

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

Studijní program: P 2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: 2303V004 Strojírenská technologie – technologie obrábění

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

**Vliv nanášecího elementu na tisk kovových součástí metodou  
DMLS**

Autor: **Ing. Milan Daňa**

Školitel: **doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**

Akademický rok 2019/20

## **Prohlášení o autorství**

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

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

V Plzni dne .....

.....

Podpis autora

## **Autorská práva**

Podle Zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků disertační práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

## **Poděkování**

Poděkování patří především doktorce Ivaně Zetkové, která mě během celého doktorského studia vedla, poskytovala mi drahocenné rady a měla obrovskou trpělivost při konzultacích. Velký dík patří také mému školiteli docentu Miroslavu Zetkovi, který mi při vypracovávání disertační práce předával cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat Katedře technologie obrábění a Regionálnímu Technologickému Institutu za zázemí, které mi během studia a řešení disertační práce poskytovali.

Závěrem bych chtěl poděkovat mé rodině a přítelkyni za podporu po celou dobu studia.

## ANOTACE

<b>Autor</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Daňa	Jméno Milan
<b>Studijní obor</b>	Strojírenská technologie-technologie obrábění	
<b>Vedoucí práce</b>	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav
<b>Pracoviště vedoucího</b>	Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra technologie obrábění ZČU – FST - KTO	
<b>Druh práce</b>	<b>Disertační</b>	
<b>Název práce</b>	Vliv nanášecího elementu na tisk kovových součástí metodou DMLS	

Fakulta: Strojní

Katedra: Strojírenská technologie-technologie obrábění

Rok odevzdání: 2020

### Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)

<b>Celkem</b>	105	<b>Textová část</b>	73	<b>Grafická část</b>	32
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

<b>Stručný popis zaměření, téma, cíl poznatky a přínosy</b>	Práce je zaměřena na problematiku 3D tisku kovů metodou DMLS založenou na principu práškového lože. Přesně se zaměřuje na nanášení práškového lože a problémů vznikajících při tomto procesu. V rámci experimentální části byly otestovány statické a dynamické mechanické vlastnosti, přesnost a drsnost v závislosti na druhu nanášecího elementu. Poslední část byla věnována vývoji dvou-pravítkové koncepce nanášecího ramene umožňující automatickou změnu během procesu 3D tisku kovů bez nutnosti zastavení tiskové úlohy.
<b>Klíčová slova</b>	3D tisk kovů, Nanášecí element, Dvou-pravítkové provedení, Měření vibrací

## SUMMARY

<b>Author</b>	Surname (including of Degrees) Ing. Daňa	Name Milan
<b>Field of study</b>	Technology of Metal Cutting	
<b>Supervisor</b>	Surname (including of Degrees) doc. Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav
<b>Institution</b>	University of West Bohemia in Pilsen, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Metal Cutting	
<b>Type of work</b>	<b>Dissertation</b>	
<b>Title of the work</b>	The influence of a recoater blade on 3d printing using direct metal laser sintering	

Faculty: Mechanical Engineering  
 Department: Technology of Metal Cutting  
 Submitted in: 2020

### Number of pages (A4 a eq. A4)

<b>Totally</b>	105	<b>Text part</b>	73	<b>Graphical part</b>	32
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

<b>Brief description topic, goal, results and contributions</b>	The thesis is focused on the issue of 3D metal printing by DMLS (Direct Metal Laser Sintering) based on powder bed fusion. The main goal of this thesis is focused on the powder bed application and solving troubles during the printing job. The thesis describes and compares static and dynamic mechanical properties, accuracy and roughness by the samples which are produced by different recoater elements. The highlight of the work is the recoater arm with two different recoater elements. This arm allows measuring of vibration and automatic recoater change during the job based on value of vibration.
<b>Key words</b>	3D printing, Recoater blade, Change of recoater blade, Vibration measurement

## Obsah

<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>10</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>12</b>
<b>Seznam zkratk, symbolů a jednotek.....</b>	<b>13</b>
<b>1 Úvod.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Aktuálnost tématu .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 Cíle disertační práce .....</b>	<b>15</b>
<b>2 Rozbor současného stavu.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Koloběh 3D tisku .....</b>	<b>17</b>
2.1.1 Model.....	17
2.1.2 Orientace modelu .....	18
2.1.3 Podpory.....	18
2.1.3.1 Tvorba podpor .....	19
2.1.3.2 Základní rozdělení podpor .....	19
2.1.3.3 Části podpor .....	20
2.1.4 Příprava programu pro 3D tiskárnu .....	20
2.1.5 Dráhy laseru .....	21
2.1.6 Kovový prášek .....	22
2.1.7 Příprava stroje, postprocesing, hotový díl .....	23
<b>2.2 Nanášecí element .....</b>	<b>24</b>
2.2.1 Geometrie nanášecích elementů .....	25
2.2.1.1 Keramické pravítko .....	26
2.2.1.2 HSS pravítko.....	26
2.2.1.3 Karbonový kartáček.....	26
2.2.2 Upnutí nanášecích elementů .....	26
2.2.3 Problémy při nanášení .....	27
2.2.4 Postup rozkmitání .....	29
2.2.5 Příznaky rozkmitání podpor .....	30
<b>3 Návrh a realizace vlastních experimentů.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1 Porovnání keramického pravítka a karbonového kartáčku .....</b>	<b>33</b>
3.1.1 Podíl nečistot ve struktuře .....	33
3.1.2 Zkouška tahem .....	37
3.1.2.1 První etapa.....	39
3.1.2.2 Druhá etapa .....	40
3.1.2.3 Zkouška tahem malých průřezů .....	43
3.1.3 Metalografie.....	44
3.1.4 Zkouška vrubové houževnatosti .....	46
3.1.5 Vysoko-cyklová únava .....	50
3.1.6 Přesnost .....	53
3.1.6.1 Přesnost úhlů .....	55
3.1.6.2 Přesnost vnějších rozměrů .....	55
3.1.6.3 Přesnost polohy .....	57
3.1.6.4 Přesnost vnitřních rozměrů .....	58
3.1.6.5 Přesnost tvarových ploch .....	61
3.1.6.6 Komplexní měření tvarové plochy.....	65
3.1.7 Drsnost povrchu .....	67
3.1.7.1 Úhly 2° - 32° .....	67
3.1.7.2 Úhly 35° - 85° .....	70

<b>3.2</b>	<b>Závěr z experimentálního porovnání keramického pravítka a karbonového kartáčku.....</b>	<b>74</b>
<b>3.3</b>	<b>Identifikace a kvantifikace problémů během nanášení .....</b>	<b>75</b>
3.3.1	Možnosti měření.....	75
3.3.1.1	Měření času .....	77
3.3.1.2	Měření proudů (zatížení motoru).....	78
3.3.1.3	Měření akcelerometry .....	79
3.3.2	Vlastní zařízení pro měření .....	80
3.3.2.1	Program pro měření vibrací.....	82
<b>3.4</b>	<b>Automatická změna pravítka – dvou-pravítkové provedení .....</b>	<b>84</b>
3.4.1	Návrh.....	84
3.4.2	Výroba a montáž .....	87
3.4.3	Rozšíření programu .....	88
3.4.4	Vyrovnání stavební platformy .....	90
3.4.5	Totožná poloha nanášecích elementů .....	92
<b>3.5</b>	<b>Testování dvou-pravítkového nanášecího ramene .....</b>	<b>94</b>
<b>4</b>	<b>Ověření funkčnosti navrženého zařízení v reálném tisku .....</b>	<b>95</b>
<b>5</b>	<b>Přínosy DP a doporučení pro další bádání .....</b>	<b>97</b>
<b>6</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>99</b>
	<b>Použitá literatura.....</b>	<b>101</b>
	<b>Seznam vlastních publikací.....</b>	<b>105</b>
	<b>Přílohy.....</b>	<b>109</b>



## Seznam obrázků

Obr. 1	Monitorovací systém EOSTATE Exposure OT .....	15
Obr. 2	Koloběh 3D tisku .....	17
Obr. 3	Napoložování zkušební etalonu - kostka [3].....	18
Obr. 4	Funkce podpor [7].....	19
Obr. 5	Typy běžných podpor [4].....	19
Obr. 6	Podpory tree a cone na prstýnku [8] .....	19
Obr. 7	Připojovací část podpory block [10].....	20
Obr. 8	Podpora typu cone [10] .....	20
Obr. 9	Procesní parametry [19] .....	21
Obr. 10	Upskin a Downskin [15].....	22
Obr. 11	Pootočení po sobě jdoucích vrstev [15] .....	22
Obr. 12	Částice prášku .....	23
Obr. 13	Příprava stroje.....	23
Obr. 14	Skutečná výška tisku .....	25
Obr. 15	Tvar keramického pravítka a HSS pravítka – optický mikroskop zvětšení 20x.....	25
Obr. 16	Karbonový kartáček .....	26
Obr. 17	Detail dorazu nanášecího pravítka.....	27
Obr. 18	Příložka pravítka .....	27
Obr. 19	Držák karbonových kartáčků .....	27
Obr. 20	Orientace podpor vůči pravítku [48] .....	28
Obr. 21	Problém během tisku [48].....	28
Obr. 22	Výstupky nad tisknutou plochu [11] .....	29
Obr. 23	Orientace převislých konců [29] .....	29
Obr. 24	Princip rozkmitání podpory [47] .....	30
Obr. 25	Příznaky rozkmitání podpory [47].....	30
Obr. 26	Odklonění podpor dotykem pravítka při tisku a výsledek [47] .....	31
Obr. 27	Odlomení podpor v důsledku kontaktu s pravítkem.....	31
Obr. 28	Ohnutí tahových vzorků tvrdým nárazem s pravítkem .....	32
Obr. 29	Štíhlé podpory.....	32
Obr. 30	Označení prvotních vzorků.....	34
Obr. 31	Pórovitost.....	35
Obr. 32	Pořadí dílu v závislosti na ofukovacím systému[7].....	36
Obr. 33	Oblast znečištění .....	36
Obr. 34	Přesívání prášku po tisku jednoduchých a malých součástí – běžný odpad .....	37
Obr. 35	Přesívání prášku po tisku tvarově komplikovaných dílů - nadměrný odpad.....	37
Obr. 36	Rozpouštěcí žíhání.....	38
Obr. 37	Zkušební těleso zkoušky tahem .....	38
Obr. 38	Křivky průběhů první etapy.....	39
Obr. 39	Ohrádka se vzorky EAE.....	40
Obr. 40	Křivky průběhů druhé etapy .....	41
Obr. 41	Porovnání směrů X a Z .....	42
Obr. 42	Ohrádka + schéma odběru vzorků .....	43
Obr. 43	E-E mechanické vlastnosti v závislosti na pozici od platformy - keramika .....	43
Obr. 44	E-A mechanické vlastnosti v závislosti na pozici od platformy - kartáček.....	44
Obr. 45	EAE mechanické vlastnosti v závislosti na přechodu keramiky a kartáčku .....	44
Obr. 46	Metalografie z místa přechodu E-E – 50x zoom [56] .....	45
Obr. 47	Porovnání metalografických výbrusů stejných sekcí EE, AA a EAE – Zvětšení 50x [56] .....	45
Obr. 48	Zkouška vrubové houževnatosti - Zkušební vzorek.....	46
Obr. 49	KCV Graf .....	47
Obr. 50	Gaussovo normální rozložení [61].....	49
Obr. 51	Porovnání hodnot KCV .....	50
Obr. 52	Způsob asymetrického zátěžného cyklu během zkoušky únavy P=2,R=0 [60].....	50
Obr. 53	Zkušební vzorek vysoko-cyklová únava.....	51
Obr. 54	Výsledky zkoušky vysoko-cyklové únavy.....	53

Obr. 55	Označení prvků pro měření.....	54
Obr. 56	Měření válců – Válec 2 – Kar. ....	56
Obr. 57	Měření malých otvorů.....	58
Obr. 58	Měřené díry [37] .....	60
Obr. 59	Díry 0.5 až 3 mm [37] .....	60
Obr. 60	Díry 5 až 10 mm [37] .....	60
Obr. 61	Schodišťový efekt u koule .....	61
Obr. 62	Odchylka od kulovitosti $\varnothing$ 20 mm .....	62
Obr. 63	Profil drážky .....	62
Obr. 64	Elipsovité kapsa – Kar. 1.....	63
Obr. 65	Pravá strana vlnovce - kar. ....	64
Obr. 66	Levá strana – kar. ....	64
Obr. 67	Měření na IFM G4 .....	65
Obr. 68	Porovnání s modelem .....	66
Obr. 69	Porovnání tisků .....	66
Obr. 70	Povrchy - leštěný, po tisku pískovaný + podpory [35].....	67
Obr. 71	Měřený vzorek .....	67
Obr. 72	Schodišťový efekt [26],[37] .....	68
Obr. 73	Průběh 2° Kar .....	68
Obr. 74	Drsnost Ra 2°- 32° .....	69
Obr. 75	Drsnost Rz 2°-32° .....	69
Obr. 76	Průběh drsnosti 15° Ker .....	70
Obr. 77	Průběh keramika 70° - nejnižší drsnost.....	70
Obr. 78	Průběh 43°B - Kartáček - nejvyšší drsnost.....	71
Obr. 79	Drsnost Ra 35°-85°A,B.....	71
Obr. 80	Drsnost Rz 35° - 85°A,B .....	72
Obr. 81	Drsnost spodní strany [30] .....	72
Obr. 82	Odvod tepla [34] .....	73
Obr. 83	Přepálený povrch .....	73
Obr. 84	Schéma měření kvality nanesené vrstvy [43].....	75
Obr. 85	Měření kvality nanesené vrstvy [44] .....	76
Obr. 86	Měření a nasvícení pro vyhodnocení skrze obrázky vrstvy[34] .....	76
Obr. 87	Výsledky měření [34] .....	77
Obr. 88	Čas nanášení vrstvy [42].....	77
Obr. 89	Porovnání výsledků měření času nanášení[42] .....	78
Obr. 90	Měření proudů .....	78
Obr. 91	Výstupní signál .....	79
Obr. 92	Měření akcelerometrem [24].....	79
Obr. 93	Měření a vyhodnocení pomocí akcelerometru [24] .....	80
Obr. 94	Elektrické schéma napájení baterie .....	81
Obr. 95	Umístění měřícího zařízení.....	82
Obr. 96	Program HD3D – Beta verze.....	82
Obr. 97	Prohlížení záznamů .....	83
Obr. 98	Experimentální zjištění prvotního zrychlení.....	84
Obr. 99	Vyměnitelné pravítko - ISO pohled přední, zadní .....	85
Obr. 100	FEM analýza poddajnosti pružných členů .....	86
Obr. 101	Elektrické schémata výměnného pravítka .....	86
Obr. 102	Tisk komponent .....	87
Obr. 103	Sestava prototypu .....	88
Obr. 104	Rozšíření programu .....	88
Obr. 105	Automatická výměna.....	89
Obr. 106	Část kódu zajišťující výměnu .....	90
Obr. 107	Vyrovnání platformy [41] .....	91
Obr. 108	Pozice měření spárovými měrkami .....	92
Obr. 109	Porovnání vrstev - základní 0,04 a výška vrstvy 0,08 mm .....	92
Obr. 110	Zaostření laseru [15] .....	93

---

Obr. 111	Testování totožné výšky .....	93
Obr. 112	Klopení pravítka .....	94
Obr. 113	Po nanesení vrstvy - zvednuté okraje .....	95
Obr. 114	Dokončený tisk .....	96
Obr. 115	Složka s uloženými a označenými záznamy .....	96
Obr. 116	Průběh problému .....	97

## Seznam tabulek

Tab. 1	Složení materiálu [16] .....	22
Tab. 2	Nanášení prášku VS spékání [15] .....	24
Tab. 3	Výsledky mikroskopie .....	34
Tab. 4	Výsledky tahové zkoušky – první etapa .....	39
Tab. 5	Výsledky tahové zkoušky – druhá etapa .....	41
Tab. 6	Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti teplota -40°C .....	46
Tab. 7	Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti teplota +20 °C .....	46
Tab. 8	Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti teplota +200 °C .....	47
Tab. 9	Hodnoty vrubové houževnatosti v ose Z .....	48
Tab. 10	Výsledky zkoušky vysoko-cyklové únavy - Keramika .....	51
Tab. 11	Výsledky zkoušky vysoko-cyklové únavy – Kartáček .....	52
Tab. 12	Výsledky zkoušky vysoko-cyklové únavy – Změna .....	52
Tab. 13	Popis měření přesnosti .....	54
Tab. 14	Celé úhly .....	55
Tab. 15	Kužely .....	55
Tab. 16	Válcové plochy .....	56
Tab. 17	Rozteče děr .....	57
Tab. 18	Náhodné body .....	57
Tab. 19	Rozměr obvodových rovnoběžných ploch .....	58
Tab. 20	Otvory se svislou osou .....	59
Tab. 21	Hodnoty průměrů vložených kružnic [37] .....	61
Tab. 22	Rozdílů odchylek .....	63

## Seznam zkratk, symbolů a jednotek

RTI	Regionální Technologický Institut při Západočeské Univerzitě v Plzni
DP	Disertační práce
AM	Additive Manufacturing
CAD	Počítačem podporované navrhování
3D	Třírozměrný
PBF	Powder Bed Fusion – metoda nanášení práškového lože
IFM G4	Optický mikroskop od firmy Alicona
Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti
Rt	Celková výška profilu drsnosti
Rz	Největší výška profilu drsnosti
STL	Stereolithography
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
SLS	Selective Laser Sintering
Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti
Rt	Celková výška profilu drsnosti
Rz	Největší výška profilu drsnosti
μm	Jednotka délky
mm	Jednotka délky
MPa	Jednotka tlaku
MS1	značení nástrojové oceli pro 3D tisk
ČSN	Česká státní norma
HSS	High Speed Steel
Fe	Železo
Ni	Nikl
Co	Cobalt
Mo	Molibden
Ti	Titan
Al	Hliník
Cr	Chróm
Cu	Měď
C	Uhlík
Mn	Mangan
Si	Křemík
S	Síra

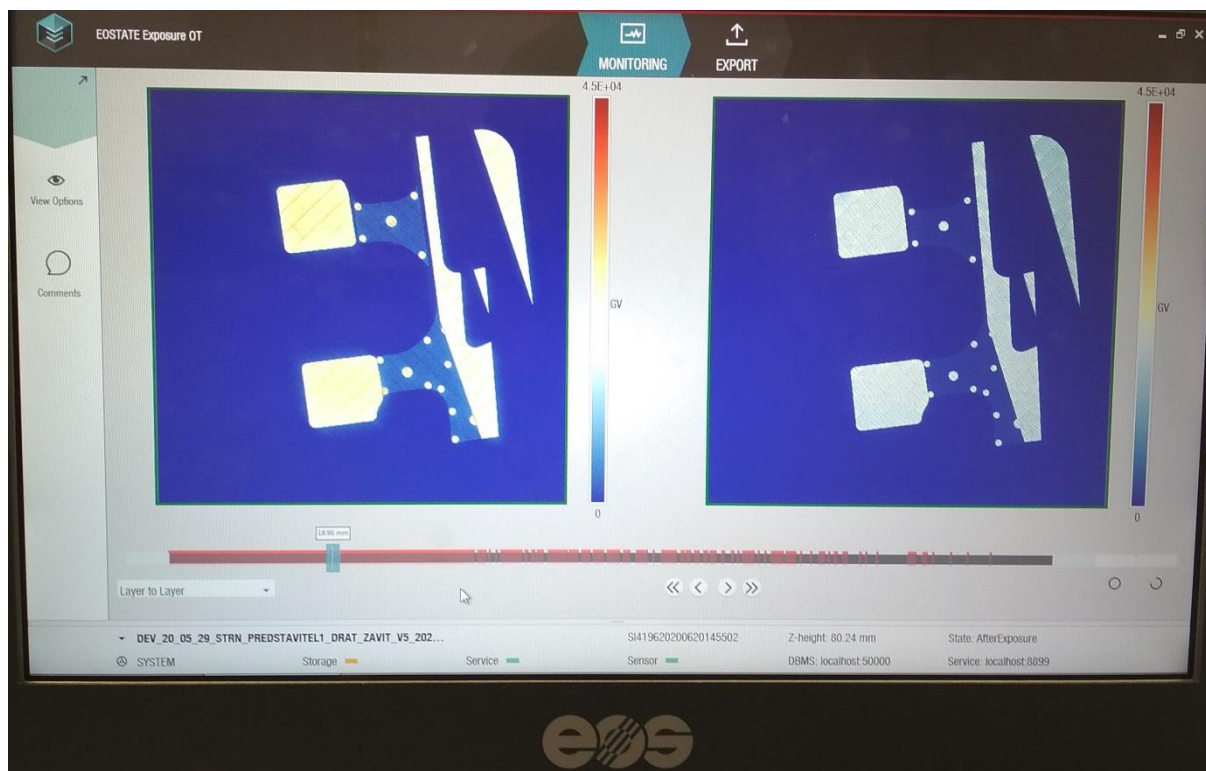
# 1 Úvod

Jako každá technologie výroby má svá slabá místa, tak i mnohými výrobci označována jako revoluční a téměř všemocná metoda výroby pomocí 3D tisku kovů má svá slabá místa a určitá úskalí. Faktory ovlivňující výrobu se ve výsledku promítnou v konečné kvalitě daných výrobků, nákladech na jejich výrobu a v neposlední řadě i ve vlivu na životní prostředí, které je v dnešní době považováno za nedílnou součást celého výrobního procesu. Na rozdíl od většiny konvenčních technologií výroby je potřeba u poměrně mladého odvětví 3D tisku kovů tyto slabé stránky nejprve identifikovat a najít nejhodnější řešení pro jejich eliminaci. Ovšem díky těmto slabým místům dochází k neustálému vývoji, kdy výrobci a výzkumné instituce mají prostor nejen pro zvyšování produktivity, bezpečnosti, snižování výrobních nákladů, zmetkovitosti a snižování dopadu na životní prostředí, ale i na netradiční koncepční a konstrukční řešení umožňující tato slabá místa omezit popřípadě úplně eliminovat. Právě jedním slabým místem u 3D tisku kovů metodou DMLS je nanášení práškového lože během procesu tisku. Přestože se na první pohled tato oblast může zdát velice jednoduchou, možná až banální, je třeba si uvědomit, že do tohoto procesu vstupuje velké množství vlivů, které na první pohled nemusí být patrné. Mezi základní vlivy, které vstupují do tohoto procesu, lze zařadit například druh nanášecího elementu, tuhost nanášecího elementu, druh podpůrných struktur, tuhost podpůrných struktur, tvarovou složitost dílů, orientaci dílů, kvalifikovanost obsluhy, ale i deformaci dílů vlivem přehřívání apod. Jak je z výše uvedeného zřejmé, je potřeba této oblasti věnovat vysokou pozornost a opomenutí či podcenění některých z výše uvedených vlivů může mít fatální následky na samotný tisk, kdy ve většině případů dochází k nevratnému znehodnocení tiskové úlohy a tím k obrovským vícenásobným vznikajícím kvůli vyjmutí znehodnoceného tisku, přepracování tiskových dat, přípravě stroje a opětovnému spuštění upravené tiskové úlohy.

## 1.1 Aktuálnost tématu

3D tisk kovů metodou DMLS (SLS) je poměrně mladou technologií, která nachází své uplatnění v opravdu různorodých oblastech od umění přes zdravotní implantáty až k částem raketových motorů atd. Od počátku byla tato technologie velice atraktivní pro strojírenskou praxi, ovšem prvotní nedůvěřivost k mechanickým vlastnostem tištěných součástí byla dlouhou dobu velkým tématem. Ověření mechanických vlastností a porovnání tištěného materiálu s konvenčně vyráběným odstartovalo enormní zájem o tuto technologii, a proto docházelo a stále dochází k masivnímu výzkumu a vývoji výrobních firem s cílem nabídnout nová konstrukční řešení výrobních zařízení, která jsou schopná vytisknout požadovaný díl rychleji a dokonce i s vyšší přesností popřípadě z jiného kovového materiálu. V dnešní době je 3D tisk kovových součástí asi nejvíce skloňovanou výrobní technologií a díky tomuto obrovskému zájmu se jedná o velice dynamicky se rozvíjející oblast. Obrovský vývoj je zde taktéž podpořen konkurenčním bojem jednotlivých firem zabývajících se výrobou 3D tiskáren.

V současné době je vývoj zaměřen na samotný proces 3D tisku a především na procesní parametry a zvyšování počtu laserových zařízení, která dokáží spékat současně. Laser může používat v jedné vrstvě několik sad procesních parametrů, kdy jádro součástí, kontura, Downskin, Upskin mají diametrálně odlišné nastavení jednotlivých procesních parametrů. Mezi základní procesní parametry jsou řazeny například rychlost skenování laseru, výkon laseru, vzdálenost mezi jednotlivými dráhami laseru, překrytí a další. Změnou jednotlivých parametrů v jednotlivých sadách je možné dosáhnout změny nejen mechanických vlastností ale i porozity materiálu, drsnosti ploch atd. Obrovským pokrokem v této oblasti bylo nalezení takových procesních parametrů, které umožňují tisk součástí bez použití podpor skloněných pod úhlem mezi stavební platformou a plochou součásti větším než 25°, přičemž doposud bylo možné takto tisknout s úhlem větším než 40°. Takto razantního pokroku bylo dosaženo pouze změnou procesních parametrů, jež ukazuje dynamiku vývoje v tomto směru. Další oblastí, na kterou se v posledních pěti letech zaměřují nejen velcí výrobci 3D tiskáren, ale i výzkumné organizace a vysoké školy, je monitorování procesu 3D tisku kovů v reálném čase během tiskové úlohy. Výrobce EOS má tři druhy monitorovacích systémů, přičemž každý z nich je zaměřen na specifickou oblast. První oblastí je monitorování tavné lázně a pro monitorování této oblasti je určen Meltpool. Pomocí systému Meltpool se měří tepelná radiace skrze laserový spot pomocí polopropustného skla. Měřicí dioda zachycuje jednotlivé body s frekvencí 60 KHz. Jednotlivé hodnoty se přiřazují k pozici laseru na platformě. Podle citlivosti nastavení se 1 pixel obrázku skládá z několika hodnot měření a poté se složí obraz z jednotlivých pixelů. Druhý systém je Exposure OT (Optical thomography), který monitoruje intenzitu tepelné emise v prostoru celé stavební platformy. Intenzita tepelné emise je pouze poměrové číslo nikoliv exaktní hodnota. Vyhodnocení se provádí pomocí algoritmů, které analyzují obrázky tepelné intenzity dané vrstvy. Každý algoritmus je uzpůsoben tak, aby hledal určitou vadu. Z tohoto důvodu je nutné dělat několik analýz, aby byly odhaleny všechny možné vzniklé vady při 3D tisku. [34],[38],[57],[58],[59].



Obr. 1 Monitorovací systém EOSTATE Exposure OT

Dalším a posledním systémem monitorování je PowderBed, který monitoruje nanášení práškového lože a pokud je práškové lože z nějakého důvodu nesprávně naneseno, opakuje nanášení. Ovšem všechny tyto monitorovací systémy dokáží problémy odhalit buďto již během tisku, nebo až po skončení tiskové úlohy a provedení potřebných analýz, ale žádný ze systémů není koncipován tak, aby vzniklé problémy dokázal zachytit a zároveň v reálném čase vyhodnotit a na základě těchto výsledků v danou chvíli reagovat na vznikající problémy.

Z tohoto důvodu vyvstal požadavek v rámci disertační práce vyvinout a ověřit zařízení, které by obohatilo paletu monitorovacích systémů a zároveň by dokázalo v reálném čase reagovat na vznikající problémy během procesu 3D tisku kovů.

## 1.2 Cíle disertační práce

Dílčích cílů v rámci výzkumu vytyčeného tématu disertační práce dále jen DP věnující se problematice 3D tisku je několik, přičemž primárním cílem je objasnění vlivu změny nanášecího elementu na proces 3D tisku kovových součástí a zároveň vytvoření dvou-pravítkového nanášecího ramene. Na základě rešerše odborné literatury a z doposud získaných zkušeností a poznatků vyplývá, že vliv nanášecího elementu, čili pravítka, na proces tisku je značný. Nejvýznamnější vliv má pravítko na stabilitu procesu tisku podpor a dílů.

V rámci DP byly stanoveny tyto následující cíle:

- **Stanovení slabých míst nanášení práškového lože**

Prvotním cílem DP je identifikace problémů, které se objevují při nanášení nové vrstvy prášku pomocí nanášecího keramického pravítka. U zjištěných problémů zmapovat vznik těchto problémů a objasnit jejich příčiny. Na základě těchto zjištění stanovit budoucí výzkumný směr a specifikovat zásadní body pro experimentální ověření.

- **Výzkum mechanických vlastností v závislosti na nanášecím elementu**

V rámci tohoto cíle je úkolem provést výzkum mechanických vlastností v závislosti na použitém nanášecím elementu. Pro kompletní naplnění tohoto cíle je nebytné otestovat mechanické vlastnosti vytištěných vzorků pomocí mechanických zkoušek (statické zkoušky tahem, zkoušky vrubové houževnatosti a zkoušky vysoko-cyklové únavy) a zároveň porovnat konkurenty z hlediska podílu nečistot ve vytištěné struktuře. Přičemž výsledkem je ověření, zda změna nanášecího elementu dokáže ovlivnit mechanické vlastnosti, případně jakým způsobem se tato změna projevuje.

- **Výzkum přesnosti a drsnosti ve spojitosti s nanášečím elementem**

Dalším cílem je výzkum přesnosti a drsnosti dílů vytvořených různými druhy nanášečích elementů. Pro objektivní porovnání je nezbytné vytvořit zkušební platformu s etalonovým dílem, který bude navržen tak, aby obsahoval různé konstrukční prvky, které jsou typické pro 3D tisk a zároveň, aby je bylo možné změřit a objektivně porovnat z hlediska přesnosti a drsnosti.

- **Vývoj měřícího zařízení a řídicího systému**

Na základě rešerše, která se zaměřuje na možnosti měření problémů vznikajících během nanášení práškového lože, bude specifikována nejvhodnější varianta měření s ohledem na možnosti Regionálního Technologického Institutu. Na základě zjištění z rešeršní části bude navrženo a otestováno měřící zařízení, které bude sloužit pro odhalení a kvantifikování problémů při nanášení nové vrstvy prášku při 3D tisku. Pro toto zařízení by měl být vytvořen měřící program, který bude schopný zaznamenat a zároveň vyhodnotit vzniklé vibrace.

- **Vývoj dvou-pravítkového provedení**

Posledním a nejdůležitějším cílem by měl být vývoj a experimentální ověření dvou-pravítkového provedení nanášečím ramene. Přičemž primárně by mělo být nanášení realizováno pomocí keramického pravítka a při vzniku problémů dojde ke změně na druhý nanášečím element. Změna nanášečím elementu bude automatická bez nutnosti zastavení tisku a otevření pracovní komory. Na základě naměřených hodnot z nanášení jednotlivých vrstev pomocí vytvořené aplikace bude být iniciována případná změna nanášečím elementu. Při použití dvou-pravítkové koncepce je předpoklad, že budou zmírněny, popř. úplně eliminovány některé problémy během tisku, jako je rozkmitání podpor, ať už vlivem špatně navržených podpor nebo volbou nevhodného nanášečím pravítka. Je předpoklad, že tato unikátní a doposud nepopsaná změna pravítka přinese kýžený efekt.

## 2 Rozbor současného stavu

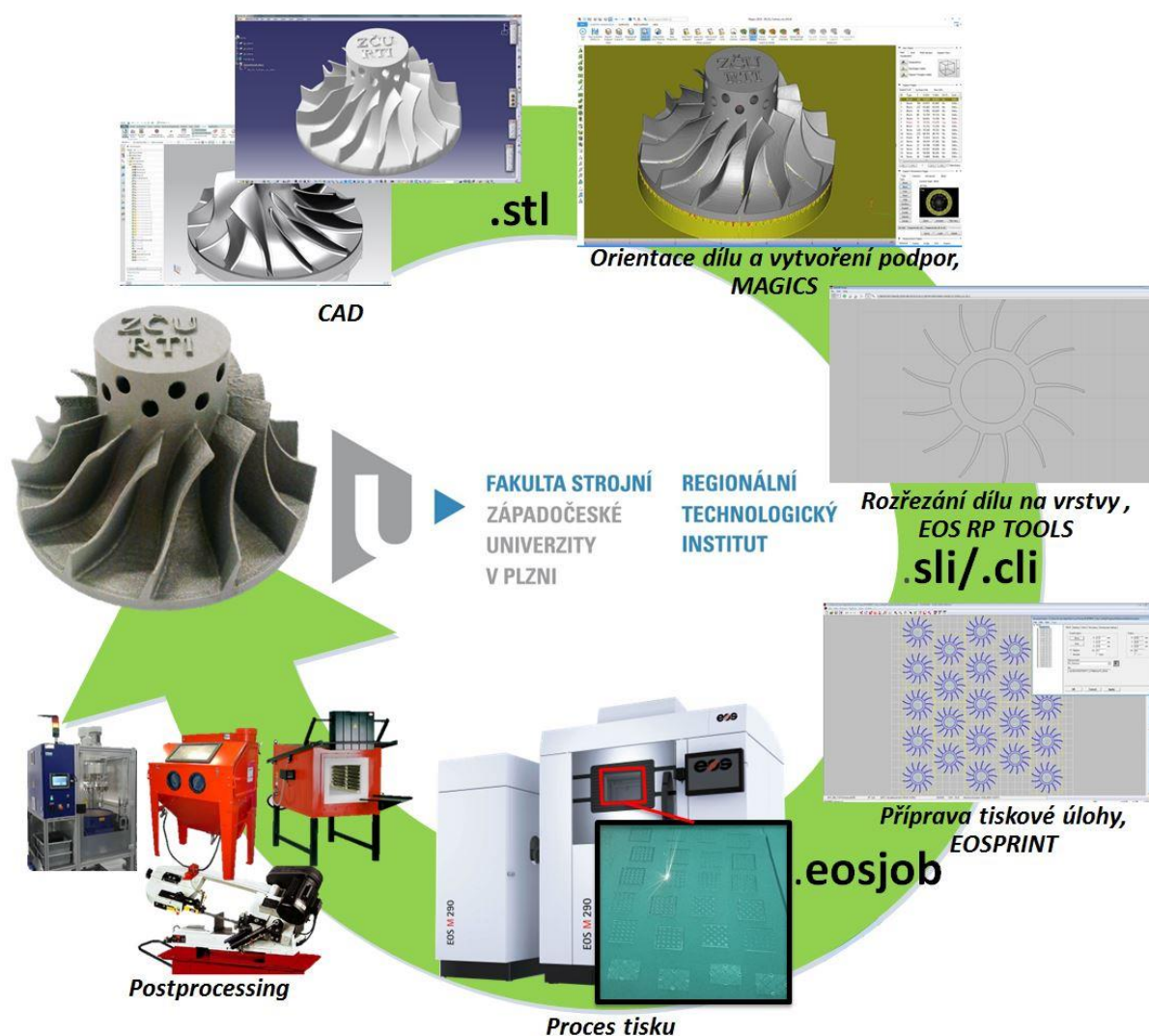
DMLS (SLM) je revoluční metoda umožňující rychle vyrobit plně funkční kovové díly přímo z 3D digitálních dat, přičemž odpadá investice do výrobních nástrojů a dalších technologií. U běžných technologií jako například odlévání, obrábění atd. je doba dodání hotového výrobku od vytvoření modelu v řádu několika týdnů, obvykle se dodací doba pohybuje okolo 4 – 6 týdnů, kdežto využitím technologie 3D tisku se dodací doba hotového dílu pohybuje v řádu několika dnů. Obvyklá doba dodání se pohybuje v rozmezí 3 – 5 dnů, díky tomuto faktu jsou hlavními uživateli 3D tisku především firmy z oblasti automotive a leteckého průmyslu, které díky rapidnímu snížení dodací doby jsou schopny výrazně zkrátit vývojový cyklus nového výrobku. Ovšem tato technologie není určena pouze pro výrobu prototypů a speciálních součástí, lze ji uplatnit například v sériové výrobě jako například firma Mapal, která využila 3D tisk pro výrobu vrtáků a hydraulických upínačů [1],[3],[5],[6].

Princip metody spočívá ve spékání tenkých vrstev kovového prášku, které jsou nanášeny na ocelovou stavební platformu pomocí ramene s nanášečím elementem. K tavení dochází díky laserovému paprsku, jenž natavuje prášek jen v řezu, který je určený průmětem konkrétní roviny 3D CAD modelem vyráběné součásti. Během stavby součásti je nezbytně nutné, aby byla správně zafixována poloha výrobku pomocí podpůrných struktur. Tyto podpůrné prvky jsou vyráběny stejným způsobem jako součást, a to vrstvu po vrstvě. Podpůrné struktury slouží nejen pro zafixování polohy, ale také pro podpírání součásti, odvodu tepla atd. Spékání prášku probíhá laserovým paprskem o maximálním výkonu od 200 do 1000 W v závislosti na použitém stroji. Kovové díly vyrobené technologií DMLS jsou z hlediska statických mechanických vlastností plně srovnatelné s obráběnými či odlévanými díly, což dokazuje studie materiálových vlastností, kterou si nechala zpracovat firma Innomia a.s. Tímto způsobem se vyrábějí i tvarově velice složité součástky, které mohou být např. tvořeny různými vnitřními dutinami, zešíkmeními nebo žebry. Největším pozitivem této metody je možnost výroby součástí s komplikovanou geometrií, která by se konvenčními metodami nedala vyrobit, nebo by se vyráběla velice složitě. Čím je součást složitější, tím se stává technologie DMLS ekonomicky efektivnější. Za obrovskou výhodu lze považovat možnost výroby několika rozdílných součástí najednou, kdy oproti konvenčnímu způsobu výroby odpadá seřizovací čas stroje při přechodu na jinou součást. S technologií Additive Manufacturing je možné vyrábět kdykoliv v případě potřeby, a proto není potřeba vyrábět díly do velké zásoby. Tato technologie produkuje mnohem méně odpadu a její systémy jsou energeticky efektivnější [1],[2],[3],[45],[52],[53],[54].

DP byla realizována ve spolupráci s Regionálním technologickým institutem při Západočeské Univerzitě v Plzni dále jen RTI. Tento institut vlastní 3D tiskárnu kovů EOS M290 a z tohoto důvodu byla práce orientována především na 3D tiskárnu tohoto výrobce. Všechny experimentální tisky a měření vibrací během tisku byly realizovány na tomto stroji.

## 2.1 Koloběh 3D tisku

Pod koloběhem 3D tisku se skrývá soubor všech nezbytných činností pro vytvoření výrobku pomocí 3D tisku čili od počáteční myšlenky převedené do podoby 3D modelu až po plně funkční díl. Jednotlivé operace v pomyslném koloběhu musí být naplňovány v pevně dané chronologii, jak ukazuje obrázek 2. Tento koloběh tvoří uzavřený cyklus, přičemž posledním procesem by mělo být proměření a otestování vytištěného dílu v provozu s cílem odhalit případné nesrovnalosti či chyby při návrhu a daný díl optimalizovat. Poté může být znovu využit celý koloběh 3D tisku pro dosažení nejlepšího výsledku. V následujících kapitolách bude rozklíčováno, co je nezbytné v jednotlivých oblastech koloběhu udělat, aby byl celý koloběh úspěšně uzavřen.



Obr. 2 Koloběh 3D tisku

### 2.1.1 Model

U konvenčních technologií je potřeba mít výkres součásti, podle kterého se bude součást vyrábět, kdežto u této technologie není výkres potřeba, ale je nezbytně nutné mít vytvořený 3D model součásti, podle kterého bude vznikat daný díl. Pro vymodelování součásti je možné použít jakéhokoli modelovacího programu, který je schopný následně model uložit do formátu STL.

STL je polygonová optimalizovaná síť a je zdrojovým formátem pro aditivní výrobu. Kvalita STL modelu významně ovlivňuje výslednou kvalitu vytištěné součásti. Kvalita STL modelu se dá ve většině případů nastavit při jeho generování. Kvalitní model je tvořen dostatečným počtem trojúhelníků, tak aby byl zachován jeho tvar v dostatečné přesnosti a kvalitě ploch. I přes kvalitně vygenerovaný STL model může docházet k drobným chybám STL sítě. Editace STL modelu je v běžných CAD programech značně obtížná, kdežto v prostředí Magics je oprava modelu velice jednoduchá, v některých případech dokonce automatická [20],[21].



### 2.1.2 Orientace modelu

Prvotním a nejvíce ovlivňujícím aspektem u 3D tisku je vhodné polohování součásti vůči stavební platformě, neboť to odráží nutnost a množství podpor. Vhodným polohováním je možné předejít velkým problémům během tiskové úlohy, a proto je velice důležité dobře promyslet všechny možnosti polohování dílu a poté vybrat nejvhodnější orientaci dílu. Pro orientaci dílu jsou v softwaru Magics funkce posunutí a otočení, obě tyto zmiňované funkce mohou mít interaktivní mód. Velice nápomocnou funkcí při polohování dílu je Supported Area Preview, která označuje barevnou škálou plochy, jež svírají určitý úhel se stavební platformou. Tento úhel je možné měnit. Díky této funkci je velmi jednoduché identifikovat plochy, které jsou orientovány pod menším úhlem, nežli je uživatelem zvoleno a tím pádem je nezbytné je podporovat.

### 2.1.3 Podpory

Při výrobě dílů pomocí aditivního způsobu výroby je nutné použít tzv. podpor či podpěrných struktur, ovšem v některých případech je výroba součásti realizována bez podpor, a to z důvodu, že součást může být pevně připevněna rovnou na stavební platformu. Podpora je prvek, který slouží pro fixaci dílu ke stavební platformě a dále vytváří podporu pro stavbu součástí, jež má stavební úhel menší než 45° (úhel mezi stavební platformou a stěnou součásti) nebo má převislý konec větší nežli 0,5 mm. Dále mají funkci odvodu tepelné energie ze součásti, zamezení deformací dílu a další.

Dá se říci, že podpory jsou „nezbytně nutným zlem“ při výrobě součástí pomocí aditivní výroby. Jejich nutnost vyplývá z geometrické složitosti dílu. Ovšem nejvýznamnější vliv na množství podpor má polohování tisknutého dílu, kdy je třeba se oprostit od konvenčních polohování dílů, jako je například upínání dílů při obrábění. Jako názorný příklad může sloužit polohování zkušebního etalonu ve tvaru kostky, viz obrázek 3.

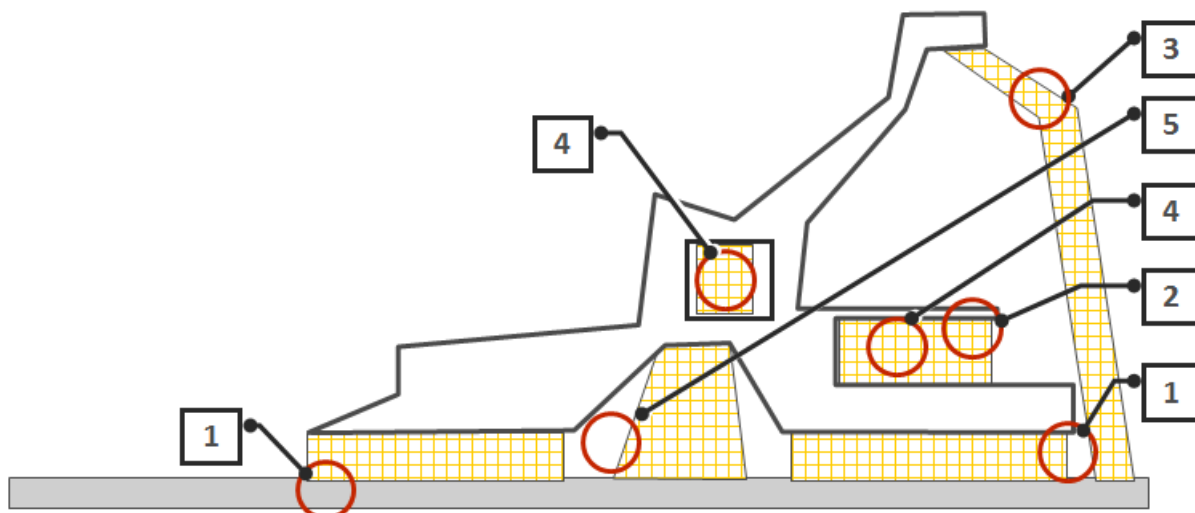
Zásadním aspektem na kvalitu dílů je jejich odstranění ze stavební platformy a následné zbavení se podpor. Proto je nezbytně nutné při polohování dílů a vytváření podpor a podpěrných struktur brát na zřetel jejich odstranitelnost a nutnost dalšího opracování. Tento aspekt je často přehlížený, ale je velmi důležitý, nejen že pomocí něho lze ušetřit mnoho nákladů, času, ale především lze předejít situaci, kdy je nutné podpory odstranit a to není technicky možné. Pokud je potřeba součást vyrábět s podporami, objem prášku pro výrobu součásti se zvyšuje = stoupá cena, stoupá čas potřebný pro výrobu. Dále se zvyšuje cena dílu z důvodu nutnosti odstranění podpor, popřípadě obrábění ploch, které byly vypodporovány, neboť jakost ploch po odstranění podpor je ve většině případů nevyhovující [12].



Obr. 3 Napolohování zkušebního etalonu - kostka [3]

Podpory musí:

1. zajistit součást proti oddělení v průběhu stavebního procesu
2. umožnit odvod tepla ze součásti
3. podpírat převislé struktury
4. být snadno odstranitelné
5. předcházet zbytečnému uvěznění prášku v podporách



Obr. 4 Funkce podpor [7]

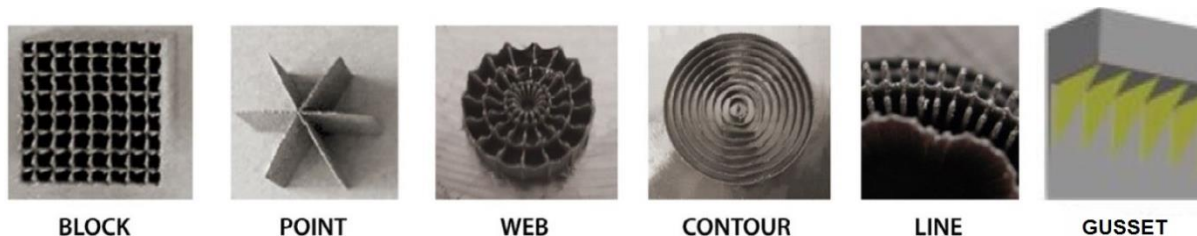
### 2.1.3.1 Tvorba podpor

Tvorba podpor je nejdůležitější část přípravy dat pro 3D tisk kovových součástí, neboť v této části musí uživatel zvážit, kde jsou nezbytně nutné a naopak, kde jsou naprosto zbytečné. Pro jejich vytvoření se nejčastěji využívá automatického módu, ovšem v drtivé většině případů je nutné automatické podpory upravit, nebo zcela nově navrhnout. Při rozhodování se uživatel převážně opírá o nabyté zkušenosti z předešlých tiskových úloh.

