Tento druh oceli se vyznačuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi a je snadno tepelně zpracovatelný použitím jednoduchého procesu tepelného stárnutí za účelem získání vynikající tvrdosti a pevnosti. Díly vyrobené z EOS Maraging Steel MS1 jsou snadno obrobitelné po procesu tisku a lze je snadno dodatečně kalit na více než 50 HRC stárnutím při 490 °C po dobu 6 hodin. Ve stavovém i stárnoucím stavu mohou být díly strojně opracovány, svařeny, mikroskopicky zušlechťeny, vyleštěny a případně potaženy. Vzhledem k metodě vrstveného budování mají součásti určitou anizotropii, kterou lze vhodným tepelným zpracováním snížit nebo odstranit - např. roztokem při 940 °C po dobu 2 hodin. Materiálový list se nachází v příloze. [29]

Tabulka 5 Detaily prášku MS1

Druh produktu	Název produktu	Označení materiálu	Typická aplikace
Oceli	EOS Maraging Steel MS1	AMS6514, 18Ni300	Vstřikovací formy, mechanicky zatěžované součásti

### 3.2 Průmyslová 3D tiskárna EOS M 290

Vhodná pro aditivní výrobu vysoce kvalitních kovových dílů – s vylepšenou kvalitou funkcí pro správu. S objemem pracovní komory zařízení 250 x 250 x 325 mm, EOS M 290 umožňuje rychlou, flexibilní a nákladově efektivní výrobu kovových dílů přímo z CAD dat. Vlákenný laser - 400 Watt poskytuje mimořádně vysokou kvalitu paprsku v kombinaci se stabilitou výkonu. Systém pracuje v ochranné atmosféře dusíku, stejně jako prostředí argonu. To umožňuje systému zpracovávat široké spektrum materiálů: od lehkých kovů, nerez a nástrojových ocelí po vysoce legované slitiny. [29]



Obrázek 12 Tiskárna EOS M 290 [29]

Tabulka 6 Technická specifikace EOS M 290 [29]

Konstrukční objem	250 x 250 x 325 mm (výška včetně stavební platformy)
Typ laseru	Yb-vlákenný laser; 400 W
Precizní optika	F-theta čočka; vysokorychlostní skener
Skenovací rychlost	up to 7.0 m/s
Průměr ostření	100 μm
Zdroj	32 A / 400 V
Spotřeba	max. 8,5 kW/ průměr 2,4 kW/s ohřevem platformy 3,2 kW
Přívod stlačeného vzduchu	7,000 hPa; 20 m <sup>3</sup> /h



Rozměry (Š x D x V)	2,500 x 1,300 x 2,190 mm
Doporučené instalační místo	min. 4,800 x 3,600 x 2,900 mm
Váha	přibl. 1,250 kg
Software	EOSPRINT incl. EOS ParameterEditor, EOSTATE Everywhere, EOSCONNECT Core, EOSCONNECT MachinePark, Materialise Magics Metal Package and modules

### 3.3 Společnost SHM, s.r.o.

Společnost působí na trhu průmyslové přípravy PVD povlaků již od roku 1993. Kromě rozvoje vlastních PVD technologií nabízí odborné a zákaznické služby.



Obrázek 13 Logo firmy SHM [30]

Tyto služby tvoří 4 segmenty nabídky SHM – PVD povlaky, úpravy povrchů, služby a výzkum. Věnují se jak novým PVD technologiím a povlakům, kde uplatňují řadu vlastních patentů, tak i jiným povrchovým úpravám, které významně umocňují funkci PVD povlaků.

Základem všech 4 segmentů je vlastní a dlouhodobý výzkum a vývoj. Nabízí originální PVD technologie, založené na principech odpařování materiálu pomocí nízkonapěťového oblouku či magnetronového naprašování z rotačních katod, představující světovou špičku. Drží světové prvenství v průmyslové přípravě super tvrdých nano kompozitních povlaků. Publikace, výsledky a patenty SHM patří k často citovaným u odborné veřejnosti a jsou i z hlediska osvěty v oblasti PVD technologií v mnoha případech průkopnické.

Společnost sídlí ve vlastním areálu v Šumperku. Od roku 2004 si udržují certifikaci ISO 9001. [30]

### 3.3.1 Portfolio SHM – Vrstva MARWIN SI

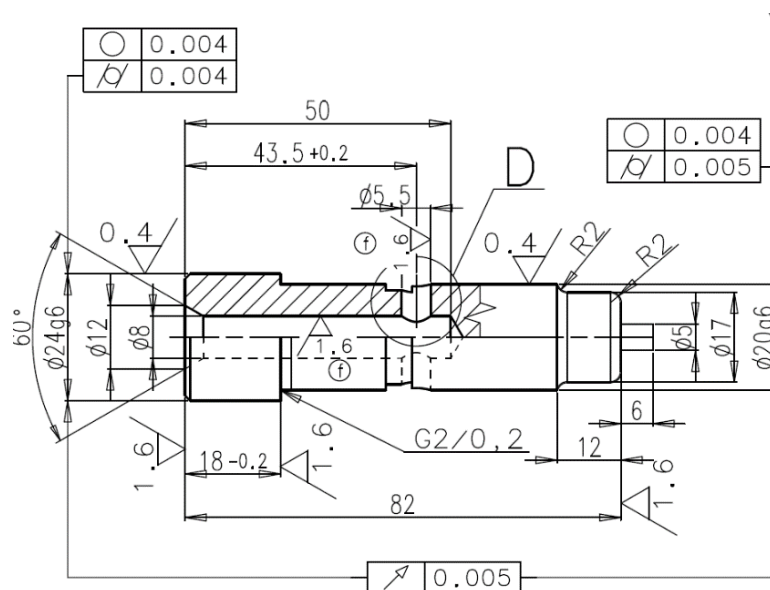


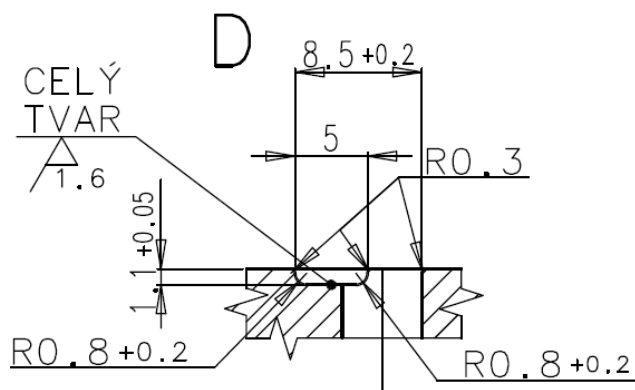
Obrázek 14 PVD Povlak MARWIN SI [30]

PVD povlak MARWIN SI je tvořen nano kompozitní TiAlSiN vrstvou, která zaručuje velmi vysokou tvrdost, tepelnou i chemickou stabilitu. Jedná se o univerzální povlak pro nástrojové aplikace. [30]

### 3.4 Tisknutá součást – vzduchový píst pneumatické očišťovací pistole

Výhodou 3D tisku v tomto případě aplikace je především výroba všech vnitřních tvarů a dutin, které mohou být optimalizovány za účelem zvýšení efektivity proudění a vzniklého tlaku na stěny bez dodatečného obrábění. Dalším benefitem 3D tisku je, že díl se vyrobí již pouze s přídatky pro obrábění, resp. broušení na požadovanou kvalitu a přesnost povrchu. Funkčnost optimalizovaného tvaru a kvalita 3D tištěného povrchu musí být však funkčně ověřena. [34]





Obrázek 15 Výkres pístu [34]

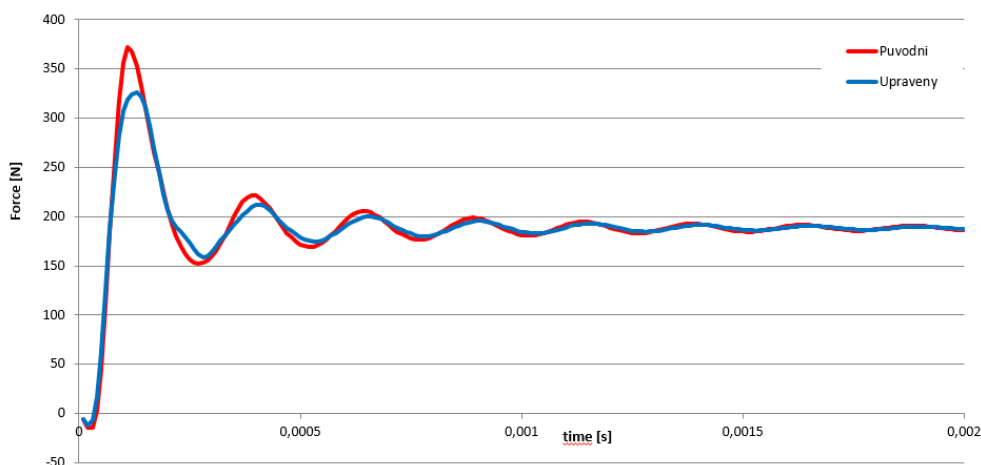
### 3.4.1 Konstrukční návrh

Při konstrukčním návrhu pístu byla zahrnuta optimalizace pro 3D tisk pomocí analyzovaných porézních struktur. Cílem řešení bylo snížit hmotnost se zachováním, popř. zvýšením účinnosti procesu ze strany pístu. V rámci konstrukčního návrhu bylo třeba vzít v potaz zjištění optimální hmotnosti pístu a její rozložení v použité struktuře, dále zjištění optimálního poměru tlakových ploch a optimalizace kanálků v pístu. Na základě původního návrhu bylo provedeno několik dalších variant zohledňujících technologičnost tisku, obrázek 16. [34]

Název	Označení	Řež
Originální	ZO / VO	
Upravený	ZU / VU	
Hybrid	ZH / VH	
PS (porézní struktura)	ZP / VP	

Obrázek 16 Vzniklé varianty vzduchového pístu [34]

Po důkladných analýzách bylo zjištěno, že významné snížení hmotnosti pístu je kontraproduktivní. Proto finální řešení snížilo hmotnost pouze o necelých 10 %. Dále byla soustředěna pozornost na funkční plochy vytvářející pohyb pístu. Zde byl vytvořen nový tvar vnitřního prostoru zajišťující vyšší stabilitu pohybu pístu díky průběhu prodění vzduchu upraveným kanálkem. Následně byla ještě upravena konstrukce porézní struktury. [34]



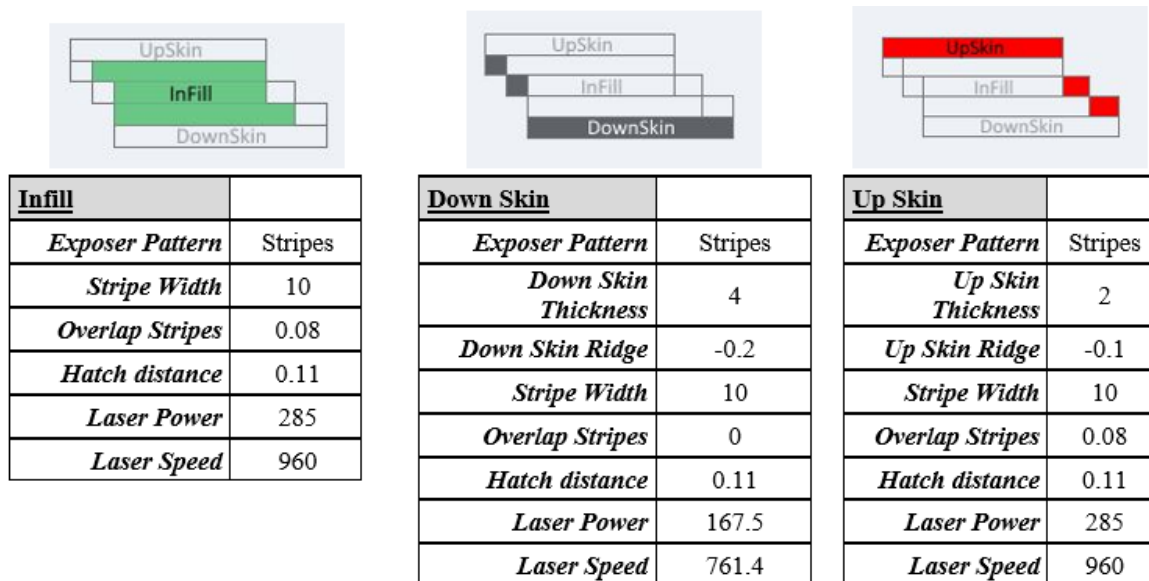
Obrázek 17 Průběh dynamických účinků [34]