### 2.1.3.2 Základní rozdělení podpor

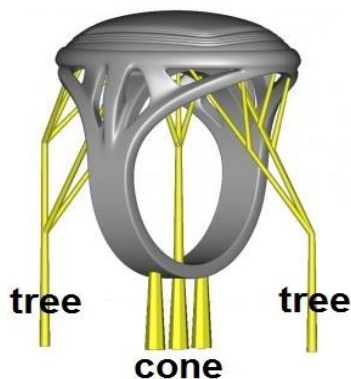
V současné době je k dispozici pro komerční použití několik druhů podpor. Podpory je možné rozdělit na objemové a speciální podpěrné struktury (například odlehčené struktury, gyroidní struktury atd.).

Mezi běžné podpory lze zařadit následující typy: Block, Point, Web, Contour, Line a Gusset. Všechny tyto výše zmíněné typy jsou vyobrazeny na obrázku 5.



Obr. 5 Typy běžných podpor [4]

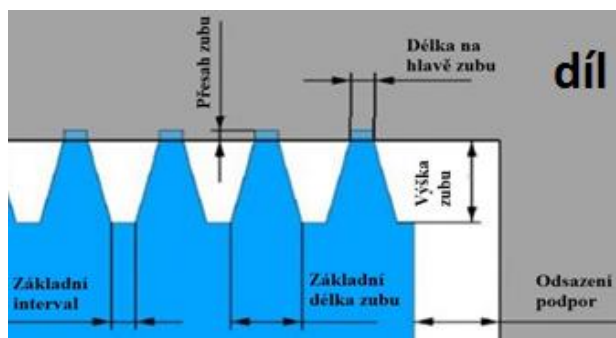
Do plno-objemových je možné zařadit následující typy: tree, cone a volume. Jedná se o podpory, jež jsou vytištěny celo-objemově bez jakýchkoliv odlehčení. Na obrázku 6 jsou vyobrazeny objemové podpory cone a tree.



Obr. 6 Podpory tree a cone na prstýnku [8]

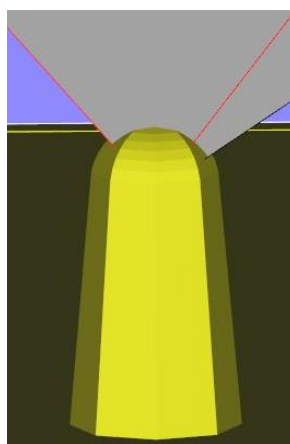
### 2.1.3.3 Části podpor

U běžných a objemových podpor lze rozeznávat několik jednotlivých částí. Základní rozdělení částí podpor je na tělo a připojení k dílu. Každá část má svoji charakteristickou funkci, pro kterou je navržena. Například tělo by mělo být kompaktní a pevné s ohledem na prnutí při tisku. Připojení k dílu je část, která je velmi specifická. Základní připojení je vidět na obrázku 7. Jedná se o tzv. připojovací zuby. Vzhledem k nutnosti odstranění podpor bylo zapotřebí tu část, jež je spojena s dílem, vytvořit s odlišnými vlastnostmi, než má tělo podpory. Kvůli této skutečnosti byly navrženy připojovací zuby, které jsou implementovány do téměř všech běžných typů podpor. Nastavením připojovacích zubů je možné ovlivnit pevnost spojení mezi podporou a součásti. Na obrázku 7 je schéma připojovacích zubů i s popisem jednotlivých parametrů, jež je možné měnit a tím docílit požadovaných vlastností připojení. Jestliže podpora nezačíná na stavební platformě, ale na některé ploše dílu, jsou připojovací zuby na obou připojeních podpory k dílu (jak na spodní straně, tak i na horní straně).



Obr. 7 Připojovací část podpory block [10]

U objemových podpor je část připojení k dílu odlišná od předchozího příkladu. U této podpory dochází k zaoblení hlavy a tím zmenšení stykové plochy dílu a podpory, čímž dochází ke snadnějšímu postprocesingu. Tvar připojení typu cone je vyobrazen na obrázku 8. Tvar připojení je standardně polokulovitého tvaru, přizpůsobuje se dané ploše, ke které je kotven.



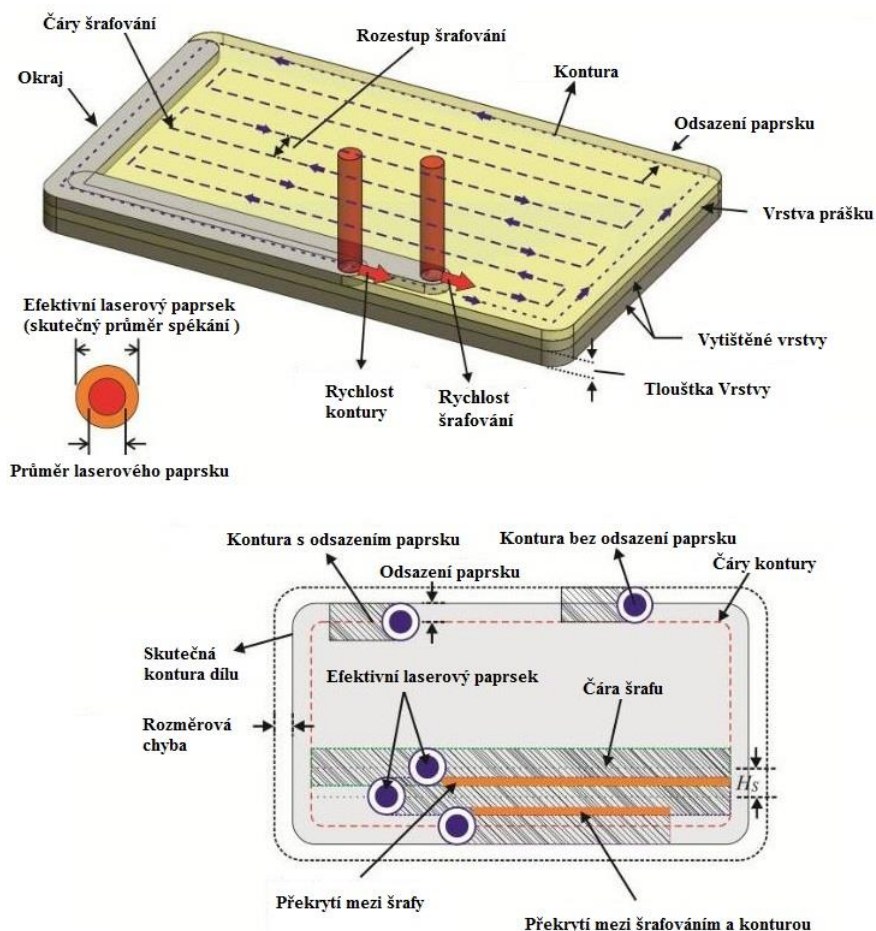
Obr. 8 Podpora typu cone [10]

Podpory typu volume jsou výjimkou. Tento typ nemá odlišené tělo a připojovací část, jedná se tedy o přímé propojení objemu podpory s objemem dílu.

### 2.1.4 Příprava programu pro 3D tiskárnu

Napoložovaný a vypořádovaný díl musí být rozřezán na jednotlivé vrstvy a k tomu slouží program RP Tools. Tento program je velice jednoduchým nástrojem, ve kterém se nastaví vzdálenost mezi jednotlivými řezy. Následně je takto rozřezaný díl načten do programu EOSPRINT, ve kterém dochází ke konečnému rozmístění dílů na stavební platformu. Dále se zde nastavují procesní parametry tisku, přičemž jsou zde přednastaveny sady parametrů. Firma EOS používá 3 typy setů s procesními parametry, které jsou unikátní pro každý materiál z jejich nabídky. Typy setů s procesními parametry jsou pojmenovány EOS\_Direct\_Part, EOS\_Direct\_Tools a EOS\_Support\_Structures. Tyto názvy pod sebou ukrývají soubory parametrů, které jsou přizpůsobeny pro určitá použití. První ze jmenovaných je vhodné použít pro díly stavěné za pomoci podpor, přičemž podpory mají nastaveny parametry EOS\_Support\_Structures. Díly stavěné bez pomoci podpor, což znamená, že jsou

přisintrovány přímo ke stavební platformě, používají procesní parametry EOS\_Direct\_Tools. V těchto setech parametrů jsou schovány další kategorie podsetů procesních parametrů, jež jsou používány v rámci jednoho dílu. Podsety parametrů jsou označeny například Inerskin, Downskin, Upskin, Contour a Support. Tyto jednotlivé podsety jsou automaticky přiřazeny k drahám laseru v dané vrstvě. Tyto jednotlivé podsety jsou uzpůsobeny pro určité použití, přičemž i nastavení jednotlivých parametrů je rozdílné. Mezi základní parametry 3D tisku, které je možné přednastavit, patří například intenzita laserového paprsku, skenovací rychlost, ofset od kontury, překrytí laserových drah, šrafování laseru atd. Obrázek 9 znázorňuje, kolik parametrů vstupuje do procesu tisku [14],[15],[19],[28].



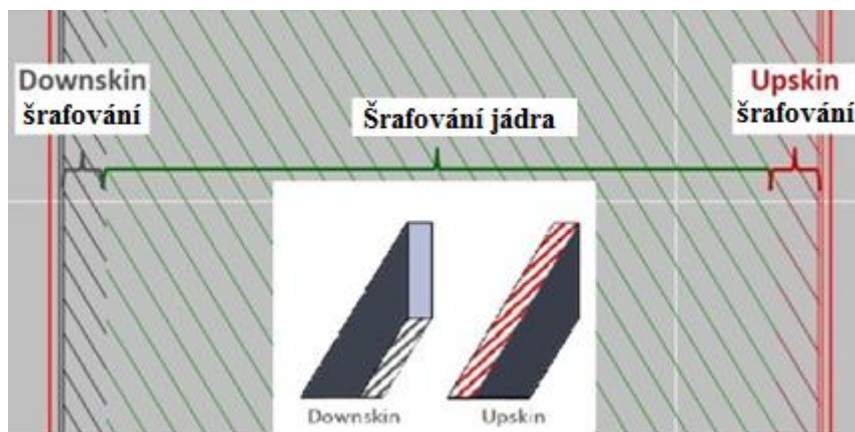
Obr. 9 Procesní parametry [19]

Například při porovnání podsetu jádra a kontury jsou parametry diametrálně odlišné, jak je ukázáno dále. Parametry jádra jsou nastaveny následujícím způsobem: Výkon laseru 285 W, rychlost laseru 960 mm/s, šrafování 0,11 mm a parametry kontury: Výkon laseru 135 W, rychlost laseru 300 mm/s. Tyto uvedené hodnoty jsou přednastaveny pro materiál MS1 pro tloušťku vrstvy 0,04 mm.

### 2.1.5 Dráhy laseru

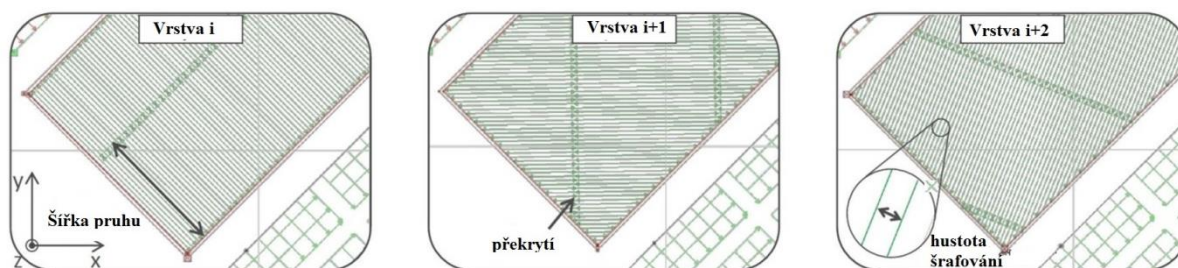
Dráhy laseru generuje software EOSPRINT automaticky, kdy je možné nastavení drah měnit a tím docílit požadovaných vlastností. Strategii tisku a pořadí spékání v rámci jedné vrstvy lze ovlivnit. V rámci jedné součásti je možné zvolit několik rozdílných strategií. Laser je programován na jeho střed, a proto kontura součásti nemůže být shodná s konturou dráhou laseru, jak je ukázáno na obrázku 10. Velikost tohoto odsazení dráhy laseru od kontury dílu dané vrstvy je dána velikostí beam ofsetu.

Jak již bylo výše zmíněno, existuje několik podsetů s nastavením parametrů, jež se odráží ve šrafování (dráhy laseru). Základní šrafování se skládá ze tří základních částí, které jsou Downskin, Jádro, Upskin. Obrázek 10 osvětluje, co znamenají jednotlivé části a kde se používají. Už z názvu je zřejmé, že Upskin se nachází na svrchní straně součásti a Downskin se nachází spodní straně součásti. Velikost jednotlivých oblastí je možné měnit. Defaultní velikost oblastí Downskin a Upskin je stanovena na 4 vrstvy. Na svislých stěnách se Upskin ani Downskin nepoužívá, je zde pouze jádro. V nastavení výrobcem je šrafování metodou Downskin hustější nežli u ostatních. Využitím těchto způsobů dochází k vytvoření kvalitnějšího povrchu [15].



Obr. 10 Upskin a Downskin [15]

Jestliže je součást rozsáhlá, je vhodné použít nastavení drah laseru jádra, kdy laser postupně spéká jednotlivé úseky ve tvaru šachovnice a tím dochází ke vzniku menšího pnutí nežli by vznikalo při běžném nastavení. Další funkcí, jež dělá software automaticky, je natáčení následujících vrstev. Tímto způsobem dochází k lepšímu propečení materiálu, ke snížení deformací a ke zvýšení homogenity spečeného materiálu. Dle výrobce je nejvýhodnější úhel natočení  $67^\circ$ . Na obrázku 11 jsou vyobrazeny 3 po sobě jdoucí vrstvy a jejich vzájemné pootočení.



Obr. 11 Pootočení po sobě jdoucích vrstev [15]

### 2.1.6 Kovový prášek

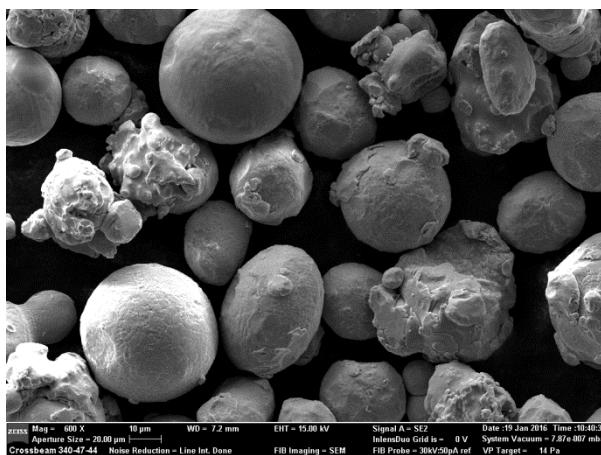
Materiálem, který byl použit pro aditivní výrobu všech součástí v rámci této práce, byl prášek vysoko pevnostní oceli od firmy EOS s obchodním označením MS1. Běžné označení podle normy DIN je X3NiCoMoTi 18-9-5 a podle evropského označení 1.2709. Tento typ oceli se vyznačuje vynikajícími mechanickými vlastnostmi a jednoduchým tepelným zpracováním, díky kterému ocel dosahuje tvrdosti nad 50 HRC a pevnosti v tahu okolo 2 000 MPa. Materiál se vyznačuje poměrně dobrou obrobiteľnosť, svařitelností a je vhodný k leštění a povlakování. Tabulka 1 ukazuje chemické složení tohoto materiálu dodávaného výrobcem [3],[16],[17],[27].

Tab. 1 Složení materiálu [16]

Fe	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr	Cu	C	Mn	Si	S	P
zbytek	17-19	8,5-9,5	4,5-5,2	0,6-0,8	0,05-0,15	≤0,5	≤0,5	≤0,03	≤0,1	≤0,1	≤0,01	≤0,01

Ocel pro 3D tisk kovů je dodávána v práškové formě. Existuje několik druhů prášků s různými tvary jednotlivých částic, což závisí především na principu výroby. Použitý prášek byl vyroben fyzikální metodou rozprašování plynem. Prášky vyrobené plynovým rozprašováním mají kulovitý tvar, což je prospěšné pro zabíhání a vyplňování vzduchových mezer v prášku. Velikost zrn je rozdílná a měla by se dle výrobce pohybovat v rozmezí od 10 do 50  $\mu\text{m}$ . Ovšem na základě výsledků DP doktorky I. Zetkové [39] je možné konstatovat, že skutečná velikost částí prášku je v rozmezí 0 až 70  $\mu\text{m}$ . Přičemž procentuální zastoupení skupiny s velikostí zrn 0 až 10  $\mu\text{m}$  je přibližně 15 %. Největší četnost má skupina 10 až 30  $\mu\text{m}$ , a to přibližně 70 %. Tímto bylo vyvráceno tvrzení výrobce, že distribuční rozložení práškových zrn je dle Gausse s nejvyšším zastoupením částic s velikostí okolo 50  $\mu\text{m}$ . Rozdílnost velikosti zrn je z důvodu lepšího vyplnění prostoru mezi zrny a tím dochází

ke zvýšení objemového podílu prášku [3],[16],[17],[39].



Obr. 12 Částice prášku

### 2.1.7 Příprava stroje, postprocessing, hotový díl

Po dokončení všech úkonů pro vytvoření programu pro 3D tiskárnu je nutné připravit i stroj na tiskovou úlohu. Postup přípravy stroje má svá určitá specifika a základní předpoklady, které musí být bezpodmínečně splněny. Jednotlivé úkony přípravy stroje na sebe vzájemně navazují. Při přípravě stroje je nutné používat ochranných prostředků, neboť příprava stroje zahrnuje práci s kovovým práškem, který může kvůli své velikosti a chemickému složení ohrožovat zdraví. Nejvíce zdraví škodlivá je skupina zrn menších než 10 µm, neboť tyto částice mohou volně poletovat [39].



Obr. 13 Příprava stroje

Mezi základní úkony přípravy stroje patří vložení stavební platformy, její následné znivelování a nanesení první vrstvy prášku. Posledním krokem je zaplynování pracovní komory, kdy je připravena dusíková atmosféra, která je nezbytná pro správné spékání kovových prášků. Při spuštění tiskové úlohy se první vrstva spéká dvakrát pro lepší přilnutí ke stavební platformě. Poté následuje nanášení prášku a spékání jednotlivých vrstev do té doby nežli je součást hotová. Doba tisku je závislá na mnoha faktorech, jako je například velikost dílů, zaplnění platformy, tloušťka nanášené vrstvy a další. S ohledem na tyto faktory může být doba tisku běžně od několika hodin až po několik desítek hodin, přičemž stroj pracuje nepřetržitě. Po dokončení tiskové úlohy je potřeba stavební platformu s vytištěnými díly vyjmout ze stroje a, je-li to nutné, tak vložit do pece na tepelné zpracování. Nutnost tepelného zpracování se odvíjí od velikosti dílů a požadavků zákazníka na mechanické vlastnosti vytištěných dílů. U materiálu MS1 jsou stanoveny dva druhy tepelného zpracování. Jedná se o rozpouštěcí žihání používané ke snížení vnitřního pnutí a vytvrzení. Oba tyto procesy se provádějí před samotným odstraněním dílů ze stavební platformy, tzn. do pece je vkládána platforma s vytištěnými díly. U drtivé většiny dílů se tepelné zpracování provádí před odstraněním součástí ze stavební platformy. Po tisku je v součásti naakumulováno vnitřní pnutí, které odstraněním pevného přichycení dílu přes podpory ke stavební platformě může díl zdeformovat. Při tepelném zpracování žiháním vnitřní pnutí vyrelaxuje, a proto lze očekávat menší pravděpodobnost deformace dílu při následném odstranění podpor. U rozpouštěcího žihání je použita ochranná atmosféra, kterou je inertní plyn argon. Vyžehnaná součást dosahuje pevnosti cca 1150 MPa a tvrdosti cca 35 HRC. Druhým typem tepelného zpracování je vytvrzování. Vytvrzená součást dosahuje pevnosti cca 1950 MPa

a tvrdosti cca 54 HRC. Toto tepelné zpracování nevyžaduje ochrannou atmosféru. Po tepelném zpracování dílů následuje postprocessing dílů. Odstraněním dílů ze stavební platformy postprocessing teprve začíná, neboť podpory, díky kterým byl vystavěn, je nutné nyní odstranit. Způsoby odstraňování podpor jsou závislé na druhu použitých podpor. Běžné podpory je ve většině případů možné odstranit ručně za pomoci nářadí (kleští, sekáčů atd). Po oddělení podpor od dílu je nutné povrch součásti dále zpracovat, neboť je velmi hrubý a vykazuje zbytky podpor. Tento povrch je nutné dále opracovat. Plochy, které byly podporovány, dosahují drsnosti povrchu Rz okolo 40  $\mu\text{m}$  (po precizním odstranění podpor) viz diplomová práce Veroniky Čápkové [3]. Postprocessing je závislý na tom, zda je daná plocha součásti funkční a má předepsanou jakost povrchu či ne. Jestliže plocha není funkční či nemá předepsanou jakost povrchu, tak se celá součást pískuje pro zlepšení povrchových vlastností, jakosti povrchu, změně struktury povrchu, odstranění nečistot, nerovností a sjednocení vzhledu povrchu. Pokud díl obsahuje funkční plochy, je potřeba tyto plochy v drtivé většině obrobit na požadovanou jakost. Tyto plochy se tisknou pouze s malými přísadky [51].

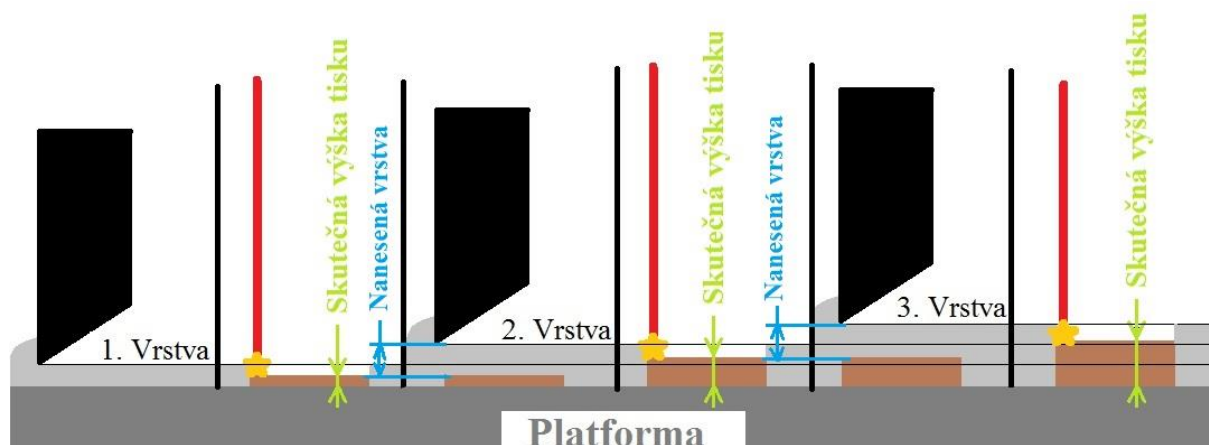
Po těchto všech operacích je díl hotový a může být podroben testování, popřípadě být využit ve strojírenské praxi.

## 2.2 Nanášecí element

Nanášecím elementem je myšlena součást, která je uzpůsobena tak, aby nanasla prášek rovnoměrně po celé ploše stavební platformy. Tato součást je delší nežli stavební platforma proto, aby nanesená vrstva práškového lože byla stejnoměrná a byla nanasena naráz. Při nanášení prášku by měl vznikat tzv. „lavinový efekt“. Díky tomuto efektu by mělo docházet k odtlačení nečistot a spalků do sběrného zásobníku. K tomuto efektu by nemohlo docházet, kdyby byl nanášen pouze takový objem prášku, jaký by byl potřeba pro zaplnění stavební platformy při dané tloušťce vrstvy, a proto se při nanášení vrstvy nanáší více prášku nežli by bylo nezbytně nutné. Dalším aspektem, proč je potřeba nanášet více prášku, je to, že objem naneseného prášku má menší objem, než je objem spečeného materiálu. Přičemž objem spečeného materiálu dosahuje cca 1/2 objemu naneseného prášku, a proto několik prvních vytištěných vrstev má menší tloušťku, než je nastavena, přičemž během několika dalších vrstev dochází k ustálení a tím tisku požadované tloušťky vrstvy. Tento jev vysvětluje tabulka 2 a pro správné interpretování je doplněna obrázkem [15],[39].

Tab. 2 Nanášení prášku VS spékání [15]

Vrstva	Poloha stavební platformy [ $\mu\text{m}$ ]	Nanesená vrstva prášku [ $\mu\text{m}$ ]	Výška spečené vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]	Skutečná výška tisku [ $\mu\text{m}$ ]
0	0	0	0	0
1	40	40	20	20
2	80	60	30	50
3	120	70	35	85
4	160	75	37,5	122,5
5	200	77,5	38,75	161,25
6	240	78,75	39,375	200,625
7	280	79,375	39,6875	240,3125
8	320	79,6875	39,84375	280,15625
9	360	79,84375	39,921875	320,078125
10	400	79,921875	39,9609375	360,0390625
11	440	79,9609375	39,98046875	400,0195313
12	480	79,98046875	39,99023438	440,0097656
13	520	79,99023437	39,99511719	480,0048828
14	560	79,99511719	39,99755859	520,0024414

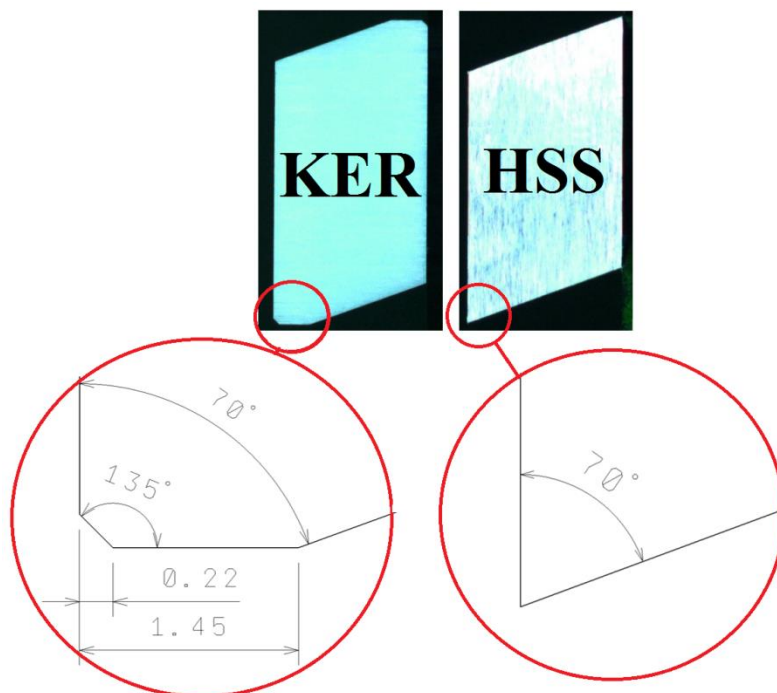


Obr. 14 Skutečná výška tisku

Firma EOS v současné době doporučuje pro tisk nástrojové oceli keramické pravítko a přípustný je i kartáč z karbonových vláken. Další možností nanášecího elementu je pravítko vyrobené z rychlořezné oceli, ovšem tento materiál není vhodný dle výrobce pro tisk nástrojové oceli. Ostatní výrobci zařízení pro 3D tisk kovů používají i další druhy materiálů jako například plastové, gumové, silikonové a další.

### 2.2.1 Geometrie nanášecích elementů

Geometrie nanášecích elementů má firma EOS patentovanou téměř 20 let. Tuhý nanášecí element má dvě pracovní plochy, což umožňuje po opotřebení jedné hrany element jednoduše otočit a dále používat tento element pro nanášení prášku. Geometrie jednotlivých nanášecích elementů se liší podle použitého materiálu. Na obrázku 15 jsou vyobrazeny nanášecí elementy z keramiky a HSS.



Obr. 15 Tvar keramického pravítka a HSS pravítka – optický mikroskop zvětšení 20x

Zaoblení hrany u HSS pravítka bylo měřeno pomocí opticko-skenovacího mikroskopu IFM G4 od firmy Alicona. Velikost zaoblení nanášecí hrany byla naměřena 4  $\mu\text{m}$  a byla po celé jeho délce v rámci výrobní tolerance konstantní.

Geometrie kartáčku z karbonových vláken se nedá určit, neboť se jedná o štětinky z karbonového vlákna, které jsou sevřené mezi dva plechy. Průměr jednoho vlákna se pohybuje okolo 0,1mm. Výška vyčnívajících štěteček je 1,5 mm.





Obr. 16 Karbonový kartáček

#### 2.2.1.1 Keramické pravítko

Každý materiál má své charakteristické vlastnosti a omezení, díky kterým je vhodný pro určité použití. Mezi základní vlastnosti keramického pravítka patří tuhost, rozměrová a teplotní stálost, homogenita, chemická odolnost a další. Nespornou výhodou keramického pravítka je jeho vysoká životnost. Ovšem mezi hlavní nevýhody je potřeba zařadit křehkost, díky které při velmi tvrdém kontaktu pravítka s překážkou (dílem či pevnými podporami) dochází k vyštípnutí části pravítka. V případě vyštípnutí dochází k vytvoření „vlnky“ na nanášené vrstvě, čímž v tomto místě dochází k nanášení silnější vrstvy prášku. V tomto případě je nutné keramické pravítko otočit na novou nanášecí hranu.

#### 2.2.1.2 HSS pravítko

Pravítko z rychlořezné oceli se vyznačuje v zásadě obdobnými vlastnostmi jako výše popsané keramické pravítko, ovšem jeho houževnatost je značně vyšší, a proto je více odolné proti vyštipování bříty při kontaktu pravítka s dílem. Z tohoto důvodu je pro tento materiál zvolena ostrá geometrie. Bohužel tato ostrá geometrie je náchylnější na rozkmitání podpor, popřípadě zastavení tisku, neboť kvůli svému velice malému zaoblení nanášecí hrany nedovoluje podporu či díl, který vyčnívá nad nanášenou vrstvou, přejet popřípadě zatlačit pod sebe jako u geometrie keramického pravítka. Další značnou nevýhodou je nižší chemická odolnost a tím větší sklon k chemické reakci s prvky obsažené v práškovém loži než u keramiky. Z tohoto důvodu není výrobcem doporučeno používat tento druh pravítka pro tisk z nástrojové oceli.

#### 2.2.1.3 Karbonový kartáček

Kartáček z karbonových vláken je jediným zástupcem měkkých nanášecích elementů, který firma EOS nabízí. Díky své flexibilitě dokáže karbonový kartáček překonat různé malé kolize při tisku, například deformaci dílů nad tištěnou plochu a další menší nepříjemnosti, které se během tisku stávají. Jeho nespornou výhodou je možnost tisku velmi subtilních dílů a podpor. Jako jediný z výše uvedených nanášecích elementů umožňuje tisknout díly tak, že když u jednoho dílu nastanou komplikace, tak to zákonitě nemusí ovlivnit ostatní díly. Díky své pružnosti se štětinky kartáčku ohnou pouze v místě kolize a zbytek kartáčku není nijak ovlivněn, díky čemuž u ostatních dílů nedochází k ovlivnění. Ovšem u kartáčku dochází k vyššímu opotřebení a tím kratší životnosti. Ale i přesto se životnost kartáčku pohybuje v řádech stovek hodin.

### 2.2.2 Upnutí nanášecích elementů

Upnutí keramického a HSS pravítka je totožné. Ustavení pravítka do ramene recoateru je realizováno pomocí výběru a dorazů na obou koncích spodní strany výběru. Jak je vidět na obrázku 17. Do tohoto výběru se vloží nanášecí pravítko a polohu tohoto pravítka zaručují dorazy, poté je pravítko fixováno pomocí příložky, skrze kterou prochází sedmero šroubů M5, díky kterým může příložka činit dostatečný přítlak na upínané pravítko. Šrouby jsou dotahovány příslušným krouticím momentem, aby nedocházelo k deformaci jak příložky, tak pravítka.



*Obr. 17 Detail dorazu nanášecího pravítka*



*Obr. 18 Příložka pravítka*

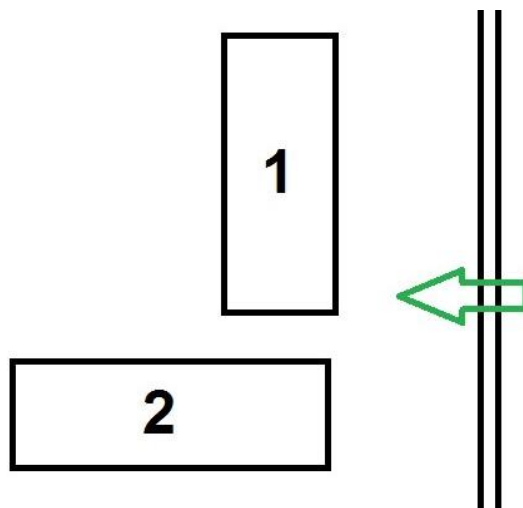
Pro upnutí karbonového kartáčku se používá speciálního upínače, přičemž nanášecí element je vždy tvořen dvojicí karbonových kartáčků. Tyto kartáčky jsou složeny za sebe a mezi ně je vložena vymežovací plechová podložka. Tato sestava je vložena do příslušného výběru v upínači a je přitlačena pomocí podložky. Pomocí trojice šroubů je podložka dotahována k upínači, čímž vytváří upínací sílu sestavy kartáčků. Celá sestava upínače s vloženými kartáčky se vloží do výběru v nanášecím rameni a dotáhne pomocí dvou šroubů.



*Obr. 19 Držák karbonových kartáčků*

### 2.2.3 Problémy při nanášení

Velkým problémem při nanášení nové vrstvy prášku je rozkmitání podpory či dílu. Tento fenomén je velmi častým jevem u téměř všech typů podpor. K rozkmitání jsou náchylnější podpory, jež podpírají plochy ve vyšších výškách od stavební platformy. Samozřejmě záleží na velikosti podpory, jestliže má podpora průřez ve tvaru obdélníku například 100 x 70 mm, nebude zde předpoklad k jejímu rozkmitání, ovšem bude-li mít podpora průřez například 40 x 5 mm a bude orientována tenčí stranou kolmo na nanášecí pravítko, lze s velkou pravděpodobností očekávat její rozkmitání. Tento jev lze pozorovat především u podpor, které jsou orientovány svou delší stranou rovnoběžně s nanášecím pravítkem, jak je vysvětleno v obrázku 20. Kdy pod číslem 1 jsou orientovány problémové podpory, neboť pravítko nabíhá na větší plochu a podpora nemá tak silnou oporu, jako kdyby byla orientována podle 2. V této pozici je náběžná hrana mnohem menší a masa podpor proti rozechvění několikanásobně větší.



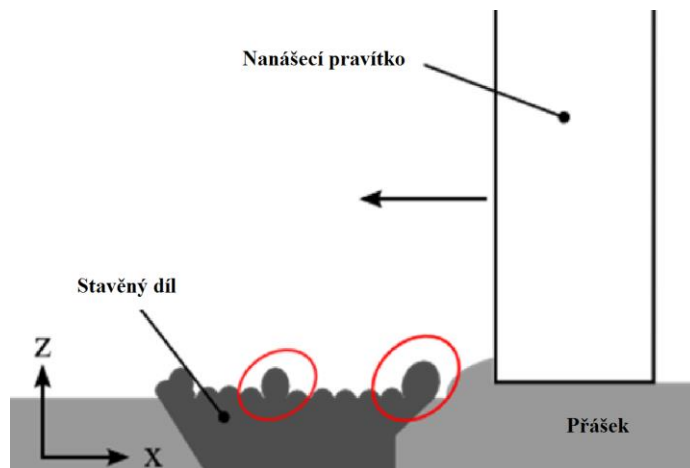
Obr. 20 Orientace podpor vůči pravítku [48]

Tento jev není doménou pouze podpor, nýbrž může k němu docházet i u tištěných dílů. Například vysoká a štíhlá žebra, což bylo experimentálně testováno na tištěných vzorcích spojících tenké stěny od 0,2 mm do 1 mm a výškou 7 mm, mohou během tisku způsobovat problémy. Tento fakt byl potvrzen, neboť problémy způsobovaly pouze vzorky orientované delší stěnou rovnoběžně s nanášecím pravítkem. V důsledku vibrací dochází ke špatnému nanášení vrstvy prášku, čímž dochází k vytvoření různé tloušťky nanášené vrstvy k tzv. zvlnění. Obrázek 21 ukazuje výše popisovanou situaci. Šipka ukazuje směr nanášení prášku a zároveň orientaci součásti ležící v ose X.



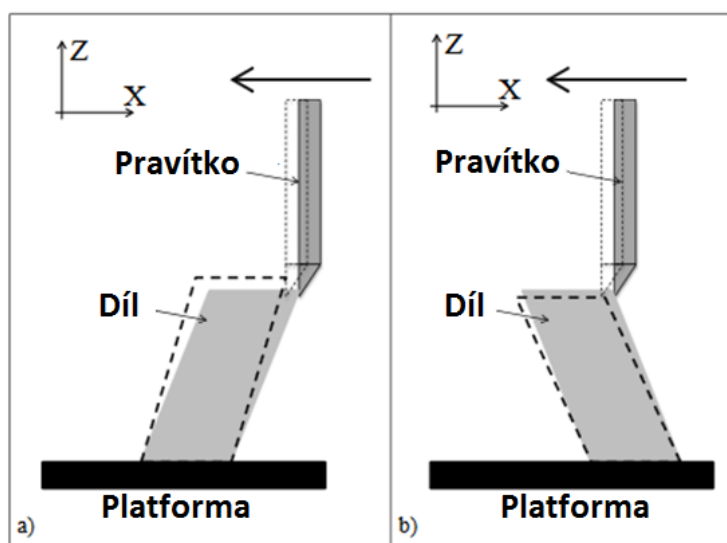
Obr. 21 Problém během tisku [48]

Ke kontaktu nanášecího pravítka s dílem může docházet z několika důvodů. Jedním z velice častých důvodů je odtržení dílu od podpor, čímž díl vystoupne nad tištěnou plochu. Dalším důvodem může být deformace dílu v důsledku vnitřního pnutí naakumulovaného v dílu během tisku. Velice častým důvodem kontaktu pravítka s dílem je vznik spalků a nečistot na povrchu tištěné součásti, čímž mohou vzniknout vrcholky, které následně vyčnívají přes nanášenou vrstvu, tento jev je vysvětlen na obrázku 22.



Obr. 22 Výstupky nad tisknutou plochu [11]

Značný vliv na vznik vibrací má vertikální orientace dílů. Na obrázku 23 jsou vyobrazeny dvě situace možností vertikální orientace dílů, které mají převis. Jestliže je díl orientován tak, že roste proti pohybu pravítka, a není dostatečně tuhý, je v tomto případě velký předpoklad, že dojde k jeho rozkmitání a v horším případě dojde k zastavení tisku. Velké rozkmitání může vyústit ve zvednutí dílu a tím vzpříčení proti pravítku. Tato skutečnost znemožní pokračování pohybu nanášecího elementu, což má za následek zastavení tisku, neboť pohon nanášecího systému má v sobě integrovanou momentovou spojku a při přetížení je pohon odpojen. Vhodnější orientace je směřovat převis ve směru pohybu nanášecího elementu. V případě, že dojde ke kontaktu nanášecího pravítka s tištěným dílem, tak díl je zatlačen do práškového lože a nemůže dojít k jeho vzpříčení proti nanášecímu elementu. S největší pravděpodobností v tomto případě dojde k ovlivnění přesnosti dílu, ale tisk může být bezpečně dokončen bez zastavení [29].



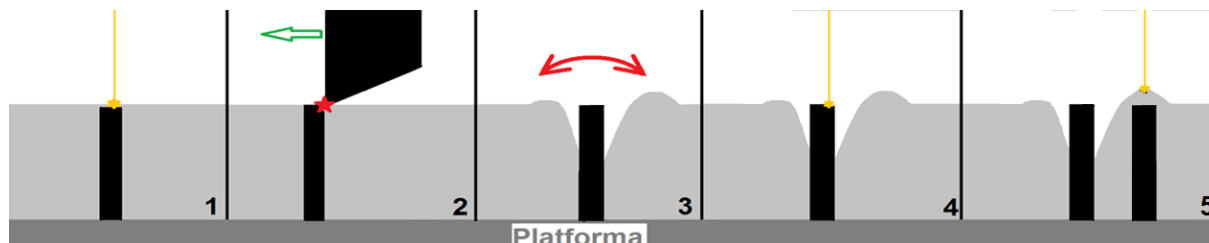
Obr. 23 Orientace převislých konců [29]

#### 2.2.4 Postup rozkmitání

Na obrázku 24 je vysvětlen postup rozkmitání podpory. V sekci číslo 1 je vyobrazeno běžné bezproblémové spékání. V druhé sekci je naznačeno nanášení nové vrstvy prášku a je zde naznačen kontakt nanášecího pravítka s vystouplou podporou či dílem nad tisknutou rovinu. Při tomto kontaktu dojde k napružení a částečnému odtlačení dané podpory do takové míry, aby bylo nanášecí rameno schopno pokračovat v nanášecím pohybu. Po přerušení kontaktu nanášecího pravítka a inkriminované podpory dochází k jejímu rozkmitání. Při prvním výkmitu dojde k tzv. odstřelení prášku, který je v blízkosti podpory. Při odstřelení se tento prášek přemístí a okolo podpory vzniká oblast bez prášku, ovšem v určité vzdálenosti od podpory dochází k jeho nahromadění. Tímto dochází ke dvěma závažným problémům. Prvním problémem je chybějící prášek pro další růst podpory při spékání. Druhým a dá se říci závažnějším problémem je, pokud je odstřelen na místo, kde má být tištěn díl.

V tomto případě dochází ke spékání nedefinovaného množství prášku, které při spékání téměř vždy vytvoří vyšší vrstvu, nežli je nově nanášená vrstva, čímž dochází k dalšímu kontaktu pravítka se součástí [46].

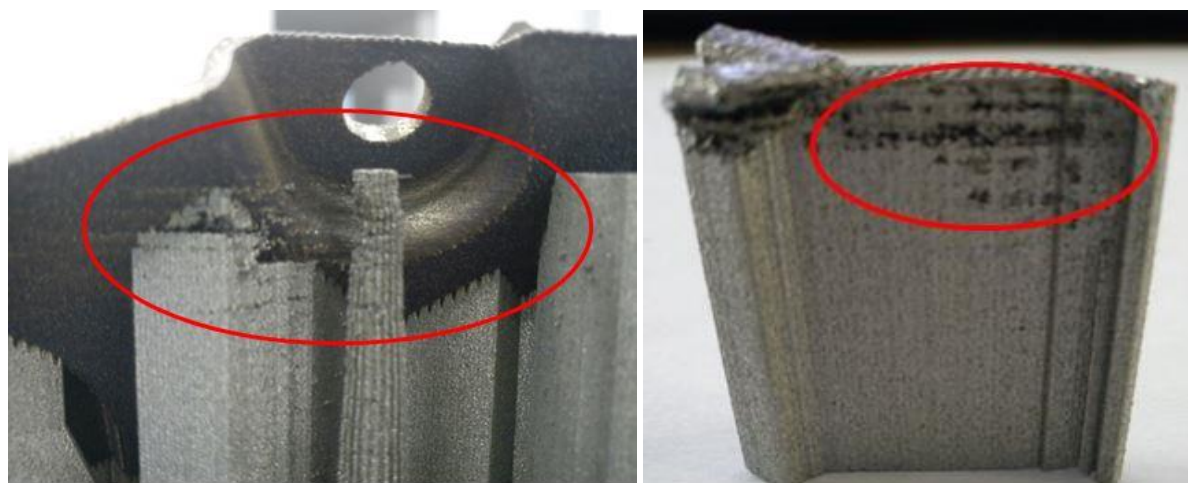
Tento jev se periodicky opakuje a z jakého důvodu k tomu dochází, je naznačeno v sekci 4 obrázku 24, kdy laserový paprsek spéká již spečenou vrstvu bez natavení dalšího prášku, čímž při následujícím nanášení další vrstvy prášku nedochází ke kontaktu pravítka s touto podporou či dílem. Ovšem během dalších několika vrstev se tento jev opakuje a s vyšší výškou podpory odstřelení prášku nabírá na intenzitě. Při odstřelení prášku na blízky díl hrozí zastavení tiskové úlohy, neboť v extrémní situaci může dojít k napečení takové vrstvy, že při zpětném přejezdu pravítka dojde ke kontaktu. Tuto skutečnost demonstruje sekce 5.