### 3.4.2 3D tisk

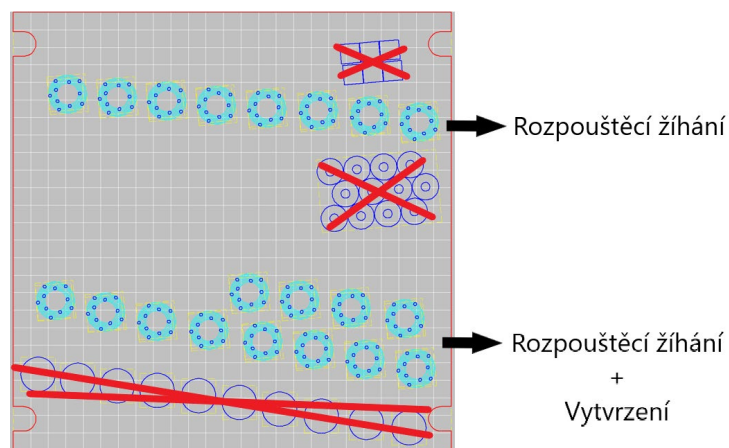
Tabulka 7 Přehled tisknutých vzorků

Označení	Popis	Tepelné zpracování	Tenká vrstva	Ks
ZO	Píst originální	Rozpouštěcí žihání 820°C	NE	2
VO		Vytvrzení	NE	2
VO		Vytvrzení	ANO	1
ZU	Píst upravený	Rozpouštěcí žihání 820°C	NE	2
VU		Vytvrzení	NE	2
VU		Vytvrzení	ANO	1
ZP	Píst upraven + porézní struktura	Rozpouštěcí žihání 820°C	NE	2
VP		Vytvrzení	NE	2
VP		Vytvrzení	ANO	1
ZH	Píst upravený + hybridní struktura	Rozpouštěcí žihání 820°C	NE	2
VH		Vytvrzení	NE	2
VH		Vytvrzení	ANO	1

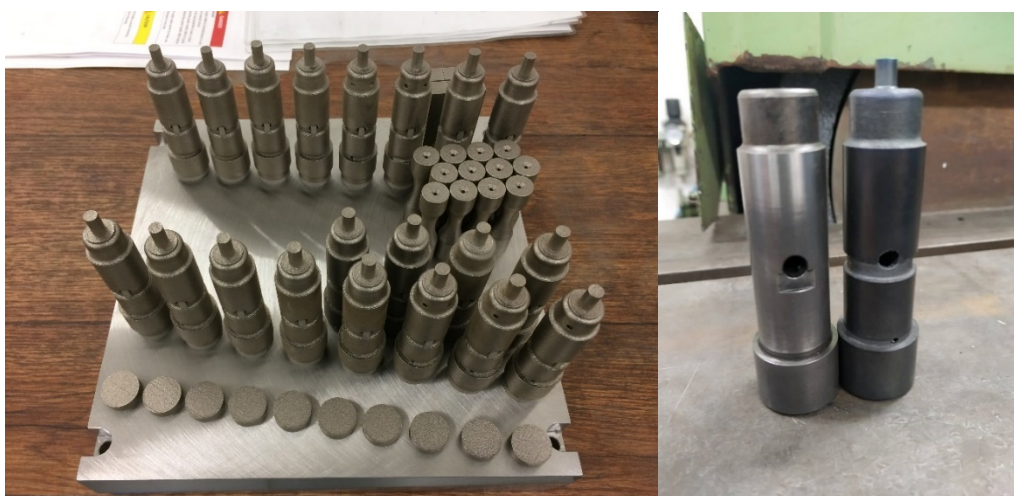
Obrázek 16 ukazuje parametry tisku v dusíkové ochranné atmosféře, konkrétně optimalizaci parametrů InFill, DownSkin a UpSkin.



Obrázek 18 Parametry 3D tisku



Obrázek 19 Rozložení na platformě



Obrázek 20 Vytištěné písky a vzorky [34]

Vytištěné zkušební vzorky, opatřené technologickými prvky pro následný postprocessing za účelem dosažení jakosti a přesnosti povrchu byly opět podrobeny analýze tvarové a rozměrové přesnosti vnitřní struktury. Výsledky odpovídaly závěrům z tisku samostatných prutů. Umístění a poloha na platformě zohlednila znalosti a ekonomiku tisku v případě většího počtu kusů, tedy ve směru Z (90°) a následné operace obrábění vnějších funkčních ploch. [34]

### 3.4.3 Postprocessing

Jako klíčová operace postprocessingu, pro správnou funkčnost, je vhodné tepelné zpracování a broušení. Vzhledem k požadované tvrdosti byl nasazen standardní proces pro vytvrzení nástrojové oceli MS1. Díky tomu dosahuje tvrdost HRC 53+-2. Dále byl paralelně optimalizován proces broušení válcových ploch s cílem zajistit požadovanou drsnost povrchu. Za tímto účelem byly připraveny referenční vzorky válcového tvaru odpovídající předpokládanému tvaru broušení. Broušení bylo prováděno na 5 osé brusce, která kombinuje rotaci brusného kotouče s rotací obrobku. Proto, aby bylo dosaženo požadované kvality povrchu je nutné vhodně naladit kombinované otáčky jinak při záběrových podmínkách dojde k nedodržení záběrových podmínek a razantně se sníží kvalita povrchu. To bylo prvním cílem. Dále se v této fázi provedla analýza všech možných povrchových úprav s cílem zajistit co nejvyšší kvalitu povrchu. Experimenty byly navrženy tak, aby bylo možné pro budoucí účely se ke stejnému výsledku vrátit a nastavit celý proces dle požadované situace. Díky tomu vznikl i předložený funkční vzorek, který postihuje proces 3D tisku a kvalitu povrchu po soustružení a broušení. [34]



Obrázek 21 Funkční vzorek pro zachování referenčního povrchu [34]

Tento výchozí stav se ještě rozpracoval na dílčí referenční povrchy ukazující kvalitu a stav povrchu po samotné technologii 3D tisku, soustružení, broušení a omílání v různých kombinacích mezi sebou. Díky tomu vznikla výchozí znalostní základna, díky které je možné dosáhnout shodného výsledku odlišnými technologiemi výroby a současně, které kombinace jsou nevhodné. [34]

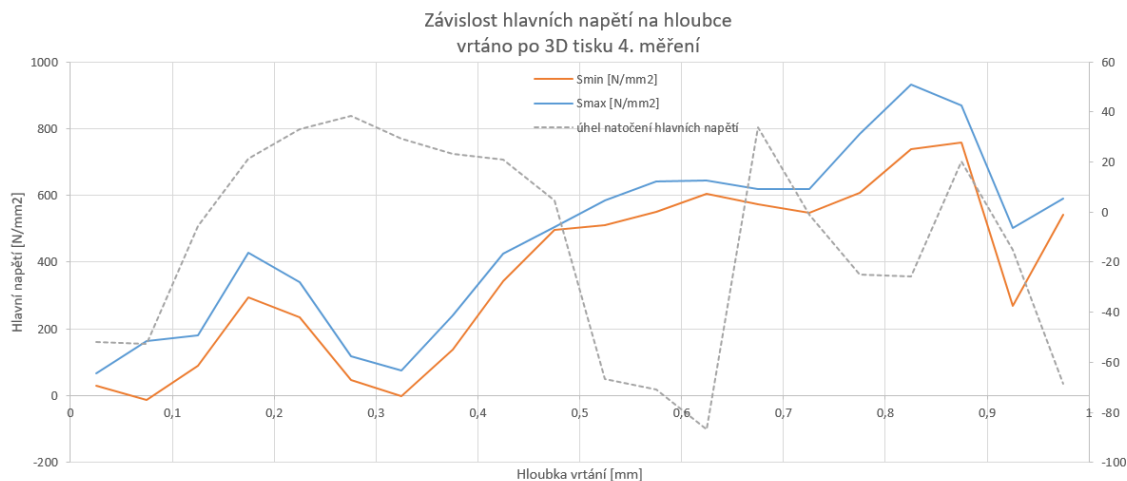
Tabulka 8 Kombinace použitých úprav

Drsnost povrchu				
3D tisk	Soustruženo	Broušeno	Omleto	Ra [ $\mu\text{m}$ ]
x				7,29
x	x			0,79
x	x	x		0,25
x	x	x	x	0,20
x			x	5,00
x	x		x	0,21

Vhodný proces výroby a postprocesingu byl přenesen na první vzorky vzduchového pístu. 3D tiskem byl vyroben originální tvar vyráběný konvenčně a současně optimalizovaná varianta vnitřního tvaru dutiny. Výstupní kontrola ukázala, že všechny tolerované rozměry jsou vyhovující. Výsledná tvrdost vzorků po tepelném zpracování byla HRC 53+-2. První testy ukázaly v počátku velmi dobré výsledky, nicméně po krátkém použití začala klesat účinnost a zvýšila se provozní teplota. Vzduchový píst vykazoval povrchové nesourodosti a změnu drsnosti povrchu. Proto bylo nutné analyzovat vlastnosti systému a přistoupit k nápravným opatřením, mezi které spadá depozice tenké vrstvy. [34]

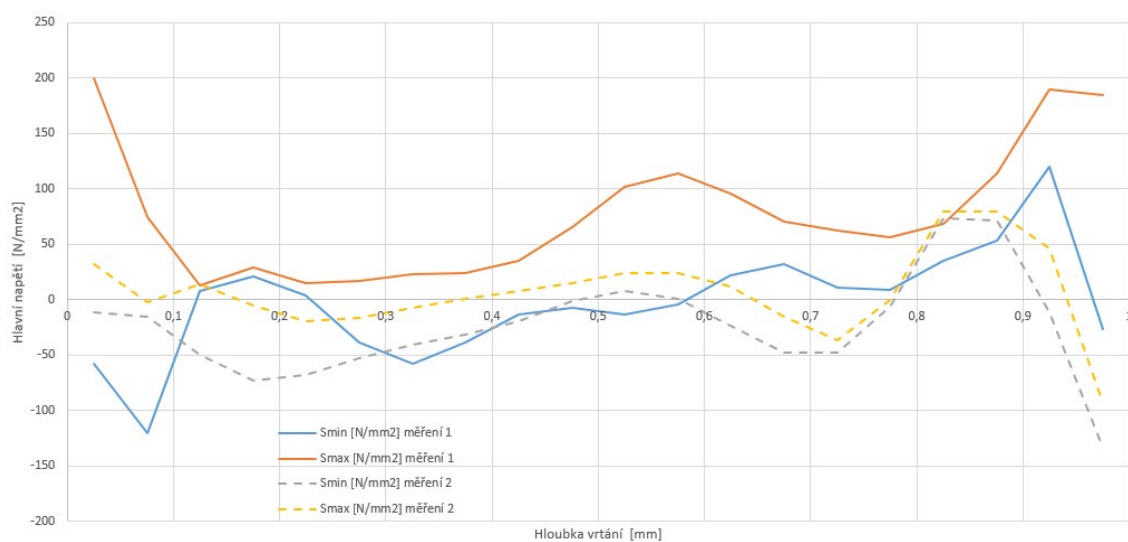
#### 3.4.4 Měření pnutí

Měření ukázalo velké povrchové tahové pnutí originálního substrátu po 3D tisku, tak jak ukazují výsledky. V případě tepelného zpracování tyto hodnoty pouze poklesnou. Pokud je však vzorek nejprve vyžehán a následně použit proces kalení, hodnoty pnutí se pohybují okolo nuly, tedy stav povrchu je již přízniví. Tohoto poznatku bude využito a systém bude posílen vrstvou generující vysoká tlaková napětí. Díky tomu bude dosaženo vysoké stability vrstvy. [34]



Obrázek 22 Graf průběhu povrchového pnutí po 3D tisku [34]

Současně byl měřen povrch, který byl broušen a následně omlet. Obecně je známo, že vlečné omílání přispívá k uvolnění povrchových pnutí a k jeho stabilizaci. [34]



Obrázek 23 Průběh povrchového pnutí 3D tištěného vzorku po broušení a leštění [34]

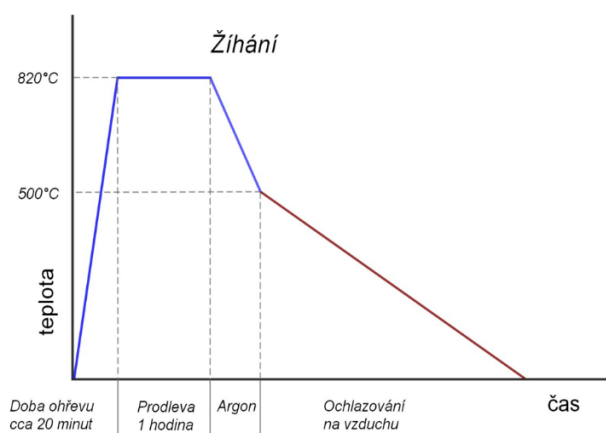


### 3.5 MS1 vzorky po TZ

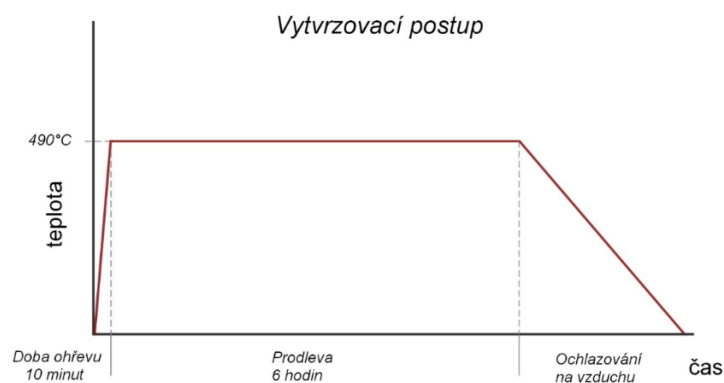


Obrázek 24 Zkušební vzorky po TZ

Vzorky tištěné na tiskárně EOS M 290 pomocí metody PBF a technologie DMLS z prášku MS1 byly tepelně zpracovány. Část vzorků byla tepelně zpracována rozpouštěcím žiháním, konkrétně ohřátím na teplotu 820 °C v ochranné atmosféře Ar, následně výdrž na teplotě po dobu jedné hodiny a pak prudké ochlazení v Ar pod 500 °C. Poté následovalo dochlazení na vzduchu. U čtyř žíhaných vzorků byla provedena úprava povrchu laserem, pro dosažení lepší kvality povrchu.



Obrázek 25 Křivka rozpouštěcího žihání



Obrázek 26 Vytvrzovací křivka

Další vzorky byly vytvrzeny na 52–56 HRC, v rychlém ohřevu přivedeny na teplotu 490 °C, následovala výdrž na této teplotě po dobu 6 hodin, a následně pozvolné ochlazování na vzduchu.

### 3.5.1 Tribologická analýza vzorků

Všech šest vzorků MS1 – žíhána a upravena (x4), žíhána, vytvrzena, bylo měřeno na tribometru Anton Paar TRB pomocí metody „pin on disk“, kdy třecí těleso proniká za stálého otáčení do zkušebního disku. Parametry zkoušky byly nastaveny tak, že třecí těleso byla kulička o průměru 6 mm z materiálu oxidové keramiky ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Disk byl zatížen silou 10 N při rotačním pohybu a poloměru dráhy 3 mm. Rychlost otáčení byla nastavena na 300 otáček za minutu. Měření probíhalo po dobu 2000 cyklů po dráze 377 m. Po zkoušce byly vzorky čištěny 5 min v ultrazvukové čističce, pak proběhlo měření drážky pomocí světelného mikroskopu.



Obrázek 27 Tribometr Anton Paar TRB3 [31]

Tabulka 9 Podmínky experimentu

přístroj	Anton Paar TRB3
zatížení	10 N
třecí těleso	kulička, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 6 mm
pohyb vzorku	rotační
poloměr dráhy třecího tělesa	3 mm
rychlost	300 ot. /min.
celková dráha	377 m (2000 cyklů)

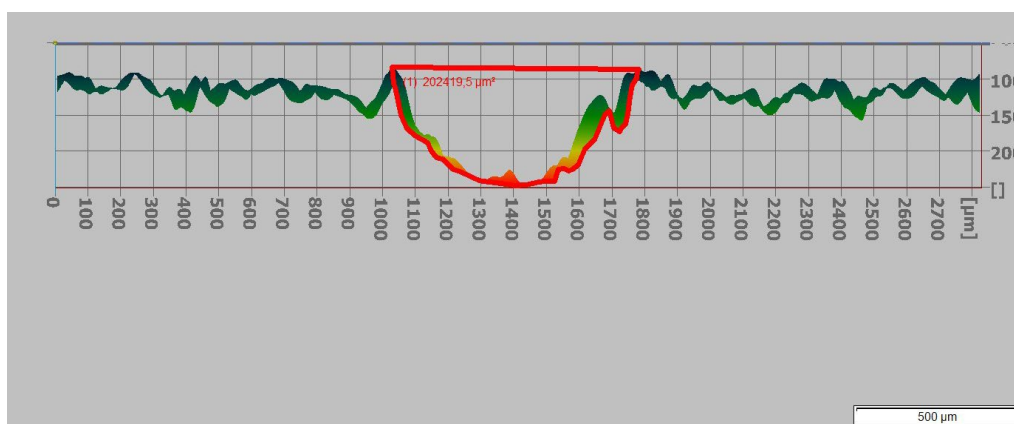
### 3.5.1.1 Velikost plochy průřezu drážky

Na obrázku 29 je vidět fotka z optického mikroskopu. Zobrazuje jednotlivé slinované vrstvy pršku, které byly vyčištěny pomocí metody laserového leštění. Dále můžeme pozorovat vrypovou stopu zanechanou třecím tělesem, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kuličkou.



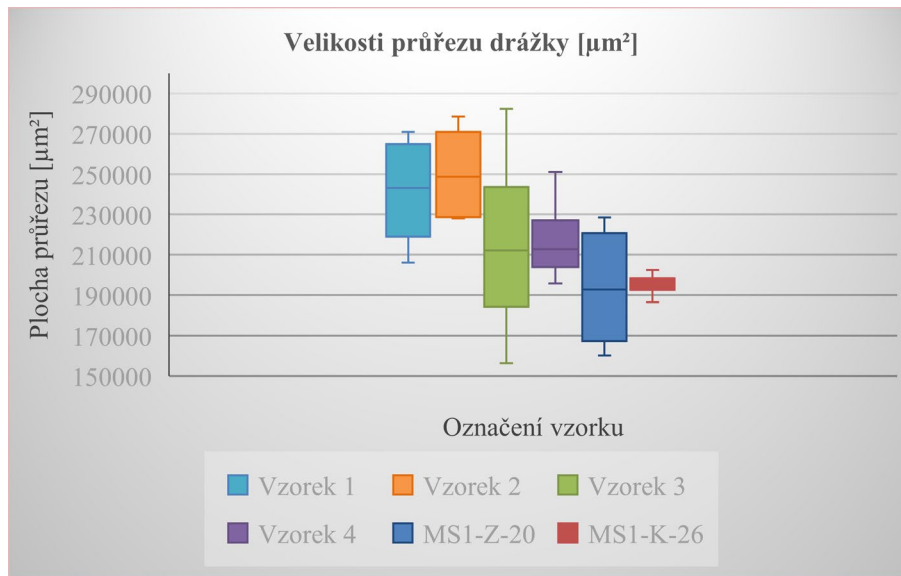
Obrázek 28 SM vzorku č.1 - vrypová drážka

U jednotlivých vzorků byly změřeny obsahy ploch průřezů (obrázek 30) na 4 místech. Výpočtem se získala průměrná hodnota velikosti ploch průřezu drážky, která posloužila pro výpočet úběru materiálu. Na obrázku 19 vidíme výstup z měření s vypočteným obsahem průřezu vrypové plochy u vzorku MS1-K-26.



Obrázek 29 Velikost průřezu vrstvy u vzorku MS1-K-26

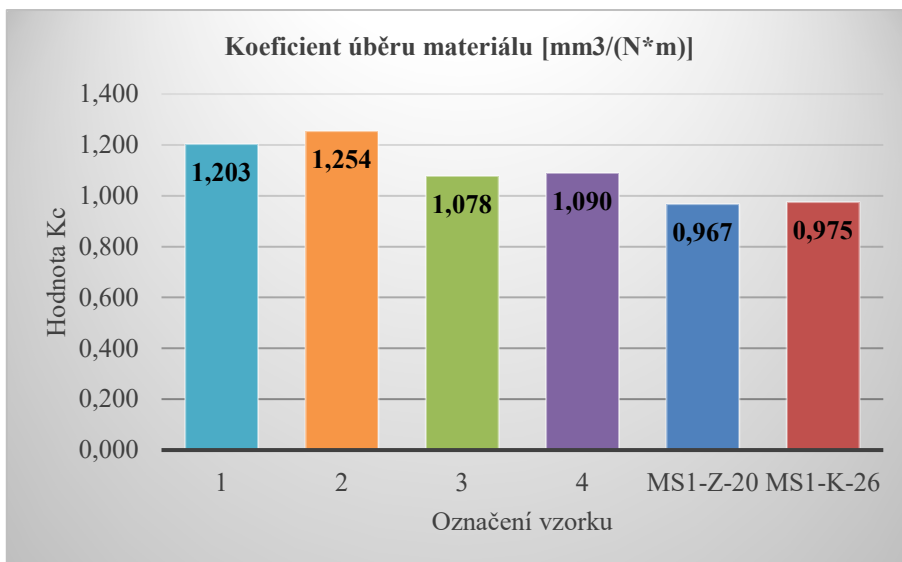
Graf 1 ukazuje hodnoty velikostí ploch průřezů drážky vzniklé po kontaktu s třecím tělesem. Nejmenší medián vykazoval vzorek MS1-Z-1, neboli žíhaná MS1, naopak největší medián měl vzorek 2. Vzorek MS1-K-26 vykazoval nejmenší rozptyl, což vypovídá o konzistentním úběru a trajektorii třecího tělesa. Největší rozptyl hodnot byl u vzorku 3. Tepelně zpracované vzorky vykazují oproti laserově povrchově upraveným menší rozptyl i měřenou hodnotu plochy průřezu.



Graf 1 Velikost obsahu průřezu drážky

### 3.5.1.2 Koeficient úběru materiálu

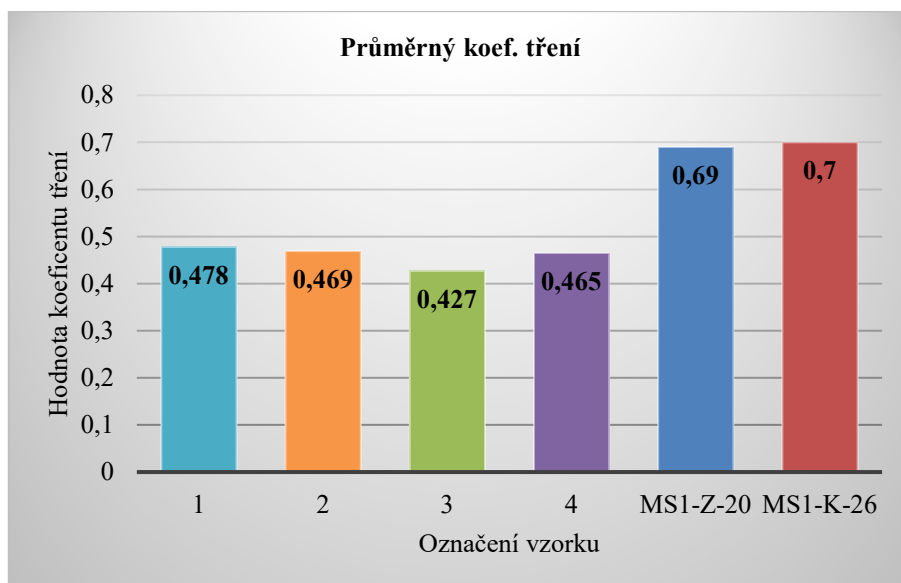
Z grafu 2 můžeme vidět, že nejmenší koeficienty úběru materiálu mají podle očekávání vzorky po tepelném zpracování díky rozpouštěcímu žíhání a vytvrzování. Tyto úpravy měly za následek větší tvrdost a houževnatost struktury materiálu. Vzorky s upravenou kvalitou povrchu vykazují o jednu až dvě desetiny vyšší koeficient. Čím je koeficient úběru materiálu nižší, tím větší odolnost vůči opotřebení materiál vykazuje.



Graf 2 Koeficient úběru materiálu

### 3.5.1.3 Průměrný koeficient tření

Koeficient tření je zásadním parametrem pro danou aplikaci, cílem je snížit tento koeficient co nejnižší a zamezit tak nadměrnému opotřebení, vibracím a koncentraci napětí za zvýšené teploty v namáhaných místech. U vzorků s povrchovou úpravou byl podle očekávání naměřen o dvě třetiny nižší koeficient tření než u vzorků čistě žíhaných a vytvrzených, ty měly koeficient tření přibližně 0,7, jak ukazuje graf 3. Nemají totiž žádnou povrchovou úpravu a vysokou drsnost povrchu díky způsobem výroby pomocí AM.



Graf 3 Průměrný koeficient tření

### 3.6 MS1 vzorky po TZ s deponovanou vrstvou

Vrstva MARVIN SI (TiAlSiN) byla deponována na dva typy substrátů MS1 s rozdílným tepelným zpracováním. První vzorek byl žíhán, druhý vytvrzován a poté deponován tenkou vrstvou pomocí metody PVD za teploty 160 a 500°C.



Obrázek 30 Zkušební vzorky s vrstvou

#### 3.6.1 Skenovací elektronový mikroskop (SEM)

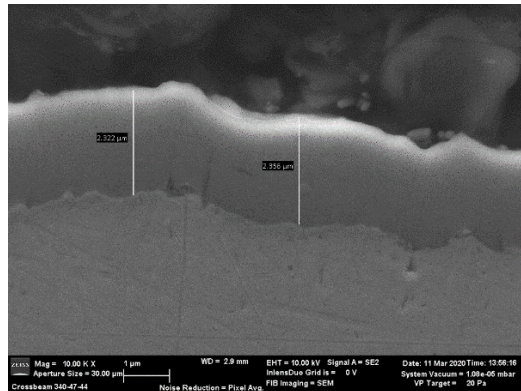
Skenovací elektronový mikroskop SEM-FIB CrossBeamAuriga s ultra-vysokým rozlišením s integrovaným iontovým svazkem. Mikroskop je vybaven rovněž BSE, EBSD, EDX a STEM detektory a může dělat 2D i 3D mapy chemického složení. Iontovým svazkem lze připravit ze zvolených oblastí struktury nano-vzorky, které mohou být následně podrobeny tahové, tlakové a ohybové zkoušce in-situ. [31]



Obrázek 31 SEM – Skenovací elektronový mikroskop [31]

Díky fotkám z elektronového skenovacího mikroskopu můžeme studovat hranici substrát – tenká vrstva ve vysokém rozlišení. Pozorovat můžeme nejen mikrostrukturu, ale i prvkové složení, atomy s vyšším prvkovým číslem se zobrazují světleji.