Obr. 24 Princip rozkmitání podpory [47]

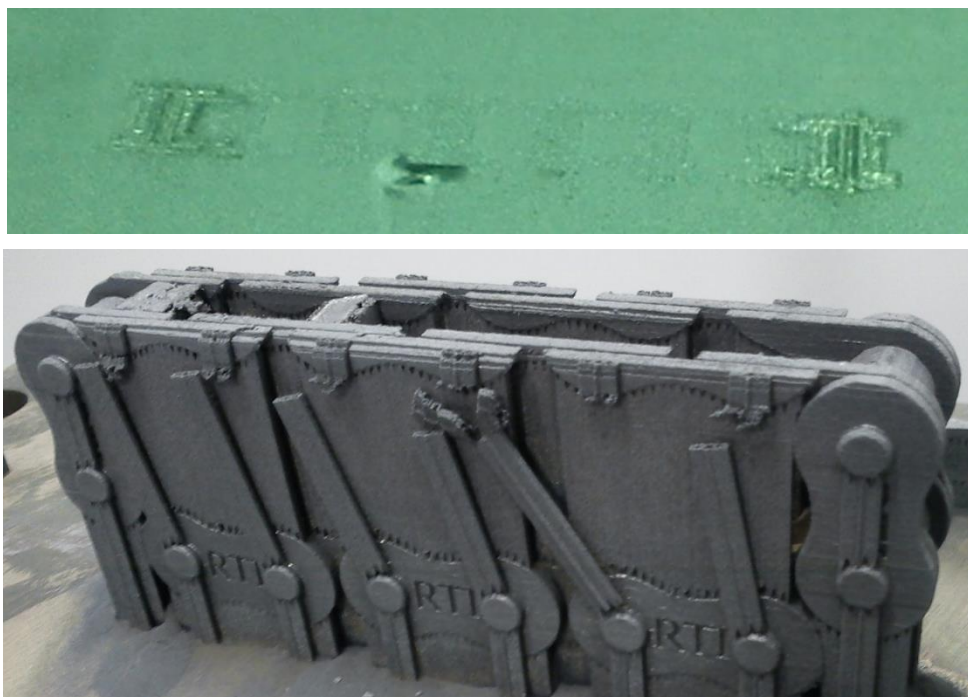
### 2.2.5 Příznaky rozkmitání podpory

I po ukončení tisku je možné identifikovat určité znaky, které naznačují, že v tomto místě byl problém s rozkmitáním podpory. Prvním znakem je přesazení určité části podpory oproti zbytku. Těto situace je možné si povšimnout na obrázku 25 v levé části, kdy došlo k přesazení podpory typu Web. Dalším jednoduše identifikovatelným znakem je nechtěná porozita podpory. Tento znak naznačuje, že podpora je málo pevná a docházelo ke kontaktu nanášecího pravítka s touto podporou, což mělo za následek výše popsané odstřelování prášku. Tato porozita podpory je vyobrazena na obrázku 25 na pravé straně.



Obr. 25 Příznaky rozkmitání podpory [47]

Jak již bylo výše zmíněno, při kontaktu pravítka s méně pevnou podporou dochází k jejímu rozkmitání, ovšem v extrémních případech může dojít k odklonění či úplnému vylomení podpory. Odklonění podpory může způsobit nemalé komplikace zapříčiněné absencí buď části nebo dokonce celé podpory na místě, jenž je nutné podporovat. Při absenci dané podpory dochází k několika problémům, například ke stavění nově vznikajících ostrovů do práškového lůžka, zhoršenému povrchu dílu v daném místě, špatnému odvodu tepla z daného místa, absence ukotvení vznikajících ostrovů k platformě a mnoho dalších. Tyto problémy ve většině případů zanechávají na tisknutých součástech vady, jako jsou chybějící část dílu, špatná geometrie vlivem deformace, špatná drsnost povrchu a další. V některých případech dochází k tak razantním problémům, že je ohrožena celá tisková úloha, a proto musí být díl deaktivován pro další tisk, neboť by hrozilo zastavení celého tisku. Jestliže dojde k samotnému zastavení tisku a operátor opětovně spustí tisk od další následující vrstvy, tak v drtivé většině během několika vrstev je tisk opět přerušeno, neboť nebyly odstraněny příčiny zastavení. V takovémto případě nezbývá nic jiného než zrušit tisk a díly s podporami vhodně upravit, aby tato situace nenastala znovu.



*Obr. 26 Odklonění podpor dotykem pravítka při tisku a výsledek [47]*

Na obrázku 27 je možné si všimnout, že u podpor umístěných uvnitř tištěného řetězu došlo při nanášení prášku k tak výraznému kontaktu pravítka s podporami, že došlo k odlomení podpory. Velikost podpor byla přibližně 6x8 mm při výšce přibližně 40 mm. Na spodní straně byly zhotoveny připojovací zuby, neboť podpory začínaly ve spodní části dílu a toto řešení bylo zvoleno z důvodu lepší odstranitelnosti podpor. Připojovací zuby byly nastaveny následujícím způsobem - Height 0,8 mm, Top length 0,35 mm, Base length 0,8 mm a Base interval 0,15 mm, Fragmentation 5,2 x 5,2 mm a separation width 0,65 mm. I přes toto velmi pevné nastavení připojovacích zubů došlo k destrukci podpor. Destrukce podpor měla fatální dopad na celý tisk, neboť odlomené podpory se naakumulovaly na konci vnitřní dutiny řetězu, jak je vidět na pravé straně obrázku. O tuto část se nanášecí pravítko zastavilo a nemohlo pokračovat dále v nanášení prášku. Tímto byl tisk zastaven. Opětovné navázání tisku nebylo možné, kvůli chybějícím podporám, a proto byl celý tisk definitivně zastaven.



*Obr. 27 Odlomení podpor v důsledku kontaktu s pravítkem*

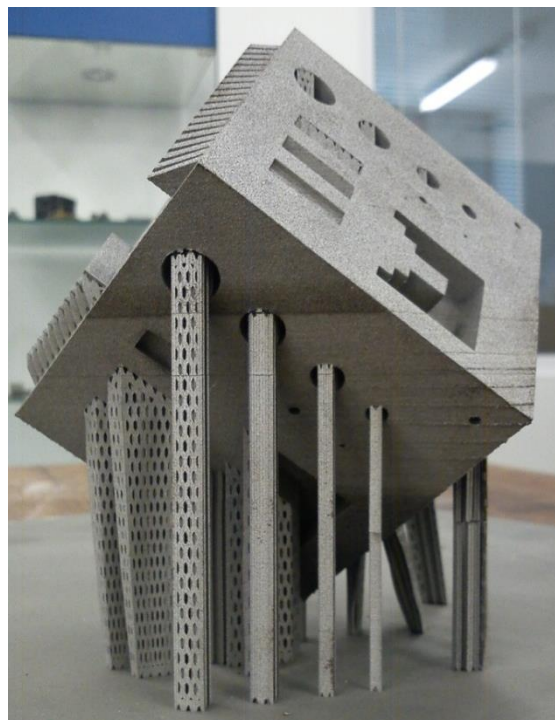
Další obrázek demonstruje, jakou deformaci zkušebních vzorků s průměrem upínací části 6 mm způsobil tvrdý kontakt dílů a tvrdého nanášecího elementu.



*Obr. 28 Ohnutí tahových vzorků tvrdým nárazem s pravítkem*

Jak by se mohlo na první pohled zdát, tak tyto problémy jsou výhradně problémem RTI, ale není tomu tak, tento problém trápí uživatele 3D tiskáren po celém světě. Tento fakt potvrzují následující publikace [11],[24],[29],[34],[42],[43],[44].

Pro porovnání je zde uveden obrázek vytištěného dílu s velmi tenkými a vysokými podporami, jež byl tištěn na konkurenčním zařízení. Základní rozměry kostky jsou 75 x 75 x 75 mm. Přičemž některé z podpor jsou perforovány a jejich velikost se pohybuje v některých případech i 1,5 x 4 mm při výšce cca 100 mm. Tisk při použití takovýchto podpor by nebyl možný bez použití pružného nanášecího elementu, díky kterému nedochází k tvrdému kontaktu elementu se vznikajícím dílem či podporami, čímž nedochází k rozkmitání podpor či jejich odehnutí či dokonce destrukci. Při použití keramického pravítka by tisk takto jemných a vysokých podpor nebyl možný.



*Obr. 29 Štíhlé podpory*

### 3 Návrh a realizace vlastních experimentů

Na základě poznatků z teoretické části práce bylo potřeba provést sérii testů a experimentů na ověření, jakým způsobem ovlivní vlastnosti vytištěných dílů druh nanášecího elementu, neboť výše popsané problémy jsou výhradně záležitostí tuhých nanášecích elementů. Při použití ohebných a pružných nanášecích elementů jsou tyto problémy zpravidla eliminovány. Z tohoto důvodu byly pro porovnání vybrány dva diametrálně odlišné nanášecí elementy, kdy první bylo vybráno keramické pravítko, které je výrobcem doporučeno pro tisk nástrojové oceli. S keramickým nanášecím elementem výrobce garantuje mechanické vlastnosti uvedené v materiálovém listu. Jako druhý byl vybrán karbonový kartáček, který je zástupcem velice pružného nanášecího elementu, jak již bylo výše několikrát zmíněno. Výrobce připouští použití tohoto nanášecího elementu pro nástrojovou ocel MS1, ovšem neuvádí, zda jeho použití nějakým způsobem ovlivní výsledné vlastnosti vytištěných dílů. Na základě zjištěných skutečností byla tedy vlastní experimentální část práce rozdělena do dvou základních částí, kdy první část byla zaměřena na ověření celé řady různorodých parametrů na vzorcích vytištěných dvěma druhy nanášecích elementů. Mezi hlavní parametry, které byly hodnoceny, patří například podíl nečistot ve vytištěné struktuře, mechanické vlastnosti, přesnost atd. Závěrem této první části vlastních experimentů je celkové zhodnocení tisku pomocí keramického pravítka a karbonového kartáčku z hlediska provedených zkoušek a experimentů.

Druhá část byla zaměřena na měření vibrací během 3D tisku, přičemž nejprve bylo zapotřebí provést detailní průzkum možností měření a následně vybrat nevhodnější metodu pro využití v laboratořích RTI. Po výběru nejvhodnější metody měření bylo potřeba vyzkoušet danou metodu v praxi a vytvořit měřicí zařízení schopné zachytit vznikající vibrace. Následně byl vývoj zaměřen na konstrukci dvou-pravítkového nanášecího ramene s implantovaným měřicím zařízením a možností automatické změny nanášecího elementu během procesu tisku.

#### 3.1 Porovnání keramického pravítka a karbonového kartáčku

Následující stránky se zabývají porovnáním tisků vytištěných pomocí keramického pravítka a karbonového kartáčku z různých hledisek, tak aby z výsledků mohl být vytvořen komplexní obraz vlastností výtisku. Během několika tisků byly vytištěny různé druhy zkušebních vzorků. Všechny vzorky byly vytištěny za stejných podmínek, pouze jedinou proměnnou byla změna nanášecího elementu. Nejprve byly všechny vzorky vytištěny pomocí keramického pravítka a následně byly tisky zopakovány pomocí karbonového kartáčku.

Výsledky jednotlivých zkoušek mají ukázat, zda mezi tisky pomocí těchto dvou konkurentů existují rozdíly a pokud ano, tak má kvantifikovat tyto rozdíly. Na základě těchto jednotlivých měření by mělo být možné určit, zda je možné během tisku provést výměnu nanášecího elementu, aniž by byly ovlivněny výsledné vlastnosti tištěného dílu. V případě, že by byl signifikantní rozdíl mezi jednotlivými konkurenty, tak má za cíl určit míru ovlivnění při změně nanášecího elementu.

Aby obraz vlastností byl komplexní a měl dobrou vypovídající hodnotu, bylo nezbytné zmapovat co nejvíce možných parametrů, a poté na základě výsledků vytvořit rozsáhlou znalostní databázi.

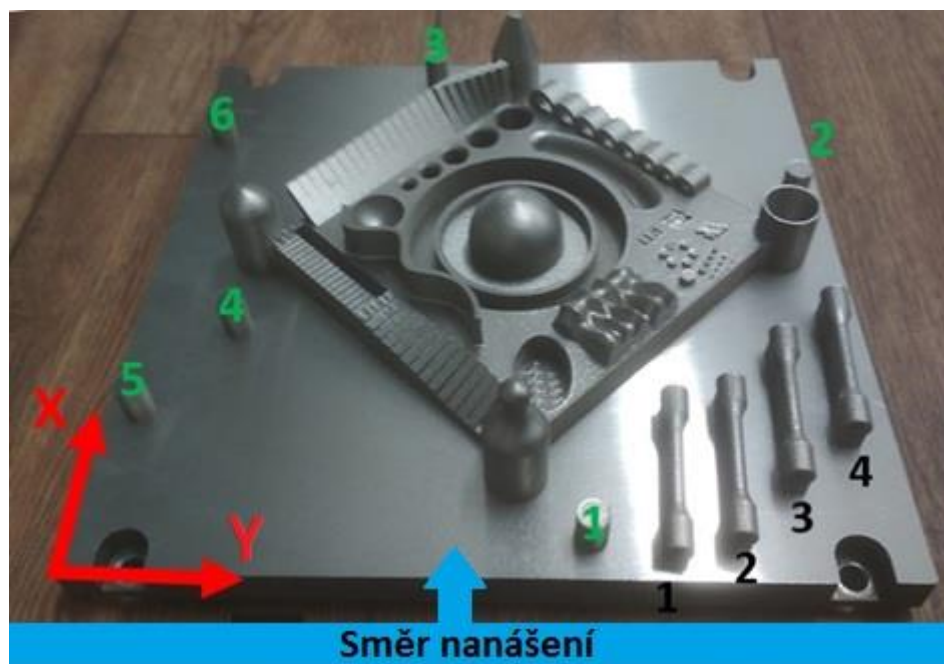
Byly provedeny experimenty zaměřeny na následující témata s cílem popsat co možná nejvíce možných parametrů:

- **Podíl nečistot ve struktuře**
- **Zkouška tahem**
- **Metalografie**
- **Zkouška rázem v ohybu**
- **Zkouška cyklického zatěžování**
- **Přesnost**
- **Drsnost**

##### 3.1.1 Podíl nečistot ve struktuře

Pro hodnocení nečistot v tištěné struktuře bylo na zkušební platformě rozmístěno 6 válečků o průměru 6 mm a výšce 12 mm. Pozice válečků byla zvolena náhodně. Jednotlivé pozice válečků viz obrázek 30. Pozice jednotlivých válečků je označena zelenou barvou. Černou barvou jsou označeny tahové vzorky. Zkoušení z hlediska podílu nečistot bylo zařazeno do hodnotících parametrů, neboť byl předpoklad, **že karbonový kartáček by měl dosahovat větší míry znečištění vnitřní struktury výtisku kontaminací odpadávajících částí štěteček.**





Obr. 30 Označení prvotních vzorků

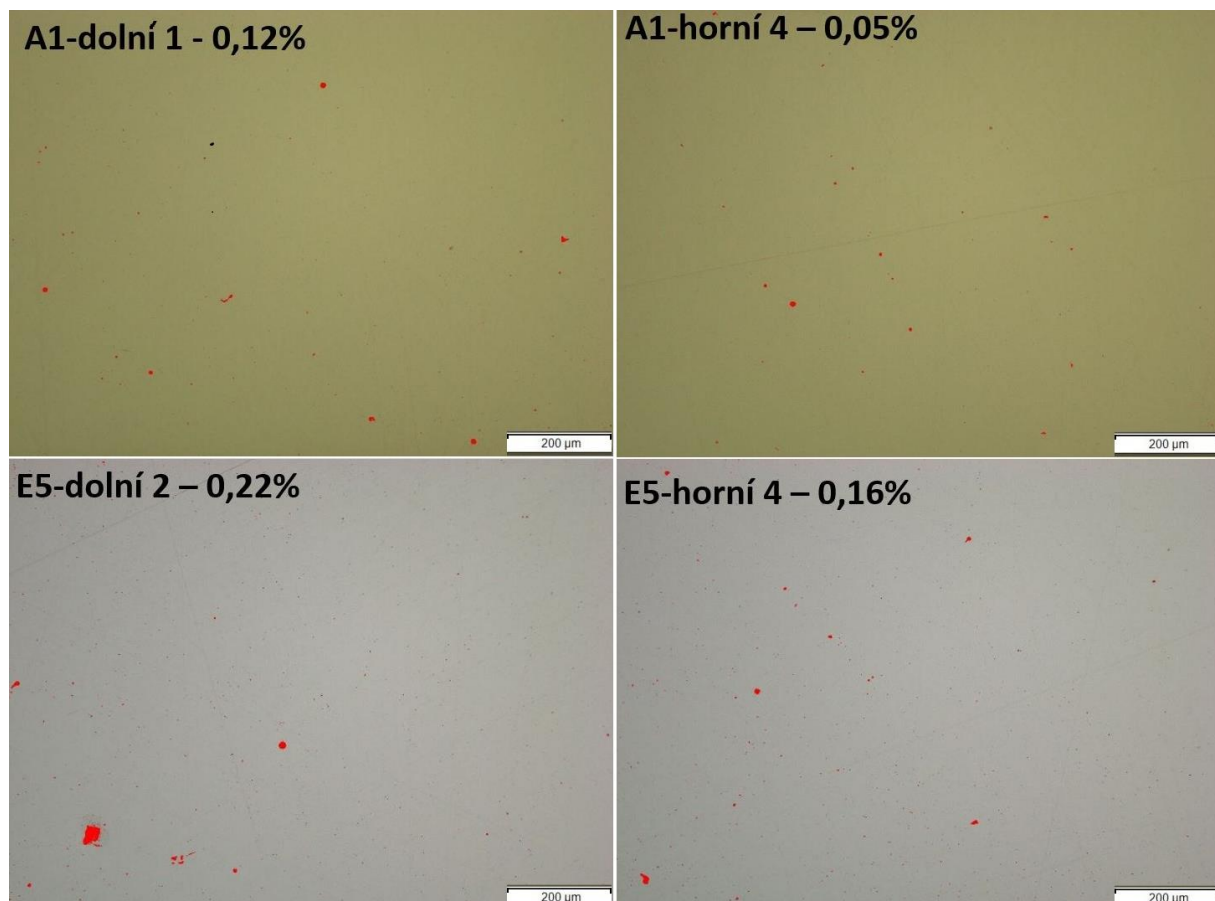
Pro hodnocení pomocí mikroskopie byly vybrány pouze vzorky 1 a 5, neboť byla stanovena pracovní hypotéza, že vzorek 5 bude ovlivněn a vzorek 1 nikoli. Tato hypotéza byla stanovena na základě ovlivnění dílů z hlediska pozice na platformě a nečistot z okolních spékanych dílů. Vzorek 5 byl umístěn pod velký díl a vzorek 1 byl osamocen. Na jednotlivých vzorcích byly provedeny podélné výbrusy středem vzorku, přičemž pro hodnocení byly zvoleny dvě pozice. První pozice byla stanovena na spodní stranu podélného výbrusu a druhá na horní hranu. Pro hodnocení byl použit fluorescenční mikroskop Olympus BX61 se 100 násobným zvětšením. Výsledky jednotlivých měření jsou uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3 Výsledky mikroskopie

Vzorek	Měření podílu nečistot [%]				Průměr [%]
	1.	2.	3.	4.	
A1-horní	0,06	0,08	0,07	0,05	0,065
A1-dolní	0,12	0,08	0,06	0,09	0,0875
A5-horní	0,08	0,07	0,11	0,15	0,1025
A5-dolní	0,07	0,09	0,2	0,12	0,12
E1-horní	0,1	0,09	0,08	0,06	0,0825
E1-dolní	0,12	0,08	0,1	0,04	0,085
E5-horní	0,1	0,08	0,12	0,16	0,115
E5-dolní	0,12	0,22	0,08	0,11	0,1325

A1 – vzorek vyčištěný pomocí karbonového kartáčku v pozici 1

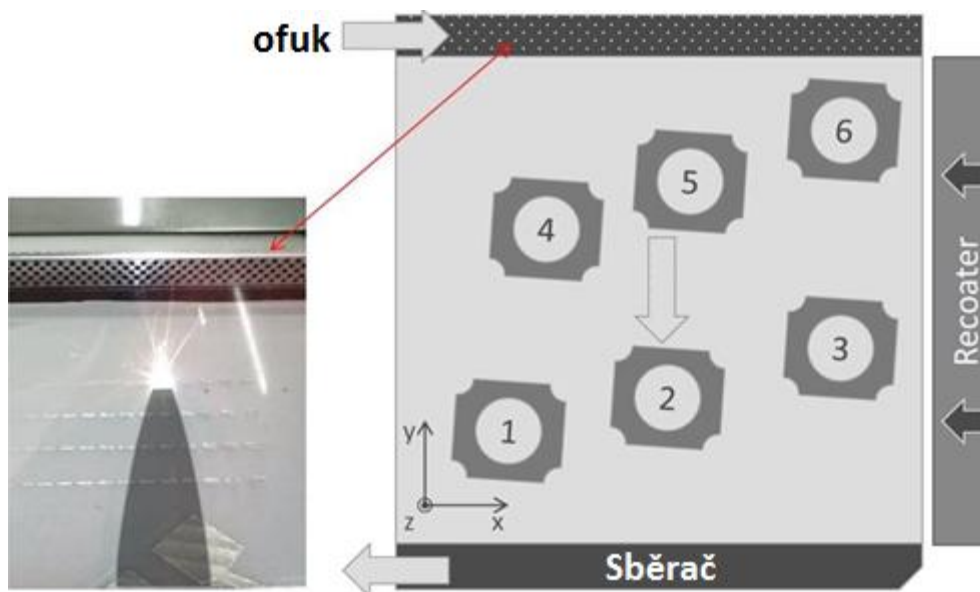
E5 – vzorek vyčištěný pomocí keramického pravítka v pozici 5



Obr. 31 Pórovitost

Z naměřených hodnot vyplývá, že **změna typu nanášecího elementu nemá žádný vliv na podíl nečistot ve vytištěné struktuře**. Ovšem podstatný vliv na podíl nečistot má pozice dílu na stavební platformě. Je zde patrný rozdíl v procentuálním zastoupení nečistot mezi pozicemi 1 a 5, kdy tato skutečnost je potvrzena v obou případech. Poloha 1 je pro podíl nečistot výhodnější, neboť průměrná hodnota nečistot je ve struktuře 0,08 %. Poloha 5 má průměrnou hodnotu nečistot převyšující 0,11 %.

Jak již bylo řečeno, tento rozdíl je způsoben výhradně pozicí na stavební platformě, neboť při tisku vznikají spaliny, nečistoty, ale i nové kuličky prášku. Tyto nežádoucí částice je potřeba z prostoru stavební platformy odvést, k čemuž slouží ofuk ochranného plynu. Schéma recirkulačního systému ukazuje obrázek 32. Z dýzy vystupuje proud ochranného plynu a snaží se vzniklé částice a nečistoty, které se produkují při spékání laserem, přemístit do sběrače tak, aby co nejméně mohly ovlivnit další proces tisku. Odtah sběrače je propojen s filtračním systémem, kde se vzniklé nečistoty filtrují. Ovšem všechny tyto částice proud ochranného plynu není schopen dopravit až ke sběrači, a proto některé mohou být distribuovány na stavební platformu, jak demonstruje obrázek 32. Při tisku je nutné dbát na správné rozmístění dílů v pracovní komoře, ale co je hlavní, je důležité správně nastavit pořadí tisku jednotlivých dílů. Vhodné rozmístění a pořadí je znázorněno v obrázku 32. Je vhodné začínat tisknout díly od levého dolního rohu a dále postupovat směrem vzhůru, aby se zabránilo nanesení spalin a nečistot na místo budoucího dílu, které bude následně spékáno.



Obr. 32 Pořadí dílu v závislosti na ofukovacím systému[7]

Vzhledem k tomu, že velikost a hmotnost vznikajících částic je velmi rozmanitá, je velice obtížné zajistit ideální recirkulační systém ochranného plynu. Velikost vznikajících částic se pohybuje od několika mikrometrů až do cca 100  $\mu\text{m}$ , jež potvrdila svým výzkumem v rámci DP doktorka Ivana Zetková. Malé částice se mohou vznášet v pracovním prostoru stroje a následně se usazovat kdekoli, například na sběrači. V případě velkých částic je situace závažnější, neboť sběrač a stavební platforma nejsou v jedné výšce, čímž dochází k hromadění nečistot před sběračem. Tyto nahromaděné nečistoty se při zpětném pohybu nanášecího pravítka přehnou na stavební platformu, neboť stavební platforma při zpětném pohybu klesne o 1 mm, jež má za následek kontaminaci části stavební platformy, jak demonstruje obrázek 33. Při dalším nanášení nové vrstvy prášku jsou částečně nečistoty přesunuty do přepadového zásobníku. Nižší bude demonstrováno, jaké množství nečistot může vznikat při tisku. Žlutá značka označuje umístění vzorku 5, který byl situován na hranici kontaminované zóny. Z výsledků vyplývá, že na hranici této oblasti dochází ke spékání dílů s vyšší hodnotou pórovitosti. Je velký předpoklad, že uvnitř oblasti bude pórovitost nabývat ještě vyšších hodnot. Ovšem i přes tyto skutečnosti je třeba konstatovat, že relativní hustota se pohybuje okolo 99,9 %, což znamená, že pórovitost tištěného materiálu dosahuje opravdu malých hodnot.

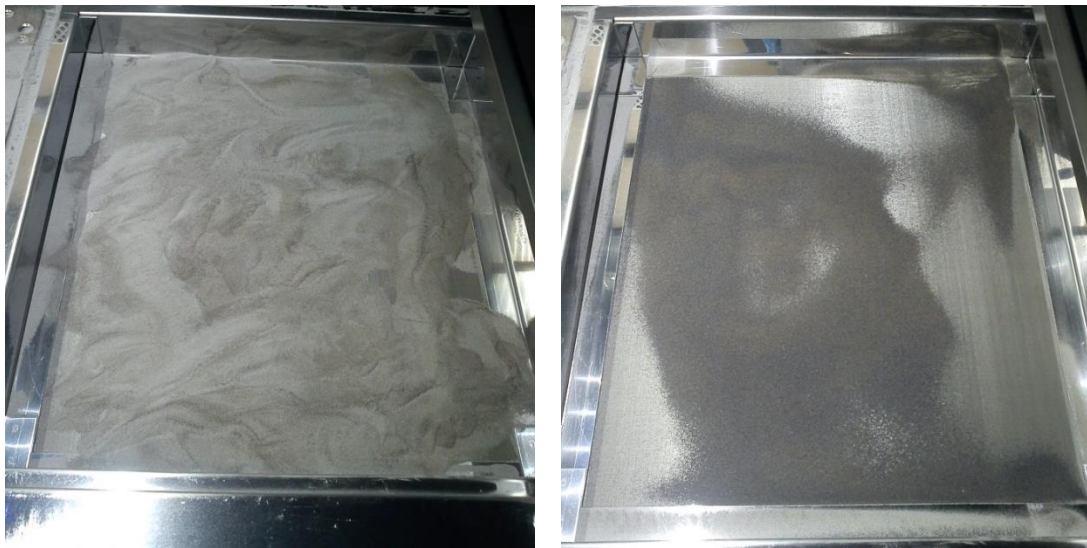


Obr. 33 Oblast znečištění

Při ručním přesívání kovového prášku MS1 skrze síto s velikostí ok 63  $\mu\text{m}$  je velice názorně vidět, kolik nečistot neodseparuje recirkulační systém. Nečistoty, které jsou menší než velikost ok, propadnou skrz síto do zásobníku a jsou opětovně použity v procesu. Nečistoty, jejichž velikost přesahuje velikost ok v sítu, jsou zachyceny a je nutné jejich odstranění. Vznik spálených částí a nečistot je závislý na velikosti a tvarové složitosti tištěného dílu. Na obrázcích 34 a 35 je porovnán tisk o malé velikosti s tvarově jednoduchými díly oproti velkému tisku s tvarově složitými díly [50].



Obr. 34 Přesívání prášku po tisku jednoduchých a malých součástí – běžný odpad



Obr. 35 Přesívání prášku po tisku tvarově komplikovaných dílů - nadměrný odpad

Z obrázků uvedených výše je patrné, že odpadu ve formě spečeného prášku a nečistot není zanedbatelné množství. Reálná spotřeba prášku na stavěný díl se pohybuje okolo 1,4 x více než je objem dílu. Do této hodnoty je započten spálený prášek, nečistoty a odpadní prášek (jedná se o prášek, který není možné vyjmout z pracovní komory, proto musí být vysán pomocí vysavače).

### 3.1.2 Zkouška tahem

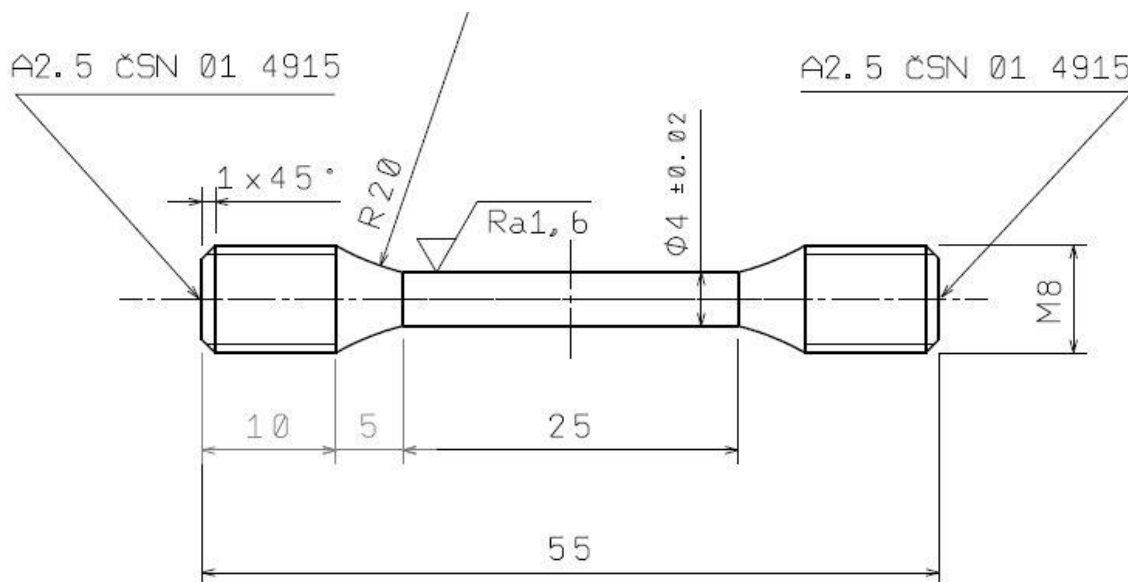
Ověření mechanických vlastností oceli MS1 (Wr. N 1.2709) v závislosti na změně nanášecího elementu bylo provedeno ve dvou etapách. V první etapě byly vytištěny zkušební vzorky ve směru X nejprve pomocí keramického pravitka a poté pomocí karbonového kartáčku. V druhé etapě byly vzorky vytištěny ve směru Z a zároveň změna nanášecího elementu byla provedena během tisku, jak bude vysvětleno níže. Všechny vzorky byly vytištěny stejnými parametry doporučenými výrobcem, a to EOS\_DirectPart při tloušťce vrstvy 0,04 mm. Pro nástrojovou ocel je tato sada parametrů nastavena následujícím způsobem: rychlost laseru 960 mm/s, intenzita laseru 285 W, šrafování 0,11 mm atd. Sada procesních parametrů obsahuje další podsady parametrů, které mají odlišné nastavení jednotlivých parametrů. Tyto podsady jsou použity například pro konturu, „Upskin“ a „Downskin“ atd. Jelikož byly vzorky tištěny s přídavkem 0,5 mm na průměr, tak všechny části vytištěné

doplňujícími podsety parametrů byly při výrobě vzorku odstraněny. Po vytištění vzorků vždy následovalo tepelné zpracování. Tepelné zpracování bylo zařazeno do procesu, neboť při tisku na díly působí velký teplotní gradient z důvodu spékání a chladnutí jednotlivých vrstev, kvůli čemuž v tištěném materiálu vzniká pnutí [38]. Pro odstranění tohoto pnutí se používá rozpouštěcí žihání. Celý proces žihání je znázorněn na diagramu v obrázku 36. U rozpouštěcího žihání je použita ochranná atmosféra, kterou je inertní plyn argon (v obrázku označeno modrou barvou). Toto tepelné zpracování bylo použito pro všechny zkušební tělesa v celé práci, ovšem výjimkou je zkouška tahem malých průřezů, kde zkušební tělesa jsou bez TZ.



Obr. 36 Rozpouštěcí žihání

Pro ověření mechanických vlastností byla zvolena statická zkouška tahem za pokojových teplot dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Zkušební tělesa byla válcového tvaru o průměru zkušební části 4mm a upínací část byla tvořena závitem M8. Na obrázku 37 jsou jednotlivé rozměry včetně tolerancí zkušebního tělesa. Zkouška byla provedena na stroji Zwick Roell Z250 v souladu s výše uvedenou normou. Základní parametry zkoušky tahem byly nastaveny následujícím způsobem. Předzatížení bylo 5 MPa. Rychlost zkoušky do meze kluzu byla konstantní, a to 0,00025 1/s od meze kluzu do přetržení zkušebního tělesa byla rychlost nastavena na hodnotu 0,0067 1/s.



Obr. 37 Zkušební těleso zkoušky tahem

### 3.1.2.1 První etapa

Pro zkoušku tahem bylo vytištěno v první fázi celkově 8 vzorků, přičemž vzorky 1E až 4E byly vytištěny pomocí keramického pravítka a vzorky 5A až 8A byly vytištěny pomocí karbonového kartáčku. V tabulce 4 jsou uvedeny výsledky zkoušky tahem.

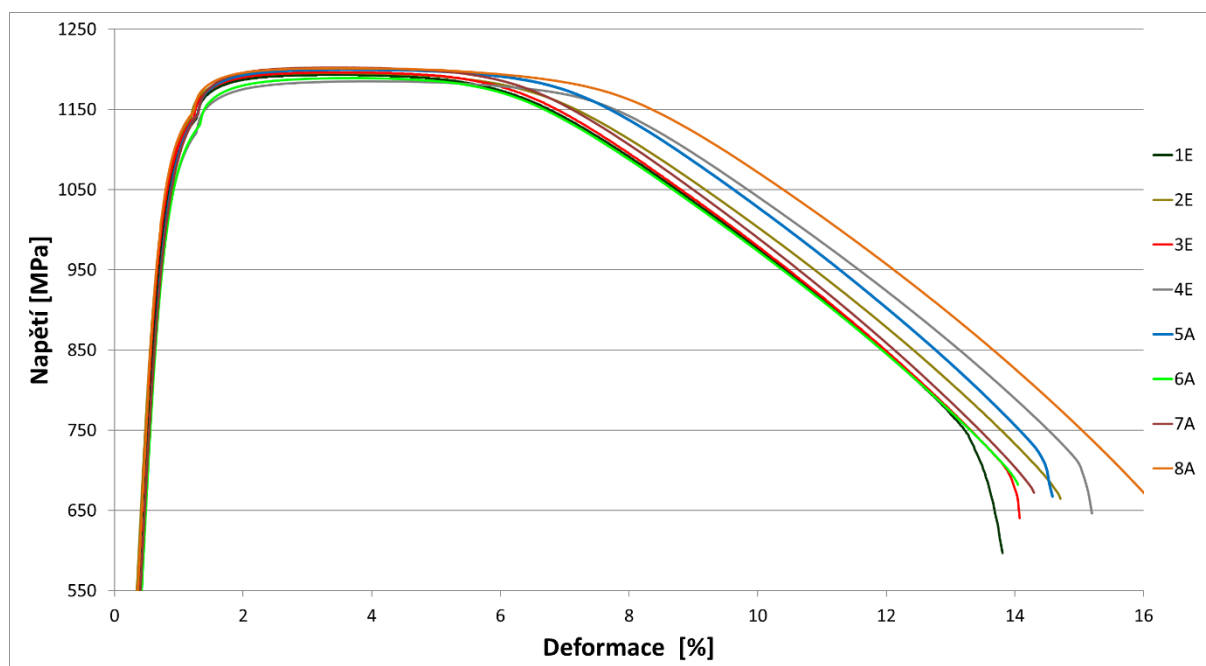
Tab. 4 Výsledky tahové zkoušky – první etapa

Popis zkoušky	$d_0$ mm	$R_{p0.2}$ MPa	$R_m$ MPa	A %	$m_E$ GPa
1E	4,02	1066	1193	13,3	167
2E	4,01	1062	1196	14,3	176
3E	4,01	1074	1196	13,6	164
4E	4,02	1049	1185	14,7	160
5A	4,01	1078	1200	14,1	162
6A	4,00	1059	1189	13,5	159
7A	4,00	1071	1202	13,8	155
8A	4,01	1086	1201	15,9	166
Deklarované hodnoty výrobcem směr XY[16]		$1050 \pm 100$	$1200 \pm 100$	$13 \pm 4$	$160 \pm 30$

Na základě naměřených výsledků je možné konstatovat, že **deklarované hodnoty jednotlivých mechanických vlastností výrobcem jsou uvedeny dle skutečnosti**. Drtivá většina výsledků se pohybuje velice blízko střední hodnoty a ani jedna z naměřených hodnot nebyla mimo povolený rozsah.

Mezi výsledky vzorků 1 až 4 a 5 až 8 není signifikantní rozdíl ani zřetelný trend. Proto je možné konstatovat, že změna nanášečícího elementu nemá vliv na mechanické vlastnosti při statickém zatížení.

Jednotlivé průběhy je možné si detailněji prohlédnout na grafu v obrázku 38. Ani grafy jednotlivých měření nevykazují žádné známky trendů.



Obr. 38 Křivky průběhů první etapy

### 3.1.2.2 Druhá etapa

Neboť se v první etapě nevyklytly žádné výraznější rozdíly mezi mechanickými vlastnostmi jednotlivých vzorků, byly pro druhou etapu stanoveny odlišné podmínky. Tato etapa byla rozdělena na 3 série, přičemž v každé z nich byly vytištěny 4 vzorky. Jak je všeobecně známo, tak při tisku dochází k vytvoření dílů s anizotropními vlastnostmi v závislosti na směru stavby. Z tohoto důvodu byl zvolen odlišný směr tisku vzorků oproti první etapě, a to směr Z. Dle dostupných informací by měly vzorky vytištěné ve směru Z dosahovat nižších mechanických vlastností, což může být výhodné pro vznik nuancí. Z důvodu bezpečnosti tisku byla okolo vzorků vytvořena vodící ohrádka. Pro všechny série byl dodržen stejný technologický postup výroby. A to tak, že vzorek byl vytištěn do  $\frac{1}{2}$  výšky pomocí keramického pravítka a následně byl tisk zastaven. Po zastavení tisku byla otevřena procesní komora a následovala 20 min prodleva. Následný tisk byl vždy navázán do 30 min od zastavení tisku. Do této chvíle byl technologický postup totožný pro všechny série.

- Pro první sérii EE bylo pro navázání tisku a dokončení tisku vzorku použito keramické pravítko.
- Pro druhou sérii EA bylo pro navázání tisku a dokončení tisku vzorku použito karbonového kartáčku (během časové prodlevy došlo k výměně nanášecího elementu).
- Série EAE měla specifický průběh, přičemž došlo k dvojímu zastavení tisku. Při prvním zastavení došlo k výměně na karbonový kartáček a pomocí něho byly na vzorek natištěny pouze 2mm. Poté opět došlo k zastavení tisku a k výměně pravítka zpět na keramické. Pomocí keramického pravítka byl tisk vzorku dokončen. (čas od zastavení a opětovném spuštění byl vždy dodržen).

**Na základě tohoto experimentu vznikla pracovní hypotéza, která předpokládá zhoršené mechanické vlastnosti vzorků kvůli přerušení tiskové úlohy a opětovnému navázání. A to kvůli možnosti oxidace dané vrstvy, ochlazení vzorků a v neposlední řadě, kvůli změně nanášecího elementu.**

Po vytištění vzorků následovalo odříznutí pouze okolní ohrádky, přičemž vzorky na stavební platformě zůstaly a podstoupily stejné tepelné zpracování jako vzorky z první etapy. Na přiložených obrázcích je zřetelně vidět, v jaké výšce byla výměna nanášecího elementu realizována. Jedná se o vzorky EAE, kde došlo ke dvěma výměnám, jak je z obrázku jednoznačně identifikovatelné.



Obr. 39 Ohrádka se vzorky EAE

V tabulce 5 jsou vyobrazeny naměřené mechanické vlastnosti vzorků z druhé etapy.

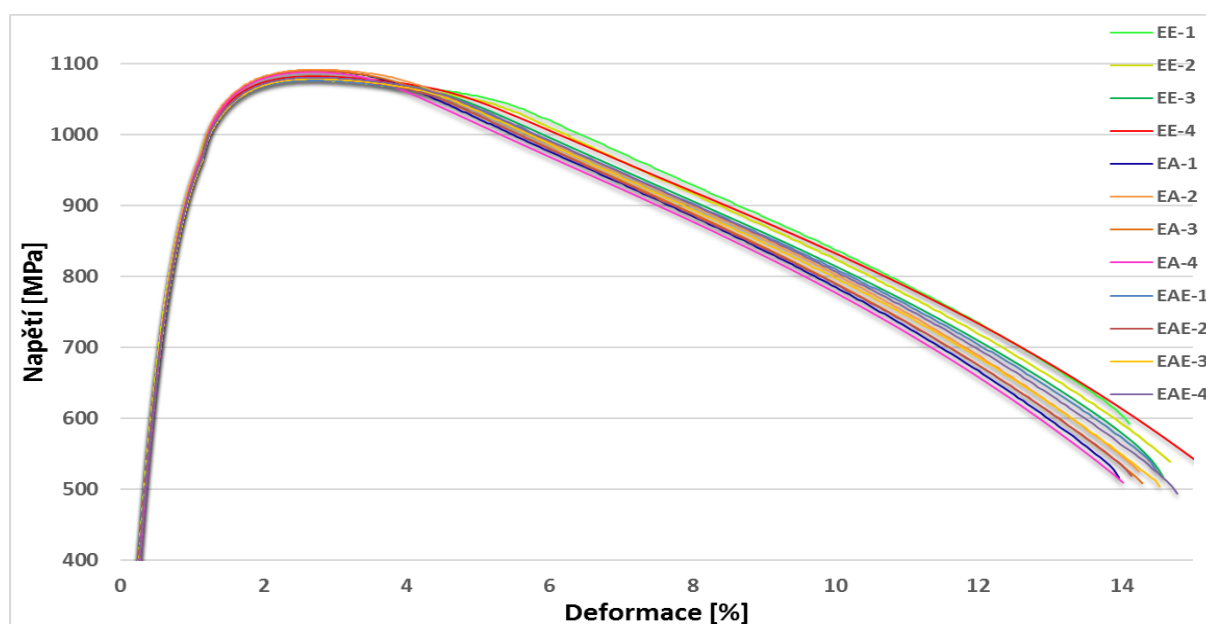
Tab. 5 Výsledky tahové zkoušky – druhá etapa

Popis zkoušky	$d_0$ mm	$R_{p0.2}$ MPa	$R_m$ MPa	A %	$m_E$ GPa
EE-1	4,01	812	1079	13,8	165
EE-2	4,02	818	1077	14,4	167
EE-3	4,01	817	1081	14,4	168
EE-4	4,00	818	1082	15,6	164
EA-1	4,01	832	1090	13,6	150
EA-2	4,00	834	1092	13,9	160
EA-3	4,00	817	1090	14,0	164
EA-4	4,01	847	1088	14,0	156
EAE-1	4,01	808	1076	14,2	165
EAE-2	4,02	810	1079	13,8	168
EAE-3	4,01	812	1078	14,2	162
EAE-4	4,00	824	1080	14,5	155
Deklarované hodnoty výrobcem směr Z [16]		$870 \pm 100$	$1100 \pm 100$	$12 \pm 4$	$150 \pm 30$

Na základě naměřených výsledků je možné konstatovat, že deklarované hodnoty jednotlivých mechanických vlastností výrobcem jsou uvedeny dle skutečnosti. Drtivá většina výsledků se pohybuje velice blízko střední hodnoty a ani jedna z naměřených hodnot nebyla mimo povolený rozsah.

Mezi výsledky jednotlivých sérií nebyl pozorován výrazný rozdíl. Největší rozdíl byl zaznamenán u meze kluzu mezi vzorky EA-2 a EAE-1. Rozdíl byl v tomto případě 26 MPa. Nejvyšší odchylky meze kluzu a meze pevnosti dosáhly stejné vzorky. U meze pevnosti je rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou pouze 16 MPa. Na základě těchto experimentů je možné konstatovat, že změna nanášecího elementu během procesu tisku nemá vliv na mechanické vlastnosti zjištěné zkouškou tahem.

Jednotlivé průběhy je možné si detailněji prohlédnout na grafu v obrázku 40. Ani grafy jednotlivých měření nevykazují žádné známky trendů.

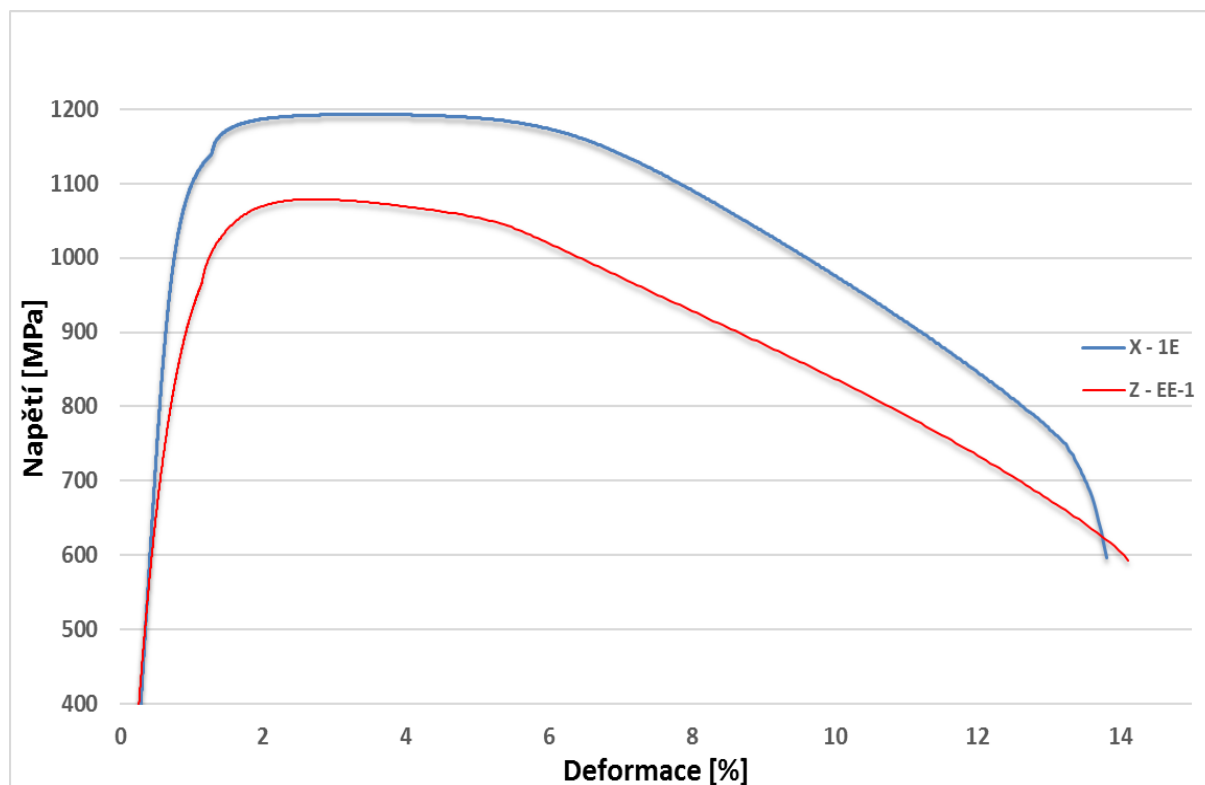


Obr. 40 Křivky průběhů druhé etapy



### Porovnání směrů tisku

Jak již bylo výše zmíněno, mechanické vlastnosti 3D tištěného materiálu jsou anizotropní. Experiment potvrdil, že hodnoty mechanických vlastností ve směru osy X se v určitých případech významně odlišují od hodnot v ose Z. Nejmarkantnější rozdíl lze pozorovat na mezi kluzu, kdy hodnota meze kluzu se pohybovala v rozmezí 808 MPa až 1086 MPa. V ose X byla naměřena nejnižší a nejvyšší hodnota 1049 a 1086 MPa. Kdežto hodnoty v ose Z byly výrazně menší. Rozdíl mezi průměrnými hodnotami v ose X a Z je více než 245 MPa. Ale je třeba brát v potaz, že vzorky v ose Z měly specifický způsob tisku. Ovšem na základě výsledků DP doktorky I. Zetkové [39] je možné konstatovat, že nejlépe patrný rozdíl je právě u meze kluzu mezi vzorky v ose X a Z. Tuto skutečnost uvádí i výrobce. U meze pevnosti je rozdíl méně znatelný, ale i tak je rozdíl v průměrných hodnotách přibližně 120 MPa. Rozptyl hodnot u jednotlivých směrů byl do 20 MPa, průměrná hodnota meze pevnosti v ose X je 1195 MPa, což znamená, že anizotropie je přibližně 10%. Na grafu v obrázku 41 je možné porovnat průběhy zástupců směru X (1E) a Z (EE-1).



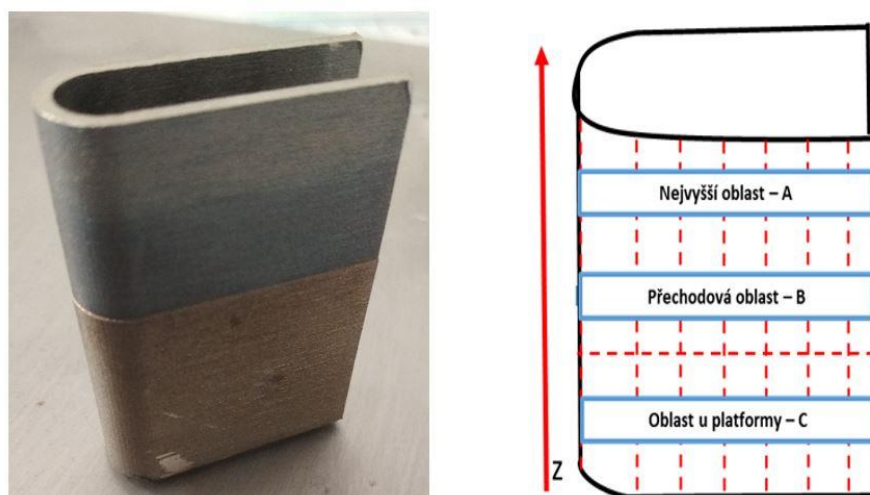
Obr. 41 Porovnání směrů X a Z

### Porovnání s konvenčně vyráběným materiálem Wr. N. 1.2709 [40]

Tištěný materiál EOS MS1 má konvenčně vyráběný ekvivalent označený Wr. N. 12709. Jedná se o velmi kvalitní nástrojovou ocel používanou například na zápustky forem. Mechanické vlastnosti této oceli jsou velice vysoké a tato ocel se vyznačuje především vysokou pevností a zároveň dobrou houževnatostí. Ovšem při porovnání konvenčně vyráběného materiálu s tištěným materiálem vykazuje vyšší mechanické vlastnosti tištěný materiál bez ohledu na směr tisku. Kupříkladu minimální hodnota meze kluzu  $R_{p0,2}$  pro konvenční materiál je stanovena na 640 MPa. Ze všech zkoušených vzorků měl nejhorší hodnotu meze kluzu vzorek EAE-1- 808 MPa, což je o přibližně 170 MPa vyšší než lepší minimální hodnota pro konvenční materiál. Nejvyšší hodnotu meze kluzu vykazoval vzorek A8 – 1086 MPa. Průměrná hodnota meze kluzu u vzorků v ose X byla přibližně 1067 MPa u vzorků v ose Z byla 820 MPa. U meze pevnosti  $R_m$  nebyly tak markantní rozdíly. Konvenční materiál má rozsah minimální pevnosti v rozmezí 930-1130 MPa. Všechny vzorky tištěného materiálu vykazovaly vyšší hodnoty než je minimální mez konvenčního materiálu. Nejnižší hodnoty dosáhl opět vzorek EAE-1 – 1079 MPa. Nejvyšší pevnost vykazoval vzorek A7 -1202 MPa. Průměrná hodnota pro směr Z byla 1083 MPa a pro směr X byla 1195 MPa. U tažnosti opět všechny vzorky vykazovaly vyšší hodnoty než 12%, která je jako minimální hodnota u konvenčního materiálu. Průměrná hodnota tažnosti byla přibližně 14%.

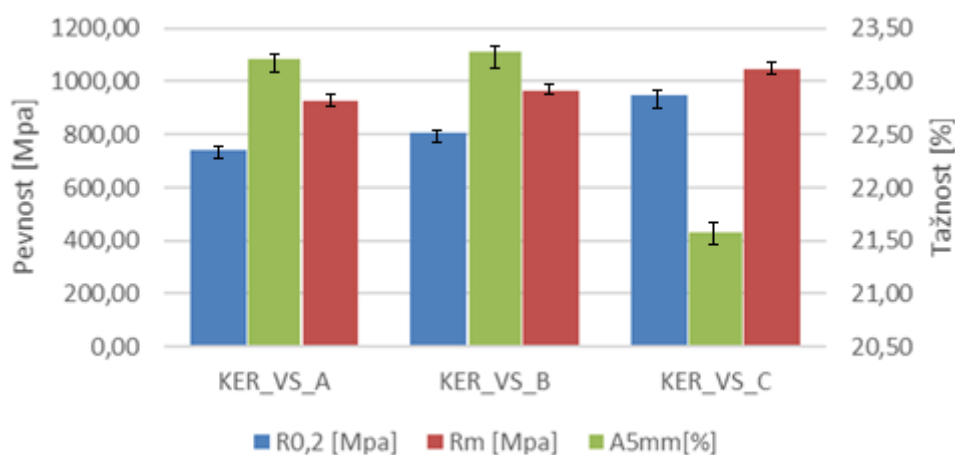
### 3.1.2.3 Zkouška tahem malých průřezů

Jak již bylo výše zmíněno, zkušební vzorky v ose Z byly tištěny společně s ohrádkami a tyto ohrádky byly po tisku odříznuty. Odříznutí ohrádek bylo provedeno za účelem získání vzorků pro mikro tahové zkoušky ze stejného tisku a zároveň bez tepelného zpracování. Na obrázku 42 je vyobrazena ohrádka a schéma sekcí, kde byly odebrány vzorky pro zkoušku tahem pro ploché vzorky o průřezu 1,5 x 1 mm. Vzorky byly odebrány ze tří částí, kdy první oblast byla v horní části ohrádky. Druhá oblast byla záměrně situována do přechodové oblasti a třetí oblast byla ve spodní části ohrádky nad stavební platformou. Jak je z prvního obrázku zřetelně vidět, tak při tisku ohrádky na stavební platformu má standardní barvu tištěných součástí. Ovšem po přerušení tisku a znovu navázání tisku má ohrádka namodralou barvu. Tento jev je způsoben špatným odvodem tepla. Jev zbarvování dílů je možné též pozorovat při tisku bez zastavení a opětovného navázání. Dochází k němu například, když je tištěn velký objem materiálu do určité výšky a následně je tištěn pouze malý objem materiálu. Zde dochází taktéž ke špatnému odvodu tepla, neboť při spékání vzniká velké množství tepla, které je zapotřebí ze spěkaného místa odvést. Vzhledem k malému množství spěkaného materiálu dochází k výraznému zrychlení tisku jednotlivých vrstev, a tím ke zkrácení času pro přestup tepla. Teplotní gradient přestupu tepla do dílu, který má v sobě naakumulované velké množství tepla, je malý, a proto je přebytečně teplo spotřebováno na zbarvení tištěných součástí. Při tisku přímo na stavební platformu dochází k velice efektivnímu odvodu tepla díky ochlazování platformy během tisku.

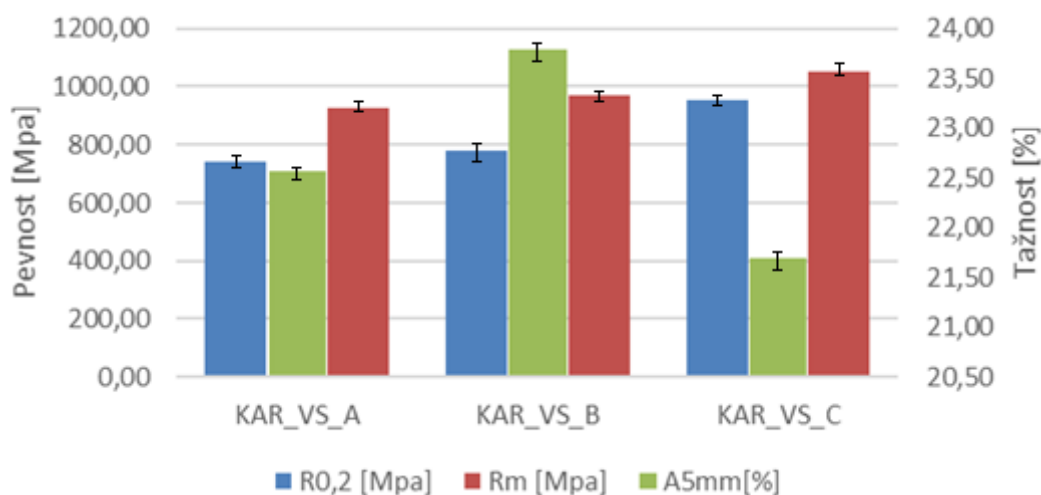


Obr. 42 Ohrádka + schéma odběru vzorků

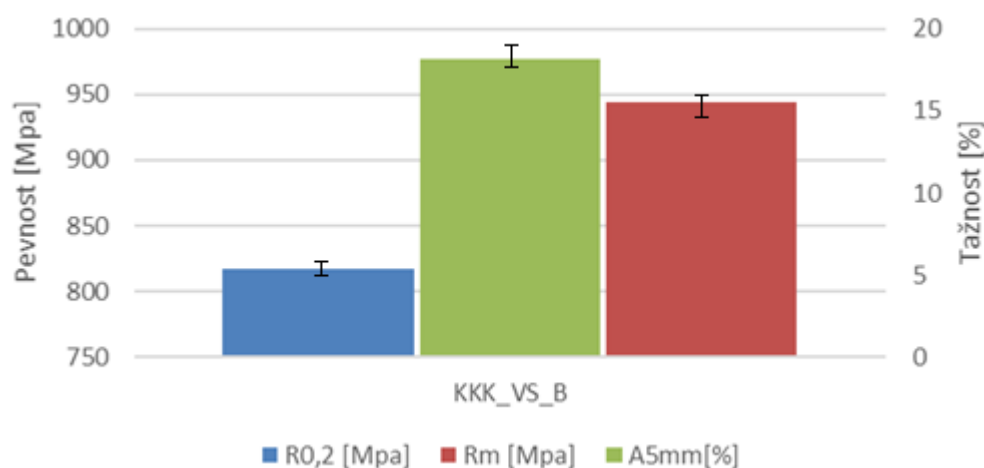
Na grafech v obrázcích 43, 44 a 45 jsou vyobrazeny mechanické vlastnosti – mez kluzu, mez pevnosti a tažnost A5 v daných oblastech. Pouze u tisku, kdy byla změna realizována dvakrát, je vyobrazena jen přechodová oblast.



Obr. 43 E-E mechanické vlastnosti v závislosti na pozici od platformy - keramika



Obr. 44 E-A mechanické vlastnosti v závislosti na pozici od platformy - kartáček



Obr. 45 EAE mechanické vlastnosti v závislosti na přechodu keramiky a kartáčku

Z výsledků je patrné, že mez kluzu a mez pevnosti klesá se vzdáleností od platformy. Tento trend byl pozorován u všech měření bez ohledu na nanášecí element. Přičemž u vzorků ve výšce cca 60 mm se mez kluzu pohybovala okolo 960 MPa a mez pevnosti okolo hodnoty 1030 MPa. Oproti tomu ve výšce cca 10 mm od platformy byly naměřeny hodnoty meze kluzu pohybující se okolo 760 MPa a meze pevnosti okolo 920 MPa. Uprostřed dílu byl rozdíl mezi konkurenty u meze kluzu 20 MPa a u meze pevnosti 10 MPa. Tažnost se pohybovala v rozmezí 21,5 až 23,8 % a rozdíl mezi keramikou a karbonovým kartáčkem byl do 0,5%. Ovšem u přechodové oblasti B při změně z keramiky na kartáček a zas zpět byla naměřena hodnota tažnosti 17 %. Tento rozdíl byl způsoben dvojitým napojováním tisku.

Tento rozdíl mechanických vlastností je způsoben tím, že skrze díl odchází teplo z tavené oblasti a tím dochází k částečnému popouštění dílů směrem ke stavební platformě. Ovšem tato **rozdílnost mechanických vlastností v závislosti na vzdálenosti od platformy je odstraněna tepelným zpracováním**, kdy se mechanické vlastnosti sjednotí.

### 3.1.3 Metalografie

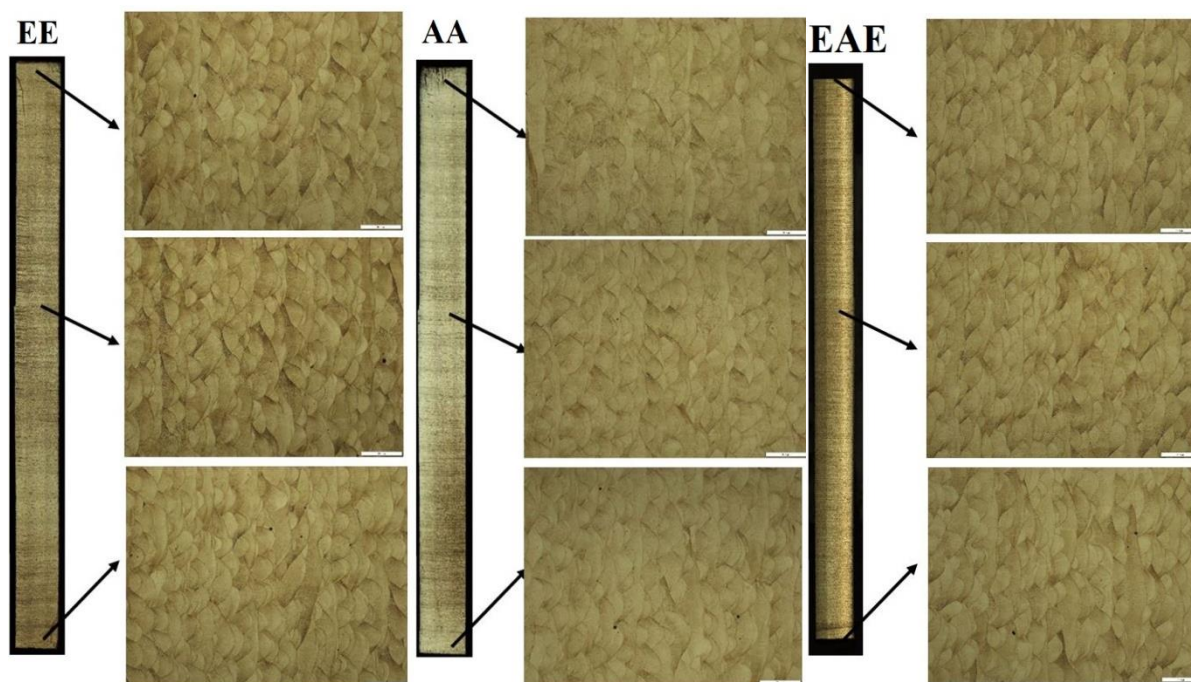
Na odebraných vzorcích z ohrádek byly provedeny metalografické výbrusy a to ve stejných sekcích, jak bylo popsáno výše. Z těchto proužků byly vyřezány zkušební vzorečky pro zkoušku tahem i vzorky pro metalografii. Po 3D tisku metodou DMLS dochází ke tvorbě martenzitické struktury s výraznou tištěnou strukturou. V podélných řezech při malých zvětšeních jsou zřetelně viditelné tzv. poloviční elipsy. Ke vzniku těchto polovičních elips dochází natavením práškového lože při spékání laserovým paprskem, který šrafuje danou vrstvu. Ve struktuře jsou jasně identifikovatelné dráhy laseru a jejich překryv. Při větším zvětšení (500x a více) je možné pozorovat buněčnou strukturu uvnitř jednotlivých laserových drah. Buněčná struktura vzniká kvůli opakovanému natavování a rychle přeměně do pevného stavu a zároveň vysokou rychlostí ochlazování [55]. Na

obrázku 46 je možné vidět metalografický výbrus z přechodové oblasti. Metalografické výbrusy byly provedeny v podélném směru (tisk v ose Z). Tato oblast je zřetelně identifikovatelná nejen díky změně barvy, ale i díky přesazení kontury dílu. Toto přesazení je vidět na levé straně obrázku. Obrázek je otočen o 90° ve směru hodinových ručiček, tak aby poloviční elipsy byly natočeny dle skutečnosti, a to svým vrcholem k platformě.



Obr. 46 Metalografie z místa přechodu E-E – 50x zoom [56]

Obrázek 47 je složenina jednotlivých metalografických výbrusů, které jsou natočeny dle měření, čili skutečná orientace struktury by měla být opět otočena o 90° ve směru hodinových ručiček. Z metalografických snímků z daných sekcí byly vytvořeny složené obrazy pro názorné porovnání keramického pravítka a karbonového kartáčku.

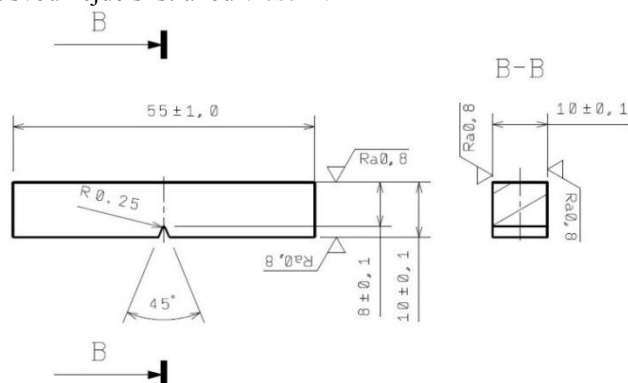


Obr. 47 Porovnání metalografických výbrusů stejných sekcí EE, AA a EAE – Zvětšení 50x [56]

Při porovnání v rámci jednoho vzorku z různých sekcí není znatelný žádný signifikantní rozdíl. Ani při porovnání nebyl pozorován rozdíl, proto lze konstatovat, že změna nanášecího elementu nemá vliv na strukturu spékaného materiálu.

### 3.1.4 Zkouška vrubové houževnatosti

Pro ověření dynamických vlastností materiálu a vlivu jednotlivých nanášecích elementů byla zvolena zkouška vrubové houževnatosti podle Charpyho. U dynamických vlastnosti 3D tištěného materiálu je všeobecně známo, že dosahuje nižších hodnot než konvenčně vyráběný materiál, a proto **byl předpoklad, že se projeví změna nanášecího elementu**. Pro zkoušku vrubové houževnatosti bylo použito instrumentované kyvadlové kladivo Charpy 150/300/450 J. Zkouška byla provedena v souladu s normou ČSN EN ISO 148-1 (420381). Pro zkoušku byly použity zkušební vzorky (10x10x55mm) s V vrubem o velikosti 2mm, které byly vyrobeny z vytištěných polotovárů, a následně vyrobeny v požadovaných tolerancích viz obrázek 48. Všechny vzorky byly tištěny ve stejném natočení a svou nejdelší stranou v ose X.



Obr. 48 Zkouška vrubové houževnatosti - Zkušební vzorek

Jako u všech zkoušek tak i u zkoušky vrubové houževnatosti byly vzorky vytištěny pomocí obou nanášecích elementů. Pro zkoušku bylo vytištěno 1 ks v ose X v obou sériích s tím, že předpoklad byl 3 vzorky pro každou teplotu tj. 9 vzorků. Dva vzorky byly navíc pro případ nutnosti měření opakovat. V obou sériích byly tyto dva vzorky využity, aby bylo dosaženo vypovídajících hodnot pro každou teplotu. Teploty pro testování byly zvoleny následovně -40 °C, pokojová teplota (20 °C) a +200 °C. Tyto tři teploty byly zvoleny záměrně, neboť strojní součásti vyráběné z této oceli bývají vystaveny právě těmto podmínkám.

Měřené hodnoty jsou následující - maximální síla, velikost průhybu při maximální síle, práce při dosažení maximální pevnosti a celková práce. Dále je zde dopočtená hodnota vrubové houževnatosti KCV. Všechny výsledky měření jsou vyobrazeny v tabulkách 6,7 a 8.

Tab. 6 Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti teplota -40°C

- 40 °C	$F_{max}$ N	$S_m$ mm	$W_m$ J	W J	KCV J/cm <sup>2</sup>
Kar - 4	31183	1,44	30,7	117,2	147
Kar - 5	32006	1,65	37,0	125,0	156
Kar - 6	31582	1,27	26,0	110,7	138
Ker - 4	31429	1,63	36,4	122,0	153
Ker - 5	31467	1,27	25,7	114,7	143
Ker - 6	30713	1,64	36,0	120,3	150

Tab. 7 Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti teplota +20 °C

+20 °C	$F_{max}$ N	$S_m$ mm	$W_m$ J	W J	KCV J/cm <sup>2</sup>
Kar - 1	29516	1,67	35,2	129,0	161
Kar - 2	29388	1,63	34,9	120,1	150
Kar - 3	29873	1,62	35,0	132,8	166
Ker - 1	28932	1,63	34,5	164,2	205
Ker - 2	29112	1,63	34,3	138,1	173
Ker - 3	29473	1,63	34,4	146,7	183

Tab. 8 Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti teplota +200 °C

+200 °C	F <sub>max</sub> N	S <sub>m</sub> mm	W <sub>m</sub> J	W J	KCV J/cm <sup>2</sup>
Kar - 7	25620	1,64	30,5	166,4	208
Kar - 8	25987	1,84	33,4	140,3	175
Kar - 9	24570	1,27	21,5	123,1	154
Ker - 7	25136	1,70	31,4	144,8	181
Ker - 8	25844	1,27	21,2	130,5	163
Ker - 9	25326	1,62	32,2	148,6	185

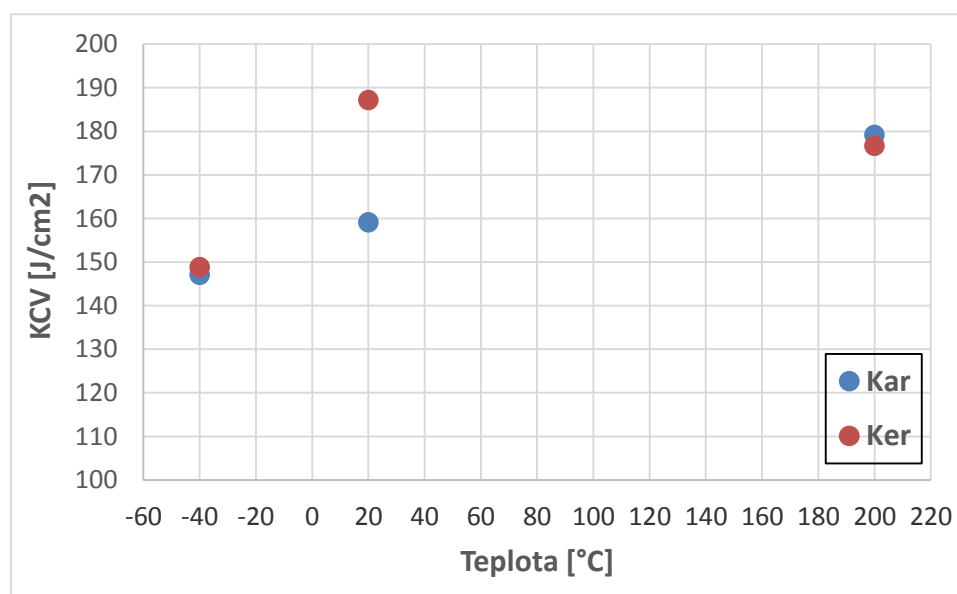
Výsledky maximální síly potvrdily předpoklad, že nejvyšší síla bude u nejnižší teploty a s vyšší teplotou se bude snižovat. Výsledky pro jednotlivé teploty měření jsou velice podobné a liší se jen v řádu procent. Nejvyšší síla byla dosažena při teplotě -40°C u vzorku Kar – 5, a to 32006 N. Nejnižší hodnota maximální síly byla 24570 N (Kar – 9) 200 °C.

Výsledky průhybu při maximální síle byly poněkud pestřejší při jednotlivých teplotách. Nejstejnomyšlnějších výsledků dosahovaly vzorky při teplotě +20 °C a jejich hodnota se pohybovala okolo 1,63 mm. Oproti tomu při zvýšení a snížení teploty zkoušky vykazovaly značně rozdílné hodnoty průhybu. Nejvyššího průhybu bylo dosaženo při teplotě +200°C, a to 1,84 mm, a nejnižší hodnota 1,27 mm byla pro obě teploty stejná.

Práce při dosažení maximální pevnosti byla nejvíce konzistentní při teplotě + 20 °C a pohybovala se okolo hodnoty 35 J. Byl zde pozorován trend, že vzorky tištěné keramickým pravítkem dosahovaly nižších hodnot přibližně o 0,5 J. U dalších dvou teplot byly hodnoty značně rozdílné, kdy dvě hodnoty dosahovaly velice podobných hodnot, ale třetí hodnota byla značně nižší. Například u teploty +200 °C a vzorků Ker byla hodnota dvou vzorků okolo 31 J, ale třetí vzorek vykazoval práci pouze 21 J. Tento jev byl totožný pro obě varianty nanášecích elementů. Na ověření tohoto trendu byly použity vzorky, které byly původně navíc. Tento trend byl jimi potvrzen.

Celková práce na přeražení zkušební tyče vykazovala při - 40 °C velice konzistentní hodnoty, a to okolo 115 – 120 J, oproti tomu při teplotě + 200 °C měly vzorky značně rozdílné hodnoty. Průměrná hodnota byla okolo 140 J, přičemž následující hodnoty byly v rozmezí ± 20 J.

Velký rozdíl v celkové práci spotřebované na přeražení zkušební tyče se vyskytl mezi nanášecími elementy při teplotě 20 °C. Pro zvýraznění tohoto rozdílu byla vypočtena hodnota vrubové houževnatosti KCV. Hodnoty z jednotlivých sérií byly zprůměrovány a vyneseny do grafu v obrázku 49.



Obr. 49 KCV Graf

Vrubová houževnatost KCV při teplotě +20 °C vykazovala výraznou nuanci mezi vzorky vytištěnými různými nanášecími elementy. Vzorky vytištěné karbonovým kartáčkem dosahovaly hodnot okolo 160 J/cm<sup>2</sup>. Kdežto vzorky vytištěné keramickým pravítkem vykazovaly hodnoty přibližně o 19 % vyšší, čili 190 J/cm<sup>2</sup>.

Při vyšší a nižší teplotě byly výsledky konkurentů víceméně totožné, ovšem vzorky vytištěné pomocí keramického pravítka dosahovaly vyšší hodnoty.

Pro ověření rozdílnosti při teplotě 20 °C bylo vytištěno celkově 18 vzorků v ose Z, kdy vždy 6 vzorků reprezentovalo jednu sérii. První série byla vytištěna do 1/2 výšky keramickým pravítkem a pomocí automatické změny nanášecího elementu změněna na karbonový kartáček. Vrub byl vytvořen přesně v místě změny. Další dvě série vzorků byly vytištěny stejně jako v předchozích porovnáních, takže keramikou a karbonovým kartáčkem. V tabulce 9 jsou uvedeny výsledky jednotlivých zkoušek.

Tab. 9 Hodnoty vrubové houževnatosti v ose Z

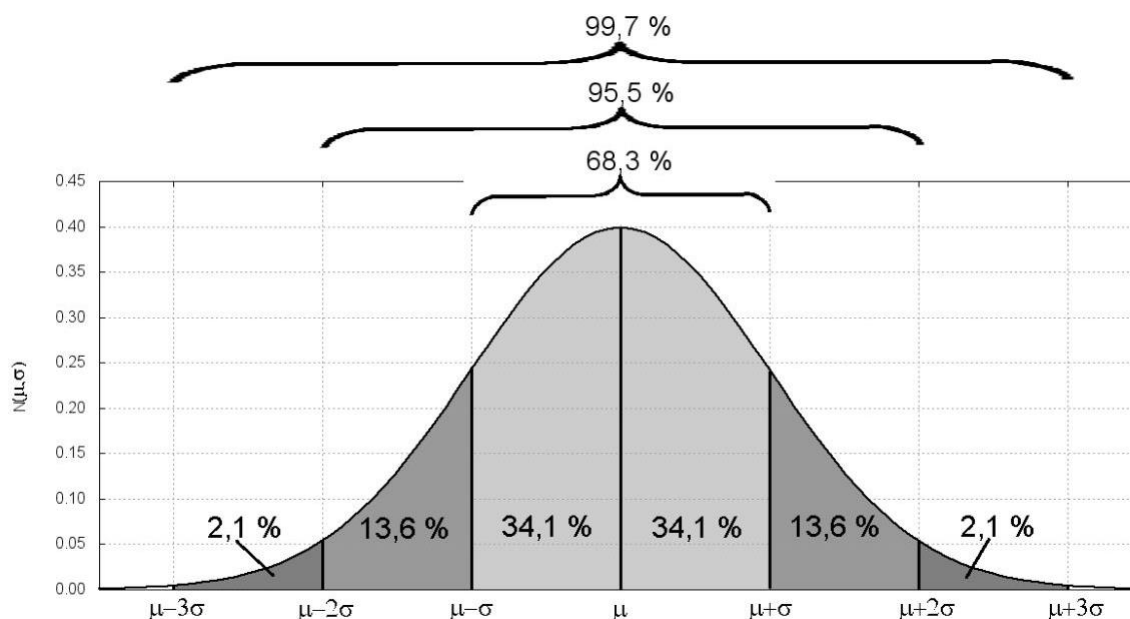
Zkušební těleso	Fmax	Sm	Wm	W	KCV	Průměrná hodnota
	N	mm	J	J	J/cm2	
Změna 1	29817	1,95	43,3	156,0	195,0	<b>178,59</b>
Změna 2	29351	1,58	33,5	139,2	174,1	
Změna 3	29522	1,93	44,0	148,5	185,6	
Změna 4	29726	1,66	35,9	136,1	170,1	
Změna 5	29934	1,66	35,8	140,6	175,8	
Změna 6	30482	1,93	42,5	136,8	171,0	
Kar 1	29991	1,44	28,6	136,8	171,0	<b>179,01</b> <b>168,9</b>
Kar 2	30047	1,51	30,5	137,2	171,5	
Kar 3	29640	1,45	28,9	141,6	177,1	
Kar 4	30249	1,51	30,7	130,7	163,4	
<del>Kar 5</del>	<del>37646</del>	<del>2,32</del>	<del>44,3</del>	<del>183,8</del>	<del>229,8</del>	
Kar 6	28818	1,51	31,3	129,1	161,4	
Ker 1	29742	1,44	29,0	130,0	162,5	<b>163,37</b>
Ker 2	29636	1,66	35,3	132,4	165,5	
Ker 3	29318	1,67	35,5	130,3	162,9	
Ker 4	28885	1,59	32,9	147,5	184,4	
Ker 5	29666	1,67	35,7	123,9	154,8	
Ker 6	29527	1,45	28,6	120,0	150,0	

Neboť hodnota u Kar 5 se vyznačovala diametrálně rozdílnou hodnotou vrubové houževnatosti, bylo potřeba měření podrobit statistickému zhodnocení. Nejprve bylo provedeno ověření dat z hlediska určení statistického normálního rozložení. Na základě ověření modusu, mediánu, šikmosti a špičatosti je možné konstatovat, že **naměřená data jsou dle Gausova normálního rozložení**. Následně byla provedena kontrola dat na zjištění hrubé chyby dle vzorce (1), kdy byla vypočtena **směrodatná odchylka**.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2} \quad (1)$$

Velikost směrodatné odchylky  $\sigma$  z měření byla vypočtena na 23,3009. Kontrola hrubé chyby je stanovena tak, že hodnota musí být  $\pm 3\sigma$  od průměrné hodnoty. V tomto konkrétním případě by hodnota musela být mimo rozmezí hodnot od 109,1 do 248,9 J. Ovšem hodnota Kar 5 byla naměřena 229,8 J, takže jí nelze považovat za hrubou chybu při stanoveném intervalu  $\pm 3\sigma$ . Ovšem norma „Guide to the expression of Uncertainty in measurement“ ve zkratce GUM 1995 udává, že pro hrubou chybu lze odhalit i zpřísněním intervalu na  $\pm 2\sigma$ , jež udává 95,5% pravděpodobnost výskytu správných hodnot, jak ukazuje obrázek 50. S ohledem na fakt, že většina statických hodnocení se provádí na hladině 95 % pravděpodobnosti, byla hodnota pro určení hrubé chyby

zvolena  $\pm 2\sigma$ . Při použití tohoto kritéria je dovolené rozmezí hodnot 132,4 až 225,6 J. Měření Ker 5 je mimo povolený rozsah, což znamená, že se **jedná o hrubou chybu a na základě tohoto statistického pravidla bylo vyřazeno z dalšího zpracování**. Obrázek 50 znázorňuje jaká je pravděpodobnost, že naměřené hodnoty budou skutečně v tolerančním intervalu v závislosti na zvoleném násobku směrodatné odchylky.



Obr. 50 Gaussovo normální rozložení [61]

Pro ověření hrubé chyby bylo přistoupeno ke kontrole odlehlých hodnot dle Grubbsova testu, který je vhodný pro nízký počet naměřených dat, dle vzorce (2).

$$T = \frac{|x_{test} - \bar{x}|}{s} \quad (2)$$

$$T \leq T_{krit}$$

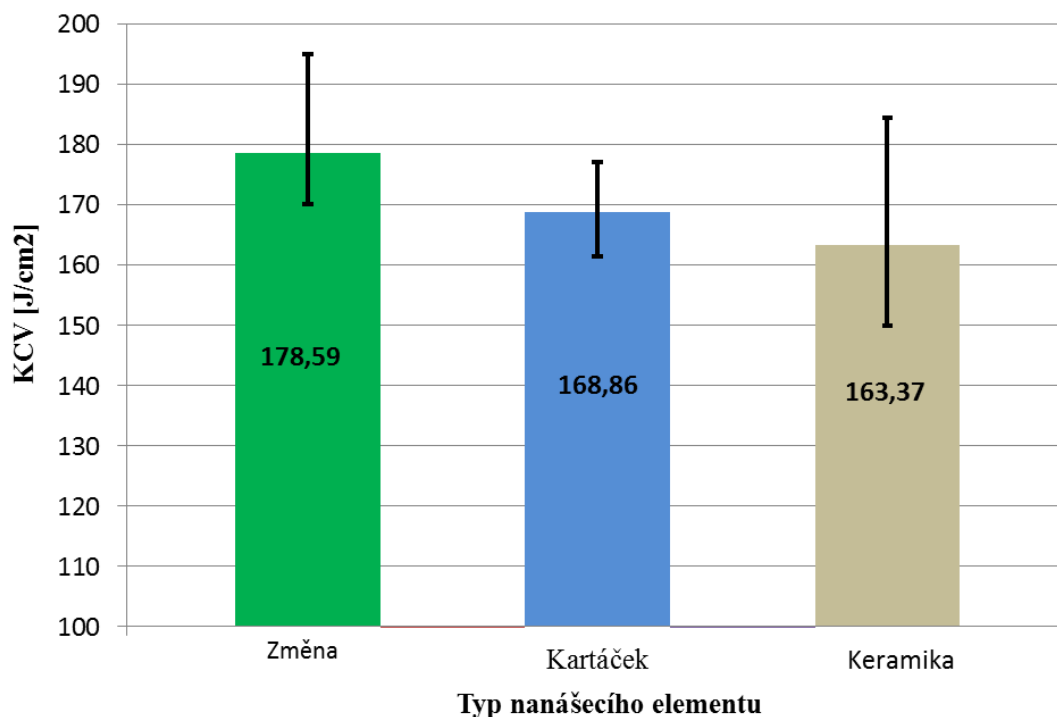
Koeficient kritické hodnoty pro  $n=6$  je stanoven na 1,996.

Na základě výsledků z Grubbsova testu je možné konstatovat, že hodnota u měření Kar 5 **je odlehlá, což potvrzuje výskyt hrubé chyby**.

Ostatní hodnoty v tabulce (série Změna a Kar) byly hodnoceny stejným způsobem a žádná z naměřených hodnot nebyla mimo stanovený interval  $\pm 2\sigma$ .

Nejlépeších výsledků bylo dosaženo změnou z keramického pravítka na kartáček, kdy průměrná hodnota KCV byla 179 J. Minimální hodnota byla naměřena 170,1 J a maximální 195,0 J. Na základě vyřazení hrubé chyby měření byla výsledná hodnota průměru vrubové houževnatosti u karbonového kartáčku a keramického pravítka téměř totožná a lišila se pouze o 5,5 J ve prospěch karbonového kartáčku. Průměrná hodnota měla hodnotu 168,9 J. Minimální hodnota u karbonového kartáčku byla 161,4 J a byla přibližně o 11 J vyšší než minimální hodnota keramického pravítka. Celkově lze hodnotit konkurenty z hlediska vrubové houževnatosti jako rovnocenné. Pro názornost jsou na obrázku 51 vyneseny průměrné hodnoty vrubové houževnatosti včetně rozptylu naměřených hodnot.



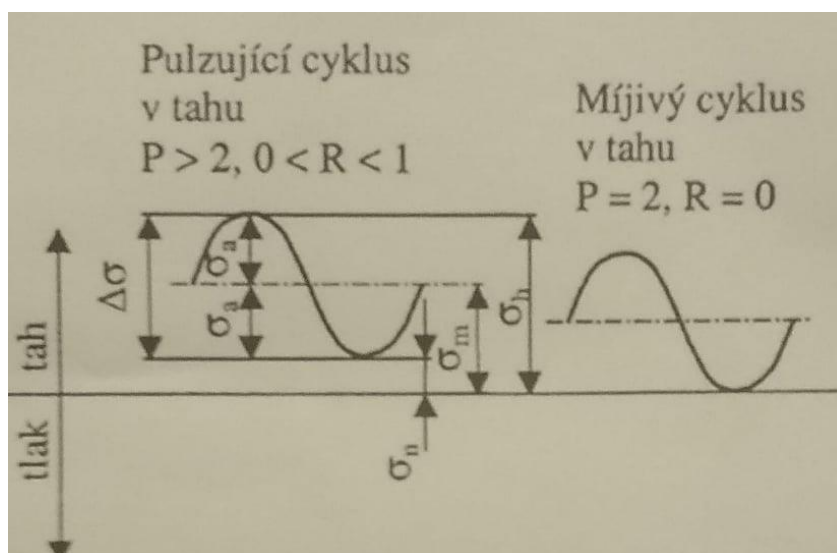


Obr. 51 Porovnání hodnot KCV

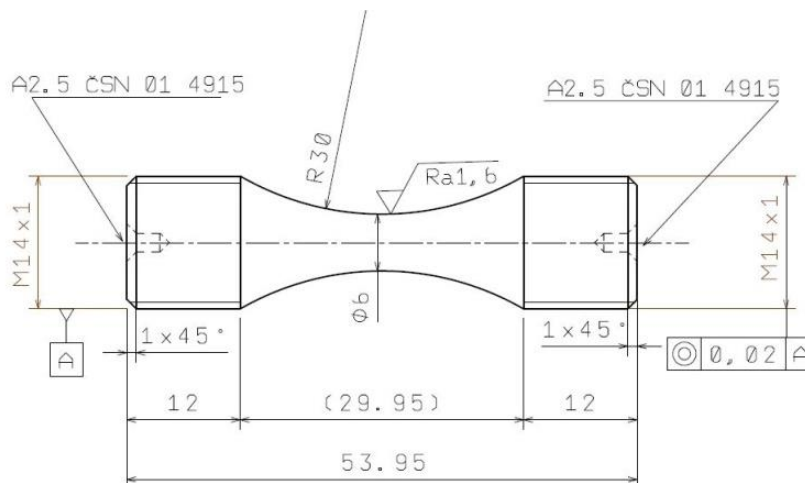
### 3.1.5 Vysoko-cyklová únava

Poslední zkouškou mechanických vlastností byla zvolena zkouška vysoko-cyklové únavy. Série byly totožné jako u zkoušky vrubové houževnatosti pouze s tím, že v každé sérii bylo vytištěno 12 vzorků. Vzorky byly opět tištěny v ose Z a zkušební vzorek odpovídal obrázku 53.

Pro zkoušku únavy cyklickým zatěžováním byl zvolen magneto-rezonanční vibrátor Zwick Roell 50 HFP 5100. Frekvence byla zvolena 100 Hz s mívivým cyklem v tahu s hodnotou  $P = 2$  a  $R = 0$ , jak popisuje obrázek 52. Zkouška byla provedena dle normy ČSN 420363.



Obr. 52 Způsob asymetrického zátěžného cyklu během zkoušky únavy  $P=2, R=0$  [60]



Obr. 53 Zkušební vzorek vysoko-cyklová únava

Při testování bylo zjištěno, že několik vzorků bylo přetrženo v upínací části přímo v závitě a z toho důvodu musely být všechny vzorky přesoustruženy na průměr zkušební části 4,5 mm se zachováním rádiusu R30. Takto upravené vzorky již praskaly v krčku zkušební části a mohly být otestovány. V tabulkách 10, 11 a 12 jsou uvedeny dosažené výsledky nanášecích elementů. Testovací vzorky s průměrem 5,9 mm jsou v tabulkách šedivě podbarveny a dále vzorky, u kterých došlo k lomu v závitě, jsou tučně a kurzívou.