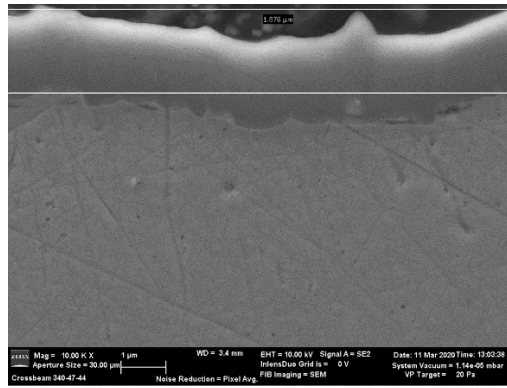
Povlak TiAlSiN byl deponován metodou PVD za teploty 160°C. Na povrchu substrátu zanechal vrstvu s průměrnou velikostí 2,35  $\mu\text{m}$ , obrázek 33.



Obrázek 32 Detail vrstvy PVD 160°C

Na obrázku 34 vidíme PVD povlak TiAlSiN, který byl deponován za teploty 500°C, která je pro PVD metodu hraniční. Zde pozorujeme průměrnou velikost vrstvy 2  $\mu\text{m}$ .

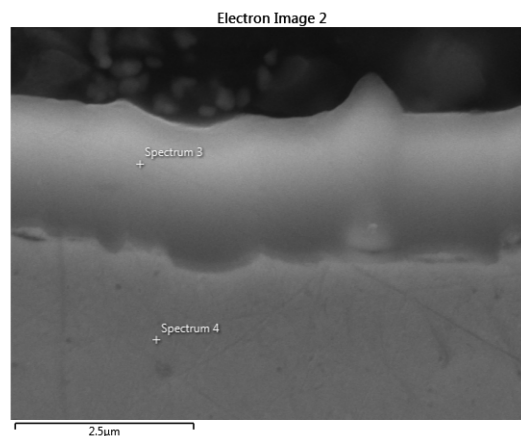




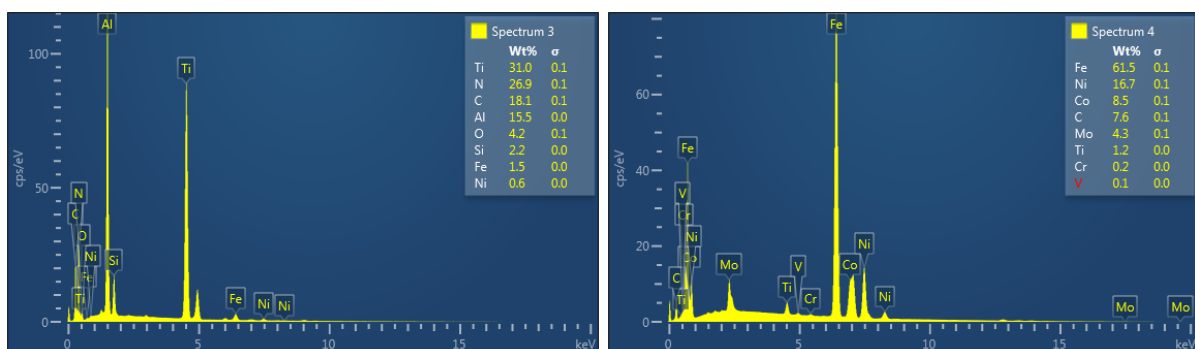
Obrázek 33 Detail vrstvy PVD 500°C

### 3.6.2 Elektronově disperzní spektrometr (EDS)

Elektronově disperzní spektrometr je nedílnou součástí skenovacího elektronového mikroskopu, jeho pomocí můžeme zkoumat prvkové složení povrchu. Prvkové zastoupení prvního vzorku s depoziční teplotou 160 °C zkoumáme ve dvou bodech podle obrázku 35.



Obrázek 34 Fotka rozhraní substrát vrstva PVD 160°C

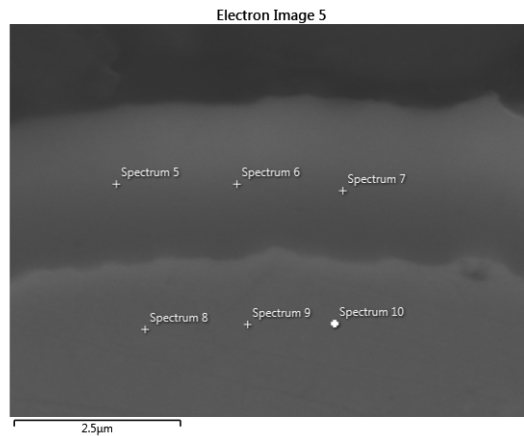


Obrázek 35 Prvkové zastoupení (Spectrum 3,4) a) ve vrstvě b) v substrátu

Vrstva TiAlSiN prvního vzorku obsahuje podle měření z EDS prvky podle následujícího procentuálního zastoupení. Největší procento zabírá Ti 31 %, pak N 26,9 %, Al 15,5 %, Si,

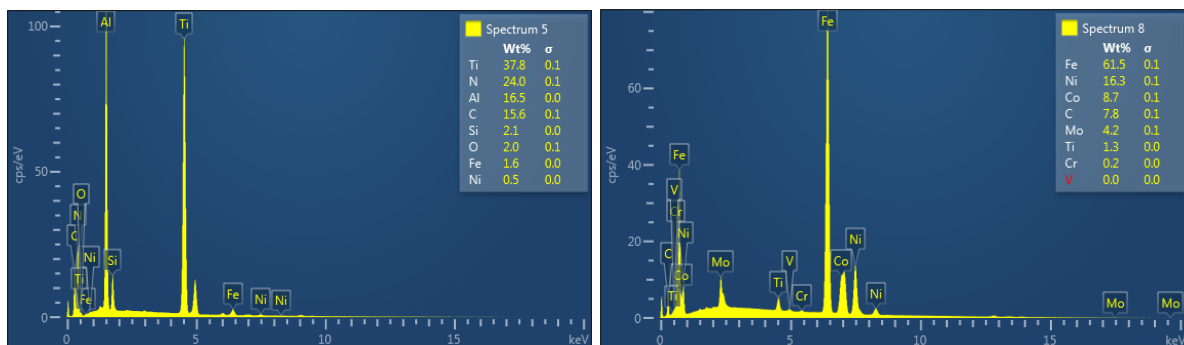


2,2 %, a další. Substrát obsahuje velké procento uhlíku 61,5 % a niklu 16,7 %, zkoumaná maraging ocel.



Obrázek 36 Fotka rozhraní substrát vrstva PVD 500 °C

Prvkové zastoupení druhého vzorku s depoziční teplotou 500 °C zkoumáme v bodech podle obrázku 37.

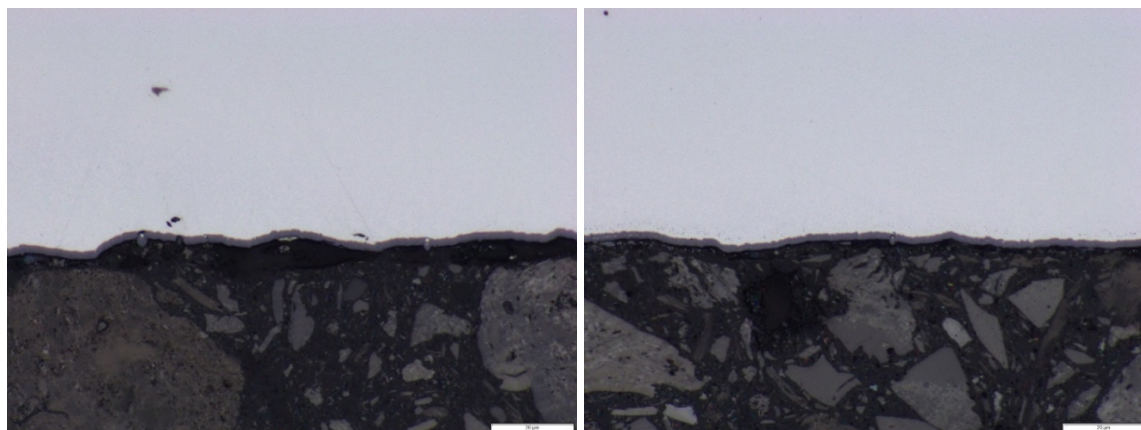


Obrázek 37 Vybrané prvkové zastoupení (Spectrum 5,8) a) ve vrstvě b) v substrátu

Vrstva TiAlSiN druhého vzorku obsahuje podle měření z EDS prvky podle následujícího procentuálního zastoupení. Největší procento zabírá Ti 37,8 %, pak N 24 %, Al 16,5 %, Si, 2,1 %, a další. Substrát obsahuje velké procento uhlíku 61,5 % a niklu 16,3 %, zkoumaná maraging ocel. Oproti předchozímu vzorku pozorujeme nárůst obsahu titanu a hliníku o několik procent.

### 3.6.3 Světelný mikroskop

Na obrázcích níže vidíme mikrostrukturu MS1 oceli po depoziaci tenké vrstvy za rozdílných teplot depoziice.



Obrázek 38 Mikrostruktura vzorku s teplotou depozice PVD 500 °C

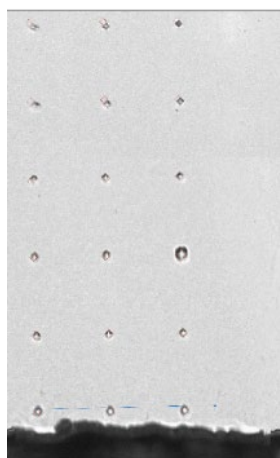
Obrázek 39 Mikrostruktura vzorku s teplotou depozice PVD 160 °C

### 3.6.4 Měření tvrdosti substrátu

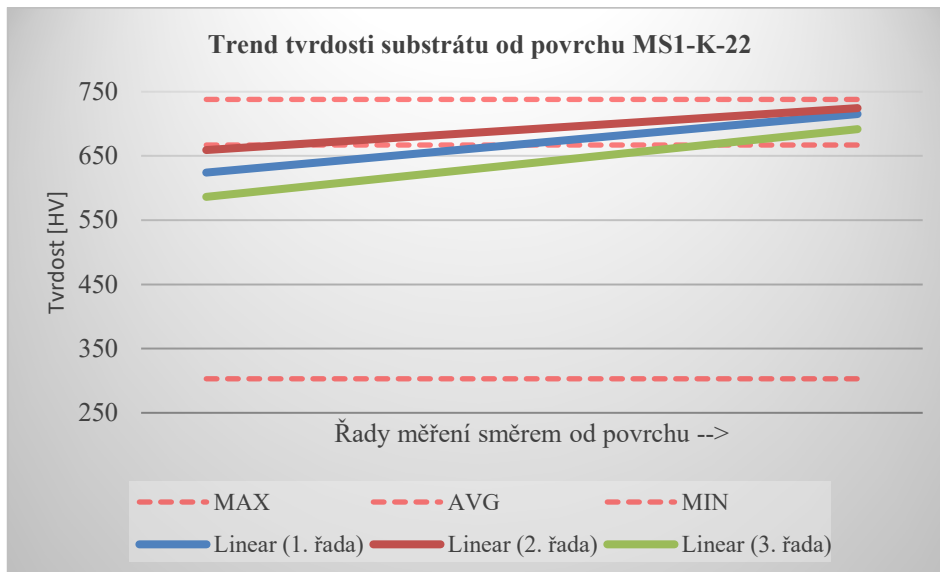
Oba druhy vzorku s rozdílným TZ byly testovány zkouškou tvrdosti podle Vickerse (šest měřících bodů ve třech řadách). Měření probíhalo pouze na substrátu v oblasti směrem od povrchu za účelem zjištění, jak depozice vrstvy ovlivní tvrdost substrátu.

#### 3.6.4.1 Vzorek MS1-K-22

Vzorek MS1-K-22 byl TZ vytvrzením. Průběh zkoušky tvrdosti podle Vickerse spočíval v měření ve třech řadách směrem od povrchu substrátu po šesti bodech vzdálenost mezi body byla pevně dána (viz. obr. 41). Na grafu 4 jsou zobrazeny spojnice jednotlivých naměřených bodů. Můžeme vidět, že tvrdost vytvrzeného vzorku po depozici stoupala směrem od povrchu, což je nezvyklé. Příčinou může být teplota depozice, která mohla ovlivnit strukturu substrátu u povrchu, což vedlo ke snížení tvrdosti.



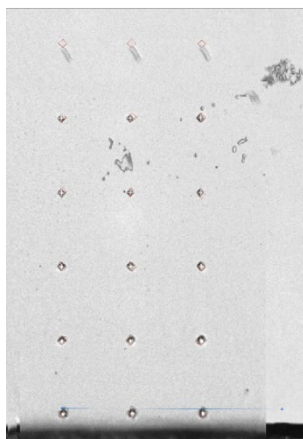
Obrázek 40 Stopy po indentoru u vzorku MS1-K-22



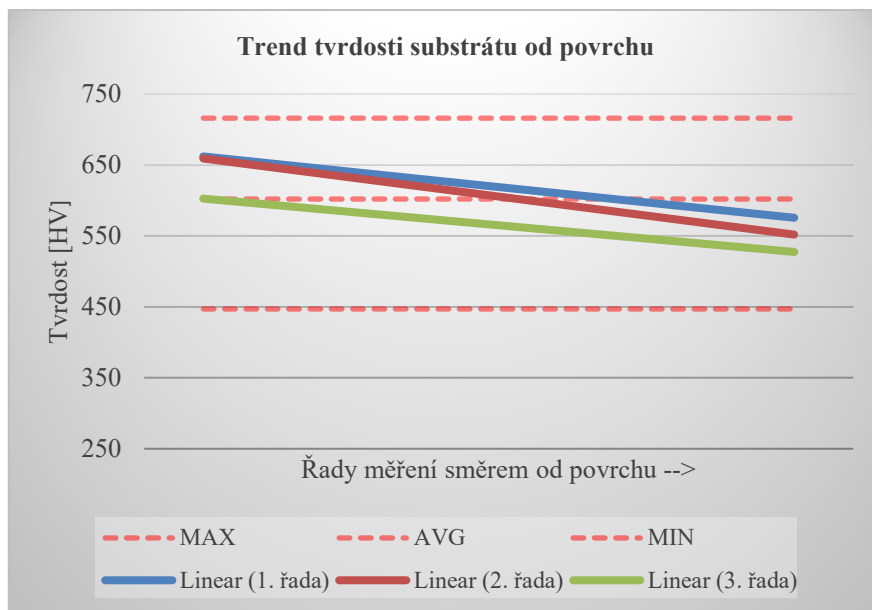
Graf 4 Průběh tvrdosti od povrchu substrátu u vzorku MS-K-22

### 3.6.4.2 Vzorek MS1-Z-18

Vzorek MS1-Z-18 byl TZ žiháním. Průběh zkoušky tvrdosti podle Vickerse spočíval v měření ve třech řadách směrem od povrchu substrátu po šesti bodech vzdálenost mezi body byla pevně dána (viz. Obr. 42). Na grafu 5 jsou zobrazeny spojnice jednotlivých naměřených bodů. Můžeme vidět, že tvrdost vytvrzeného vzorku po depozici klesala směrem od povrchu, což je očekávané vzhledem k TZ rozpouštěcím žiháním.



Obrázek 41 Stopy po indentoru u vzorku MS1-Z-18



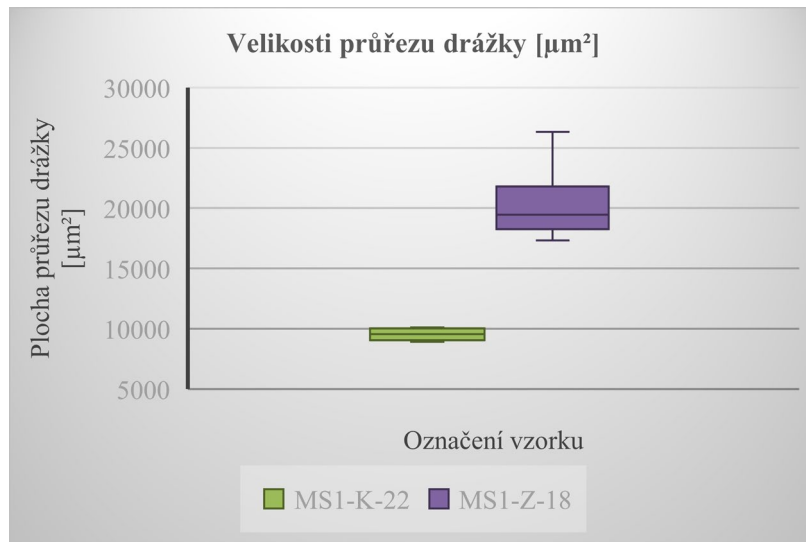
Graf 5 Průběh tvrdosti od povrchu substrátu u vzorku MS-Z-18

### 3.6.5 Tribologická analýza vzorků po depozici vrstvy

Vzorky byly měřeny na tribometru Anton Paar TRB pomocí metody „pin on disk“. Parametry zkoušky byly nastaveny tak, že třecí těleso byla kulička o průměru 6 mm z materiálu oxidové keramiky ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Disk byl zatížen silou 10 N při rotačním pohybu a poloměru dráhy 3 mm. Rychlost otáčení byla nastavena na 300 otáček za minutu. Měření probíhalo po dobu 2000 cyklů po dráze 377 m. Po zkoušce byly vzorky čištěny 5 min v ultrazvukové čističce, pak proběhlo měření drážky pomocí světelného mikroskopu. Parametry zkoušky a postup byly zachovány za účelem možnosti porovnání hodnot z předchozího měření.

#### 3.6.5.1 Velikosti plochy průřezu drážky

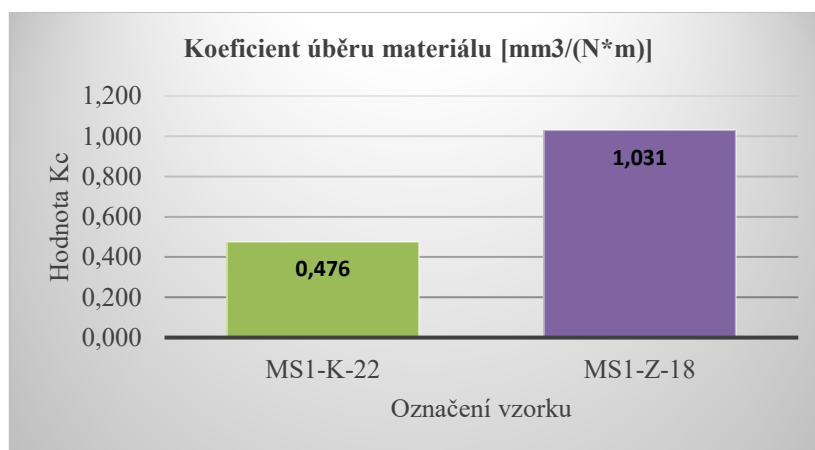
Graf 6 ukazuje hodnoty velikostí ploch průřezů drážky vzniklé po kontaktu s třecím tělesem. Nejmenší medián i rozptyl vykazoval vzorek MS1-K-22, neboli vytvrzená MS1 s deponovanou tenkou vrstvou, což vypovídá o konzistentním úběru a trajektorii třecího tělesa. Naopak největší medián měl žíhaný vzorek MS1-Z-18 s tenkou vrstvou.



Graf 6 Velikost obsahu průřezu drážky

### 3.6.5.2 Koeficient úběru materiálu

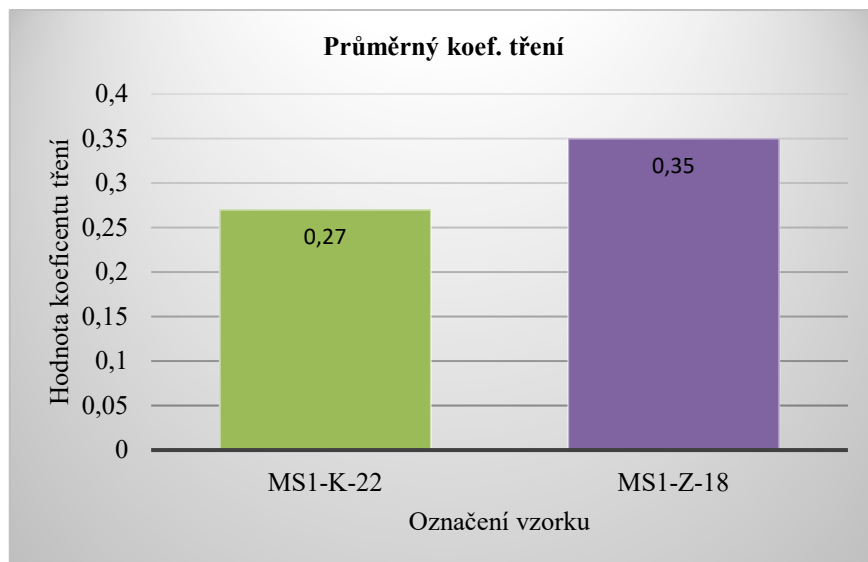
Z grafu 7 můžeme vidět, že nejmenší koeficient úběru materiálu 0,476 má podle očekávání vzorek po tepelném zpracování vytvrzením a deponovanou vrstvou MS1-K-22. Tyto úpravy měly za následek větší tvrdost a odolnost vůči opotřebení povrchu materiálu. Vzorek žíhaný a povlakovaný MS1-Z-18 vykazuje dvojnásobně vyšší koeficient. Čím je koeficient úběru materiálu nižší, tím větší odolnost vůči opotřebení materiál vykazuje.



Graf 7 Koeficient úběru materiálu

### 3.6.5.3 Průměrný koeficient tření

U vzorků s TZ a deponovanou tenkou vrstvou byl podle očekávání naměřen celkově nižší koeficient tření a to 0,27 u kaleného MS1-K-22 a 0,35 u žíhaného vzorku MS1-Z-18, jak ukazuje graf 8. Mají totiž deponován TiAlSiN povlak s vysokou tvrdostí, odolností vůči opotřebení a dobrými třecími vlastnostmi.

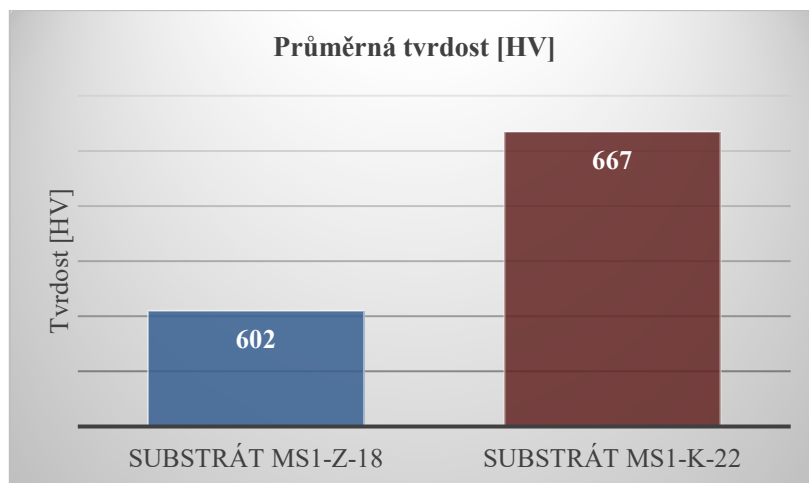


Graf 8 Průměrný koeficient tření

### 3.7 Tvrdomost vrstvy a substrátu

Tenká vrstva MARWIN SI (TiAlSiN) byla nanášena metodou PVD. Pro zjištění hodnot tvrdosti byla zvolena metoda měření nano tvrdosti pomocí nano indentace. Naměřené hodnoty se pohybovaly při zatížení 2 mN v 45 GPa, což je velmi dobrý výsledek.

Následně byly porovnány všechny průměry naměřených hodnot tvrdostí substrátu, a to substrátu po žíhání, depozici a substrátu po vytvrzení, depozici.



Graf 9 Průměrná tvrdost substrátu

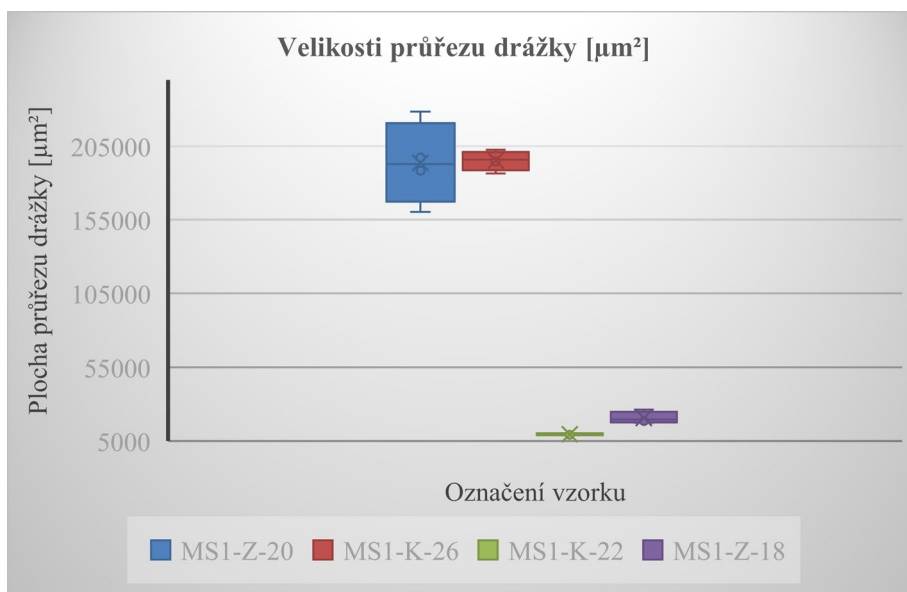
Z obou vzorků rozdílných TZ substrátu měl vyšší průměrnou hodnotu tvrdosti 667HV vytvrzený vzorek MS1-K-22. Až za ním byl žíhaný vzorek MS1-Z-18 s průměrnou tvrdostí 602HV.