Tab. 10 Výsledky zkoušky vysoko-cyklové únavy - Keramika

Označení	Napětí	Průměr	průřez	Síla	počet cyklů
	Mpa	mm	mm <sup>2</sup>	N	-
<b>KE1</b>	<b>550</b>	<b>5,93</b>	<b>27,618</b>	<b>15190</b>	<b>7858615</b>
KE2	650	4,42	15,344	9974	167747
KE3	600	4,43	15,413	9248	312385
KE4	550	4,43	15,413	8477	10000000
KE5	580	4,43	15,413	8940	395782
KE6	570	4,43	15,413	8786	213469
KE7	560	4,43	15,413	8631	886485
KE8	550	4,43	15,413	8477	10000000
KE9	700	4,42	15,344	10741	232052
KE10	540	4,43	15,413	8323	397507
KE11	550	4,43	15,413	8477	501465
KE12	530	4,43	15,413	8169	10000000

Tab. 11 *Výsledky zkoušky vysoko-cyklové únavy – Kartáček*

Označení	Napětí	Průměr	Průřez	Síla	Počet cyklů
	Mpa	mm	mm <sup>2</sup>	N	-
KA1	483	5,9	27,340	13205	10000000
KA2	690	5,9	27,340	18864	207350
<b>KA3</b>	<b>600</b>	<b>5,92</b>	<b>27,525</b>	<b>16515</b>	<b>752025</b>
<b>KA4</b>	<b>550</b>	<b>5,92</b>	<b>27,525</b>	<b>15139</b>	<b>2919977</b>
KA5	580	4,43	15,413	8940	520724
KA6	560	4,43	15,413	8631	230557
KA7	540	4,43	15,413	8323	486046
KA8	540	4,43	15,413	8323	701387
KA9	520	4,43	15,413	8015	10000000
KA10	530	4,43	15,413	8169	10000000
KA11	530	4,43	15,413	8169	10000000
KA12	530	4,43	15,413	8169	10000000

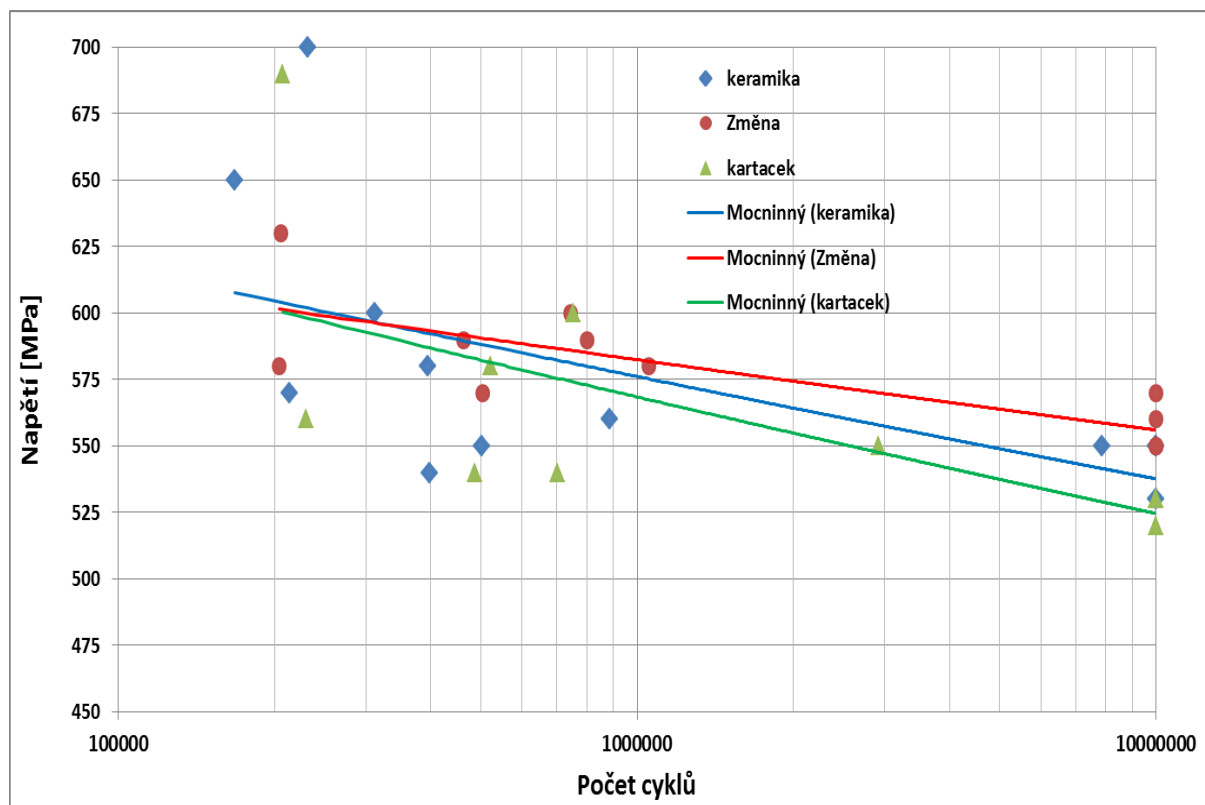
Tab. 12 *Výsledky zkoušky vysoko-cyklové únavy – Změna*

Označení	Napětí	Průměr	Průřez	Síla	Počet cyklů
	Mpa	mm	mm <sup>2</sup>	N	-
Změna 1	550	4,43	15,413	8477	10000000
Změna 2	600	4,43	15,413	9248	743108
Změna 3	570	4,43	15,413	8786	10000000
Změna 4	580	4,43	15,413	8940	1052871
Změna 5	590	4,43	15,413	9094	800432
Změna 9	630	4,43	15,413	9710	205489
Změna 6	590	4,43	15,413	9094	462232
Změna 7	580	4,43	15,413	8940	204317
Změna 8	570	4,43	15,413	8786	504121
Změna 10	550	4,43	15,413	8477	10000000
Změna 11	550	4,42	15,344	8439	10000000
Změna 12	560	4,43	15,413	8631	10000000

V grafu na obrázku 54 jsou vyobrazena všechna měření jednotlivých konkurentů, kde na ose Y je napětí při zkoušce a na ose X dosažený počet cyklů. Díky tomuto porovnání je velice dobře zřetelné, že nejlepšími výsledky dosahovala změna karbonového kartáčku na keramické pravítko. Mez únavy pro změnu nanášecích elementů byla stanovena na 550 MPa, neboť tři po sobě jdoucí měření dosáhla 10 milionů cyklů při tomto napětí. U karbonového kartáčku byla mez únavy 530 MPa a též tato hodnota byla naměřena u tří vzorků. U keramického pravítka dva vzorky dosáhly meze únavy při napětí 550 MPa, ovšem poslední měření na téže hodnotě napětí meze únavy nedosáhlo, a proto bylo sníženo o 10 MPa. Bohužel ani tento vzorek meze únavy nedosáhl. Poslední vzorek byl testován při 530 MPa a dosáhl 10 milionů cyklů, takže z důvodu nedostatku vzorků nelze přesně určit hodnotu meze únavy u keramického pravítka. Tato hodnota se bude pohybovat v rozmezí 530 až 550 MPa. Pro přesné určení by bylo potřeba provést další experiment.

Napětí 530 MPa je limitní hodnota pro mez únavy u 3D tištěného materiálu bez ohledu na použitý nanášecí element. Z provedených experimentů plyne, že všechny zkoušené vzorky s napětím 530 MPa a nižším dosáhly meze únavy. Rozpětí napětí u vzorků, které dosáhly 10 milionů cyklů, bylo 530 MPa až 570 MPa. Spojnice trendů v grafu ukazují teoretický počet cyklů při daném zatížení. Ze spojnic je zřejmé, že výsledky dosažené změnou nanášecího elementu dosahují vyšších hodnot. Při porovnání spojnic keramického pravítka a

karbonového kartáčku je pozorován pouze minimální rozdíl, a to do 10 Mpa. Podle normy pro měření meze únavy u vysoko-pevnostních ocelí je tolerance meze únavy  $\pm 15$  Mpa.



Obr. 54 Výsledky zkoušky vysoko-cyklové únavy

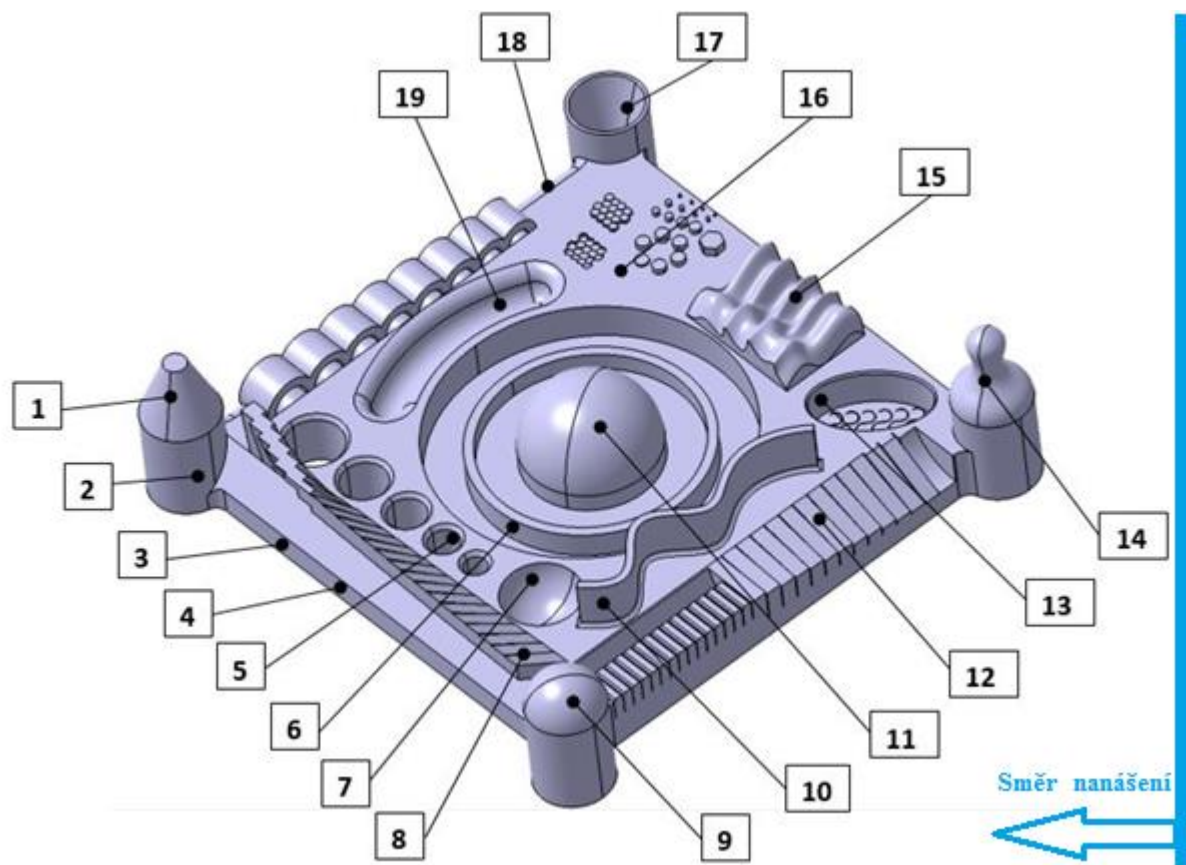
### 3.1.6 Přesnost

V rámci experimentální části práce byl zkonstruován model, který obsahuje velké množství různých prvků. Tyto prvky byly do součásti integrovány záměrně, neboť se z hlediska tisku jedná o problematické prvky, a to především ze strany kvalitativních parametrů, jako je například přesnost a drsnost. Jednotlivé prvky byly voleny tak, aby postihovaly co největší škálu tištěných prvků a zároveň aby po provedení měření poskytovaly komplexní obraz dosahované drsnosti a přesnosti při 3D tisku kovů.

Mezi nejčastější představitele tištěných součástí je možné zařadit komplexní součásti, které se v drtivé většině vyznačují svým velice komplikovaným tvarem, ale zároveň v těchto součástech jsou integrovány běžné prvky, jako jsou například díry, tenké stěny atd. Z toho důvodu vytvořený model obsahuje nejen tvarově složité plochy, ale také i naprosto jednoduché prvky.

Na vytištěném modelu bylo měřeno mnoho různorodých prvků a pro přehlednost byla jednotlivá měření vyznačena do modelu a bylo jim přiděleno referenční číslo. Referenční číslo a popis měření jsou uvedeny v tabulce 13.

**Pracovní hypotéza o vlivu nanášecího elementu na přesnost tištěných dílů byla založena na faktu, že keramické pravítko nanáší vždy stejnou tloušťku vrstvy díky své tuhosti, čímž by mělo dosahovat lepších výsledků. Oproti tomu karbonový kartáček nezaručuje nanášení vždy stejné tloušťky vrstvy, a proto je předpoklad, že by se toto mohlo projevit na přesnosti dílů.**



Obr. 55 Označení prvků pro měření

Tab. 13 Popis měření přesnosti

Číslo	Popis měření
1	Úhel a profil kužele
2	Průměry čtyř krajních válců (dva řezy) + rozteč
3	Kolmost plochy vůči stavební platformě
4	Rozměr krajních rovnoběžných ploch
5	Průměry děr (dva řezy) včetně roztečí
6	Průměry – pod polokoulí, tenká stěna, kapsa (dva řezy)
7	Profil vnitřní polokoule (dva kolmé řezy)
8	Úhly a drsnosti jednotlivých sklonů (horní, spodní strana)
9	Profil vnější polokoule (dva kolmé řezy)
10	Odchylka od profilu (tři řezy)
11	Profil vnější polokoule (dva kolmé řezy)
12	Drsnosti na šikmých plochách
13	Profil oválu (dva řezy)
14	Profil vrchlíku
15	Přesnost tvarové plochy
16	Rovinnost vrchní plochy
17	Úhel a profil vnitřního kužele
18	Náhodné body
19	Profil drážky (dva řezy)

Všechna výše uvedená měření byla provedena za laboratorních podmínek. Pro toto komplexní měření dílu, bylo potřeba využít několika měřících zařízení. Pro měření délky, úhlů, odchylek od profilů atd. byl použit měřicí stroj CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator. Na měření drsnosti jednotlivých ploch byl využit vysoce přesný profiloměr / drsnoměr Hommel Etamic T8000. Jako poslední měřicí zařízení bylo použito opticko-skenovacího mikroskopu Infinite Focus measurement G4 (IFM G4) od firmy Alicona, a to pro měření přesnosti tvarové plochy.

Nebudou zde uvedeny všechny výsledky ze všech měření. Výsledky jsou rozděleny do několika kategorií, které spojují jednotlivá měření a poskytují komplexní pohled. Základní rozdělení je na dvě kategorie, jimiž jsou přesnost a drsnost tisku. Přesnost tisku je dále rozdělena na další podkategorie jako například přesnost úhlů, otvorů a tvarových ploch.

### 3.1.6.1 Přesnost úhlů

Pro měření přesnosti úhlů byly na modelu vytvořeny plochy skloněné pod různými úhly, přičemž měřené rozmezí bylo 35° až 80°. Na těchto vzorcích byla následně měřena i drsnost povrchu, která bude popsána dále. Hodnoty z měření je možné si prohlédnout v tabulce 14. Jak je na první pohled zřejmé, tak odchylky od jednotlivých sklonů jsou velice malé. Přičemž největší odchylka byla naměřena u plochy skloněné pod úhlem 55° a její hodnota dosahovala 0°33', odchylka měla kladný charakter. Největší odchylka se záporným charakterem byla dosažena u plochy skloněné pod úhlem 70° a její hodnota byla -0°24'. Je třeba podotknout, že průměrná hodnota odchylky obou konkurentů se pohybovala ± 0°5'. Při porovnání výsledků s diplomovou prací Veroniky Čapkové je možné konstatovat, že bylo dosaženo výrazně lepších výsledků, což mohlo být způsobeno tím, že úhly v dané práci nejsou absolutními úhly nýbrž relativními, protože při stavbě byly vzorky na ploše, která byla sama skloněna pod úhlem 45°. Dále mohl mít vliv na dosažení lepších výsledků neustálý tlak ze strany výrobce na vývoj vhodnějších procesních parametrů, neboť výsledky Veroniky Čapkové jsou publikovány před 5 lety. Při porovnání výsledků nelze stanovit žádná závislost nebo trend.

Tab. 14 Celé úhly

	35°	36°	37°	38°	39°	40°	41°	42°	43°	44°	45°
Ker.	-0° 8'	-0° 2'	0° 4'	0°16'	-0° 1'	0°18'	0°14'	-0°17'	0°24'	-0° 9'	0°11'
Kar.	-0° 7'	-0° 4'	-0°13'	0°20'	-0° 8'	0° 6'	0° 4'	0° 0'	0°15'	0° 4'	0°10'
	46°	47°	48°	49°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°
Ker.	-0° 0'	0°31'	0°30'	0°13'	0°12'	0°33'	0° 0'	0° 1'	0° 7'	0° 0'	0° 0'
Kar.	0° 0'	-0° 2'	0°22'	0°20'	0°11'	0° 2'	-0° 3'	0°13'	-0°24'	-0°12'	-0° 7'

Pro porovnání přesnosti úhlů byly na modelu vytvořeny dva kužely s obecným úhlem, aby bylo možné porovnat libovolnou hodnotu úhlu nikoli celočíselnou. Kužel byl vytvořen jako vnější i jako vnitřní plocha, přičemž velikost úhlu nebyla totožná. Vnější kužel byl tvořen plochou skloněnou pod 45°28'59" a vnitřní 38°39'12". I toto měření potvrdilo, že 3D tisk je velice přesný při tisku úhlů. Odchylka u vnějšího kužele tisknutého pomocí keramického pravítka byla velice malá, a to - 0° 1'17". Při tisku karbonovým kartáčkem bylo dosaženo téměř totožné odchylky, a to -0° 1'43". Obdobný případ nastal u měření vnitřního kužele, jen odchylka obou konkurentů se pohybovala okolo 0°5'.

Tab. 15 Kužely

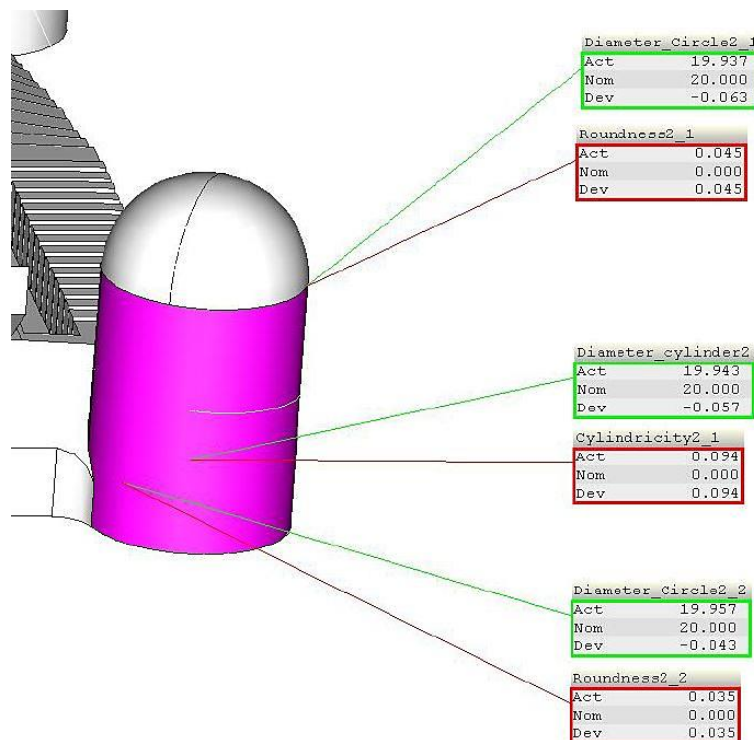
element	Vnější kužel			Vnitřní kužel		
	model	naměřeno	odchylka	model	naměřeno	odchylka
Ker.	45°28'59"	45°27'42"	- 0° 1'17"	38°39'12"	38°44'37"	0° 5'24"
Kar.	45°28'59"	45°27'17"	-0° 1'43"	38°39'12"	38°43'34"	0° 4'22"

### 3.1.6.2 Přesnost vnějších rozměrů

Tato oblast je velice rozsáhlá a není možné pojmut přesnosti všech různých ploch, a proto se oblast zaměřuje především na vnější plochy, které byly měřeny na zkušebním modelu. Jedná se především o válcové plochy, vzdálenost dvou ploch, rovinnost atd.

### 3.1.6.2.1 Přesnost válcových ploch

Přesnost válcových ploch byla hodnocena z hlediska několika faktorů. Nejprve byly změřeny jednotlivé průměry ve třech řezech, následně byla měřena odchylka od kruhovitosti ve dvou řezech a jako poslední byla vyhodnocena válcovitost. Tam, kde nebylo možné válec měřit po celém obvodu, byla naměřena největší možná výšeč válce a softwarově byly válce či kružnice těmito výsledky proloženy. Během měření jednoho řezu válce bylo nasnímáno 500 bodů. Naměřené hodnoty výše uvedených faktorů jsou uvedeny v tabulce 16.



Obr. 56 Měření válců – Válec 2 – Kar.

Tab. 16 Válcové plochy

měření	Válec 1		Válec 2		Válec 3		Válec 4	
	Ker.	Kar.	Ker.	Kar.	Ker.	Kar.	Ker.	Kar.
1	19,933	19,924	19,95	19,943	19,941	19,935	19,933	19,929
2	19,925	19,918	19,947	19,937	19,936	19,932	19,937	19,933
3	19,935	19,925	19,941	19,957	19,977	19,96	19,9	19,91
<b>Odchylka od kruhovitosti</b>								
1	0,046	0,041	0,048	0,045	0,045	0,040	0,054	0,044
2	0,172	0,058	0,037	0,035	0,042	0,046	0,039	0,028
<b>Odchylka od válcovitosti</b>								
1	0,177	0,074	0,175	0,094	0,067	0,063	0,098	0,065

Všechny měřené válce měly nominální průměr 20,000 mm, ale žádná z naměřených hodnot nedosáhla této hranice. Všechny změřené průměry měly zápornou odchylku od nominální hodnoty. Nejvyšší odchylku vykazoval válec 4 ve třetím řezu vytištěný keramickým pravitkem, a to 0,100 mm. Oproti tomu nejmenší odchylku vykazoval válec 3 ve třetím řezu vytištěný keramickým pravitkem, a to 0,023 mm.

Souhrnně lze říci, že většina válců vytištěných pomocí keramického pravitka dosahovala nižší odchylky od nominální hodnoty. Ovšem je potřeba konstatovat, že maximální rozdíl mezi hodnotami nanášecích elementů byl  $\pm 0,016$  mm. Průměrná hodnota ze všech měřených průměrů byla 19,936 mm, čili průměrná odchylka od

nominálního průměru byla 0,064 mm.

U měření kruhovitosti se vyskytla jedna hodnota, která byla výrazně odlišná od zbytku naměřených výsledků, a to u prvního válce vytištěného keramickým pravitkem u druhého měření. Hodnota kruhovitosti v tomto případě byla 0,172 mm, přičemž ostatní hodnoty se pohybovaly v rozmezí 0,028 až 0,058 mm. V případě kruhovitosti ve všech případech dosáhly lepších výsledků válce vytištěné pomocí karbonového kartáčku. Opět se zde hodnoty lišily v řádech mikrometrů, jestliže označíme toto měření s výše zmíněnou abnormálně vysokou odchylkou za chybu měření.

Odchylka od válcovitosti nabývala hodnot od 0,063 až 0,177 mm. Nejvyšší rozdíl mezi válcovitostí byl naměřen u prvních dvou válců, kdy v obou případech vyšší hodnoty odchylky dosahovaly válce vytištěné keramickým pravitkem. Nejhorší válcovitosti 0,177 mm dosáhl válec 1. V tomto případě došlo i k největšímu rozdílu mezi konkurenty, a to více než o 0,1 mm. U druhého válce byla situace obdobná, jen rozdíl mezi konkurenty nebyl tak rapidní. I v kruhovitosti dosáhly lepších výsledků válce vytištěné pomocí karbonového kartáčku a jak již bylo výše zmíněno, v některých případech byl rozdíl obrovský.

### 3.1.6.3 Přesnost polohy

Pro ověření přesnosti polohy byly vybrány roztečné vzdálenosti jednotlivých děr. Roztečná vzdálenost se pohybovala od 11 mm až po 56,5 mm. Výsledky jednotlivých měření jsou zaznamenány v tabulce 17. Tabulka obsahuje naměřené hodnoty a odchylky od nominálního rozměru.

Tab. 17 Rozteče děr

<b>Rozteč mezi dírami</b>	<b>12 a 6</b>	<b>12 a 8</b>	<b>12 a 10</b>	<b>15 a 12</b>	<b>15 a 10</b>	<b>15 a 8</b>	<b>15 a 6</b>
<b>Rozměr</b>	<b>11,000</b>	<b>13,000</b>	<b>15,000</b>	<b>17,500</b>	<b>32,500</b>	<b>45,500</b>	<b>56,500</b>
Ker.	10,980	12,991	14,973	17,486	32,460	45,445	56,431
Kar.	11,002	12,983	14,963	17,476	32,440	45,423	56,424
<b>Odchylka od rozměru</b>							
Ker.	0,020	0,009	0,027	0,014	0,040	0,550	0,069
Kar.	-0,002	0,017	0,037	0,024	0,060	0,077	0,076

Jak je z naměřených výsledků zřejmé, s vyšší vzdáleností se odchylka od ideálního rozměru zvětšuje. Tato skutečnost, a z jakého důvodu se to děje, je popsána v kapitole Přesnost větších rozměrů.

Roztečná vzdálenost jednotlivých děr byla vždy menší nežli skutečný rozměr, jen u nejmenšího rozměru byla hodnota vyšší, a to u tisku pomocí karbonového kartáčku. V ostatních případech dosahovala lepších výsledků keramika. Nejvyšší odchylka mezi konkurenty byla  $\pm 0,022$  mm. U malých rozměrů do 20 mm byla maximální odchylka do - 0,04 mm. U rozměrů od 30 do 60 mm byla maximální naměřená odchylka 0,077 mm a opět byla odchylka záporná. V tomto rozmezí se průměrná odchylka pohybovala okolo hodnoty 0,06 mm.

Na modelu bylo specifikováno deset bodů, které byly náhodně rozmístěny na různé plochy a prvky modelu. V těchto bodech byla změřena odchylka od modelu a tato odchylka byla zaznamenána do tabulky.

Tab. 18 Náhodné body

	<b>bod 1</b>	<b>bod 2</b>	<b>bod 3</b>	<b>bod 4</b>	<b>bod 5</b>	<b>bod 6</b>	<b>bod 7</b>	<b>bod 8</b>	<b>bod 9</b>	<b>bod 10</b>
Ker.	-0,115	-0,036	-0,047	-0,015	-0,137	0,084	0,026	0,080	0,080	-0,057
Kar.	-0,120	-0,037	-0,069	-0,018	-0,151	0,045	0,039	0,074	0,062	-0,087

Největší záporná odchylka od modelu je v bodě 5, a to - 0,151 mm, přičemž byla naměřena na dílu tištěným karbonovým kartáčkem. Oproti tomu největší kladná odchylka byla naměřena v bodě 6 a její hodnota byla 0,084 mm. Takže odchylky se pohybovaly v rozpětí - 0,151 mm až + 0,084 mm, což znamená, že velikost intervalu odchylek byla 235  $\mu$ m. Je třeba zdůraznit, že body byly umístěny na různé prvky i tvarové plochy. Průměrná odchylka od modelu ze všech těchto měření je - 0,018 mm.

Je třeba konstatovat, že jsou zde pouze minimální rozdíly mezi oběma konkurenty a největší odchylka je 39  $\mu$ m, a to u bodu 6. Pouze ve třech případech dosahuje tisk karbonovým kartáčkem menší odchylky, a to právě u bodu 6, 8 a 9. Když není brána v potaz hodnota odchylky v bodě 6, která jediná se svou velikostí výrazně odlišuje, tak odchylka obou konkurentů není větší než 22  $\mu$ m v daných bodech.



### 3.1.6.3.1 Přesnost větších rozměrů

U tisku větších rozměrů se výrazněji projevuje smršťení, jak prokázal svou studií Senthilkumaran a kolektiv [33]. Ze studie vyplývá, že pro orientaci v osách X a Y je velikost smršťení rozdílná. Přičemž díly tištěné v ose X dosahují konstantnější hodnoty smršťení, a to v rozmezí 0,2 % až 0,3 %. Kdežto u dílů tištěných v ose Y dochází k výraznému rozdílu u hodnoty smršťení v závislosti na velikosti rozměru. Smršťení se pohybuje v rozmezí -0,4 % až 0,35 %. Ke smršťení dochází kvůli teplotnímu gradientu a kolísání hustoty energie. [33]

Zkušební díl byl tištěn v orientaci 45°, tedy všechny měřené plochy byly orientovány pod tímto úhlem, proto nejde stanovit rozdíl mezi smršťením o osách X a Y.

Tab. 19 *Rozměr obvodových rovnoběžných ploch*

Obvodové plochy - Rozměr a odchylka				
Plocha	Ker.	Kar.	Ker.	Kar.
	135,000	135,000		
1 a 2	134,757	134,759	-0,213	-0,241
3 a 4	134,798	134,763	-0,202	-0,237

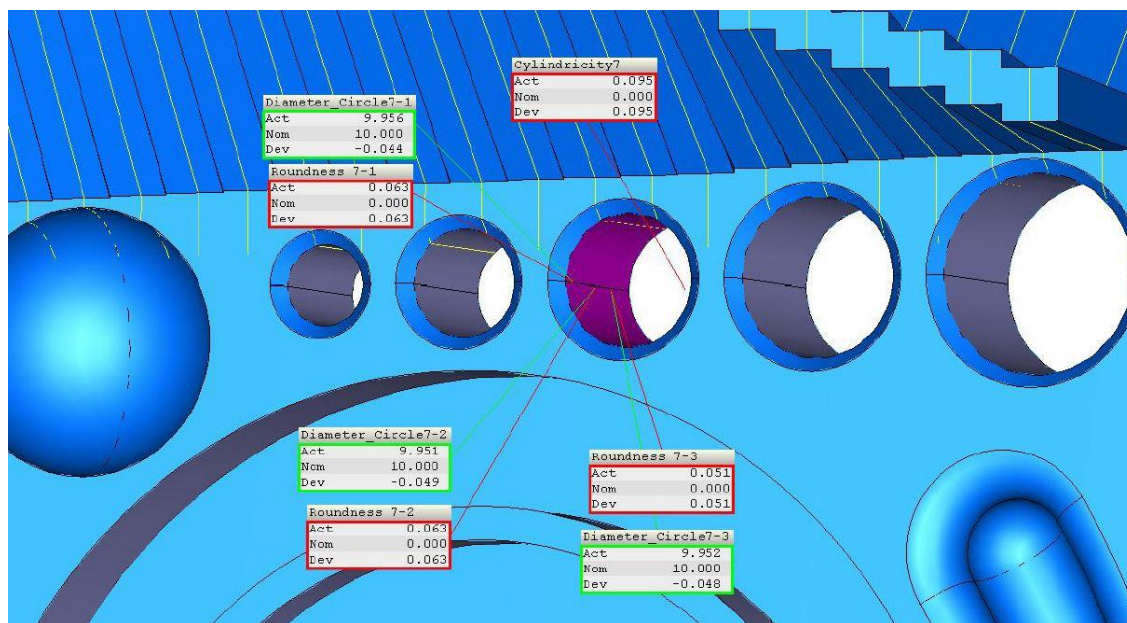
Měřená vzdálenost rovnoběžných ploch byla v obou případech 135 mm, přičemž naměřené hodnoty vykazovaly značnou odchylku od této hodnoty. Díky výrazné odchylce od hodnoty modelu a zároveň stejnoměrným výsledkům obou nanášecích elementů je možné konstatovat, že se v tomto případě projevilo smršťení. Jež svou velikostí odpovídá přibližně 0,2 %.

Rozdíl odchylky rovinnosti svrchní plochy modelu u obou konkurentů je velice podobný a liší se pouze o 0,025 mm. Lepšího výsledku rovinnosti dosáhl tisk keramickým pravítkem, a to hodnoty 0,115 mm.

### 3.1.6.4 Přesnost vnitřních rozměrů

#### 3.1.6.4.1 Přesnost otvorů se svislou osou

Dalším prvkem hojně se vyskytujícím v součástech pro tisk jsou díry. V modelu byly vytvořeny díry od průměru 6 mm do 15 mm a byly průchozí. U všech těchto děr byly měřeny 3 veličiny, a to skutečný průměr, odchylka od kruhovitosti a válcovitost. Skutečný průměr a kruhovitost byly měřeny vždy ve třech řezech. Z těchto tří řezů byla vytvořena válcovitost dané díry. Na obrázku 57 je možné si prohlédnout všechny změřené hodnoty pro jednu díru.



Obr. 57 *Měření malých otvorů*

Všechny změřené hodnoty byly zapsány do tabulky 20.

Tab. 20 Otvory se svislou osou

Měření	Ø 6		Ø 8		Ø 10		Ø 12		Ø 15	
	Ker.	Kar.	Ker.	Kar.	Ker.	Kar.	Ker.	Kar.	Ker.	Kar.
1	5,905	5,907	7,920	7,907	9,950	9,945	11,950	11,952	14,971	14,964
2	5,906	5,908	7,913	7,916	9,951	9,945	11,941	11,943	14,962	14,949
3	5,920	5,917	7,945	7,932	9,952	9,941	11,933	11,939	14,953	14,950
<b>Odchylka od kruhovitosti</b>										
1	0,083	0,065	0,082	0,097	0,072	0,063	0,049	0,048	0,063	0,066
2	0,061	0,088	0,070	0,067	0,063	0,057	0,054	0,057	0,099	0,097
3	0,065	0,070	0,049	0,058	0,051	0,048	0,060	0,051	0,076	0,067
<b>Odchylka od válcovitosti</b>										
1	0,088	0,104	0,089	0,098	0,090	0,075	0,072	0,070	0,200	0,209

Na základě výsledků měření je možné říci, že všechny vytištěné otvory mají menší průměr, než je nominální průměr. Odchylka se pohybuje od - 0,027 do - 0,095 mm. Z uvedených výsledků vyplývá, že vyšších hodnot odchylky je dosaženo u malých průměrů 6 a 8 mm. Průměrná odchylka u zmíněných průměrů je - 0,085 mm. Kdežto u větších průměrů dosahují odchylky menších hodnot a pro porovnání je zde uvedena průměrná odchylka 0,051 mm.

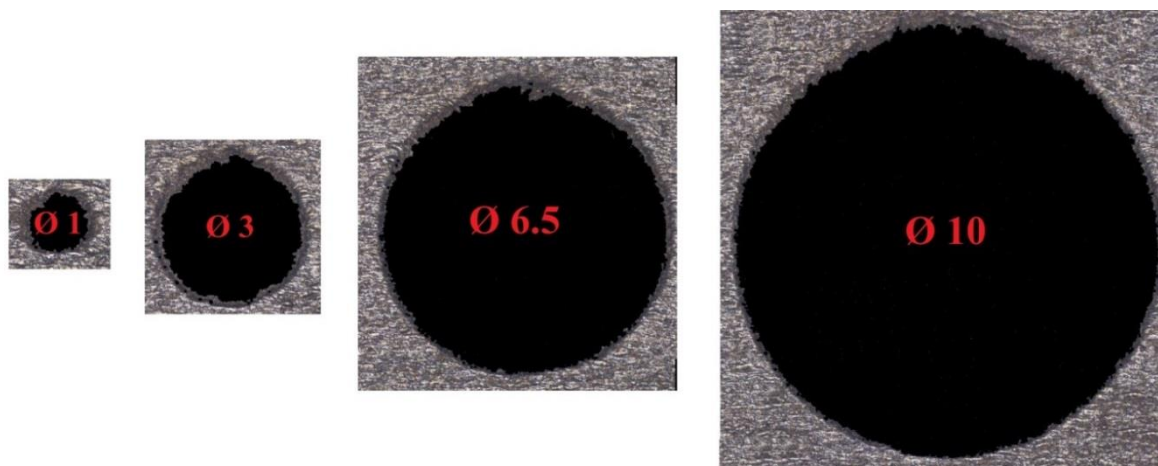
Opět se zde nikterak výrazně neprojevil vliv nanášecího elementu, neboť nejvyšší odchylka průměrů mezi konkurenty byla 0,013 mm.

Ani u kruhovitosti nedocházelo k výrazným odchylkám mezi konkurenty. Odchylka byla vždy do 0,020 mm. Nejvyšší naměřená odchylka od kruhovitosti měla hodnotu 0,099 mm a nejmenší hodnota byla naměřena 0,048 mm.

Odchylka od ideálního válce byla velice podobná jako u měření vnějších válcových ploch, také zde se většina hodnot pohybovala okolo hodnoty 0,070 až 0,100 mm, ale jedna válcovitost se opět vymykala a dosahovala hodnoty okolo 0,200 mm. Ale v tomto případě byla naměřená hodnota téměř totožná u obou konkurentů. Všechny hodnoty obou konkurentů byly velice konzistentní a nelišily se více než o 0,015 mm. Hodnoty nevykazovaly známky nějakých trendů, neboť se nanášecí elementy v dosažení lepších výsledků nepravidelně střídaly.

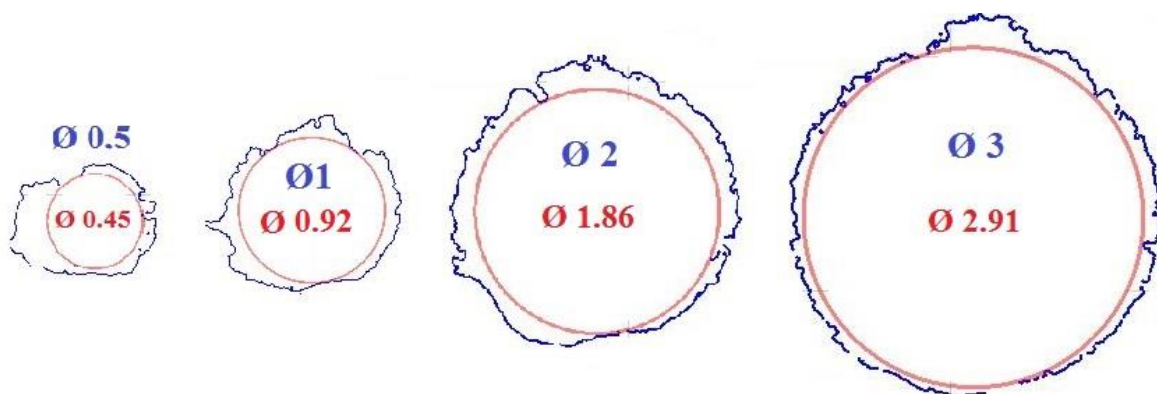
#### 3.1.6.4.2 Přesnost otvorů s vodorovnou osou

Pro dokreslení komplexní informace o přesnosti tištěných děr bez použití podpůrných struktur je zde uveden následující příklad. Vzorek pro měření vodorovných děr byl vytištěn separátně od zkušebního modelu, neboť se jednalo o předcházející experiment. Vzorek nebyl vytištěn odlišnými druhy nanášecích elementů, ale byl vytištěn pouze keramickým pravítkem. V tomto experimentu bylo cílem zjistit, zda rozdílná pozice na stavební platformě má vliv na přesnost děr s horizontální osou. Orientace vzorků byla ve směru osy X a Y. Měřené díry byly měřeny pomocí opticko-skenovacího mikroskopu IFM G4.



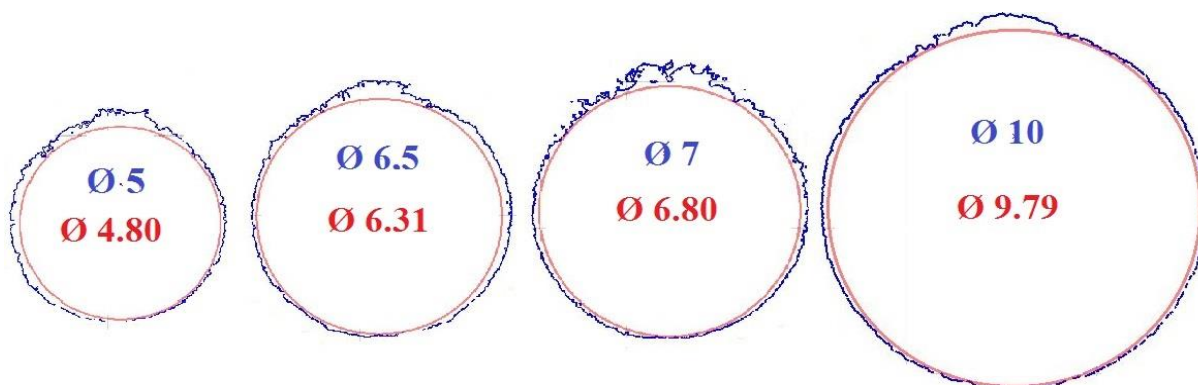
Obr. 58 Měřené díry [37]

Otvory byly měřeny ve vzdálenosti 0,2 mm od čelní plochy vzorku z důvodu eliminace nuancí, které mohou vznikat na hraně otvoru. Otvory byly měřeny z obou stran a následně byly hodnoty jednotlivých stran porovnány. Pro hodnocení otvorů byla použita metoda vložení kružnice, která nejlépe reprezentuje skutečný otvor. Skutečný tvar vytištěných otvorů s malými rozměry nebyl přesně kruhový, což se nejvíce projevilo u děr 0,5 mm, 1 mm a 2 mm.



Obr. 59 Díry 0.5 až 3 mm [37]

Větší díry než 3 mm vykazovaly výrazně lepší kruhovitost, ale byly zde pozorovány dvě oblasti, kde docházelo k výrazné odchylce od kruhovitosti. První oblast byla na vrcholu otvoru. Tento problém popisuje mnoho studií. „Když stavební proces dosáhne vrcholu díry, je překročen kritický úhel 40° a tím pádem vznikají v tomto místě problémy s přesností a drsností otvoru.“ [31] Z tohoto důvodu vznikají v inkriminovaném místě převisy, což má za následek zvedání převislých konců, které nejsou vzájemně spojeny. V tomto místě vznikají spalky a prázdná místa, jak je vidět na obrázku 60 [31],[37],[49].



Obr. 60 Díry 5 až 10 mm [37]

Tab. 21 Hodnoty průměrů vložených kružnic [37]

Nominální průměr	Vzorek orientován v ose Y		Vzorek orientován v ose X	
	Pravá strana	Levá strana	Pravá strana	Levá strana
0,5	0,458	0,370	0,398	0,358
1	0,932	0,862	0,926	0,840
2	1,858	1,848	1,858	1,842
3	2,862	2,810	2,916	2,826
5	4,778	4,694	4,802	4,842
6,5	6,306	6,232	6,308	6,314
7	6,696	7,790	6,748	6,824
10	9,792	9,758	9,828	9,770

Výsledky ukazují, že skutečný průměr vepsané kružnice je výrazně menší, nežli hodnota v modelu, a to u všech měření. Maximální odchylka vepsané kružnice byla -0,306 mm, a to u díry průměru 5 mm. Ve většině případů byla odchylka menší než 0,2 mm. Rozdíl mezi pravou a levou stranou byl ve všech případech menší nežli 0,1 mm. Vliv orientace na přesnost díry nebyl pozorován.

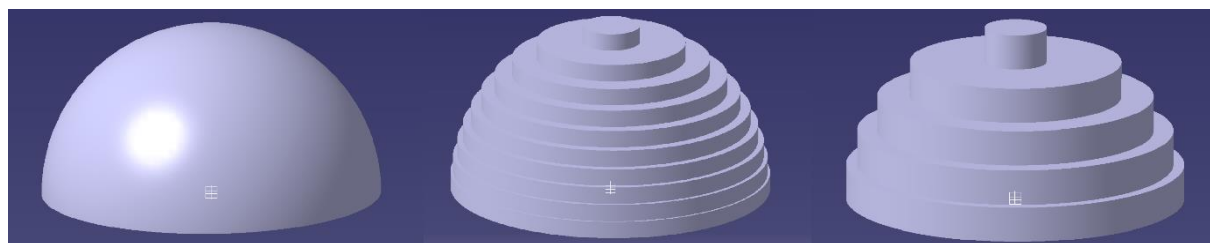
### 3.1.6.5 Přesnost tvarových ploch

Stanovit přesnost tvarových ploch u 3D tisku kovů není jednoduché, neboť do tohoto procesu vstupuje obrovské množství parametrů, které v určitém případě může mít naprosto zásadní vliv a naopak v dalším případě může mít vliv naprosto minimální. Mezi omezující parametry lze zařadit například velikost plochy, orientace, vypodporování součástí, objem atd. Z tohoto důvodu je nutné posuzovat přesnost v konkrétních případech nikoli paušálně.

Jako demonstrativní příklad je možné uvést následující situaci. Jestliže bude tvarová plocha na okraji plnoobjemové součásti, tak bude mít rozdílnou přesnost, než kdyby ta samá plocha byla tvořena skořepinou tloušťky 1,5 mm nebo kdyby ta plocha byla tvořena jen žebrem. Zároveň rozdílnou přesnost by měla ta samá plocha pouze jinak orientovaná, popřípadě jinak vypodporovaná. Významnou roli zde hrají i deformace.

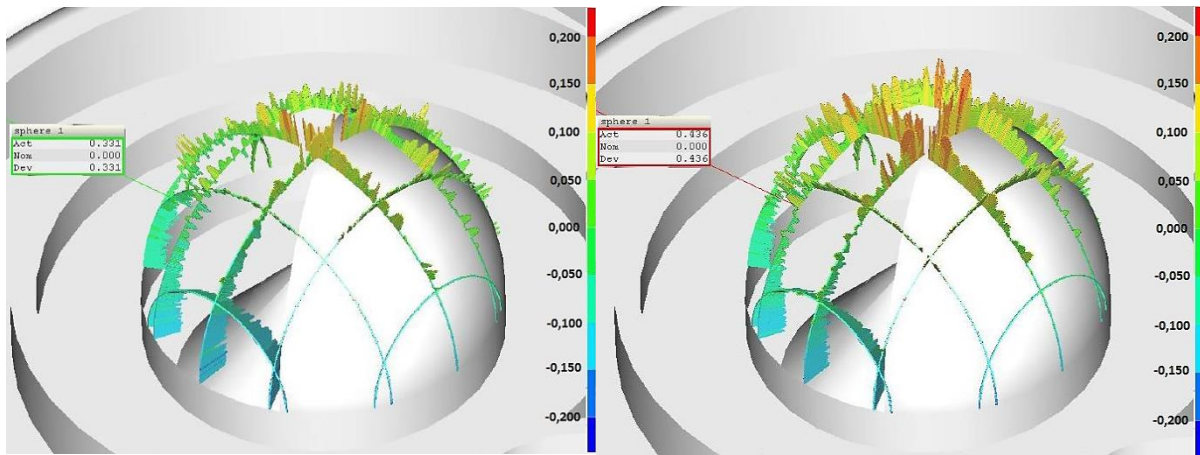
#### 3.1.6.5.1 Kulové plochy

Přesnost tištěných kulových ploch značně ovlivňuje přítomnost neblahého schodišťového efektu. Tento fenomén je detailněji rozebrán v kapitole drsnost. V tomto případě je pouze ukázáno, jak vypadá ideální model polokoule a oproti tomu skutečný model pro tisk složený z jednotlivých vrstev. Jednotlivé vrstvy nejsou schopny vytvořit dokonale spojitou plochu a dochází místo toho k nahrazení schodovitým povrchem. Zásadní vliv v tomto případě má velikost tloušťky vrstvy. V obrázku 61 je demonstrováno, jaký je rozdíl ve skutečném vytištěném dílu, pokud je tloušťka vrstvy například 0,02 mm nebo 0,04 mm. U tohoto demonstrativního příkladu byl zvolen malý průměr kulové plochy pro zvýraznění tohoto efektu. Nejvýrazněji se tento neblahý vliv projeví na vrchlíku koule, kde dochází k velkým rozdílům v tištěných průřezích koule v jednotlivých po sobě jdoucích vrstvách.



Obr. 61 Schodišťový efekt u koule

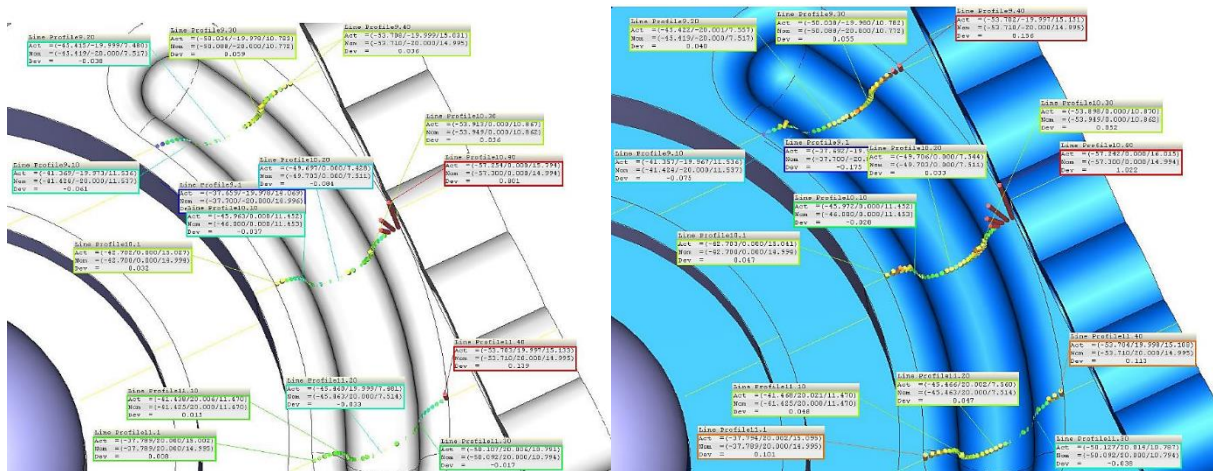
Pro měření polokoulí bylo provedeno celkově 10 řezů, přičemž každý řez obsahoval 500 naměřených bodů. Pět řezů ve směru X a 5 řezů ve směru Y. Na obrázku 62 je možné si prohlédnout odchylky od kulovitosti. Naměřené výsledky potvrdily, že největší odchylka je situována na vrcholek polokoule. Mezi konkurenty byl v tomto případě výrazný rozdíl, neboť tisk pomocí karbonového kartáčku dosáhl hodnoty 0,331 mm a keramickým pravitkem 0,436 mm. Rozdíl mezi hodnotami je tedy více než 100  $\mu$ m.



Obr. 62 Odchylka od kulovitosti Ø 20 mm

### 3.1.6.5.2 Profilová drážka

Profilová drážka byla měřena ve 3 řezech, ale bohužel v prvních dvou řezech došlo k náměru několika hodnot, které jsou diametrálně odlišné a proto výsledná odchylka je ovlivněna touto chybou proto výsledky dosahovaly hodnot odchylky v řádech milimetrů. Kdežto hodnoty u třetího řezu byly naměřeny správně a odchylky karbonového kartáčku jsou v rozpětí 0,277 mm a u keramického pravítka 0,226 mm. Ovšem toto je rozdíl mezi nejvyšší a nejmenší odchylkou, proto když byly porovnány jednotlivé odchylky na obrázku 63, tak se ukázalo, že drtivá většina hodnot u tisku keramickým pravítkem kladnou odchylku pohybující se okolo 50 µm. Kdežto tisk karbonovým kartáčkem má odchylky plusové i minusové téměř vyrovnané. Při porovnání třetího měření, čili náměr na spodní hraně, vychází lépe přesnost u karbonového kartáčku. Vyznačené odchylky jsou v tomto řezu +0,008; +0,015; -0,033; -0,017 a +0,139 mm. Oproti tomu odchylky konkurenta byly +0,101; +0,046; +0,047; -0,039 a +0,113 mm. Na základě těchto hodnot je možné konstatovat, že v tomto případě je tisk karbonovým kartáčkem přesnější. Ale je třeba konstatovat, že u předchozích dvou měřeních řezů drážkou nejsou tyto rozdíly tak markantní, ale lze konstatovat, že tisk karbonovým kartáčkem je blíže nominálnímu řezu drážkou.



Obr. 63 Profil drážky

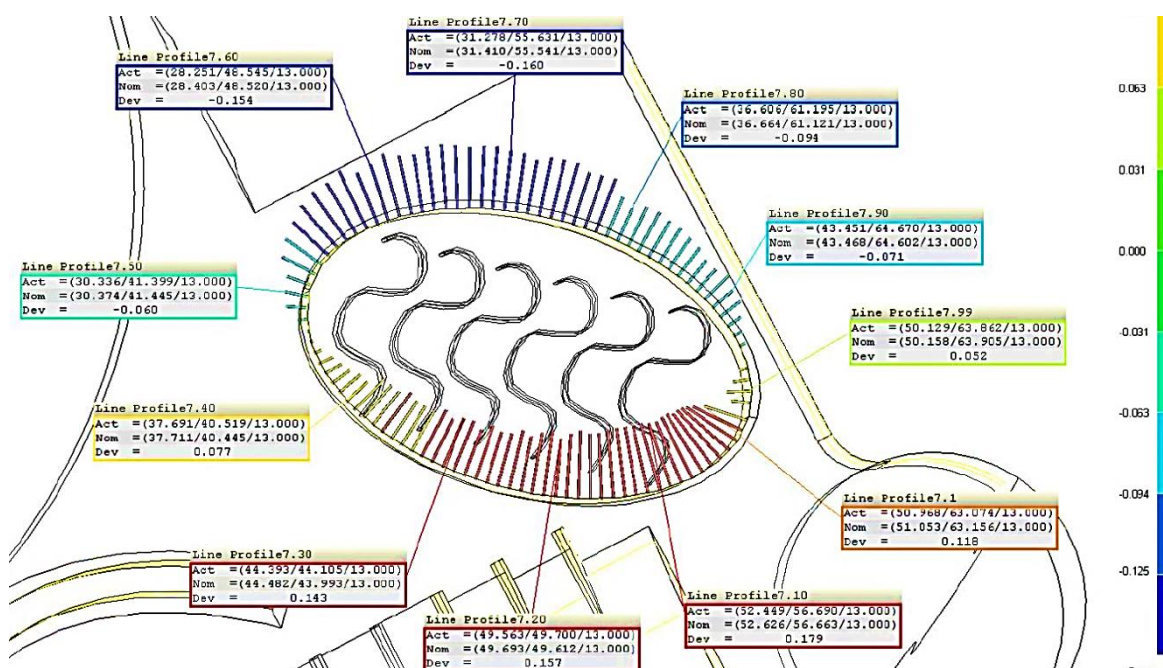
### 3.1.6.5.3 Vnitřní oválný tvar

Další tvarově složitou plochu tvořila kapsa elipsovitého tvaru. Tato kapsa byla měřena ve dvou řezech, příčměz první řez byl ve výšce 3 mm ode dna kapsy a druhý řez byl 2 mm od horní plochy součásti. V tabulce 22 jsou zobrazeny výsledky měření. V tabulce jsou uvedeny hodnoty, které jsou rozdílem nejvyšší a nejnižší odchylky od profilu.

Tab. 22 Rozdílů odchylek

Měření	Rozdíl max.odchylek	
	Ker.	Kar.
1	0,348	0,37
2	0,392	0,42

Z tabulky hodnot je patrné, že odchylka, ve skutečnosti rozdíl odchylek, je opravdu velká a dosahuje hodnot od 348 až 0,420 mm. Mezi prvním a druhým řezem je téměř totožný rozdíl u obou konkurentů, a to cca 0,045 mm. Vyšší odchylka byla naměřena u druhého, který byl situován blíže k povrchu součásti. Menších odchylek dosahuje eliptický tvar vytištěný pomocí keramického pravítka, a to v obou případech přibližně o 0,030 mm.

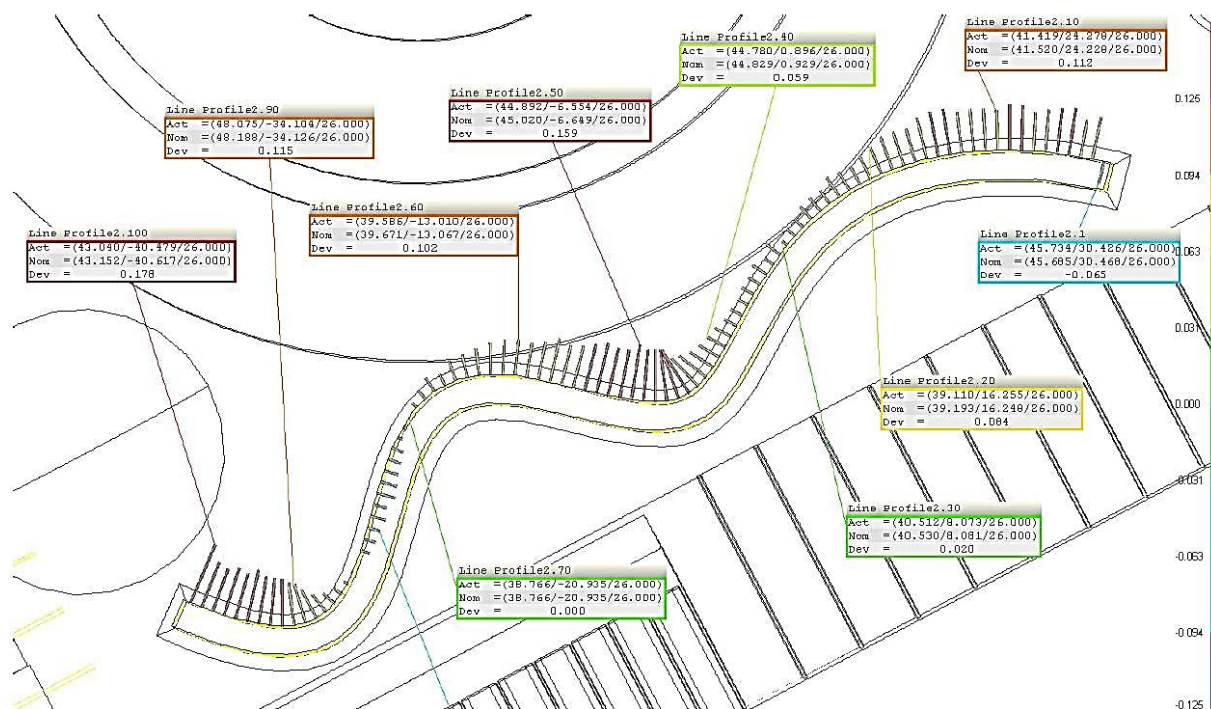


Obr. 64 Elipsovitá kapsa – Kar. 1

Ovšem při konfrontaci odchylek s modelem, jak je vidět na obrázku výše, skutečné odchylky vykazují známky určitého trendu. Odchylky mají přibližně stejnou absolutní hodnotu na protějších stranách elipsy, ovšem samozřejmě mají opačný smysl, neboť na jedné straně je kladná odchylka od modelu a na druhé straně záporná. Kdyby se vrcholy jednotlivých odchylek propojily, tak by vytvořily velice podobnou elipsovitou plochu jen s posunutým středem. Posunutí středu elipsy je přibližně o 0,1 mm. Tento trend se projevil u obou tisků.

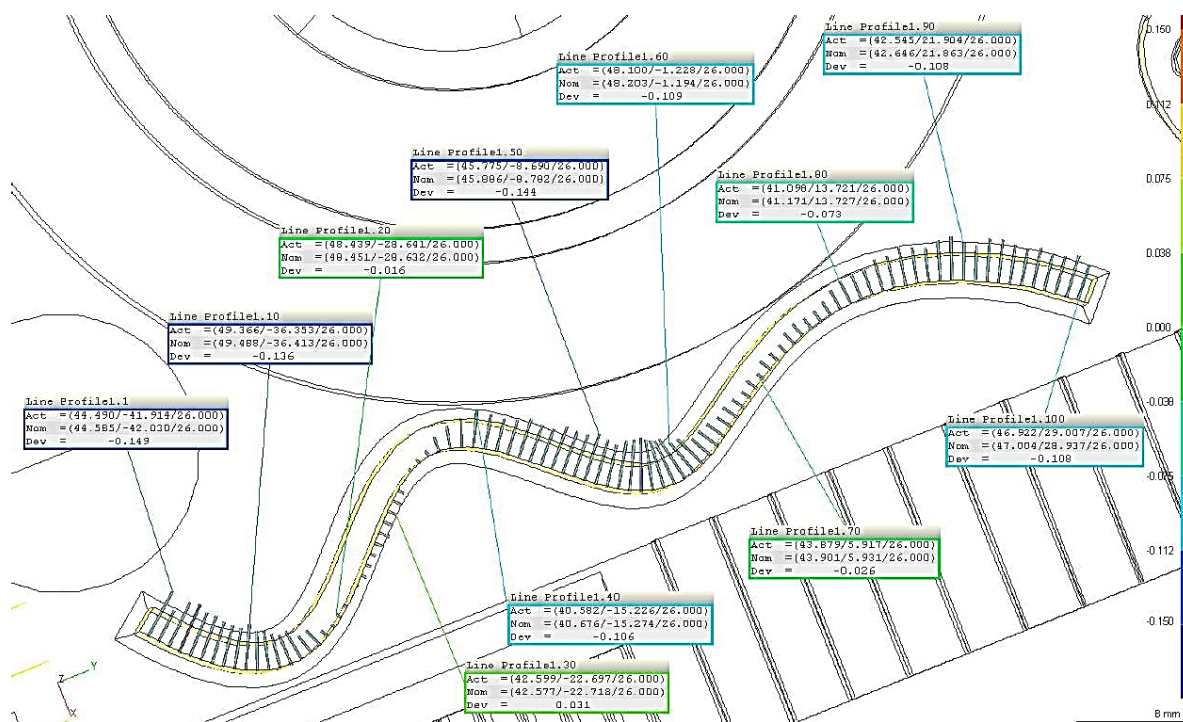
#### 3.1.6.5.4 Tenké žebro

Jak již bylo několikrát zmíněno, přesnost tvarových ploch je u 3D tisku závislá na mnoha faktorech a jedním z nich je právě objem materiálu. V tomto případě se jednalo o tvarové žebro o výšce 8 mm a tloušťce 1,5 mm. Žebro bylo změřeno ve třech řezech z obou stran a odchylka mezi jednotlivými řezy byla v řádech mikrometrů. Jak je na obrázku 65 vidět, tak odchylky jsou převážně kladného charakteru a nejvyšší odchylka dosahuje hodnoty + 0,159 mm a největší záporná odchylka je - 0,041 mm. První a koncová hodnota mohou být zkresleny, proto byly z vyhodnocení vyřazeny.



Obr. 65 Pravá strana vlnovce - kar.

Pro porovnání je zde přiložen obrázek z měření levé strany žebra. Na tomto obrázku je patrné, že odchylky levé strany téměř kopírují odchylky z pravé strany, jen mají opačný charakter, neboť oproti modelu dosahují záporných hodnot. Odchylky se liší maximálně do 45  $\mu\text{m}$ .



Obr. 66 Levá strana - kar.

I v druhém případě se odchylky pravé a levé strany více méně shodovaly a zároveň tloušťka žebra odpovídala modelu. Z toho je tedy možné usuzovat, že tento díl byl vlivem pnutí zdeformován a tím došlo k vychýlení, neboť se jedná o tvarově složitý tenkostěnný díl. Vychýlení má velikost přibližně 0,085 mm.

Mezi tiskem keramickým pravítkem a karbonových kartáčkem byl minimální rozdíl, ovšem je možné konstatovat, že velikost odchylek u většiny měřených bodů byla u keramického pravítka nižší. Hodnoty se maximálně lišily do 35  $\mu\text{m}$ .

### 3.1.6.6 Komplexní měření tvarové plochy

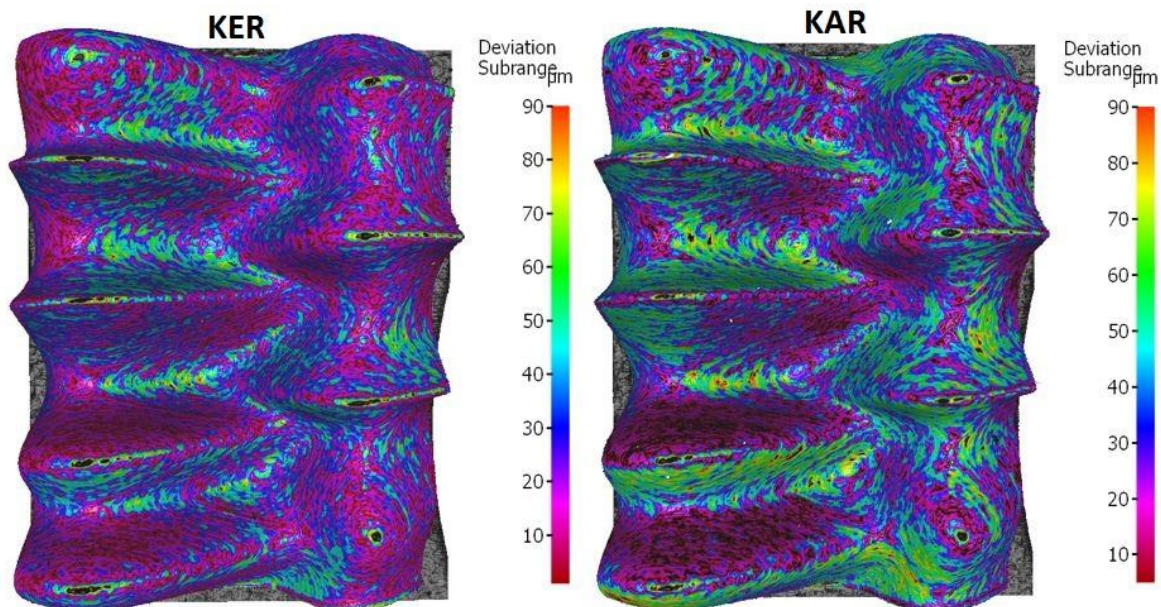
Jak již bylo řečeno, pro měření tvarové plochy označené v modelu číslem 15 byl použit opticko-skenovací mikroskop IFM G4. Toto zařízení je schopné měřit s přesností na 0,0001mm. Zařízení slouží pro optické skenování povrchu a následné vyhodnocení jednotlivých parametrů povrchu. Například k hodnocení jednotlivých druhů drsností povrchu. Další užitečnou funkcí, kvůli které bylo zařízení využito pro měření, je diferenční analýza. Diferenční analýza se s výhodou používá pro porovnání skutečného povrchu s referenčním modelem nebo je možné porovnávat naskenované povrchy mezi sebou. Na obrázku 67 je znázorněno měření na tomto zařízení. Pro měření byl použit objektiv s 5ti násobným zvětšením, protože byla potřeba široká hloubka ostrosti z důvodu velkého rozdílu mezi nejvyšším a nejnižším místem měřeného modelu.



Obr. 67 Měření na IFM G4

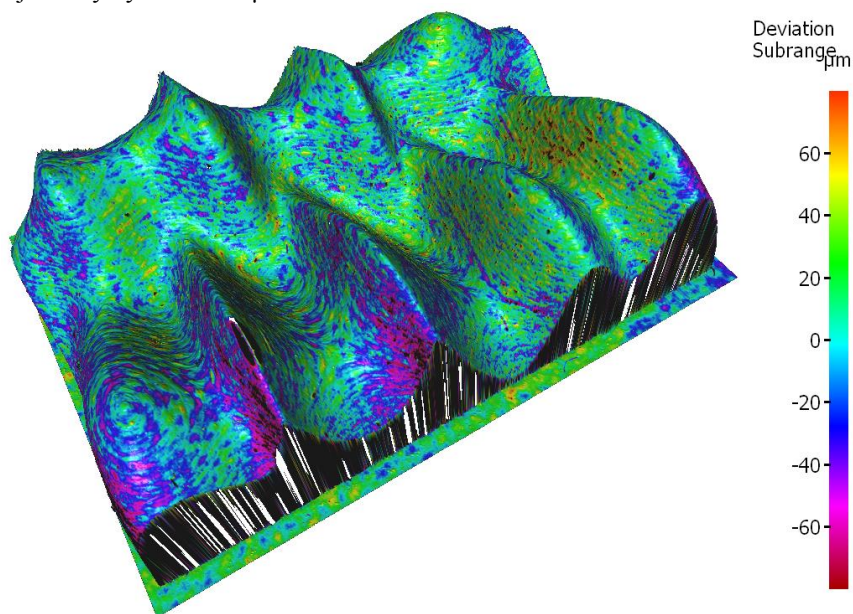
Výsledky měření jsou pro názornost vyjádřeny pomocí diferenční analýzy. Obrázek vlevo ukazuje výsledky vytištěné keramickým pravítkem v porovnání s referenčním modelem. Na barevné škále je zřetelně identifikovatelné, jaká odchylka je v daném místě. Měřítka barevného spektra bylo zvoleno v rozmezí 0 až + 90  $\mu\text{m}$  pro obě měřené varianty. Jak už měřítko naznačuje, tak všechny odchylky od referenční plochy modelu jsou kladného charakteru. U plochy (KER) převládají plochy fialové až modré, což na barevné škále odpovídá odchylce v rozmezí + 15 až + 40  $\mu\text{m}$ . Dále jsou zde patrná místa, především v údolí mezi vrcholky, která jsou světle zeleně zbarvena, což odpovídá odchylce okolo + 60  $\mu\text{m}$ . Na vrcholcích plochy je možné si povšimnout černých míst. Toto značí, že tato místa jsou buďto špatně naskenována, nebo jsou mimo zvolené měřítko. V tomto případě se jedná o místa, jež mají zápornou odchylku s maximální velikostí - 20  $\mu\text{m}$ . U plochy (KAR) převládá modro zelená barva, jež značí, že odchylky nabývají vyšších hodnot, a to v rozmezí + 40 až + 70  $\mu\text{m}$ . Ovšem je nutné konstatovat, že reliéf povrchu je zde téměř totožný s plochou KER, jsou pouze vůči sobě posunuty o několik desítek mikrometrů.





Obr. 68 Porovnání s modelem

Pro porovnání odchylek vytištěných ploch vůči sobě byla vytvořena diferenční analýza povrchů po tisku. Nejprve byl vložen povrch vytvořený keramickým pravítkem a jako druhý byl vložen povrch vytvořený karbonovým kartáčkem, čili referenční povrch byl vytvořen keramickým pravítkem. Z barevné škály je patrné, že zde nejsou žádné výraznější rozdíly. Nejpočetnější zastoupení mají plochy zbarvené do světle modré a světle zelené barvy, což demonstruje odchylku okolo hodnoty  $\pm 20 \mu\text{m}$ . V levé dolní části jsou plochy zbarvené do světle fialové, zde je odchylka se zápornou hodnotou okolo  $50 \mu\text{m}$ . Ovšem je potřeba říci, že tyto plochy jsou pod velkým úhlem, kde není ideální viditelnost vzhledem k orientaci součásti při měření, takže tato místa jsou spíše informativní. Jsou zde i černá místa, jež značí nenaskenovaný povrch, čili prázdná místa v modelu. Souhrnně lze říci, že odchylka mezi naskenovanými povrchy se pohybuje v rozmezí  $-30$  až  $+30 \mu\text{m}$ , přičemž nejvyšší četnost mají odchylky  $0$  až  $+20 \mu\text{m}$ .



Obr. 69 Porovnání tisků

### 3.1.7 Drsnost povrchu

Nejen tvarová přesnost je nejdůležitějším parametrem, který ovlivní možnost využití 3D tisku pro danou aplikaci, ale velice důležitým parametrem z hlediska kvality ploch je také jejich drsnost. Kvalita vytištěné plochy je závislá především na třech faktorech. Za předpokladu, že budou použity standardní procesní parametry doporučené výrobcem. Prvním faktorem je tloušťka vrstvy použitá při tisku. Při použití menší tloušťky spékaného materiálu dosahuje drsnost povrchu lepších hodnot, neboť průřez tištěné plochy se více přibližuje modelu, jak je naznačeno v kapitole kulové plochy. Druhým faktorem je nutnost použití podpěrných struktur. Jestliže je nutné použít podpěrných struktur, tak dochází k pevnému propojení dané plochy podpěrnou strukturou, jak bylo popsáno v kapitole Části podpor. Ovšem při odstraňování podpěrných struktur zůstávají na dané zbytky podpěrných struktur, jež významně ovlivňují drsnost plochy. Téměř vždy je nutné zbytky podpor odstranit nebo plochu obrobit. Posledním a opravdu velice důležitým faktorem je orientace dané plochy vůči stavební platformě. Tento vliv byl podroben důkladnému zkoumání a bude rozebrán na následujících stránkách.



Obr. 70 Povrchy - leštěný, po tisku pískovaný + podpory [35]

Pro experimentální zjištění vlivu orientace součásti vůči stavební platformě na drsnost součásti byly vzorky rozděleny na dvě sekce. Pro obě sekce bylo použito stejného měřicího zařízení a stejných parametrů. Měření drsnosti bylo provedeno na přístroji Hommel Etamic T8000, který byl osazen snímačem TKU 300. Měřená délka  $L_t$  byla 4,8mm a rychlost posuvu 0.50 mm/s. Jednotlivé průběhy v sobě obsahují 2400 naměřených hodnot. Měření a vyhodnocení proběhlo v souladu s normou ČSN EN ISO 4287. Jak bylo v teoretické části zmíněno, díl je stavěn různými sety a podsety parametrů. Drsnost povrchu ovlivňují především podsety parametrů downskin a upskin. V první sekci byly zkušební vzorky vytištěny pouze pomocí parametrů upskin a druhá sekce byla optimalizována tak, aby bylo možné tisknout oběma podsety parametrů na jednom vzorku.

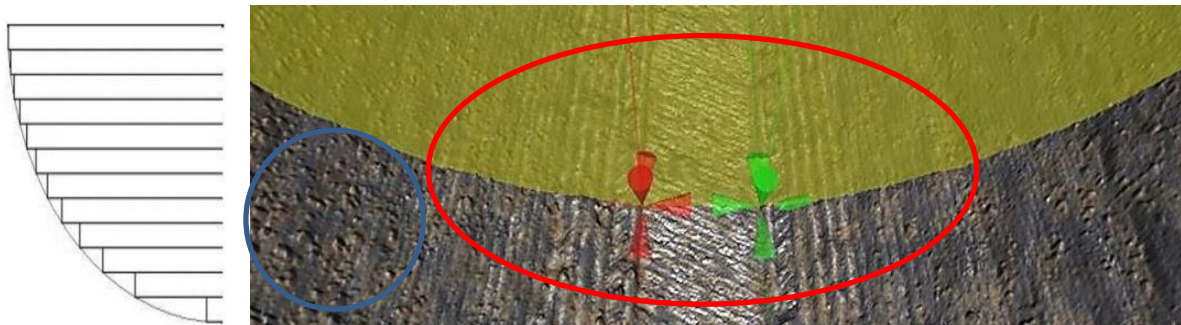
#### 3.1.7.1 Úhly $2^\circ$ - $32^\circ$

První oblast byla tvořena nakloněnými rovinami od  $2^\circ$  do  $32^\circ$ . Tato oblast je vyobrazena na obrázku 71. Oblast byla navržena pro měření drsnosti pouze svrchní strany, neboť doporučený minimální úhel, který je možné bezpečně stavět bez podpor, je  $45^\circ$ .



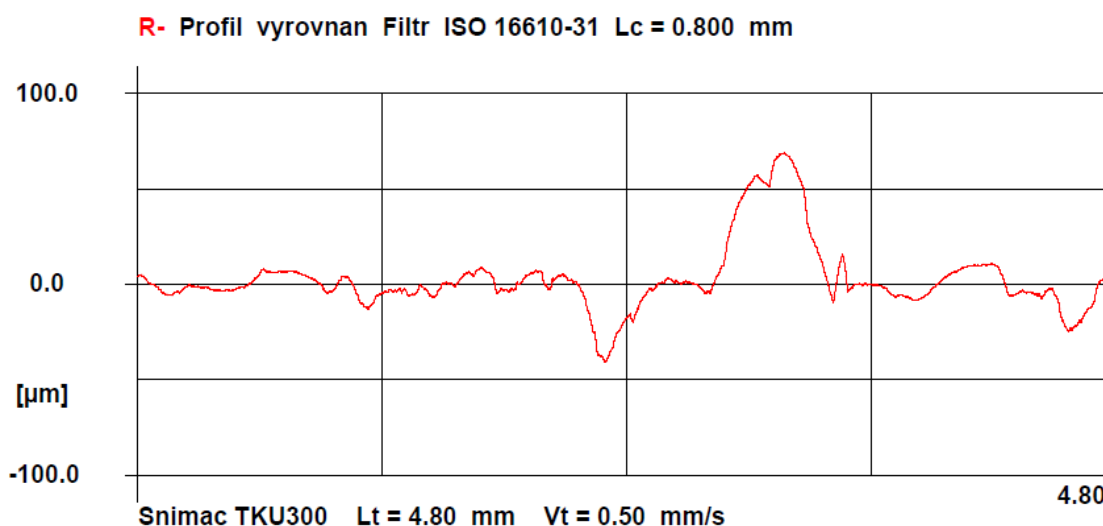
Obr. 71 Měřený vzorek

Na obrázku jsou zřetelně vidět rozdíly v drsnosti prvních dvou vzorků vůči ostatním. Tato skutečnost je způsobena schodišťovým efektem. Schodišťový efekt vychází z principu technologie 3D tisku, kdy díl je stavěn vrstvu po vrstvě, přičemž tloušťka vrstvy je vždy stejná. Tento defekt se nejvýrazněji projevuje při tisku ploch skloněných pod velmi malým úhlem a je patrný u tisku děr s horizontální osou nebo u tisku kulových ploch. Tento efekt neblaze ovlivňuje nejen drsnost povrchu ale i geometrickou přesnost, jak je vidět na obrázku 72. Nejvýrazněji ovlivněná oblast je vyznačena červeným oválem.



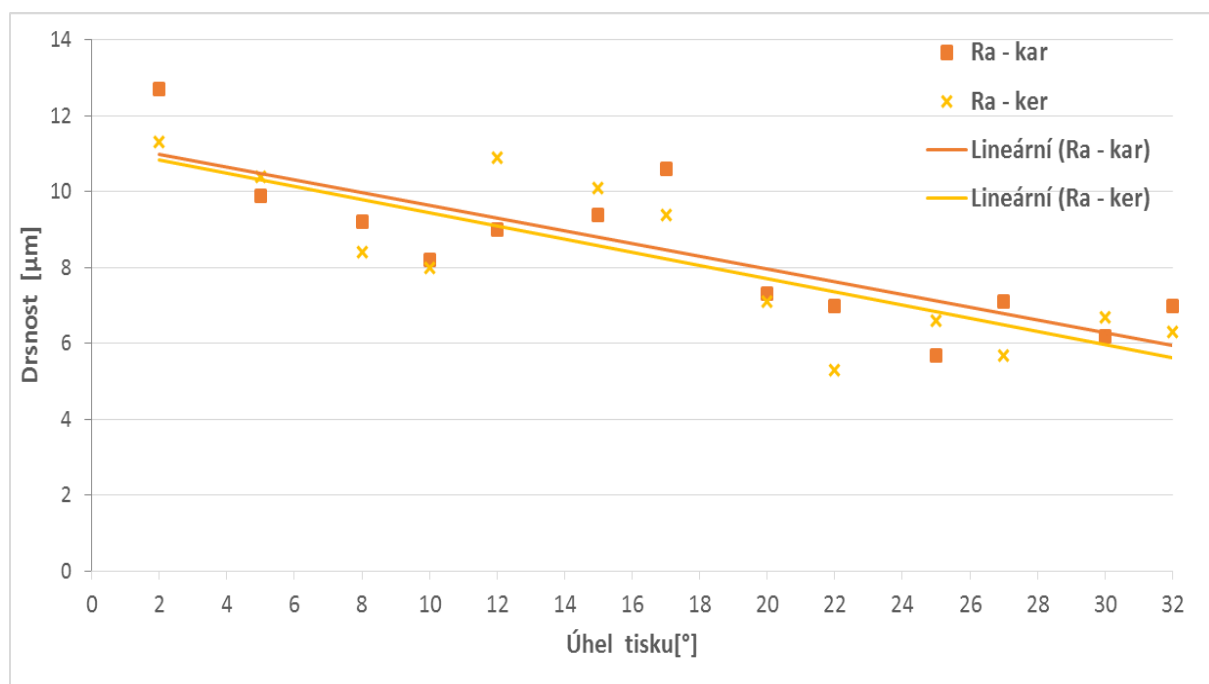
Obr. 72 Schodišťový efekt [26],[37]

Neblahý vliv schodišťového efektu na drsnost povrchu potvrdilo měření. Průběh z měření drsnosti na nakloněné rovině skloněné pod úhlem  $2^\circ$  je vyneseno do obrázku 73. V průběhu je zachycena oblast přechodu z jednoho schodu na druhý. Z celého průběhu je zřetelné, že mimo přechodovou oblast se drsnost pohybuje v rozmezí  $\pm 25 \mu\text{m}$ , ale přechodová oblast celkovou drsnost výrazně zhorší.



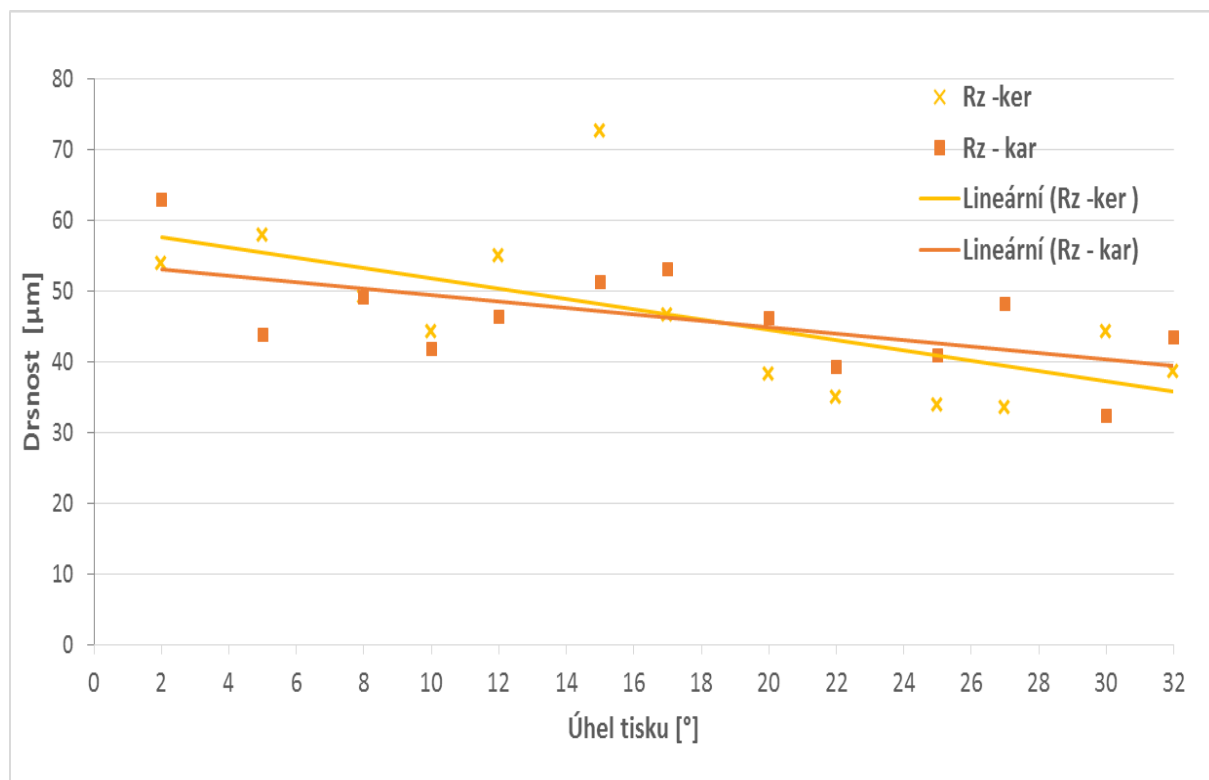
Obr. 73 Průběh  $2^\circ$  Kar

Všechny hodnoty drsnosti  $R_a$  byly vyneseny do grafu v obrázku 74. V grafu jsou vyneseny body a směrnice bodů. Drsnost od  $2^\circ$  do  $10^\circ$  náklonu tisknuté plochy má tendenci klesat na hodnotu  $R_a 8 \mu\text{m}$  u obou druhů nanášecích elementů. Ovšem v rozmezí  $10^\circ$  až  $20^\circ$  dochází k výraznému zhoršení drsnosti. Od  $20^\circ$  do  $32^\circ$  se hodnota drsnosti přibližuje hodnotě  $R_a 6 \mu\text{m}$ . Je možné konstatovat, že drsnosti v závislosti na použití rozdílného druhu nanášecího elementu se od sebe nikterak výrazně neliší.

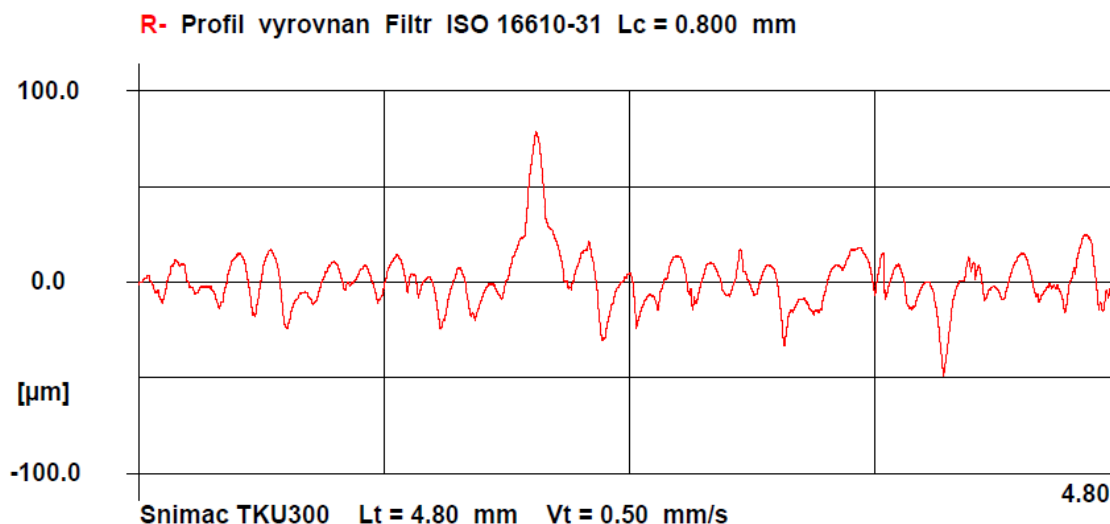


Obr. 74 Drsnost Ra 2°- 32°

Oblast 10° až 20° náklonu tisknuté plochy již není tak výrazně ovlivněna schodišťovým efektem, ovšem v této oblasti dochází ke tvorbě výrůstků, jak je znázorněno v obrázku 72 modrou barvou, čímž dochází k významnému zhoršení drsnosti. Vyšší vypovídající hodnotu z hlediska velikostí nerovností a podílu nosné plochy má hodnota drsnosti Rz. Hodnota drsnosti Rz se skládá z pěti hodnot lokálních rozdílů mezi nejvyšším vrcholem a nejnižším bodem v daném intervalu [36]. Tento parametr lépe reprezentuje skutečnou hodnotu drsnosti dané plochy. Výsledky parametru drsnosti Rz ještě více zvýraznily zhoršení drsnosti v oblasti 10° až 20°. Jak už bylo výše uvedeno, dochází k nim z důvodu vzniku výrůstků.



Obr. 75 Drsnost Rz 2°-32°



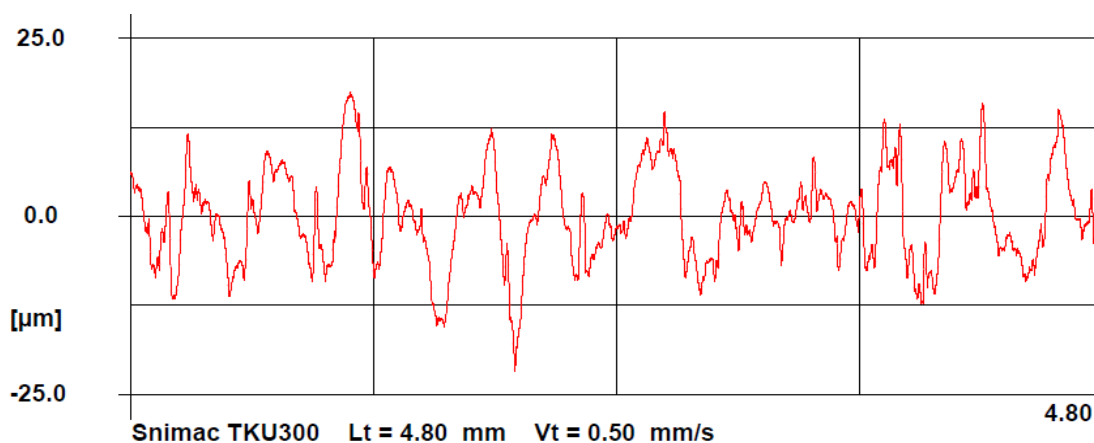
Obr. 76 Průběh drsnosti 15° Ker

### 3.1.7.2 Úhly 35° - 85°

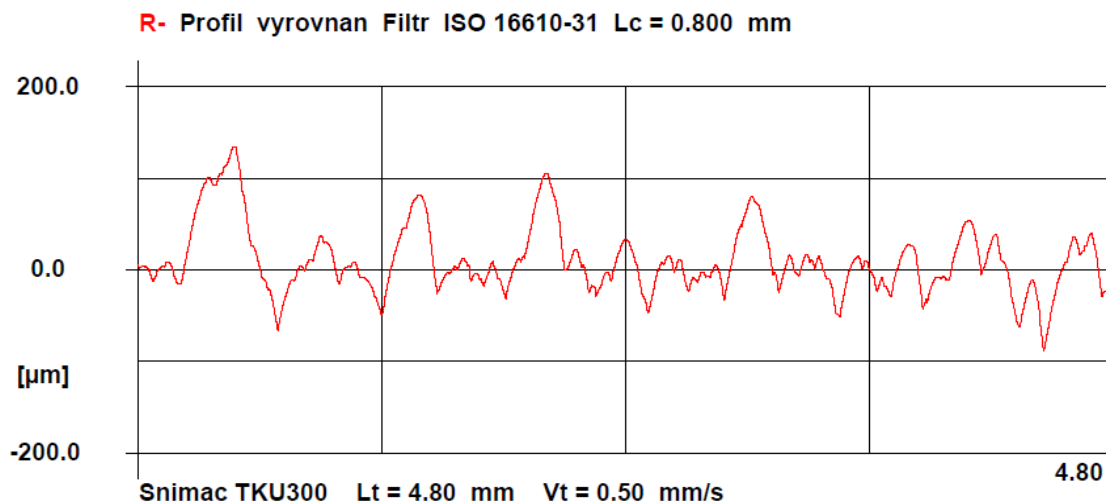
Tato oblast nakloněných vzorků pro měření drsnosti jednotlivých úhlů tisku byla optimalizována tak, aby bylo možné měřit drsnost stejného úhlu z vrchní a zároveň i ze spodní strany. Tímto způsobem bylo možné porovnat, jak se mění drsnost dílu v závislosti na úhlu stavění a zároveň na tom, jestli je daná plocha na spodní nebo vrchní straně dílu.

Všeobecně je známé, že bez podpůrných struktur je možné bezpečně tisknout díly pod úhlem 45° vůči stavební platformě. Ovšem bez podpěrných struktur je možné tisknout i menší úhly, ale dochází zde k výraznému zhoršení přesnosti a drsnosti povrchu. Dochází k tomu kvůli špatnému odvodu tepla vzhledem k absenci podpěrných struktur, které v tomto případě mají sloužit nejen jako podpěra pro stavbu plochy ale i jako vodič tepla. Samozřejmě záleží na velikosti a orientaci dané plochy. Pro ověření tvrzení, že je možné tisknout plochy skloněné pod menším úhlem nežli 45° bez podpěrných struktur, začínaly zkušební vzorky na hodnotě úhlu 35°. Vzorky v rozmezí 35° až 50° byly skloněny po 1° a dále vzorky byly odstupňovány pod 5°. Poslední vzorek končil hodnotou náklonu 85°. Všechny tyto vzorky mají dvě strany, kdy pro měření byla označena svrchní strana písmenem A a spodní písmenem B.

Na obrázcích 77 a 78 jsou znázorněny průběhy drsností, které dosáhly nejnižší a nejvyšší hodnoty drsnosti. První průběh dosáhl drsnosti Rz 28,3 µm (Ra 5,3 µm), na průběhu je vidět, že hodnoty jsou velice konzistentně distribuovány. Jedná se o vzorek tištěný pod úhlem 70° pomocí keramického pravítka. Téměř všechny píky mají hodnotu okolo ± 12 µm, přičemž měřítko grafu je ± 25 µm. Oproti tomu nejhorší drsnosti dosáhl vzorek tištěný po úhlem 43° měřený ze spodní strany vzorku, čili strana B. U tohoto vzorku byla naměřena drsnost Rz 152,4 µm (Ra 26,9 µm). V tomto průběhu má drtivá většina výrazných odchylek od nulové hodnoty kladnou hodnotu, kdy nejvyšší pík má hodnotu okolo 135 µm. Možná se na první pohled zdá, že při porovnání těchto dvou průběhů je první průběh výrazně horší, ovšem je potřeba zohlednit měřítko grafu, neboť druhý graf má 8x větší měřítko.

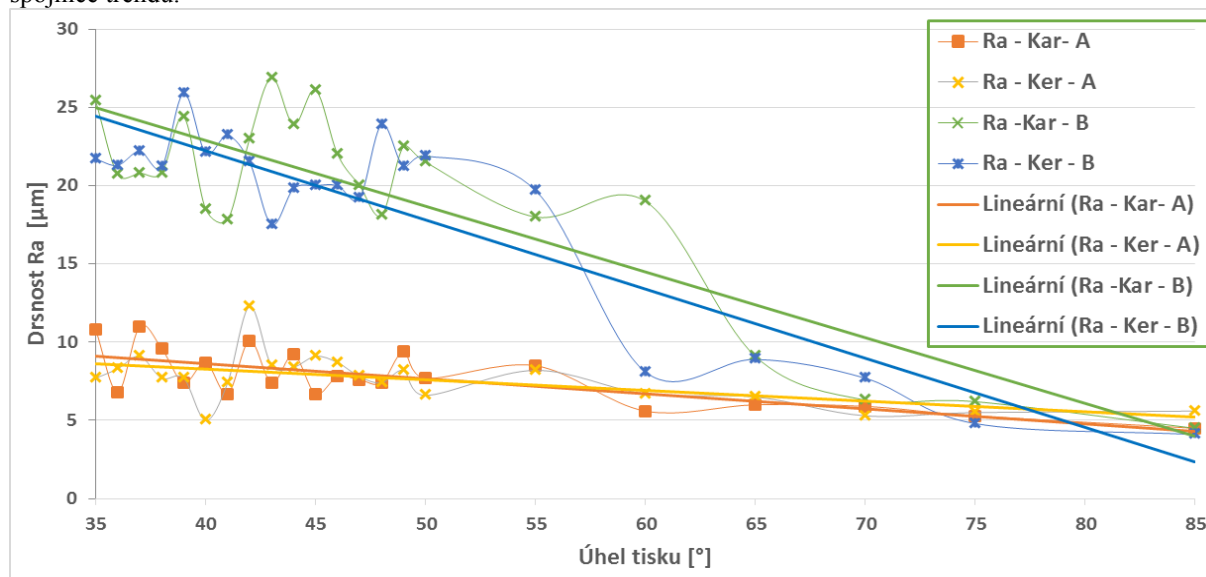


Obr. 77 Průběh keramika 70° - nejnižší drsnost



Obr. 78 Průběh  $43^\circ B$  - Kartáček - nejvyšší drsnost

Naměřené hodnoty drsnosti z obou stran vzorků byly vyneseny do grafu v obrázku 79. V grafu jsou jednotlivé body proloženy slabou křivkou, **ovšem nejedná se o spojitou funkci drsnosti**, jen toto zobrazení více přispívá ke zpřehlednění grafu. Toto platí pro oba grafy drsnosti s proloženými body. Opět jsou zde vykresleny i spojnice trendů.