### 3.8 Porovnání tribologické analýzy

Pro ověření závislosti koeficientu tření a aplikace povlaku byly porovnány výsledky tribologických analýz vzorků tepelně zpracovaných žiháním a vytvrzením (MS1-Z-20 a MS1-K-26) se vzorky tepelně zpracovanými žiháním a vytvrzením navíc s deponovanou vrstvou (MS1-Z-18 a MS1-K-22). Z teorie je známo, že depozice použitého povlaku vylepší vlastnosti substrátu z oblasti ořezuvzdornosti, tvrdosti, chemické a tepelné odolnosti včetně menšího koeficientu tření. Proto u vzorků s deponovanou vrstvou očekáváme lepší výsledky z hlediska tribologie než u vzorků bez tenké vrstvy.

#### 3.8.1 Velikosti plochy průřezu drážky

Graf 10 ukazuje hodnoty velikostí ploch průřezů drážky vzniklé po kontaktu s třecím tělesem. Nejmenší medián vykazovaly vzorky s deponovanou vrstvou (MS1-Z-18 a MS1-K-22), naopak největší medián měly vzorky pouze s TZ (MS1-Z-20 a MS1-K-26). Vzorek MS1-K-22 vykazoval nejmenší rozptyl i nejmenším mediánem ze všech testovaných vzorků, což vypovídá o konzistentním úběru a trajektorii třecího tělesa. Největší rozptyl hodnot byl u vzorku MS1-Z-20.

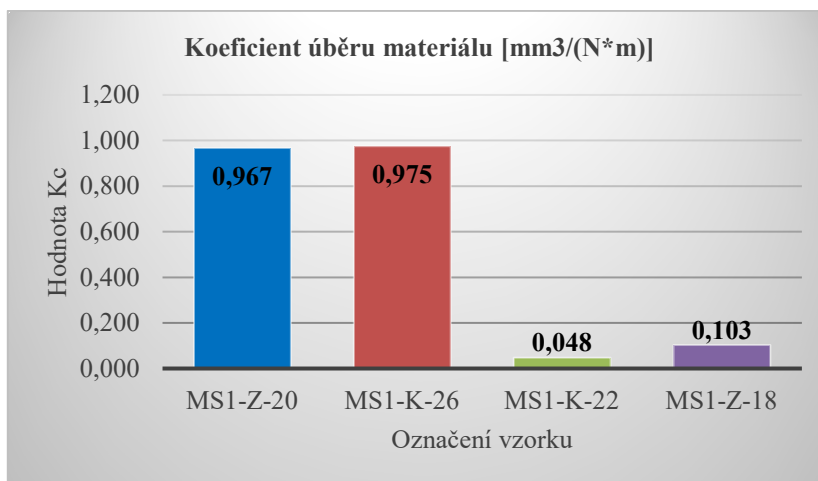


Graf 10 Velikost obsahu průřezu drážky

#### 3.8.2 Koeficient úběru materiálu

Z grafu 11 můžeme vidět, že nejmenší koeficienty úběru materiálu mají podle očekávání vzorky po tepelném zpracování a depozici vrstvy (MS1-Z-18 a MS1-K-22). Tato úprava měla za následek větší tvrdost a odolnost vůči opotřebení materiálu. Vzorky pouze TZ (MS1-Z-20

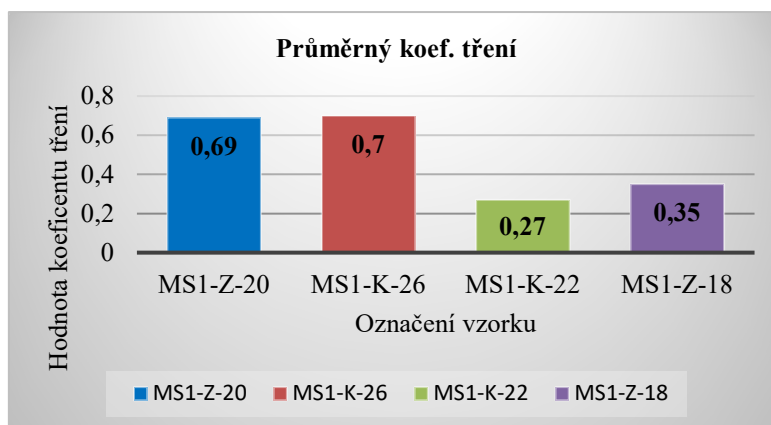
a MS1-K-26) vykazují řádově vyšší koeficient. Čím je koeficient úběru materiálu nižší, tím větší odolnost vůči opotřebení materiál vykazuje. Nejnižší koeficient 0,048 měl vzorek TZ vytvrzováním a s deponovaným povlakem (MS1-K-22).



Graf 11 Koeficient úběru materiálu

### 3.8.3 Průměrný koeficient tření

U vzorků s TZ a deponovanou vrstvou (MS1-Z-18 a MS1-K-22) byl podle očekávání naměřen přibližně o polovinu nižší koeficient tření než u vzorků čistě žíhaných a vytvrzených (MS1-Z-20 a MS1-K-26), ty měly koeficient tření přibližně 0,7, jak ukazuje graf 12. Nemají totiž žádnou povrchovou úpravu a vysokou drsnost povrchu díky způsobem výroby pomocí AM. Nejnižší koeficient 0,27 měl vzorek TZ vytvrzováním a s deponovaným povlakem (MS1-K-22).



Graf 12 Průměrný koeficient tření



### 3.9 Experimentální ověření

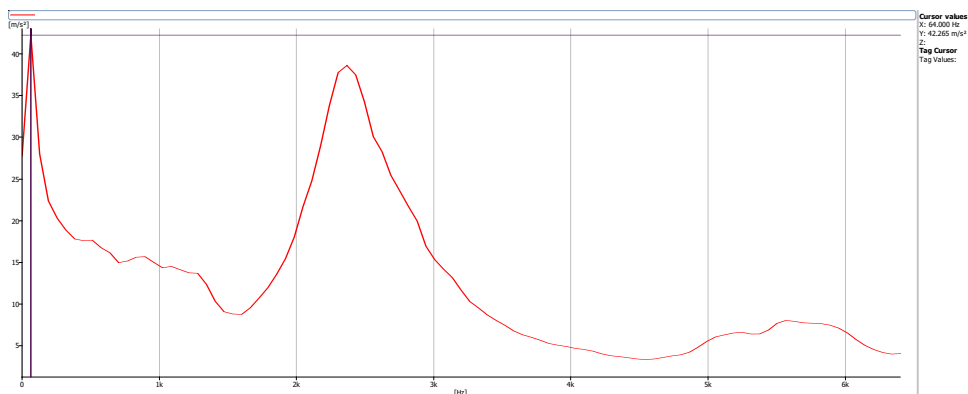
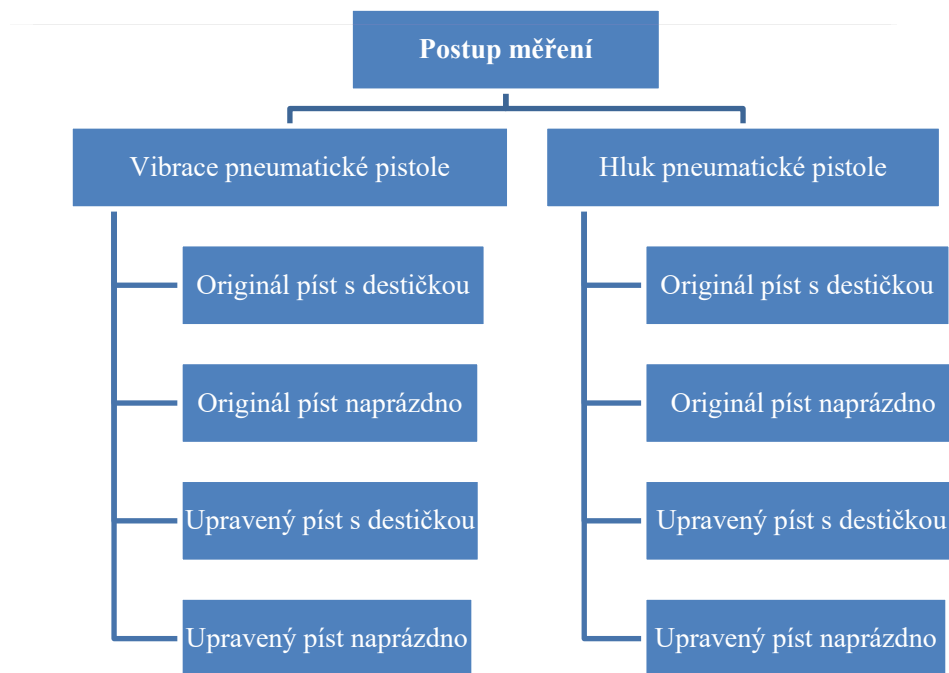
Písty byly experimentálně ověřeny, jestli dochází k poklesu dynamických účinků. Bylo potřeba provést sérii testů, mezi které patří: měření akustické emise, vibrací a tepla. Taktéž byly nové písty podrobeny zátěžovému testu trvajícím 1 hodinu pracovního provozu. Písty byly taktéž prakticky vyzkoušeny při odstraňování strusky z materiálu. [34]



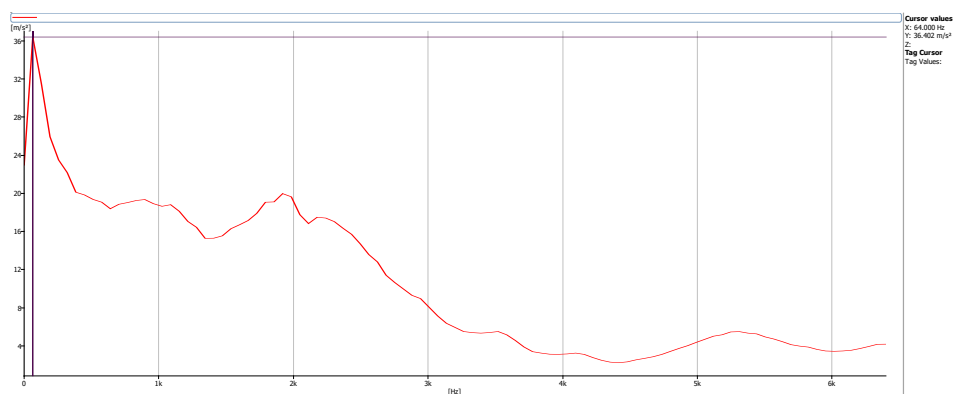
Obrázek 42 Pažba pistole se snímačem [34]

#### 3.9.1 Postup měření

Pro měření byly použity jednoosé snímače od firmy Bruel & Kjaer, které byly nejdříve umístěny na tělo pažby pistole do pozice blízké komory pístu. (viz obr. 43) Avšak měření vibrací v tomto místě dosáhlo nadlimitních hodnot, které pro snímače zrychlení tohoto typu jsou na úrovni  $10,09k \text{ m/s}^2$ . Jednalo se o velké rázové kmity, které způsobily přebuzení snímače, a tím znemožnili korektně vyhodnotit úroveň vibrací. Proto byl snímač umístěn na pažbu pistole v místě, které je pokryto pryží. V tomto místě již vibrace nepřesahovaly nadlimitních hodnot, a proto bylo možné získat časový průběh vibrací. Poté byla naměřena a vyhodnocena frekvenční spektra vibrací a změřeny hladiny hluku pro různé stavy provozu. Hodnoty vibrací bylo možné odečíst. Hodnoty hladin hluku jsou v  $\text{dB}/20\mu\text{Pa}$ . [34]



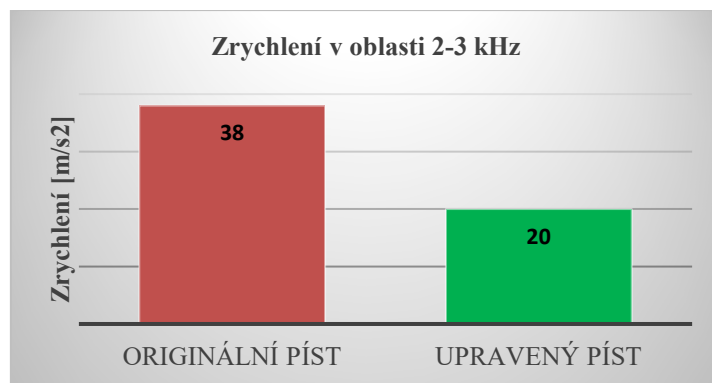
Obrázek 43 Spektrum vibrací – zrychlení – originální píst naprázdno [34]



Obrázek 44 Spektrum vibrací – zrychlení – upravený píst naprázdno [34]

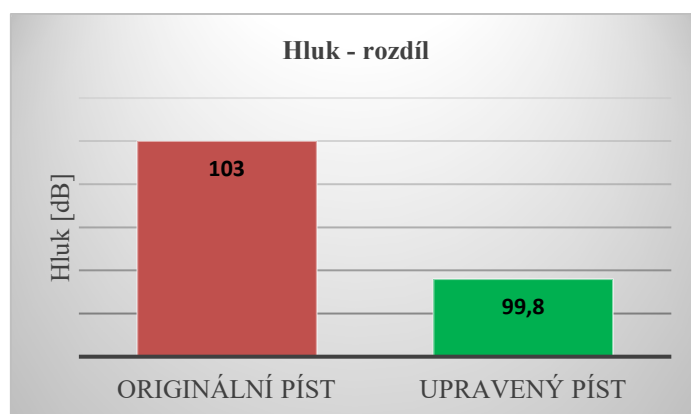
Získaná frekvenční spektra napříč různými měřeními režimy vykazují dva charakteristické vrcholy vibrací, první je možné dávat do souvislosti s pohybem pístu v pracovní komoře.