Obr. 79 Drsnost Ra  $35^\circ$ - $85^\circ A, B$

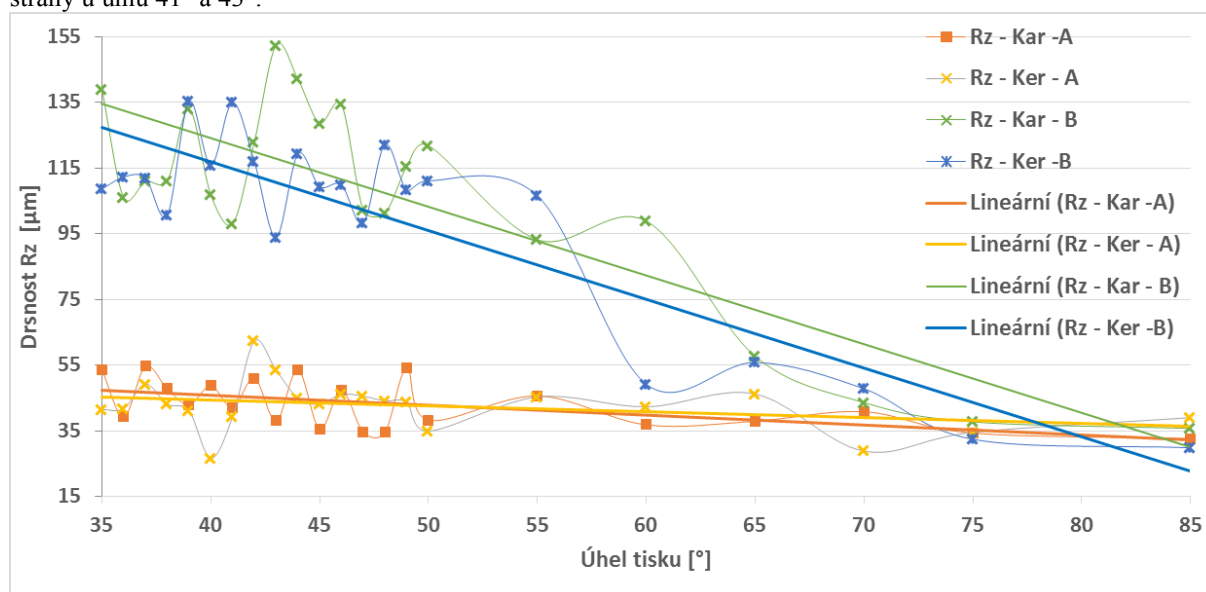
Na první pohled je patrné, že je velmi výrazný rozdíl v drsnosti spodní a svrchní strany vzorků. Přibližně do hodnoty náklonu tištěné plochy  $65^\circ$  má markantně horší drsnost spodní strana vzorku (strana B) bez ohledu na použitý element nanášení. Spodní strany vzorků vykazují velmi špatný povrch, kdy většina naměřených hodnot drsnosti Ra vykazuje vyšší hodnotu než  $20 \mu\text{m}$ . Jak již bylo výše zmíněno, nejhorší drsnosti dosáhl vzorek tištěný po úhlem  $43^\circ$  a to Ra  $26,9 \mu\text{m}$ . Průměrná hodnota drsnosti se pohybovala okolo hranice  $22 \mu\text{m}$ .

V intervalu úhlů  $43$  až  $46$  je možné pozorovat rozdílné hodnoty drsnosti v závislosti na použitém nanášecím elementu. Vzorky vytištěné pomocí keramického pravítka vykazují hodnoty drsnosti okolo hranice  $20 \mu\text{m}$ , kdežto vzorky tištěné pomocí karbonového kartáčku dosahují hodnot okolo hranice  $25 \mu\text{m}$ . Je třeba konstatovat, že tento trend se vyskytl pouze u spodní strany vzorků. Dále se zde vyskytla dvě místa, kde byla drsnost výrazně horší u tisku pomocí keramického pravítka, a to u úhlů  $40, 41$  a  $48$ . V těchto místech byla drsnost výrazně horší, a to o více než  $4 \mu\text{m}$ . Ovšem nejvyšší rozdíl drsností byl naměřen na vzorku skloněném pod úhlem  $60^\circ$ . Hodnota drsnosti u tohoto úhlu byla enormně rozdílná, a to o více než  $10 \mu\text{m}$ , kdy lepší drsnosti, a to  $8,1 \mu\text{m}$  dosáhl tisk pomocí keramického pravítka, kdežto konkurent dosáhl drsností  $19 \mu\text{m}$ . Okolo úhlu  $60^\circ$  je přechodová oblast, kde dochází ke skokovému zlepšení drsnosti, neboť hodnoty drsností u obou konkurentů se u hodnoty  $55^\circ$  a  $65^\circ$  téměř shodují. Od hodnoty  $65^\circ$  se drsnosti spodní strany dostávají pod hranici  $8 \mu\text{m}$  a výrazně klesají až pod  $5 \mu\text{m}$  při  $85^\circ$ . Od úhlu  $75^\circ$  se drsnosti spodní a svrchní strany přibližně vyrovnávají.

Drsnost u svrchní strany vzorků, nevykazovala tak obrovské rozdíly, jako spodní strana. Zde se drsnost Ra pohybovala v rozmezí 12,3  $\mu\text{m}$  až 4,5  $\mu\text{m}$ . Nejvýraznější rozdíl mezi hodnotami byl naměřen na vzorku tisknutým pod 40°, a to 3,5  $\mu\text{m}$ , přičemž lepší hodnoty dosáhl tisk keramickým pravítkem, a to 5  $\mu\text{m}$ . Z výsledků není patrné, že by se výsledky jednotlivých nanášecích elementů výrazně odlišovaly a bylo by možné konstatovat, že jeden z konkurentů dosahuje lepších výsledků. Pásma, kdy je drsnost lepší u jednoho a následně zas u druhého z konkurentů, je možné sledovat, ale nejsou nikterak významná.

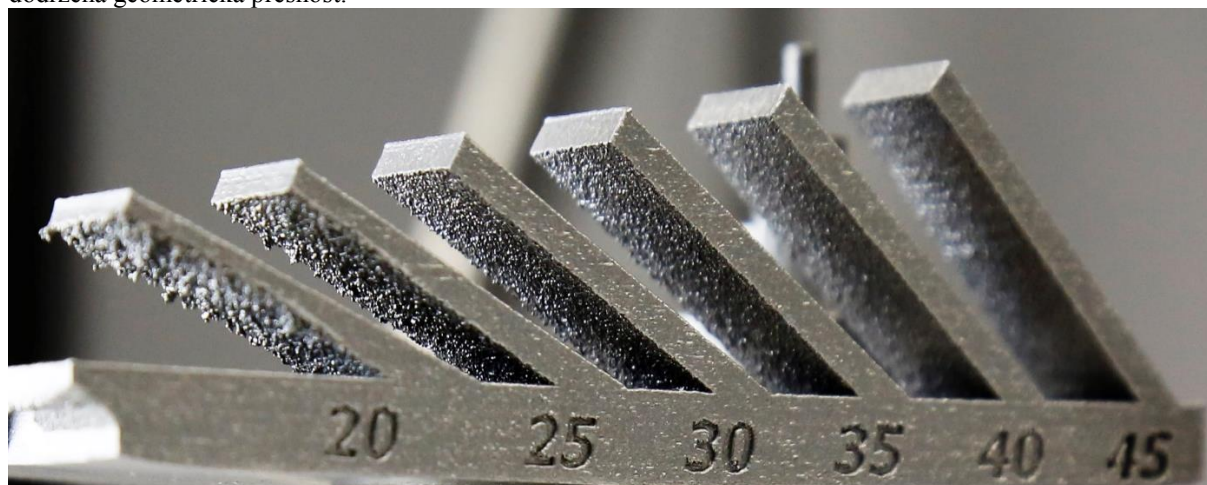
K nejvýraznějšímu poklesu hodnot drsnosti došlo od úhlu tisku 55°, a to z hodnoty 8  $\mu\text{m}$  na cca 5  $\mu\text{m}$ , které dosahují vzorky při úhlu tisku 85°.

Graf s drsností Rz všechny tyto trendy potvrdil a v některých případech je zvýraznil jako například u spodní strany u úhlů 41° a 43°.



Obr. 80 Drsnost Rz 35° - 85°A,B

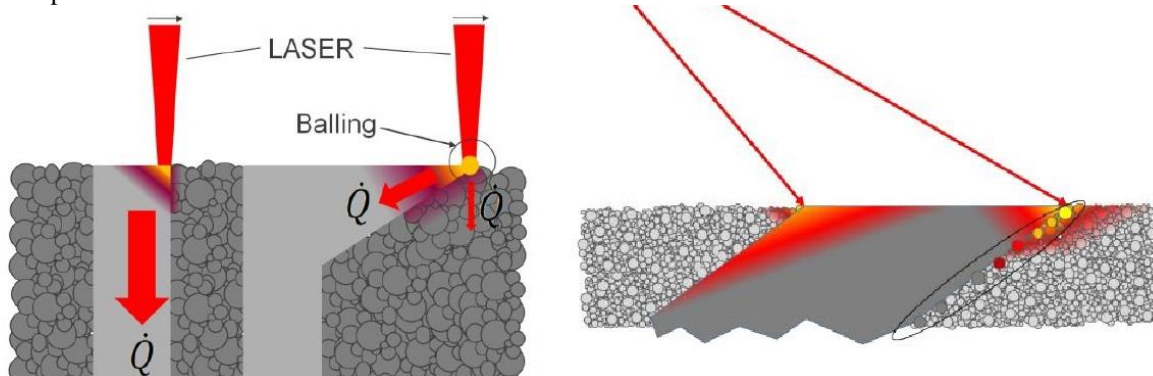
Tvrzení, že drsnost tištěného povrchu bez použití podpor je ze spodní strany dílu do určitého úhlu velice špatná a zároveň, že se nejedná pouze o výjimečnou situaci, která se vyskytla během tohoto experimentu, potvrzuje obrázek 81. Tento obrázek ukazuje testovací vzorek pro ověření drsnosti spodní strany (downskin) bez použití podpěrných struktur. Tento vzorek byl vytištěn z materiálu MS1 a na tiskárně EOS M290, čili za stejných podmínek. V publikaci [30] je uvedeno, že povrch spodní strany vzorků je velice špatný a na základě provedených experimentů je možné tisknout plochy skloněné vůči platformě o více než 30° až 35°. Ovšem je zde podotknuto, že **drsnost spodní plochy je stále velice špatná a pohybuje se okolo hodnoty Ra 20  $\mu\text{m}$ , což potvrzuje výsledky provedeného experimentu v rámci DP.** Na obrázku 81 je možné si také povšimnout, že u ploch skloněných pod úhlem 20° a 25° má spodní plocha opravdu velice špatný povrch a zároveň zde není dodržena geometrická přesnost.



Obr. 81 Drsnost spodní strany [30]

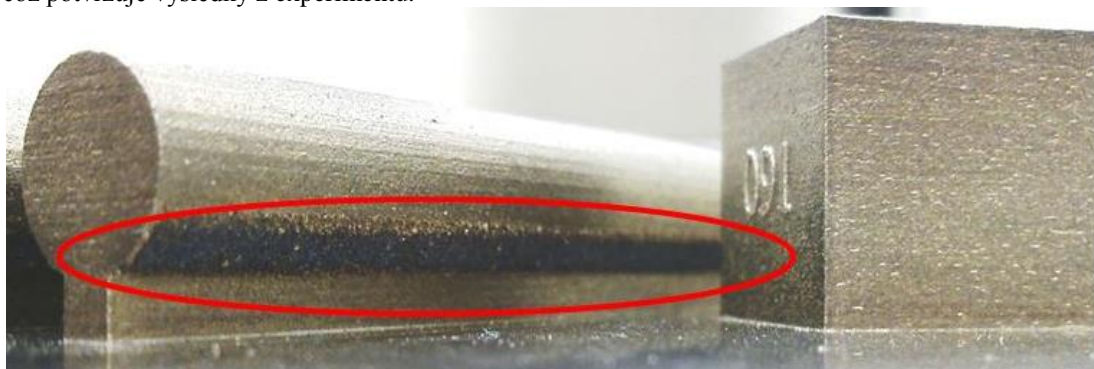
Rozdílné drsnosti na svrchní straně a spodní straně dílu popisuje publikace [31], ovšem tato publikace je zaměřena všeobecně na různé druhy tištěných materiálů. Zde je též potvrzen významný rozdíl v drsnosti ploch na svrchní a spodní straně a také je zde zmíněno, že při určitém úhlu náklonu se drsnosti vyrovnají.

Špatný povrch na spodní straně vzniká kvůli velké akumulaci tepla, které je z těchto míst špatně odváděno, neboť pod převislým koncem je pouze práškové lože, jak již bylo zmíněno výše. Pokud teplo není odvedeno dílem do stavební platformy, dochází k lokálnímu přehřátí a natavování kuliček prášku na tištěný díl. Tento efekt se nazývá Balling a typicky se vyskytuje u převislých konců [34]. Obrázek 82 demonstruje odvod tepla u rovné stěny se stěnou s převislým koncem a dále je znázorněno vedení tepla u horní a spodní strany převislého konce. Na těchto obrázcích je vysvětleno, proč na spodní straně převislého konce dochází k výraznému zhoršení drsnosti povrchu.



Obr. 82 Odvod tepla [34]

Pro názorné potvrzení, že existuje přechodová oblast změny drsnosti, slouží obrázek 83, který zachycuje vytištěnou tyčku průměru 10 mm a délky 100 mm. Tato tyčka je podporována plno-objemovou podporou do úhlu naklonění tištěné plochy 45°. Uprostřed vyznačeného místa na obrázku je zřetelně vidět velice špatný povrch na spodní straně dílu. Je zde zřetelně identifikovatelná přechodová oblast, kdy dochází k výraznému zlepšení drsnosti v určitém úhlu naklonění plochy vůči stavební platformě. Tato oblast má určitý interval a při proměření náklonu jednotlivých ploch válce vůči platformě byla tato oblast přechodu identifikována okolo úhlu 60°, což potvrzuje výsledky z experimentu.



Obr. 83 Přepálený povrch



## 3.2 Závěr z experimentálního porovnání keramického pravítka a karbonového kartáčku

Díly a vzorky vytištěné pomocí keramického pravítka a karbonového kartáčku byly hodnoceny z několika kritérií a byl zde zkoumán vliv nanášecího elementu. Mezi zásadní kritéria byly vybrány následující - mechanické vlastnosti – statická zkouška tahem, zkouška vrubové houževnatosti, zkouška cyklického zatížení, pórovitost, metalografie, přesnost a drsnost.

Z hlediska mechanických vlastností při statickém zatížení lze konstatovat, že vytištěné vzorky oběma konkurenty dosahují identických výsledků a není zde žádný rozdíl v žádné z měřených veličin. **Těmito zkouškami došlo k vyvrácení pracovní hypotézy o vlivu zastavení tisku a opětovnému navázání tisku bez ohledu na použitý nanášecí element.**

Při porovnání z hlediska dynamického zatížení při zkoušce vrubové houževnatosti dosahují obdobných výsledků, maximální naměřený rozdíl byl 19 % při 20°C, ovšem při zopakování zkoušky při stejné teplotě a s větším počtem vzorků byl rozdíl minimální v řádech procent. Při zvýšených a snížených teplotách je opět rozdíl minimální. Průměrná hodnota vrubové houževnatosti u druhé etapy zkoušky při 20°C je 170 J (bez uvažování hrubé chyby).

Z hlediska cyklického zatížení dosahuje lepších výsledků změna nanášecích elementů, kdy mez únavy byla stanovena na 550 MPa, oproti tomu jeho konkurenti dosáhly meze únavy 530 MPa. Toto bylo velkým překvapením, neboť byla předpokládána zhoršená mez únavy právě u změny nanášecího elementu během procesu tisku, ale opakovatelná mez únavy byla stanovena na 550 MPa. Dokonce některé vzorky dosáhly 10 milionů cyklů při vyšší zátěži (560 MPa a 570 MPa), ale při opakovacích měřeních mez únavy nebyla dosažena. Podle normy pro mez únavy u vysoko-pevnostních ocelí je tolerance meze únavy  $\pm 15$  MPa, takže lze konstatovat, že se nejedná o významnou anomálii. Při porovnání spojnic keramického pravítka a karbonového kartáčku je pozorován pouze minimální rozdíl, který není nikterak významný. Maximální napětí na mezi únavy, které vydržely všechny testované vzorky, bylo 530 MPa.

**Předpoklad výrazně zhoršených dynamických vlastností s ohledem na použitý nanášecí element byl vyvrácen.**

U porovnání vzorků z hlediska vnitřní struktury a pórovitosti nebylo možné od sebe rozeznat vzorky, jakým nanášecím elementem byly tištěny. **Tímto byl vyvrácen předpoklad, že karbonový kartáček by měl mít zhoršenou vnitřní strukturu výtisku kontaminací odpadávajících částí štětinek. Dále byla potvrzena pracovní hypotéza o vlivu na nečistoty ve struktuře v závislosti na pozici na platformě a okolních dílech.**

Pro objektivní porovnání přesnosti muselo být proměřeno několik různých charakteristických představitelů, jako jsou například: vnitřní otvory, vnější válce, velké rozměry, tenké stěny a tvarová plocha. Z naměřených výsledků vnitřních otvorů a válcových ploch vyplývá, že bez ohledu na nanášecí element jsou rozměry vždy menší než nominální hodnota. Rozdíl mezi konkurenty byl vždy do 0,02 mm. Tisk velkého rozměru (135 mm) vykazoval výraznou odchylku, průměrně 0,22 mm od hodnoty modelu, a zároveň díky stejnoměrným výsledkům obou konkurentů je možné konstatovat, že se v tomto případě projevilo smrštění. Tenké tvarové žebro vykazovalo velké odchylky od nominálního rozměru, ovšem tato odchylka byla naměřena u obou konkurentů a její velikost se lišila do 0,04mm. Při změření tloušťky žebra hodnota se shodovala s modelem, z toho je tedy možné usuzovat, že tento díl byl vlivem pnutí zdeformován, a tím došlo k vychýlení, neboť se jedná o velmi tvarově složitý tenkostěnný díl. U komplikované tvarové plochy lze souhrnně říci, že odchylka mezi naskenovanými povrchy se pohybuje v rozmezí - 30 až + 30  $\mu\text{m}$ , přičemž nejvyšší četnost mají odchylky 0 až + 20  $\mu\text{m}$ . **Na základě experimentu zaměřeného na přesnost byla pracovní hypotéza o vlivu nanášecího elementu na přesnost tisku vyvrácena.**

Jak z experimentální části vyplývá, tak drsnost neovlivňuje pouze náklon dané plochy vůči stavební platformě, ale obrovský vliv má pozice plochy, zda je plocha na spodní straně dílu či svrchní. Každá z těchto ploch je vytvořena rozdílnými parametry laseru (downskin a upskin), a proto v rozmezí úhlů 35° - 60° je drsnost diametrálně odlišná. Drsnost  $R_a$  na spodní straně dílu dosahuje vyšších hodnot než 20  $\mu\text{m}$ , oproti tomu na svrchní v rozmezí  $R_a$  6 až 12  $\mu\text{m}$ . Okolo úhlu 60° se nachází přechodová oblast drsnosti u spodních ploch, kde dochází ke skokovému zlepšení drsnosti, neboť hodnoty drsnosti u obou konkurentů se u hodnoty 55° a 65° téměř shodují. Od sklonu svrchní a spodní strany 65° se drsnosti vyrovnávají a dostávají se pod hranici 8  $\mu\text{m}$  a dokonce u posledního měřeného úhlu 85° se drsnost pohybovala okolo hranice 5  $\mu\text{m}$ . Drsnost u spodní strany plochy se pohybovala v rozmezí  $R_a$  26,9 až 5  $\mu\text{m}$  a u svrchní v rozmezí  $R_a$  12,3 až 4,5  $\mu\text{m}$ . Z výsledků není patrné, že by se výsledky jednotlivých nanášecích elementů výrazně odlišovaly a bylo by možné konstatovat, že jeden z konkurentů dosahuje lepších výsledků. Pásma, kdy je drsnost lepší u jednoho a následně zas u druhého z konkurentů, je možné sledovat, ale nejsou nikterak významná.

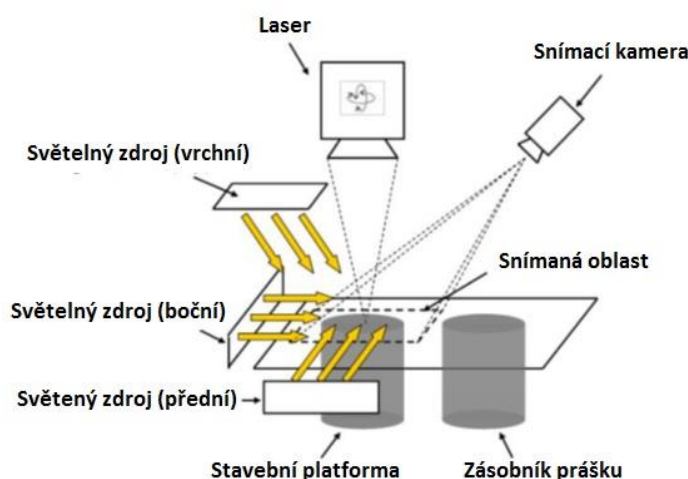
**Na základě výsledků experimentální části práce je možné konstatovat, že tištěné díly pomocí keramického pravítka nebo karbonového kartáčku dosahují téměř totožných kvalitativních i kvantitativních parametrů.**

### 3.3 Identifikace a kvantifikace problémů během nanášení

Po ověření, že výsledky mechanických vlastností i ostatních hodnocených kritérií jsou rovnocenná, bylo potřeba se zaměřit na identifikaci a kvantifikaci problémů vznikajících během procesu nanášení práškového lože. Toto monitorování procesu bude sloužit jako iniciátor automatické změny nanášecího elementu při vzniklých problémech. Na základě zjištění, že výsledky obou nanášecích elementů jsou rovnocenné, se vybízí používat pouze karbonový kartáček, který dokáže překonat problematické místa, ovšem existují případy, kdy je nezbytné použít keramické pravítko, jako například u podpůrných struktur s velkou plochou, a to především u typu block, kdy dochází ke zvlnění vytištění horní plochy podpor atd. Změna nanášecího elementu má svůj opodstatněný smysl nejen jako možnost řešení problémů během tiskové úlohy bez zastavení tisku. Pro tuto automatickou změnu nanášecího elementu je potřeba vyhledat nejhodnější způsob měření problémů.

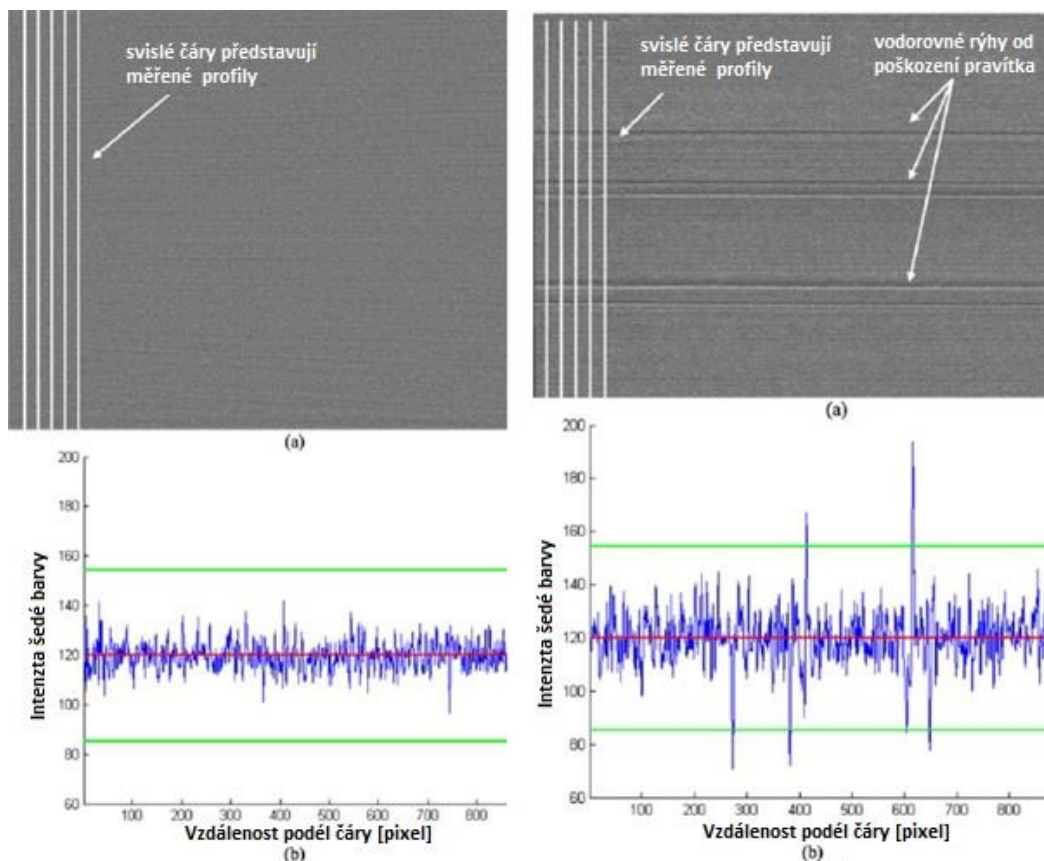
#### 3.3.1 Možnosti měření

Při posuzování vhodnosti měřicího zařízení bylo zvažováno několik možností, jak identifikovat a následně kvantifikovat vzniklé problémy během procesu nanášení nové vrstvy prášku. Jako první byla prověřována metoda měření pomocí digitální kamery se senzorem obrázků CCD nebo CMOS je dnes velice populární a většina výrobců 3D tiskáren ji integrovala do svých strojů. Jedná o velice populární způsob monitorování procesu 3D tisku a především nanášení práškového lože a vznikajících problémů během nanášení. Jedná se o metodu, kdy je sledována plocha stavební platformy před a po nanášení prášku. Na obrázku 84 je znázorněné schéma měření, přičemž je nutné, aby do pracovní komory byly instalovány přídavné světelné zdroje z různých stran proto, aby bylo možné pořídit kvalitní snímky [42],[43],[44].



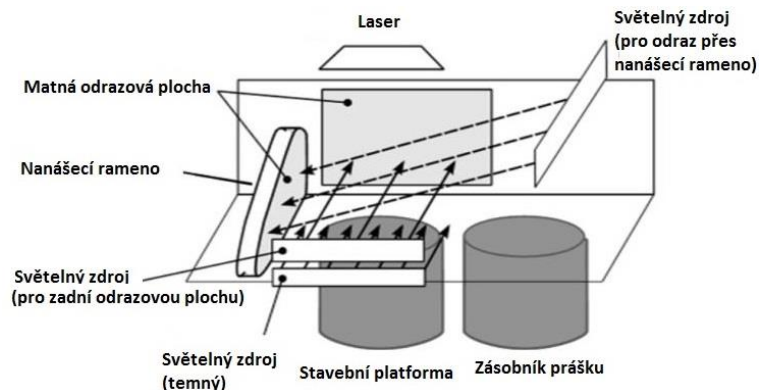
Obr. 84 Schéma měření kvality nanášené vrstvy [43]

Vyhodnocení snímků je založeno na hodnocení škály šedé barvy, přičemž platí, že čím je odstín šedé světlejší, tím je místo ve vyšší poloze a opačně. Vyhodnocení je provedeno automaticky pomocí vyhodnocovacího softwaru. Obrázek je vyhodnocován pixel po pixelu. Měření a vyhodnocení je vyobrazeno na obrázku 85, kde jsou porovnány dva stavy. Bezproblémové (ideální) nanášení vrstvy prášku a nanášení nekorektního práškového lože způsobené poškozením nanášecího elementu. Na osách Y jsou uvedeny hodnoty odstínu šedé barvy a na osách X jsou zaznamenány jednotlivé pixely podél svislé čáry od horního okraje stavení platformy až na spodní okraj. Podle pěti bílých čar v levé části je stanovena střední hodnota šedé. Dále jsou v grafu uvedeny limity, které jsou stanoveny na základě empirických zkušeností a odráží v sobě dobu expozice, světelný zdroj, materiál práškového lože atd. V pravém obrázku je pět horizontálních rýh od nanášecího elementu a těchto pět rýh v grafu reprezentují naprosto zřejmé píky [42],[43],[44].



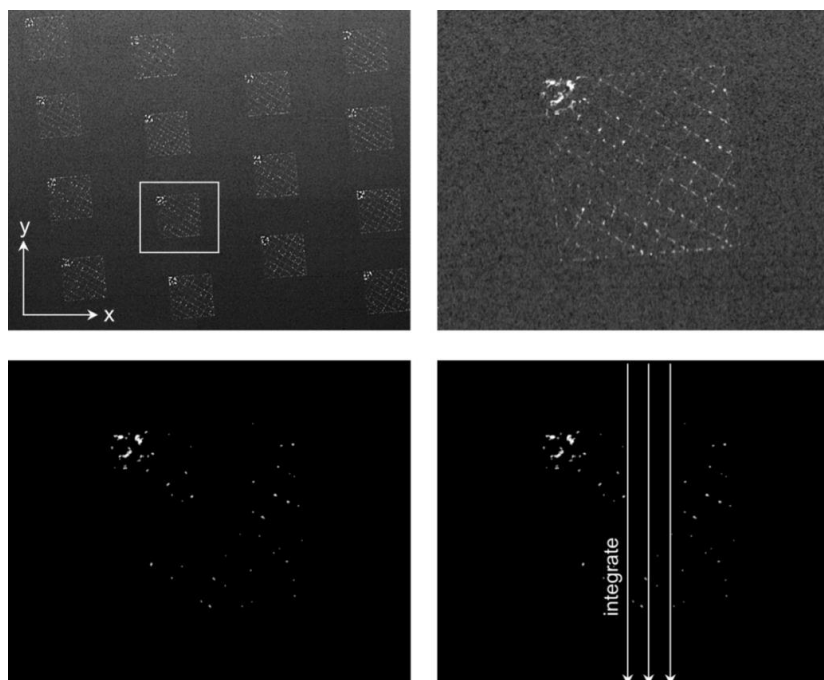
Obr. 85 Měření kvality nanesené vrstvy [44]

Obdobný systém měření využil pro měření a vyhodnocení Kleszczynski a kol. Ovšem v tomto případě bylo využito matných odrazových ploch pro lepší nasvícení sledované plochy. Dle jeho tvrzení: „*Difuzní osvětlení se zdrojem umístěným blízko pracovní ploše a naproti fotoaparátu, který zachycuje oblast platformy, vytváří nejlepší možný způsob, jak vytvořit vysoce kvalitní snímek plochy.*“ [34] Matné odrazové plochy pomáhají lépe distribuovat homogenní osvětlení na práškové lože a zároveň zamezují zrcadlovým odrazům světla, což je velice výhodné pro CCD senzory ve fotoaparátech [25],[34],[42].



Obr. 86 Měření a nasvícení pro vyhodnocení skrze obrázky vrstvy [34]

Pro kvalitní zachycení odchylek byl použit vysoce přesný monochromatický fotoaparát se senzorem CCD a rozlišením 29 Megapixelů. Zorné pole bylo pouze 150 x 100 mm při dosažení rozlišení 20 – 30  $\mu\text{m}$  / pixel. Na základě vyfoceného obrázku práškového lože bylo zapotřebí určit intenzitu. Nejprve byla určena průměrná intenzita prášku za použití matematických vzorců uvedených v publikaci [34]. Následně bylo potřeba určit prahové hodnoty a odlehlá místa, která značí anomálie. Tyto hodnoty byly zjištěny experimentálně a byly do výpočtu integrovány pomocí konstanty. Po dalším výpočtu je získán výsledek ve formě obrázku, ve kterém jsou zvýrazněny oblasti, které vystupují nad nanášenou plochu. U těchto oblastí je velký předpoklad, že během nanášení další vrstvy prášku v těchto místech dojde ke kontaktu s nanášecím pravítkem [34],[42].



Obr. 87 Výsledky měření [34]

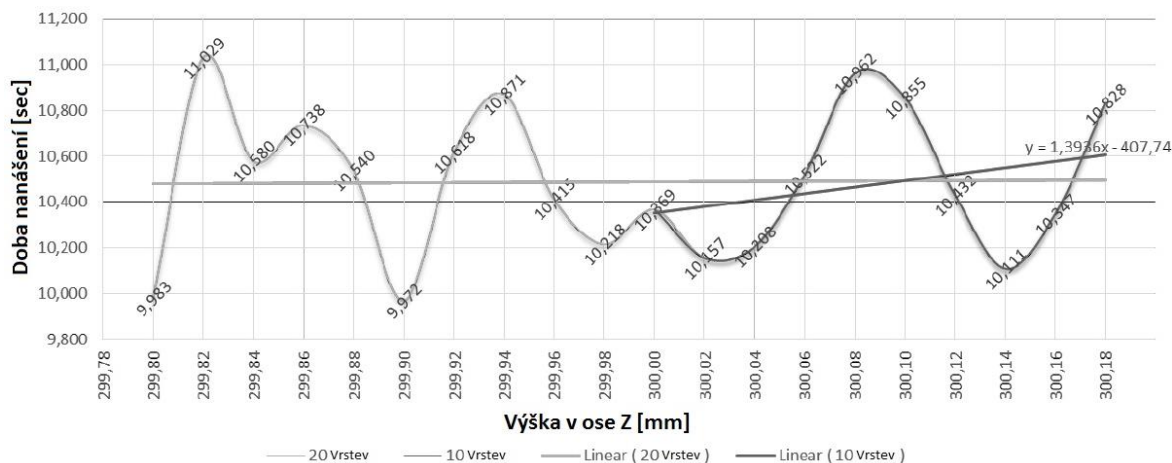
Tento způsob je sice velice atraktivní a dnes hojně využíváný, ale pořizovací cena tohoto systému je příliš vysoká. Zároveň není tento způsob měření pro tento daný případ zcela vhodný. Způsoby měření, které je v tomto případě možné použít, jsou uvedeny níže.

### 3.3.1.1 Měření času

První možností bylo měření času tak, že na zadní stranu pracovní komory se připevní snímače a bude měřen čas mezi jednotlivými snímači a podle časové odchylky se bude vyhodnocovat zpoždění v daných intervalech. Na základě těchto odchylek by byla vyhodnocena závažnost problému.

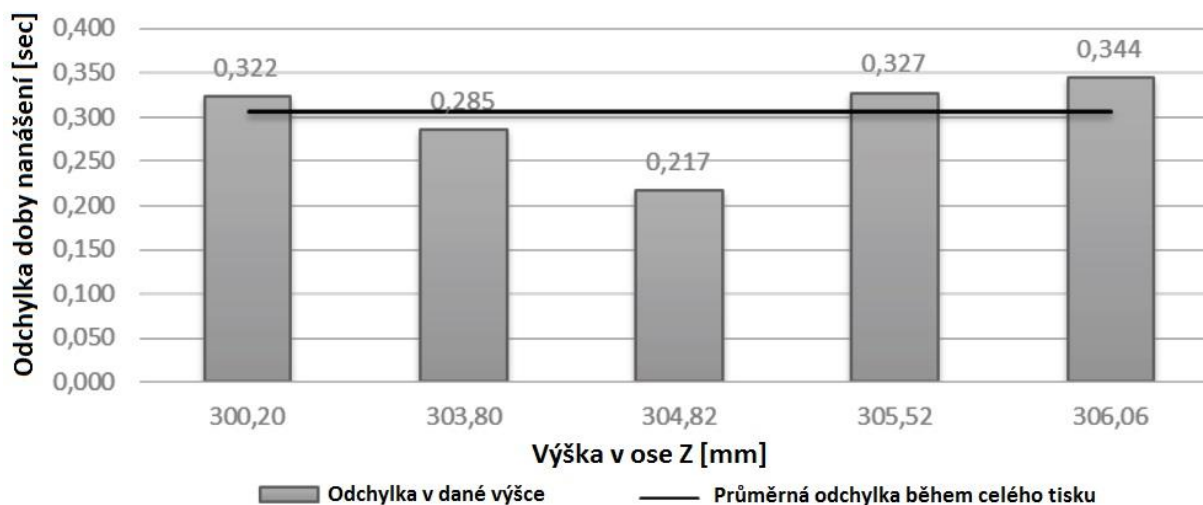
Měřením času nanášení se věnoval ve své práci Caellers [42], kde také detailně popsal metody, které se v dnešní době používají pro měření a předcházení kolizí mezi nanášecím elementem a tištěným dílem. Ve své práci se snažil potvrdit toto tvrzení „Trend zvyšující se doby přejezdu nanášecího ramene z jedné strany na druhou při nanášení vrstev je způsoben třením mezi dílem a pravítkem, přičemž na základě těchto dat je možné předpovídat kolizi“ [42].

Provedl experiment, kdy měřil časy jednotlivých vrstev před zastavením tisku z důvodu kolize pravítka s tištěným dílem. Pro porovnání měl 5 zachycených kolizí v různé výšce. Na obrázku 88 je vyobrazený graf, který ukazuje průběh času nanášení. Nanášená vrstva byla 0,02mm a v grafu je zachyceno 20 vrstev před zastavením [42].



Obr. 88 Čas nanášení vrstvy [42]

V tomto grafu je vykreslená křivka 20 hodnot před zastavením a zároveň posledních 10 hodnot je zvýrazněných. Dále jsou v grafu zakresleny dvě čáry, které znázorňují trend hodnot. Jak je z grafu patrné, tak žádný významný trend či jiný ukazatel, který by naznačoval blízkost kolizi, zde není. Všechny naměřené kolizní stavy byly zpracovány a výsledky byly porovnány a zapracovány do grafu v obrázku 89.



Obr. 89 Porovnání výsledků měření času nanášení[42]

V grafu jsou uvedeny odchylky v času nanášení vždy ve 20 vrstvách předcházejících kolizi, přičemž pro porovnání je v grafu vyznačena černou čarou průměrná odchylka během celého tisku. Na základě výsledků autor zhodnotil, že výše **uvedená hypotéza je mylná a není možné předpovídat kolizi na základě měření času nanášení**. Z tohoto důvodu bylo od testování pomocí měření času nanášení ustoupeno.

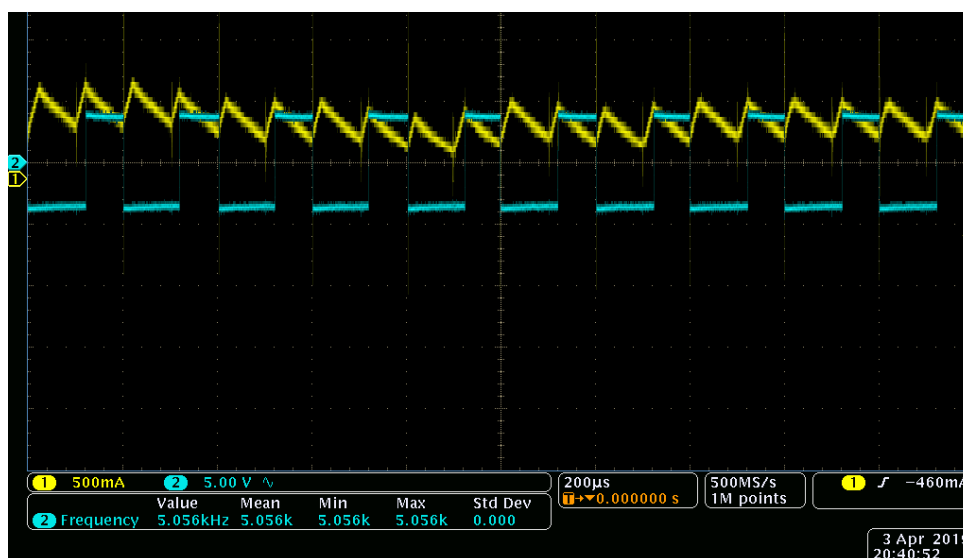
### 3.3.1.2 Měření proudů (zatížení motoru)

Jako první byla zvažována možnost měřit proud na frekvenčním měniči, neboť ten má za úkol řídit servomotor, jenž pohání nanášecí rameno. Takže při zvýšení odporu na nanášecím rameni by se mělo zvednout i zatížení motoru. Tento způsob byl založen na skutečnosti, že pokud během tiskové úlohy dojde k velkému nárazu nebo zastavení, na monitoru se v daném místě objeví svislá červená čára. Takže zatížení motoru je během tisku monitorováno. Ovšem výrobce nebyl ochoten odtajnit, jakým způsobem k měření či monitoringu dochází, tak byl navržen zkušební experiment pro zjištění, zda je možné pomocí měření proudů monitorovat nanášecí proces. Experiment byl založen na měření velikosti proudu na frekvenčním měniči s výstupem na 3 fáze. Každá fáze je tvořena PWM (Pulsně Šířková Modulace) s frekvencí střídá 25 kHz. Proud ke každému vinutí motoru záleží na signálech na obou koncích. Velikost proudu je úměrná rozdílu hodnot napětí dvou signálů (pulsů), ale záleží na kvalitě snímání signálů.



Obr. 90 Měření proudů

Při měření byly testovány 3 stavy, a to samotný přejezd nanášecího ramene (bez nanášení prášku), dále bylo měření provedeno při aplikaci první vrstvy a jako poslední byl měřen mezí stav, jako je například náraz o platformu (zastavení). Na obrázku 91 je možné si prohlédnout naměřený průběh z nanášení první vrstvy prášku.

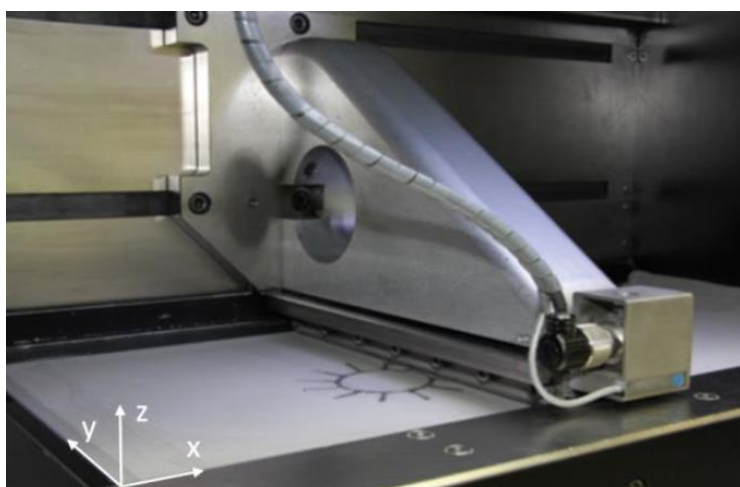


Obr. 91 Výstupní signál

Bohužel při vyhodnocování naměřených průběhů nebyla zřejmá žádná výrazná změna mezi jednotlivými měřeními průběhy, a proto bylo konstatováno, že je zapotřebí velmi rychlého snímání signálů, aby bylo možné co nejpřesněji určit časový okamžik, kdy puls začíná a kdy končí. Takto přesné měřicí zařízení, které umožňuje snímání v řádech MHz, není k dispozici. Z tohoto důvodu bylo od způsobu monitorování procesu pomocí měření proudů upuštěno.

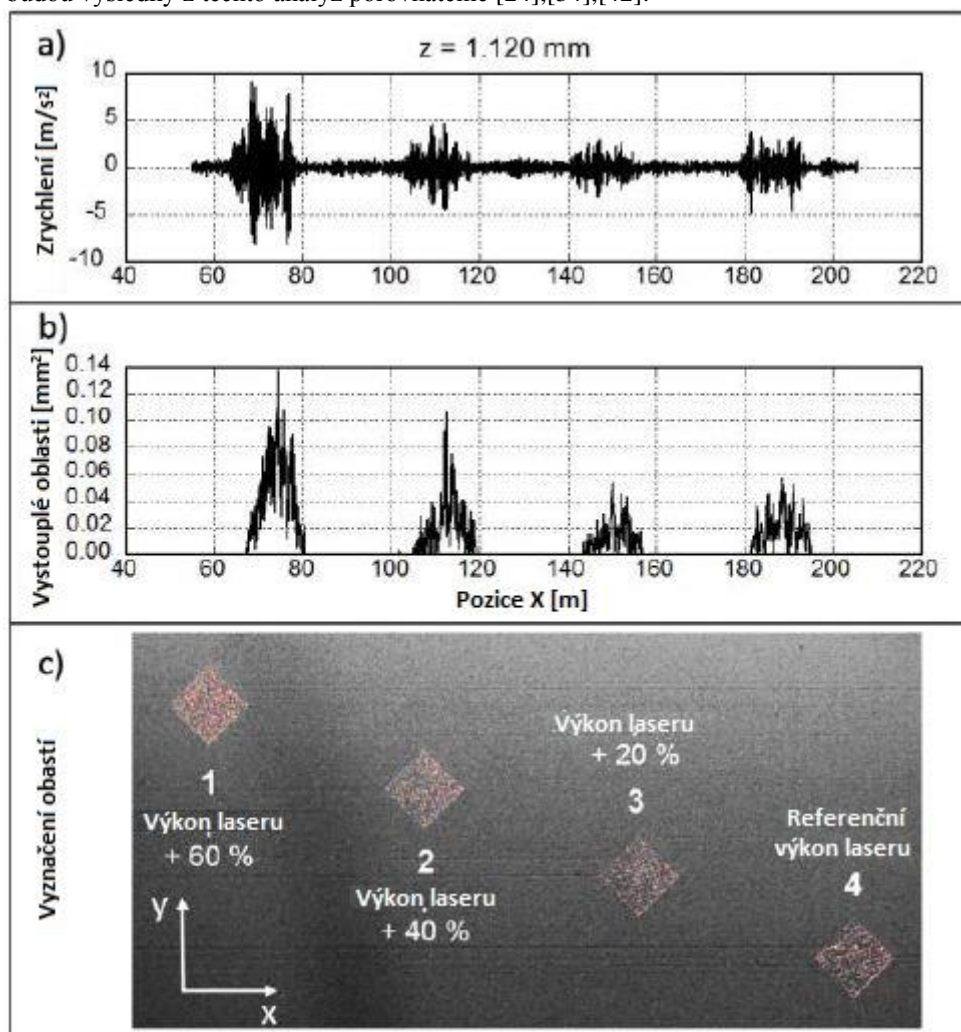
### 3.3.1.3 Měření akcelerometry

Měření vibrací při 3D tisku akcelerometrem už bylo publikováno v několika publikacích, kdy nejvíce se tomuto tématu věnovali Kleszczynski, Jacobsmühlen, Witt a kolektiv. Pomocí akcelerometru je možné efektivně měřit zrychlení v jednotlivých osách, záleží na tom, kolika složkový akcelerometr je použit (v drtivé většině tříoskový, pokud je vyžadováno měření zrychlení ve 3D prostoru). Výsledky je možné rozložit do jednotlivých os nebo získat výsledné zrychlení. Akcelerometr je zařízení, které je schopné měřit s vysokou frekvencí, čehož je s výhodou použito u nanášení prášku, neboť se jedná o velmi dynamický proces, kdy je potřeba efektivně zachytit velkou škálu zrychlení. Výše zmínění autoři použili akcelerometr pevně uchycený na nanášecím rameni, jak ukazuje obrázek 92 a takto provedli velké množství experimentů [24],[34],[42].