Jedná se o zobrazenou špičku při levém okraji měřeného spektra na frekvenci 64 Hz. Druhý vrchol v rozmezí 2–3 kHz lze interpretovat jako širokopásmové kmitání způsobené nepravidelnými nárazy pracovních trnů na píst, které se poté přenáší do pažby pistole. Porovnání originálního pístu s pístem, který byl vytvořen 3D technologií, je patrné právě v poklesu tohoto vrcholu v rozmezí 2-3 kHz. [34]



Graf 13 Zrychlení v oblasti 2-3 kHz

Měření hluku respektovalo postup při měření hladin akustického tlaku podle normy ČSN ISO 230-5. Naměřené signály byly analyzovány a byly provedeny CPB analýzy a z nich je patrné, že celkové hlukové třetino-oktávové spektrum vykazuje vysoké hladiny akustického tlaku dosahující celkových hodnot 100 dB. Při měření hluku je patrný pokles při použití vytvořeného pístu o zhruba 3 dB pro oba režimy. Hlukové spektrum má špičku v pásmu 4 kHz. [34]



Graf 14 Rozdíl hluku

Pro detailnější porovnání by bylo potřeba využít speciální edici snímačů zrychlení, které jsou navrženy pro měření rázů. Za pomoci těchto snímačů naměřit a následně detailně zanalyzovat odezvu vibrací. Tento snímač extrémních úrovní vibrací však již vyžaduje

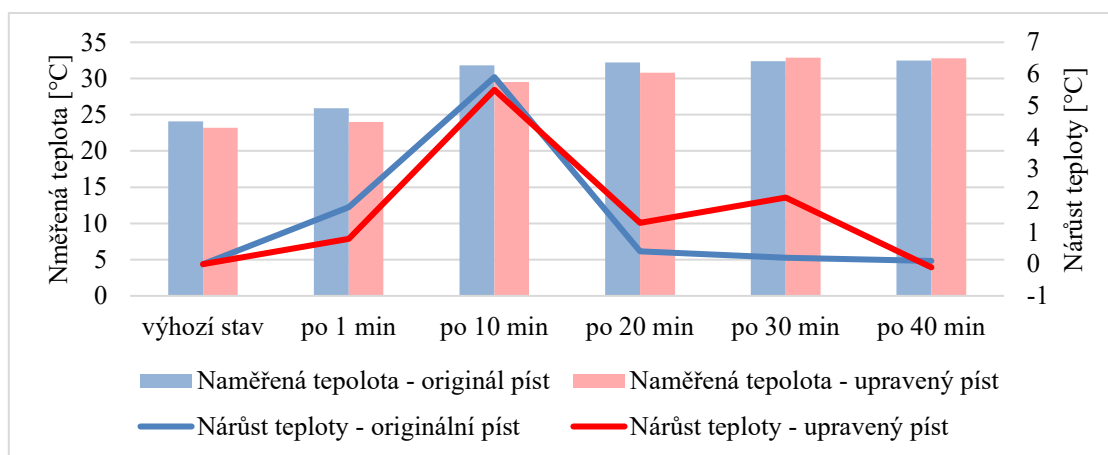
destruktivní upevnění šroubem na povrch měřené struktury, což vyžaduje konstrukční úpravu měřené součásti, a to nebylo v tomto případě vhodné. [34]

### 3.9.2 Výsledky z termografie

Měření probíhalo pomocí kamery FLIR E6, kdy se dělal snímek při chodu pistole viz obrázek 46, kde byl vybrán bod u rukojeti kde se pohybuje píst. Z grafu níže je vidět průběh ohřívání při práci originálního a upraveného pístu. [34]



Obrázek 45 Snímek z termografické kamery [34]



Graf 15 Průběh naměřených teplot [34]

Tabulka 10 Průběh naměřených teplot

	výchozí stav	po 1 min	po 10 min	po 20 min	po 30 min	po 40 min
<b>Nárůst teploty – originální píst</b>	0	1,8	5,9	0,4	0,2	0,1
<b>Nárůst teploty – upravený píst</b>	0	0,8	5,5	1,3	2,1	-0,1
<b>Naměřená teplota – originál píst</b>	24,1	25,9	31,8	32,2	32,4	32,5
<b>Naměřená teplota – upravený píst</b>	23,2	24	29,5	30,8	32,9	32,8

## 4 Zhodnocení

Praktická část této diplomové práce se zabývala návrhem pístu pneumatické očišťovací pistole (jehlový oklepávač) se speciální interní strukturou pro aditivní výrobu z MS1 oceli technologií DMLS na průmyslové 3D tiskárně EOS M 290. V důsledku vysokých nároků na odolnost vůči opotřebení povrchu a požadavku pro co nejmenší koeficient tření, kvůli kontaktu pístu s dalšími funkčními plochami a eliminaci vibrací bylo rozhodnuto, že se tisknutá součást bude upravovat postprocessingem, podstoupí TZ a pro zvýšení užitečných vlastností bude na píst deponována tenká vrstva.

Po vytištění vzorků při postprocessingu bylo testováno několik kombinací technologií úprav. Z nich se ukázala být nejúčinnější kombinace soustružení, broušení a omílání, po kterém byl změřen nejnižší koeficient tření.

Výsledky z měření pnutí ukázaly, že po tisku vykazují vzorky vysoké hodnoty pnutí. Proto bylo provedeno tepelné zpracování, konkrétně rozpouštěcí žíhání a vytvrzování. Po TZ hodnoty pnutí klesly téměř na nulu.

Pro ověření vlivu tenké vrstvy na vlastnosti součásti bylo vytištěno několik vzorků. Ty podstoupily tepelné zpracování žíháním a vytvrzením a následně byly deponovány tenkou vrstvou MARWIN SI (TiAlSiN). Vzorky se zanalyzovaly z hlediska mikrostruktury, chemického složení, tvrdosti substrátu a nano tvrdosti vrstvy. Následně byly pomocí tribologické analýzy porovnány koeficienty úběru materiálu a tření mezi čistě tištěnými TZ vzorky a TZ vzorky s deponovanou vrstvou. Podle očekávání tenká vrstva zvýšila užitečné vlastnosti AM vzorků, a to svou tvrdostí a odolností vůči opotřebení při tribologické analýze, kdy vzorky s deponovanou vrstvou měly nejnižší hodnotu koeficientu tření i úběru materiálu.

V poslední části aplikační části byl tištěný píst experimentálně ověřen z hlediska dynamických účinků. Měřil se průběh vibrací, hluku a teploty pro původní i nový píst. Z výsledných hodnot bylo zjištěno, že nový píst vykazuje menší hodnoty vibrací i hluku a z termografického měření vyšlo najevo, že provozní teplota klesla o pár stupňů.

## 5 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo ověřit vliv depozice tenkých vrstev na výsledné vlastnosti tištěných AM dílů z hlediska jejich praktického využití ve vybrané aplikaci, a to u pístu pneumatické očišťovací pistole. Užité vlastnosti vrstvy byly testovány při statickém, ale hlavně dynamickém zatěžování.

Teoretická část práce zanalyzovala současný stav aditivní výroby se zaměřením na metodu AM spékání práškové vrstvy a konkrétně technologii Direct Metal Laser Sintering, spočívající ve spékání jednotlivých vrstev kovového prášku za pomoci laseru, kterou byly zkušební vzorky vytištěny. Dále rozebírá nejpoužívanější tisknutelné kovové materiály a slitiny, zejména vysokopevnostní maraging oceli neboli martenziticky stárnuté oceli, které disponují vysokou pevností, houževnatostí a stabilitou. Používají se pro vysoko výkonné průmyslové součásti v leteckém a automobilovém průmyslu. Po vytištění AM součástí musí následovat postprocessing ať už úpravou povrchu nebo tepelným zpracováním. Poslední kapitoly teoretické části se věnovaly tenkým vrstvám, jejich materiálům, konkrétně povlaku TiAlSiN, který byl na vzorky deponován, dále vlastnostem vrstev, a to jak tvrdosti, odolnosti vůči opotřebení, případně adhezi na substrát, včetně metod měření a zkoušení.

Aplikační část se věnovala testováním vzorků pro píst pneumatické očišťovací pistole speciálně konstruovaným pro AM. Nejprve byl představen kovový prášek MS1, ze kterého byly vzorky vytištěny na tiskárně EOS M290 a firma SHM s.r.o., která deponovala na vzorky tenkou vrstvu ze svého portfolia MARWIN SI (TiAlSiN). Byly představeny konstrukční návrhy a tiskové parametry vzorků, následně jejich úprava při postprocessingu, jak TZ žíháním a vytvrzováním, tak technologickými úpravami soustružením, broušením a omíláním. Na vzorcích bylo měřeno pnutí před a po TZ, které dokázalo značné snížení pnutí po TZ. Velmi zásadní zkouškou byla tribologie vzorků pouze TZ a vzorků TZ s deponovanou vrstvou. Z výsledků bylo jednoznačně pozorováno zvýšení užitečných vlastností vrstvy zejména větší odolnosti vůči opotřebení a snížení koeficientu tření. Zkouška nano tvrdosti potvrdila zvýšenou tvrdost povrchu po depozici vrstvy podle očekávání. Při experimentálním ověření byl testován nový i stávající píst z hlediska dynamických účinků. Test vibrací i hluku vyšel pozitivně pro obě veličiny, které byly nižší u pístu s deponovaným povlakem, rovněž termografické snímky potvrdili u nového pístu pokles teploty. Deponování tenkých vrstev na AM součásti se ukázalo jako velice přínosné, ovšem vždy záleží na druhu aplikace, pro který

volíme, druh AM materiálu, technologii tisku, optimalizaci parametrů at' už se jedná o parametry tisku, TZ, postprocessingu, případně metodu depozice a materiál tenké vrstvy.

## Seznam zdrojů

- [1] KARAR, Gautam Chandra, Ratnesh KUMAR a Somnath CHATTOPADHYAYA. An Analysis on the Advanced Research in Additive Manufacturing. PANDEY, P. M., Pradeep KUMAR a Vikas SHARMA, ed. *Advances in Production and Industrial Engineering* [online]. Singapore: Springer Singapore, 2021, 2021-09-21, s. 229-277 [cit. 2021-01-2]. Lecture Notes in Mechanical Engineering. ISBN 978-981-15-5518-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-15-5519-0\_19
- [2] GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies* [online]. New York, NY: Springer New York, 2015 [cit. 2021-3-17]. ISBN 978-1-4939-2112-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4939-2113-3
- [3] DUTTA, Bhaskar, Sudarsanam BABU a Bradley JARED. Metal additive manufacturing. *Science, Technology and Applications of Metals in Additive Manufacturing* [online]. Elsevier, 2019, 2019, s. 1-10 [cit. 2021-3-17]. ISBN 9780128166345. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-816634-5.00001-7
- [4] YAKOUT, Mostafa, M.A. ELBESTAWI a Stephen C. VELDHUIS. A Review of Metal Additive Manufacturing Technologies. *Solid State Phenomena* [online]. 2018, 278, 1-14 [cit. 2021-3-17]. ISSN 1662-9779. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.278.1
- [5] Additive Manufacturing | Farinia Group. *Farinia Group | Forge, Foundry, Machining...* [online]. Copyright © 2020, Farinia Group [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: <https://www.farinia.com/additive-manufacturing>
- [6] DERADJAT, D., & MINSHALL, T. (2017). Implementation of rapid manufacturing for mass customisation. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 28 95-121. [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/JMTM-01-2016-0007>
- [7] SUN, S., M. BRANDT a M. EASTON. Powder bed fusion processes. *Laser Additive Manufacturing* [online]. Elsevier, 2017, 2017, s. 55-77 [cit. 2021-3-17]. ISBN 9780081004333. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-100433-3.00002-6
- [8] RAHMATI, S. Direct Rapid Tooling. *Comprehensive Materials Processing* [online]. Elsevier, 2014, 2014, s. 303-344 [cit. 2021-3-17]. ISBN 9780080965338. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-096532-1.01013-X



- [9] Materials and Product Testing, Inspection & Certification | Element. *Materials and Product Testing, Inspection & Certification | Element* [online]. [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: <https://www.element.com/>
- [10] SUN, S., M. BRANDT a M. EASTON. Powder bed fusion processes. *Laser Additive Manufacturing* [online]. Elsevier, 2017, 2017, s. 55-77 [cit. 2021-3-17]. ISBN 9780081004333. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-100433-3.00002-6
- [11] Bineli, A. R. R., Peres, A. P. G., Jardim I, A. L., Filho, R. M. DIRECT METAL LASER SINTERING (DMLS): In technology for design and construction of microreactors. Brasil 2011. 6th brazilian conference on manufacturing engineering. [cit. 2021-3-17]. ISSN: 0100-7386
- [12] FRAZIER, William E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2014, 23(6), 1917-1928 [cit. 2021-3-17]. ISSN 1059-9495. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-014-0958-z
- [13] LEWANDOWSKI, John J. a Mohsen SEIFI. Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties. *Annual Review of Materials Research* [online]. 2016, 46(1), 151-186 [cit. 2021-3-17]. ISSN 1531-7331. Dostupné z: doi:10.1146/annurev-matsci-070115-032024
- [14] BAJAJ, P., A. HARIHARAN, A. KINI, P. KÜRNSTEINER, D. RAABE a E.A. JÄGLE. Steels in additive manufacturing: A review of their microstructure and properties. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2020, 772 [cit. 2021-3-17]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2019.138633
- [15] KEMPEN, K., E. YASA, L. THIJS, J.-P. KRUTH a J. VAN HUMBEECK. Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel. *Physics Procedia* [online]. 2011, 12, 255-263 [cit. 2021-3-17]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2011.03.033
- [16] HERMANN BECKER, Thorsten a Dimitri DIMITROV. The achievable mechanical properties of SLM produced Maraging Steel 300 components. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2016, 22(3), 487-494 [cit. 2021-3-17]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-08-2014-0096
- [17] CASATI, Riccardo, Jannis LEMKE, Ausonio TUISSI a Maurizio VEDANI. Aging Behaviour and Mechanical Performance of 18-Ni 300 Steel Processed by Selective Laser Melting. *Metals* [online]. 2016, 6(9) [cit. 2021-3-17]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met6090218

- [18] KUMBHAR, N. N. a A. V. MULAY. Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C* [online]. 2018, 99(4), 481-487 [cit. 2021-3-17]. ISSN 2250-0545. Dostupné z: doi:10.1007/s40032-016-0340-z
- [19] S. DOLINSEK, Investigation of direct metal laser sintering process, *Strojnicki Vestnik*, vol. 50, pp. 229-238, 01/01 2004.
- [20] FUGES, C., M. PVD Coatings Solve Common 3D-Printed Mold and Part Problems. In *Additive Manufacturing Magazine* [online]. Copyright © Gardner Business Media, Inc. 2020 [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: <https://www.additivemanufacturing.media/blog/post/pvd-coatings-solve-common-3d-printed-mold-and-part-problems>
- [21] FIORESE, A. Learn all about coating the additive manufactured Titanium64. In *Tav Vacuum Furnaces* [online]. [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: <https://www.tav-vacuumfurnaces.com/blog/53/en/coating-titanium64-additive-manufacturing-1>
- [22] FIALA, Jaroslav a Ivo KRAUS. *Povrchy a rozhraní. 2. přepracované vydání*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 978-80-01-05881-7.
- [23] KRAUS, V. *Povrchy a jejich úpravy. 1. vyd.* Plzeň: ZU FS, 2000. ISBN 80-7082-668-1.
- [24] BUNSHAH, R. F. *Handbook of Hard Coating*. New York: Wialam Andrew Publishing, 2001. ISBN 9780815514381.
- [25] MARTIN, P. *Introduction to Surface Engineering and Functionally Engineered Materials*. New York: John Wiley&Sons, 2011. [cit. 2021-3-17] ISBN 978-0-470-63927-6 (online ISBN 0470639276).
- [26] DENG, Yang, Wanglin CHEN a Bingxin LI. Physical vapor deposition technology for coated cutting tools: A review. *Ceramics International* [online]. 20120, 46(11, Part B), 18373-18390 [cit. 2021-3-17]. ISSN 0272-8842. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884220311123>
- [27] CALISKAN, H., P. PANJAN. 3.16 Hard Coatings on Cutting Tools and Surface Finish. *Comprehensive Materials Finishing* [online]. Elsevier, 2017, 2017, s. 230-242 [cit. 2021-3-17]. ISBN 9780128032497. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/303748297\\_Hard\\_Coatings\\_on\\_Cutting\\_Tools\\_and\\_Surface\\_Finish](https://www.researchgate.net/publication/303748297_Hard_Coatings_on_Cutting_Tools_and_Surface_Finish)

- [28] BOUZAKIS, Konstantinos-Dionysios a Nikolaos MICHAILIDIS. Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization. *CIRP Annals* [online]. 2012, 61(2), 703-723 [cit. 2021-3-17]. ISSN 0007-8506. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850612002053>
- [29] Additive Manufacturing solutions & industrial 3D printer by EOS . *Redirecting to* <https://www.eos.info/en/> [online]. Copyright © EOS [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en>
- [30] SHM Vás vítá ve světě supertvrdých materiálů | SHM. *SHM Vás vítá ve světě supertvrdých materiálů | SHM* [online]. Copyright © 1993 [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: <https://shm-cz.cz/>
- [31] Regionální technologický institut – Vybavení. *Západočeská univerzita v Plzni* [online]. Copyright © 1991 [cit. 26.05.2021]. Dostupné z: [http://rti.zcu.cz/laboratore/met/vybaveni\\_met.html](http://rti.zcu.cz/laboratore/met/vybaveni_met.html)
- [32] KŘÍŽ, Antonín. Tribologická analýza PIN ON DISK. *Metal*. 2004. Plzeň.
- [33] LÜ, Wenzhang, Guojian LI, Yaoyao ZHOU, Shiyong LIU, Kai WANG a Qiang WANG. Effect of high hardness and adhesion of gradient TiAlSiN coating on cutting performance of titanium alloy. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2020, 820 [cit. 2021-5-27]. ISSN 09258388. Dostupné z: doi:10.1016/j.jallcom.2019.153137
- [34] ZETEK, M, HANZL, P. *3D tisk výpočtově optimalizovaných kovových součástí s využitím technologie DMLS*. Výzkumná zpráva č. FV30149. Plzeň. Výzkumné centrum RTI – Regionální technologický institut

## **Přílohy**

### **PŘÍLOHA č. 1 MS1 materiálový list**

## Material data sheet

---

### EOS MaragingSteel MS1

EOS MaragingSteel MS1 is a steel powder which has been optimized especially for processing on EOSINT M systems.

This document provides information and data for parts built using EOS MaragingSteel MS1 powder (EOS art.-no. 9011-0016) on the following system specifications:

- EOSINT M 280 400W  
with PSW 3.6 and EOS Original Parameter Set MS1\_Performance 1.0 or MS1\_Speed 1.0
- EOS M290 400W  
with EOSPRINT 1.0 and Parameter Set MS1\_Performance 1.0 or MS1\_Speed 1.0

### Description

Parts built in EOS MaragingSteel MS1 have a chemical composition corresponding to US classification 18% Ni Maraging 300, European 1.2709 and German X3NiCoMoTi 18-9-5. This kind of steel is characterized by having very good mechanical properties, and being easily heat-treatable using a simple thermal age-hardening process to obtain excellent hardness and strength.

Parts built from EOS MaragingSteel MS1 are easily machinable after the building process and can be easily post-hardened to more than 50 HRC by age-hardening at 490 °C (914 °F) for 6 hours. In both as-built and age-hardened states the parts can be machined, spark-eroded, welded, micro shot-peened, polished and coated if required. Due to the layerwise building method, the parts have a certain anisotropy, which can be reduced or removed by appropriate heat treatment - see Technical Data for examples.

## Material data sheet

### Technical data

#### General process data

Typical achievable part accuracy [1], [8]	
- 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. $\pm 0.002$ inch
Age hardening shrinkage [2], [8]	approx. 0.08 %
Min. wall thickness [3], [8]	approx. 0.3 - 0.4 mm approx. 0.012 - 0.016 inch
Surface roughness (approx.) [4]	
- as manufactured	
MS1 Performance (40 $\mu\text{m}$ )	$R_a$ 5 $\mu\text{m}$ ; $R_z$ 28 $\mu\text{m}$ $R_a$ 0.19 $\times 10^{-3}$ inch, $R_z$ 1.10 $\times 10^{-3}$ inch
MS1 Speed (50 $\mu\text{m}$ )	$R_a$ 9 $\mu\text{m}$ ; $R_z$ 50 $\mu\text{m}$ $R_a$ 0.47 $\times 10^{-3}$ inch, $R_z$ 2.36 $\times 10^{-3}$ inch
- after shot-peening	$R_a$ 4 - 6.5 $\mu\text{m}$ ; $R_z$ 20 - 50 $\mu\text{m}$ $R_a$ 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 $\mu\text{m}$ $R_z$ up to < 0.02 $\times 10^{-3}$ inch (can be very finely polished)
Volume rate [5]	
- Parameter set MS1_Performance (40 $\mu\text{m}$ )	4.2 $\text{mm}^3/\text{s}$ (15.1 $\text{cm}^3/\text{h}$ ) 0.92 $\text{in}^3/\text{h}$
- Parameter set MS1_Speed 1.0 (50 $\mu\text{m}$ )	5.5 $\text{mm}^3/\text{s}$ (19.8 $\text{cm}^3/\text{h}$ ) 1.21 $\text{in}^3/\text{h}$

[1] Based on users' experience of dimensional accuracy for typical geometries, as built. Part accuracy is subject to appropriate data preparation and post-processing, in accordance with EOS training.

[2] Ageing temperature 490 °C (914 °F), 6 hours, air cooling

[3] Mechanical stability is dependent on geometry (wall height etc.) and application

## Material data sheet

- [4] Due to the layerwise building, the surface structure depends strongly on the orientation of the surface, for example sloping and curved surfaces exhibit a stair-step effect. The values also depend on the measurement method used. The values quoted here given an indication of what can be expected for horizontal (up-facing) or vertical surfaces.
- [5] Volume rate is a measure of build speed during laser exposure of hatched areas. The total build speed depends on the average volume rate, the recoating time (related to the number of layers) and other geometry- and machine setting-related factors.

### 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 <sup>3</sup> 0.289 - 0.293 lb/in <sup>3</sup>

## Material data sheet

### Mechanical properties of parts at 20 °C ( 68°F ) [8]

	As built
<b>Tensile strength [6]</b>	
- in horizontal direction (XY)	typ. 1200 ± 100 MPa typ. 160 ± 15 ksi
- in vertical direction (Z)	typ. 1100 ± 150 MPa typ. 160 ± 22 ksi
<b>Yield strength (Rp 0.2 %) [6]</b>	
- in horizontal direction (XY)	typ. 1100 ± 100 MPa typ. 1xx ± 22 ksi
- in vertical direction (Z)	typ. 930 ± 150 MPa typ. 145 ± 22 ksi
<b>Elongation at break [6]</b>	
- in horizontal direction (XY)	typ. (12 ± 4 ) %
- in vertical direction (Z)	x
<b>Modulus of elasticity [6]</b>	
- in horizontal direction (XY)	typ. 150 ± 25 GPa typ. 22 ± 4 Msi
- in vertical direction (Z)	typ. 140 ± 25 GPa typ. 20 ± 4 Msi
<b>Hardness [7]</b>	typ. 33 - 37 HRC

[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.

[8] Hint: these properties were determined on an EOSINT M 280-400W. Test parts from machine type EOS M 290-400W correspond with these data.



## Material data sheet

### Thermal properties of parts

	As built	After age hardening [2]
Thermal conductivity	typ. $15 \pm 0.8 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ typ. $104 \pm 6 \text{ Btu in/(h ft}^2 \text{ }^\circ\text{F)}$	typ. $20 \pm 1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ typ. $139 \pm 7 \text{ Btu in/(h ft}^2 \text{ }^\circ\text{F)}$
Specific heat capacity	typ. $450 \pm 20 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ typ. $0.108 \pm 0.005 \text{ Btu/(lb }^\circ\text{F)}$	typ. $450 \pm 20 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ typ. $0.108 \pm 0.005 \text{ Btu/(lb }^\circ\text{F)}$
Maximum operating temperature		approx. $400 \text{ }^\circ\text{C}$ approx. $750 \text{ }^\circ\text{F}$

### Abbreviations

typ.	typical
min.	minimum
approx.	approximately
wt	weight

### Notes

The data are valid for the combinations of powder material, machine and parameter sets referred to on page 1, when used in accordance with the relevant Operating Instructions (including Installation Requirements and Maintenance) and Parameter Sheet. Part properties are measured using defined test procedures. Further details of the test procedures used by EOS are available on request. Unless otherwise specified, the data refer to the default job MS1\_040\_default.job or the equivalent parameter set MS1\_Performance 2.0. The corresponding data for the default job MS1\_020\_default.job or the equivalent parameter set MS1\_Surface 1.0 are approximately the same except where otherwise specified.

The data correspond to our knowledge and experience at the time of publication. They do not on their own provide a sufficient basis for designing parts. Neither do they provide any agreement or guarantee about the specific properties of a part or the suitability of a part for a specific application. The producer or the purchaser of a part is responsible for checking the properties and the suitability of a part for a particular application. This also applies regarding any rights of protection as well as laws and regulations. The data are subject to change without notice as part of EOS' continuous development and improvement processes.

EOS<sup>®</sup>, EOSINT<sup>®</sup> and DMLS<sup>®</sup> are registered trademarks of EOS GmbH.

© 2014 EOS GmbH – Electro Optical Systems. All rights reserved.