Obr. 92 Měření akcelerometrem [24]

Akcelerometr byl v tomto případě použit pro měření vibrací během nanášení a také pro stanovení velikostí oblastí problematických pro nanášení. Aby bylo zajištěno, že záznam z měření vibrací je pořizován jen v případě, že dochází k aplikaci prášku, byla na počáteční a koncovou polohu nainstalována čidla polohy. Jestliže nanášecí rameno projede okolo snímače 1, tak je záznam spuštěn a když projede okolo snímače 2, tak je záznam ukončen a uložen. Obrázek 93 porovnává získané výsledky, jak z měření akcelerometrem, tak pomocí hodnocení obrázků metodou CCD. V tomto případě byla měřena stejná vrstva, a to ve výšce 1,120 mm, přičemž do výšky 1,000 mm byly tištěny podpory. Takže v této vrstvě byly tištěny plno-objemové díly hlavním setem parametru nikoli downskin nebo upskin. Pro porovnání byly zvoleny 4 díly, přičemž u nich byla postupně zvyšována intenzita laserového paprsku vždy o 20% a bylo pozorováno, zda se to nějakým způsobem projeví a zároveň zda budou výsledky z těchto analýz porovnatelné [24],[34],[42].



Obr. 93 Měření a vyhodnocení pomocí akcelerometru [24]

Na základě těchto výsledků je možné konstatovat, že metoda měření akcelerometrem a metoda analýzy obrázku povrchu nanášené vrstvy dosahují totožných výsledků.

Ovšem akcelerometr ve výše zmíněných případech byl umístěn na nejvzdálenější plochu od uchycení ramene ke stroji, což je pro měření vibrací nejvýhodnější pozice z hlediska tuhosti, ovšem tuto pozici není možné použít při reálném tisku u stroje EOS M290, neboť v tomto místě se nachází sběrač nečistot.

Z výše uvedených měřících metod se měření akcelerometrem jeví jako nejlepší varianta, a proto bylo rozhodnuto, že tato metoda bude využita při měření vibrací během nanášení vrstvy prášku v rámci této DP.

### 3.3.2 Vlastní zařízení pro měření

Neboť RTI nedisponuje vhodným akcelerometrem, který by bylo možné použít v procesní komoře 3D tiskárny, bylo zapotřebí pořídit zařízení, díky kterému by bylo možné měřit zrychlení či brzdění nanášecího ramene. Ovšem žádné zařízení nespĺňovalo požadavky ať už z hlediska měření, rozměrů, kompatibilitosti nebo ceny. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto, že měřící zařízení bude vyrobeno vlastní konstrukce, a to z běžně

dostupných elektrických součástek.

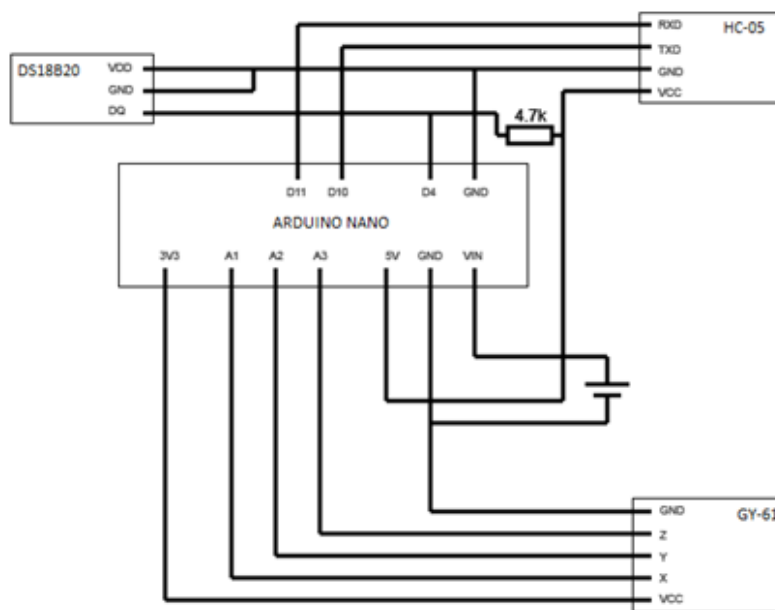
Základem tohoto zařízení je platforma Arduino čili jednodeskový mikroprocesorový počítač, který má vlastní vývojové prostředí, díky čemuž může být využito téměř kdekoli, kde je potřeba vykonávat jednoduché operace na základě nahraného programu. Do Arduina je nahrán program, který je potřeba separátně vytvořit. Protože je Arduino velice oblíbené, je možné k tomuto zařízení pořídit nejen elektrické součástky, ale také různé periferie od různých druhů senzorů, detektorů, motorů až po měřicí zařízení. V současné době je velice oblíbené zejména u řízení 3D tiskáren na plast a u létajících dronů.

Požadavky na měřicí zařízení byly následující: Zařízení musí být schopné v reálném čase měřit zrychlení a vytvořit z něho záznam. Dále musí mít zařízení velmi malé zástavbové rozměry, aby mohlo být implementováno do, popřípadě na nanášecí rameno. Zařízení by mělo být hermeticky uzavřeno, aby nemohlo dojít ke vzniku jiskry, která by mohla způsobit výbuch prášku. Přenos dat řešit bezdrátově, pokud to bude možné. Napájení by mělo být součástí zařízení a mít dostatečnou kapacitu, aby bylo schopné měřit alespoň 100 hodin. V neposlední řadě by mělo umět měřit teplotu uvnitř hermeticky uzavřeného boxu s elektronickými součástkami.

Na základě těchto požadavků bylo sestrojeno měřicí zařízení, které se skládá z následujících komponent:

- Modul Arduino nano
- Třísložkový akcelerometr
- Modul bluetooth
- Teplotní senzor
- Baterie
- Propojovací kabely

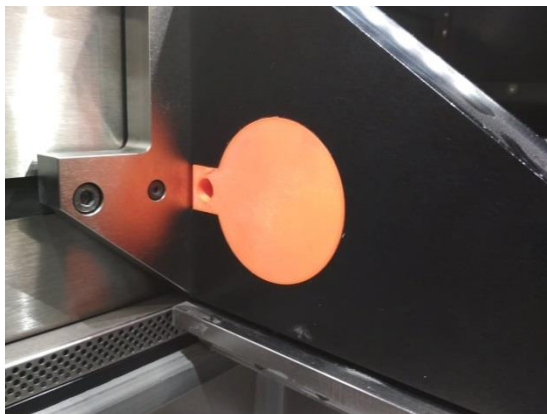
Nejprve bylo zapotřebí vytvořit elektrické schéma zapojení jednotlivých součástek. Toto schéma ukazuje obrázek 94.



Obr. 94 Elektrické schéma napájení baterie

Po navržení a úspěšném virtuálním otestování schématu bylo sestrojeno měřicí zařízení. Následně bylo zapotřebí vytvořit hermeticky uzavíratelnou obálku tak, aby jí bylo možné přidělat k nanášecímu rameni. Umístění celého zařízení bylo potřeba volit tak, aby bylo pevně spojené s nanášecím ramenem, nepřekáželo a hlavně, aby za žádných okolností nemohlo upadnout z nanášecího ramene. Jako nevhodnější místo pro umístění měřicího zařízení byl vybrán otvor v nanášecím rameni. Byl vymodelován tvar krabičky tak, aby přesně pasoval do uvedeného otvoru a zároveň byla vždy zajištěna jeho poloha. Pro vytvoření uzavíratelné krabičky byl zvolen 3D tisk plastů. Umístění celé sestavy měřicího zařízení je vidět na obrázku 95. Ovšem hardwarová stránka je pouze polovina, v tuto chvíli bylo zapotřebí vytvořit program, který bude schopen měřit a vyhodnotit odeslaná data v podobě signálů z měřicího hardwaru.



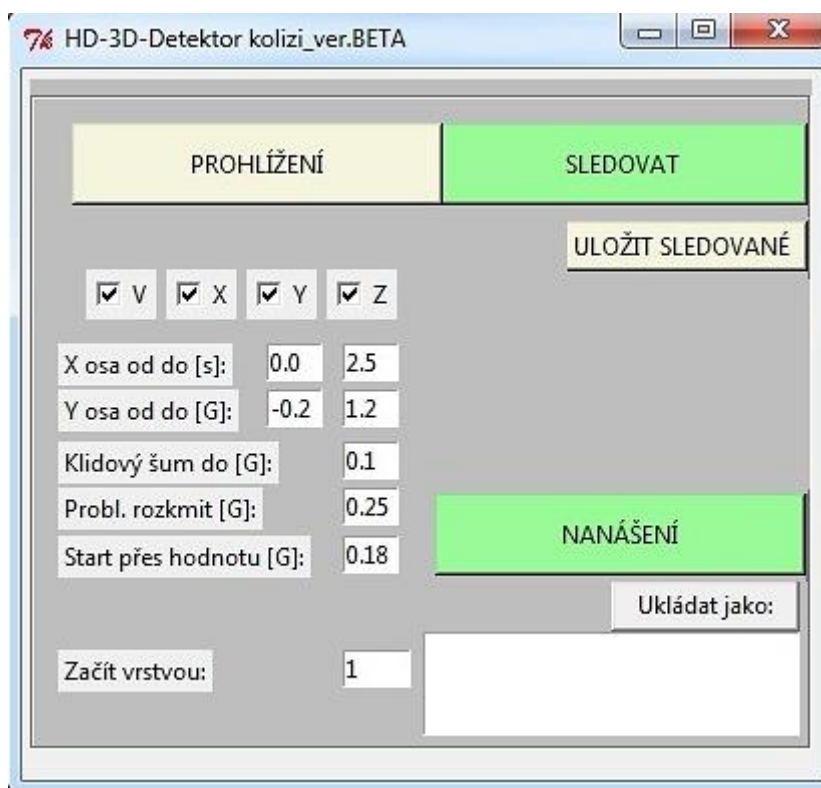


Obr. 95 Umístění měřicího zařízení

### 3.3.2.1 Program pro měření vibrací

Pro tvorbu programu byl vybrán programovací jazyk Python, který je vyvíjen jako open source platforma, tudíž je volně stažitelný a existují instalační balíky pro všechny běžné operační systémy. Aplikace vytvořena v tomto programu je plně kompatibilní s operačním systémem Windows.

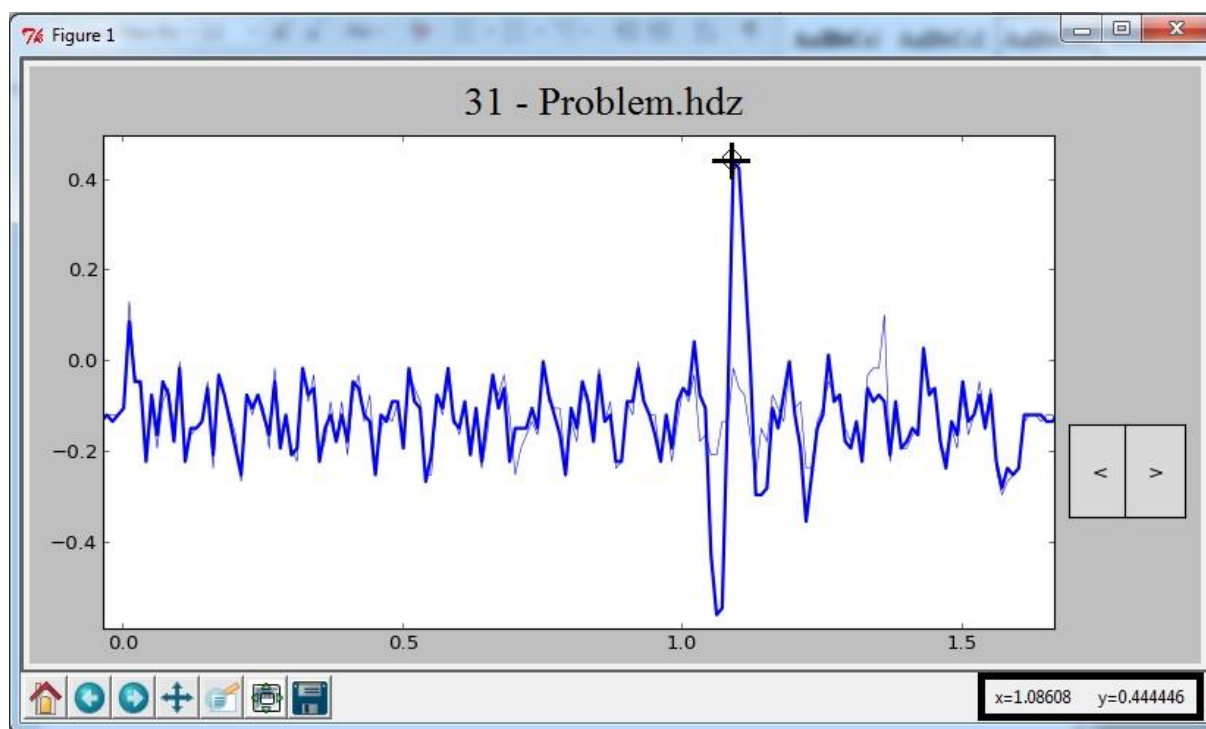
Přenos signálů z měřicího zařízení do počítače byl realizován pomocí sériové komunikace skrze bezdrátové zařízení Bluetooth. Do měřicího zařízení byl implementován modul Bluetooth, který měřený signál odesílá a v počítači je bluetooth modul, který signál přijímá. Pomocí akcelerometru je měřeno zrychlení G, proto všechny hodnoty vztahující se ke zrychlení uvedené v aplikaci jsou nastaveny v těchto jednotkách. Délka je v aplikaci časový údaj pro nastavení osy X a je uveden v sekundách. Aplikace byla rozdělena do tří hlavních kategorií, a to Prohlížení, Sledovat a Nanášení. Jednotlivé části programu budou popsány níže. Na obrázku 96 je vyobrazeno vytvořené prostředí aplikace pro měření vibrací během 3D tisku. Zdrojový kód vytvořené aplikace obsahuje více jak tisíc řádek.



Obr. 96 Program HD3D – Beta verze

Tlačítko prohlížení slouží pro zobrazení a porovnávání naměřených záznamů. Je možné načíst více záznamů najednou a vzájemně je porovnávat. Jestliže je načteno více než jeden záznam, tak je možné jednotlivé záznamy prohlížet šipkami doprava a doleva s tím, že aktuální záznam se zvýrazní tučnou modrou barvou. Je nutné

předem zvolit rozsah os grafu a vybrat jaké složky akcelerace budou hodnoceny zaškrtnutím pole u označení os X, Y, Z a V – Výsledné zrychlení. Jestliže byl rozsah zvolen nevhodně pro plné zobrazení grafů, tak není potřeba okno prohlížení zavřít a upravit rozsah hodnot na osách, ale je možné s grafem pracovat pomocí funkcí jako jsou posunutí grafu, zoom, přecházení mezi předchozími zobrazeními a uložení záznamu ve formě obrázku. Jestliže kurzorem myši je najeto na jakýkoli bod v záznamu, tak se zobrazí v levém spodním rohu pozice v hodnotách X a Y. Pozice v ose X značí čas od začátku měření a pozice v ose Y znázorňuje hodnotu zrychlení, viz obrázek 97.



Obr. 97 Prohlížení záznamů

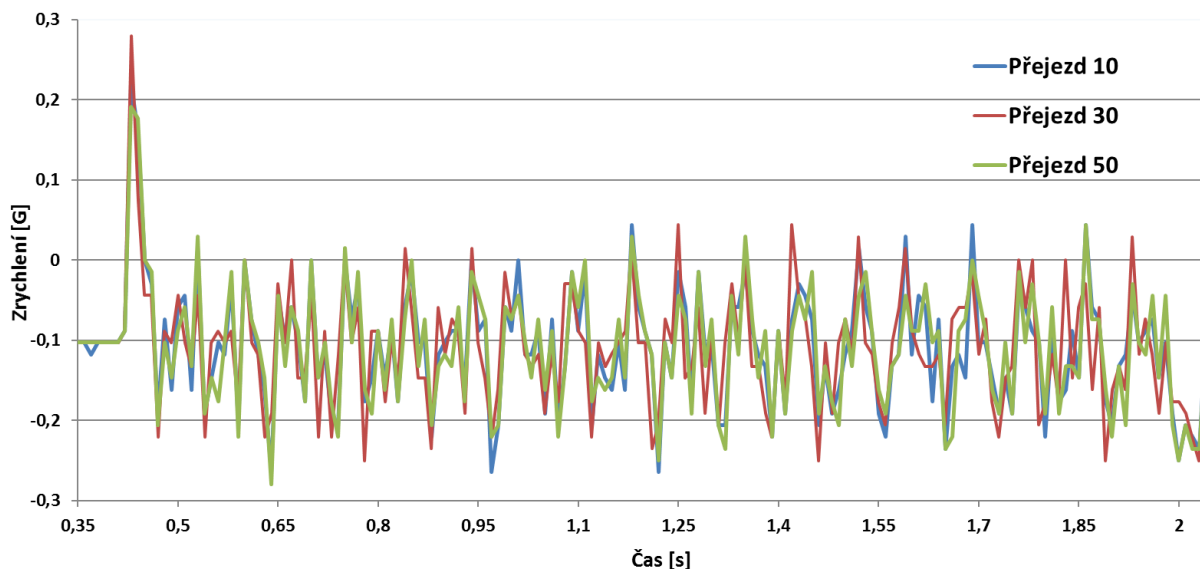
Tlačítko sledovat slouží pro online sledování v reálném čase (čas reakce a zpracování se projevuje se zpožděním v řádu desetin sekund při zobrazování výsledků). Při měření jsou zaznamenávány automaticky všechny složky akcelerace. Výběr složek akcelerace slouží pouze pro prohlížení. Záznam z online měření je možné uložit a následně porovnávat s dalšími záznamy. Pomocí výše popsaného tlačítka prohlížení.

Nejdůležitější tlačítko je nanášení, neboť se jedná o automatický mód měření a detekování problémů během procesu tisku. Dříve než bude aktivováno toto tlačítko, je potřeba vytvořit složku, kam budou ukládány jednotlivé záznamy z měření. Tento automatický mód v sobě ukrývá několik zásadních funkcí, které je potřeba zmínit, a proto jsou popsány níže.

První a nejzásadnější funkcí, která je do automatického módu integrována, je rozpoznání startu a konce nanášení vrstvy. Aby na počáteční a koncové pozici nanášecího ramene nemusely být umístěny snímače polohy, čehož bylo využito v publikaci [24] pro určení oblasti záznamu, bylo hledáno jiné řešení, jak zaznamenávat pouze hodnoty během nanášení. Nanášecí rameno více než 90% procent času tisku stojí na koncové pozici (samozřejmě záleží na zaplnění stavební platformy a výšce tisku), a proto bylo zapotřebí hledat způsob, jak zaznamenávat pouze v okamžik nanášení.

Při zpětném přejezdu nanášecího ramene poklesne stavební platforma i zásobník prášku o 1 mm a při dosažení začáteční pozice pro nanášení je nucen na krátký okamžik zastavit, aby stavební platforma a zásobník prášku mohly být nastaveny do správné pozice. Poté dojde k pohybu nanášecího ramene. Při detailním zkoumání těchto pohybů a prodlev byl navržen algoritmus pro omezení měřené oblasti. Tento algoritmus je založen na tom, že při čekání na najetí platformy a zásobníku do správné pozice je na krátký okamžik nanášecí rameno uvedeno do klidu a poté dochází k prudkému rozjezdu nanášecího ramene. Při tomto rozjezdu vzniká výrazné zrychlení, které by mělo být identifikovatelné, a zároveň velikost by měla nabývat přibližně stejné hodnoty. Bylo nezbytné tento předpoklad experimentálně ověřit. Bylo provedeno 50 měření přejezdů pro zjištění daného zrychlení a obrázek 98 ukazuje porovnání tří přejezdů. Tyto záznamy byly pořizeny v době, když měřicí program dokázal záznamy pouze zachytit, nikoliv však zobrazit a vyhodnotit. Z tohoto důvodu pro hodnocení a zobrazení musel být užit Microsoft Excel, ovšem práce s naměřenými daty byla velice časově náročná. Pro výrazné ulehčení a zrychlení práce byly následně do programu integrovány funkce umožňující vyhodnocení a

prohlížení výsledků. Z tohoto důvodu obrázek 98 není vygenerován z programu. Tyto přejezdy ukazují, že průběhy první, třicáté a padesáté vrstvy jsou velice podobné a prvotní zrychlení je u všech zřetelně identifikovatelné. Jedná se o zrychlení v ose X, neboť v tomto směru je vykonáván pohyb nanášecího elementu. Na základě provedených experimentů byla stanovena minimální hodnota 0,18 G pro spuštění záznamu. Tímto je zajištěno, že se začátek měření spustí automaticky ve správném okamžiku. Při rozjezdu z koncové pozice nanášecího ramene se měření nespustí, protože zrychlení nabývá záporné hodnoty, a to kvůli orientaci snímače ve směru nanášení. Dále z měření vyplývá, že doba nanášení je 1,8 s při bezproblémovém nanášení, ovšem při vzniku problémů se doba nanášení prodlužuje, ale nikterak výrazně, jedná se o desetiny sekundy (pokud není uvažováno úplného zastavení tisku vlivem zaseknutí pravítka o díl). Z tohoto důvodu je konec měření stanoven pomocí časového úseku od začátku měření. Délka záznamu je primárně nastavena na 2,5 s, aby byl zachycen celý průběh nanášení v případě vzniku problémů.



Obr. 98 Experimentální zjištění prvotního zrychlení

Při měření a přenosu dat dochází k šumu, proto byla vložena funkce filtrace hodnot menších než určitá hodnota. Tato hodnota je v programu označována jako klidový šum a její hodnota 0,1 G byla stanovena na základě provedených experimentů.

Pro snadné nalezení vrstev, kde docházelo ke kontaktu nanášecího elementu a tištěného dílu, byla do programu integrována funkce, která hlídá maximální hodnotu akcelerace (prvotní hodnota akcelerace, která slouží pro odstartování měření, je automaticky vyřazena z hodnocení). Jestliže některá hodnota z měřeného intervalu překročí nastavenou hodnotu, tak je při ukládání záznamu automaticky do názvu záznamu připojena poznámka o překročení této hodnoty. Díky této poznámce je jednoduché identifikovat, u kterých vrstev docházelo během tisku k problémům. Počet vrstev je závislý na výšce tisku, zpravidla se pohybuje v řádech tisíců a bez této funkce by byla identifikace vrstev s problémem velice časově náročná.

### 3.4 Automatická změna pravítka – dvou-pravítkové provedení

Automatická změna nanášecího elementu během tisku je velice zajímavá myšlenka, ovšem pro úspěšné provedení automatické výměny bylo potřeba vytvořit unikátní řešení nanášecího ramene. Jedná se o velice komplikované zařízení a během jeho vývoje a následného testování bylo nezbytné se vypořádat s mnoha problémy. V následujících kapitolách budou popsány jednotlivé etapy vývoje a určitá úskalí, která se během vývoje a testování tohoto zařízení objevila.

#### 3.4.1 Návrh

Požadavky na nanášecí rameno byly následující: musí umožnit výměnu nanášecího elementu během tisku, iniciovanou na základě měření vibrací během procesu nanášení. Nové nanášecí rameno musí být uzpůsobeno tak, aby umožnilo upnutí dvou rozdílných nanášecích elementů tak, aby byl umožněn jejich vzájemný pohyb. Dále musí mít dostatečnou tuhost a jeho hmotnost by měla být srovnatelná s originálním nanášecím ramenem. Nastavení pozic pro nanášení by mělo být jednoduché a především při pracovní pozici keramického pravítka by měla být zajištěna dostatečná tuhost, kvůli častým tvrdým střetům pravítka s tištěnými díly. Posledním značným omezením je, že návrh ramene musí být uzpůsoben tak, aby mohl pracovat ve výbušném prostředí, čili musí být

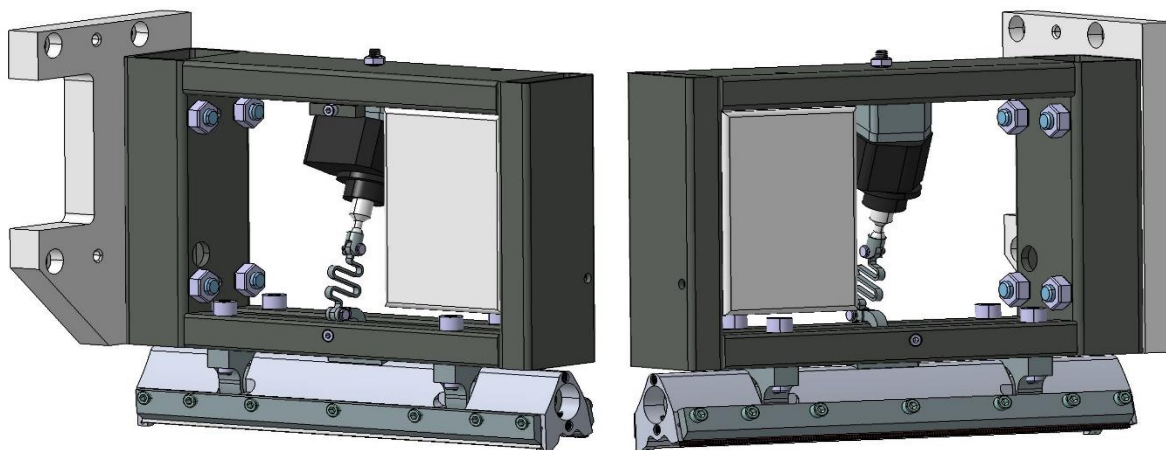
naprosto bez jiskrové (veškerá elektronika musí být uzavřena v hermeticky uzavíratelném boxu).

Pro mechanismus výměny byly uvažovány dvě koncepční varianty:

- **Varianta 1** byla navržena s posuvnými držáky nanášecích elementů. Při návrhu bylo zamýšleno, že by bylo využito lineárních vedení. Statická část lineárních vedení by byla upevněna k nanášecímu rameni a na posuvnou část by byl upevněn držák nanášecího elementu. Pohyb by byl zajištěn pomocí pohybového šroubu s motorem. Ovšem pro každý nanášecí element by bylo nezbytné použít samostatnou pohybovou soustavu.
- **Varianta 2** byla koncepčně řešena jako pohyblivý buben, do kterého by byly upnuty oba nanášecí elementy, přičemž natočením bubnu by byla realizována výměna. V tomto případě postačí jeden motor pro výměnu nanášecích elementů.

Po detailním zvážení výhod a nevýhod jednotlivých koncepčních návrhů **byla stanovena jako vhodnější varianta 2 s otočným bubnem**. Tato varianta je výhodnější především díky použití pouze jednoho motoru pro realizaci výměny, jež je mnohem jednodušší na řízení. Z hlediska výroby je tato varianta komplikovanější, neboť v posuvné variantě by byla většina dílů nakupovaná nebo poměrně jednoduchá na výrobu, ale i přesto bylo rozhodnuto vydat se směrem otočného bubnu.

Návrh nové sestavy nanášecího ramene se skládá z několika hlavních součástí, jako je zadní připojovací deska, konzola, objímky ložisek, ložiska, dělený buben, nanášecí elementy, upínky, pružný člen, motůrek s převodovkou a krabička s elektronikou. Celou sestavu je možné si detailněji prohlédnout na obrázku 99.



Obr. 99 Vyměnitelné pravítko - ISO pohled přední, zadní

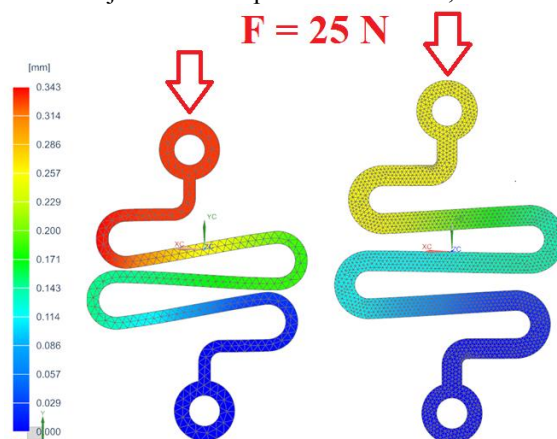
Rozměry zadní připojovací desky, která slouží pro uchycení celé sestavy nanášecího ramene, vycházely ze stávajícího řešení. Všechny rozměry, které slouží pro uchycení do stroje, zůstaly zachovány. Zadní deska se liší pouze dírami, které jsou určeny pro spojení desky s konzolou. Byly zde navrženy dvě díry pro kolíky a 4 díry pro spojovací šrouby.

Při návrhu konzoly nanášecího ramene byly zvažovány dva návrhy, a to plně rameno vyrobené z hliníku, kde by byly vyfrézovány kapsy pro jednotlivá zařízení. Druhá varianta byla svařenec z konstrukční oceli z běžně dostupných profilů, kde by se jednotlivá zařízení a připojení dalších dílů řešilo různými držáky, či přišroubováním, přivařením atd. Při přihlédnutí k tomu, že se jedná o prototyp, který bude během výroby i následně při testování upravován, tak bylo rozhodnuto, že varianta svařené konzoly bude výhodnější.

Otočný buben byl navržen dělený na 3 části, aby mohlo být zajištěno klopení bubnu a zároveň přichycení ke konzole. Jednotlivé části bubnu jsou vzájemně propojeny čepy pomocí lisovaného spoje. Na těchto čepích je umístěna dvojice zakrytovaných ložisek v objímce, která slouží pro připojení ke konzole. Buben byl rozdělen tak, aby pozice ložisek odpovídala Besselovým bodům z důvodu prohnutí způsobeného vlastní vahou. V bubnu jsou vytvořena lůžka pro nanášecí elementy. Lůžko pro keramické pravítko je na přední straně a lůžko pro karbonový kartáček je umístěno na zadní straně bubnu. Uchycení obou nanášecích elementů je navrženo pomocí příložky a šestice šroubů. Dále na zadní straně je vytvořena ploška a dva závity sloužící pro připojení vidlice, která zajišťuje naklápění celého bubnu.

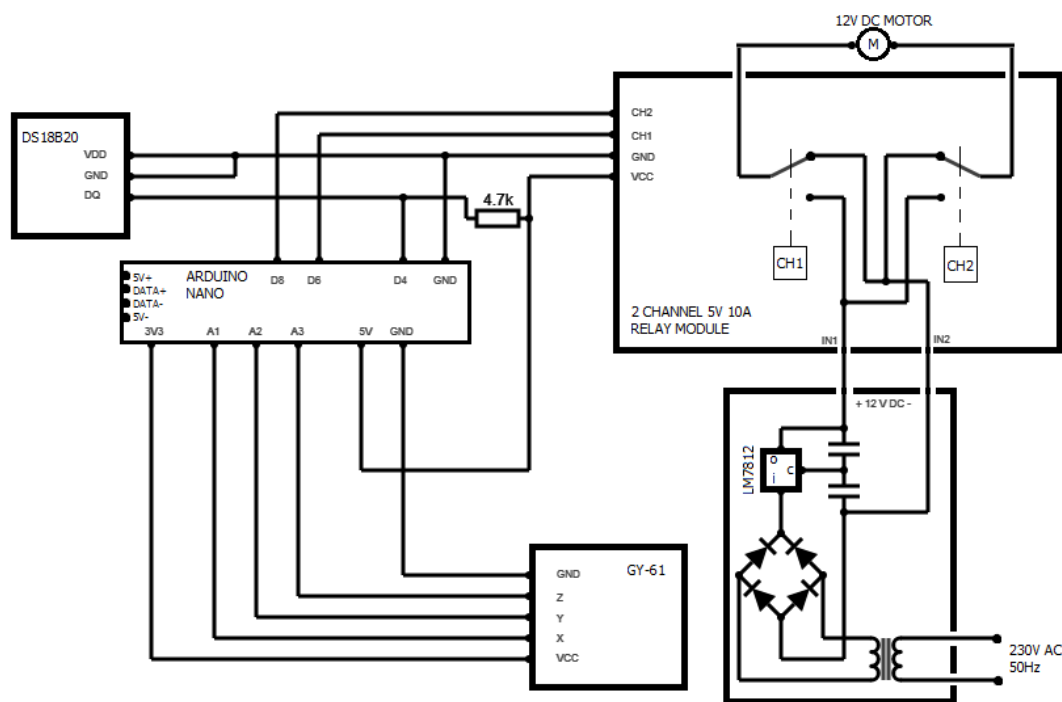
Jako poháněcí aparát byl vybrán motůrek s převodovkou původně sloužící pro naklápění světel u automobilu Škoda Octavia. Tato sestava byla vybrána, protože mění rotační pohyb hřídele motůrku na posuvný pohyb pomocí samosvorného šnekového převodu a zároveň je hermeticky uzavřena v plastovém obalu. Za plastový obal pomocí šroubů byla sestava motůrku připevněna k držáku, který slouží k uchycení a nastavení do správné pozice. Výsuv pístu sestavy motůrku je přibližně 12 mm. Plastové provedení a vůle v něm dosahuje dostatečné přesnosti. Pro vytvoření síly působící proti dorazu nanášecího elementu v pracovní pozici byl do sestavy vložen pružný člen. Tento pružný člen je deformován silou od motůrku a tato deformace následně tvoří předepnutí.

Pružný člen má tvar vlnovce a na obrázku 100 je si možné prohlédnout porovnání deformací pružných členů při zatížení 25 N. Při tomto zatížení dosahuje deformace prvního vlnovce 0,343 mm a u druhého 0,076 mm.



Obr. 100 FEM analýza poddajnosti pružných členů

Veškerá elektronika byla vměštnána do normalizované plastové krabičky, která je hermeticky uzavíratelná. V elektrickém zapojení přibylu dvoukanálové relé, které má za úkol řídit motůrek sepnutím a vypnutím přívodu proudu. Chod motůrku je pro správnou funkci zařízení realizován v obou směrech (pravotočivý i levotočivý), z tohoto důvodu je potřeba pro jeho řízení dvoukanálové relé. Oproti předchozímu měřicímu zařízení při návrhu bylo zjištěno, že při použití napájení pomocí baterie by zdroj vydržel napájet celý systém pouze přibližně 20 - 25 hodin. Tato hodnota výdrže je opravdu tristně nedostačující, a proto bylo přistoupeno k napájení skrze externí zdroj připojený do elektrické sítě. Jestliže není jiná možnost nežli přivést elektrickou energii skrze průchodku do pracovní komory pomocí kabelu, tak bylo rozhodnuto, že realizace přenosu dat pomocí bezdrátového zařízení není bezpodmínečně nutná a může být použit druhý kabel. Pro napájení i přenos signálu byly použity kroucené kabely, jak je vidět na obrázku testování výšky. Tyto kroucené kabely zajišťují, že při nanášení má kabel dostatečnou délku díky natažení závitů a při koncové pozici nanášení dojde opět ke stažení. Tímto způsobem je zajištěno, že nedochází k prověšení ani k nevhodné pozici kabelů. Obrázek 101 ukazuje elektrické schéma dvou-pravítkového nanášecího ramene.

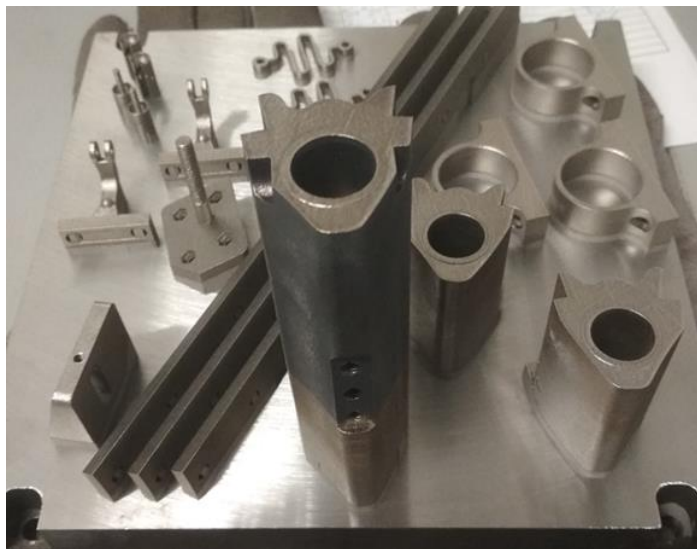


Obr. 101 Elektrické schémata výměnného pravítka

### 3.4.2 Výroba a montáž

Součásti byly rozděleny na dvě skupiny podle způsobu výroby. První skupinou byly součásti, které budou vyráběny konvenčním způsobem, a druhá skupina součástí bude vytvořena pomocí 3D tisku. Klasickým způsobem byly vyrobeny tyto díly, zadní přípojovací deska, konzola a čepy. Obrábění těchto dílů bylo realizováno na strojích laboratoře LTO v RTI. Nejsložitější na výrobu byla konzola. Tento díl byl nejprve svařen z jednotlivých konstrukčních profilů z oceli S235JR a poté vyžhán pro odstranění pnutí a až poté následovalo samotné obrábění. Nejprve byly na svařenci vytvořeny dvě na sebe kolmé plochy, aby byla zajištěna kolmost upínací plochy a plochy sloužící pro připojení ložiskových objímek včetně nanášecího bubnu. Tyto plochy byly referenční a k těmto plochám byly vztaženy všechny rozměry pro obrábění. Následně byly vyrobeny díry a drážky sloužící pro připojení dalších součástí sestavy. Zadní přípojovací deska byla vyrobena z materiálu W. NR. 1.2083 s velikostí polotovaru 150 x 200 x 22 mm. Obrábění probíhalo na dvě upnutí, kdy z první strany byl vyhotoven obrys a díry sloužící pro ustavení a připojení ke konstrukci stroje. Při druhém upnutí byly zhotoveny díry pro upnutí a ustavení konzoly. Dvojice čepů Ø 17 x 65 mm byla vyrobena z materiálu C45 (ČSN 41 2050).

Pro ostatní díly byla použita technologie 3D tisku pro jejich výrobu, jak je vidět na obrázku 102. Tento obrázek ukazuje stavební platformu s vytištěnými díly při transportu na tepelné zpracování. 3D tisk byl zvolen z důvodu komplikovanosti některých dílů a zároveň se jedná o prototypovou výrobu, na kterou je 3D tisk především určen. Dalším zásadním kritériem byla časová náročnost kusové výroby těchto součástí. Kompletní výroba od objednání polotovarů, nástrojů atd. až po expedici těchto součástí by trvala několik týdnů, oproti tomu využitím 3D tisku byla celá sestava vytištěna za 39 hodin. Přibližně dalších 10 hodin trval postprocessing (tepelné zpracování, odstranění podpor, ruční broušení, pročištění předtiskových závitů závitníkem a pískování). Díly vyrobené pomocí 3D tisku byly kompletně zhotoveny přibližně za 50 hodin. Při uvažování 8 hodinové pracovní doby a pouze ranní směny tedy výroba trvala pouhých 3,5 dne, neboť 39 hodin běžel tisk nepřetržitě, bez nutnosti dohledu obsluhy.



Obr. 102 Tisk komponent

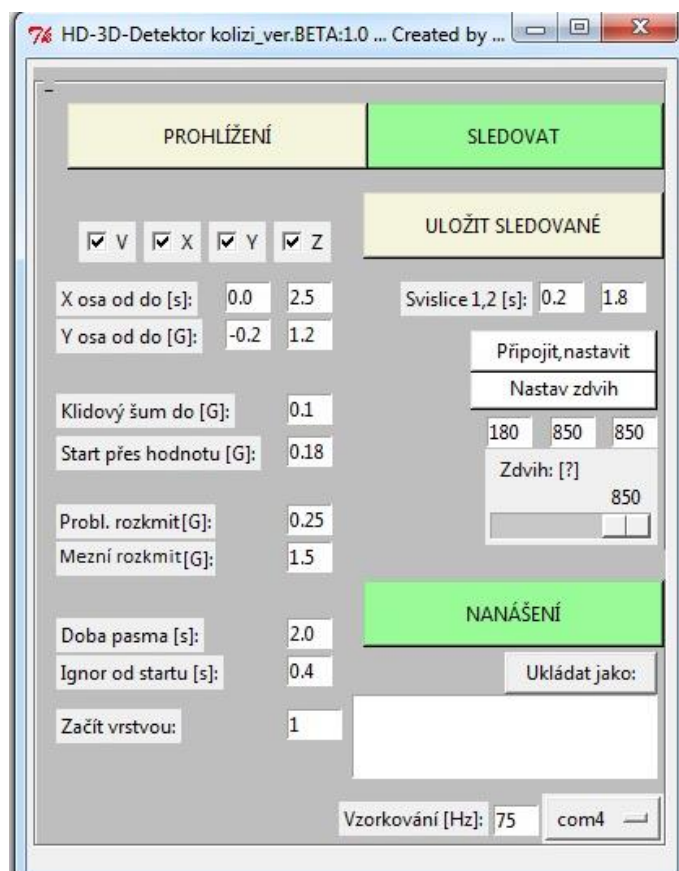
Po vyrobení všech potřebných součástí následovalo smontování nového nanášecího ramene. Při montáži byla nejprve nalisována ložiska do ložiskových objímek a zároveň byly nalisovány čepy do prostředního dílu bubnu. Následovalo lisování ložisek včetně objímek na čepy a až poté byly nalisovány zbývající konce bubnu. Při lisování bylo použito přípravku pro to, aby bylo zajištěno, že dosedací plochy pro nanášecí elementy jednotlivých částí bubnu budou ve stejné pozici a nebude docházet vzájemnému pootočení. Po lisovacích operacích následovalo osazení nanášecími elementy a pomocí přílozek a šroubů bylo zajištěno jejich upnutí. Dalším krokem bylo přišroubování vidlice k bubnu a poté byla celá tato sestava přišroubována ke konzole pomocí čtyř šroubů M10. Do konzoly byla přimontována sestava motůrku pomocí držáku. Mezi vidlici a píst byl vložen pružný člen, který byl připojen pomocí čepů. Předposledním krokem byla instalace krabičky s elektronikou do konzoly. Finální operací bylo spojení zadní přípojovací desky s konzolou pomocí dvou kolíků Ø 5 mm a čtveřice šroubů M8. Takto smontované nové nanášecí rameno je plně připravené na nahrazení současného nanášecího ramene ve stroji. Při výměně nanášecích ramen je opakovatelná montáž ramene zajištěna dvěma středícími kolíky a upevnění je realizováno čtveřicí šroubů.



Obr. 103 Sestava prototypu

### 3.4.3 Rozšíření programu

Měřicí program musel být rozšířen o část řízení mechanismu výměny, aby bylo možné na základě naměřených a vyhodnocených hodnot provést automatickou výměnu nanášecího elementu. Dále byl program rozšířen o další vylepšení na základě poznatků z měření.



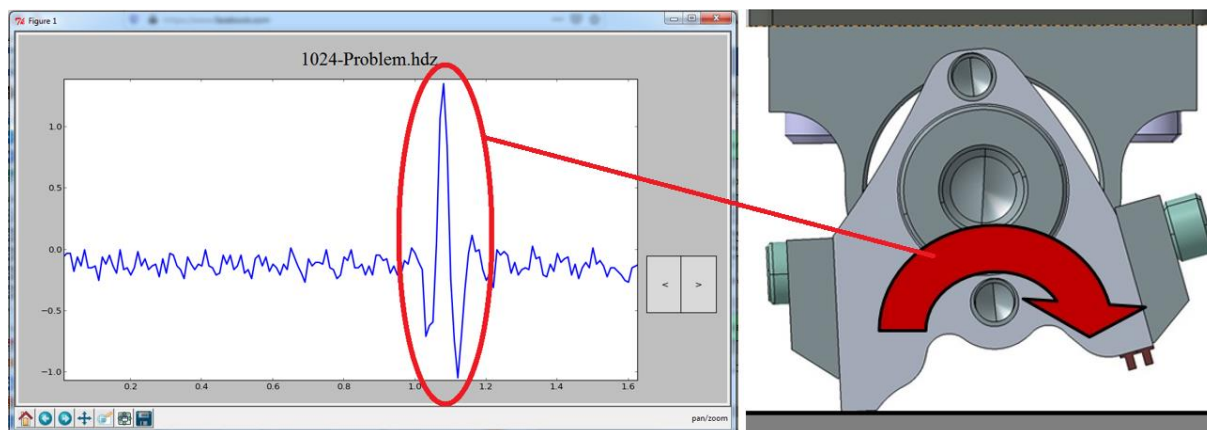
Obr. 104 Rozšíření programu

Mezi rozšíření programu na základě poznatků patří například vytvoření svislice v určitém časovém intervalu, změna doby měřeného pásma, možnost ignorování časového úseku záznamu od startu. Dále zde přibýly funkce vzorkování a výběr připojení com port. Tyto dvě funkce slouží pro zjednodušení propojování a komunikace měřícího zařízení s aplikací. Na základě mnoha experimentů byly stanoveny optimální hodnoty pro všechna tato rozšíření.

Nejdůležitější částí rozšíření programu byla výměna nanášecího elementu. Aby bylo možné výměnu automaticky provést, bylo nezbytné vyřešit dílčí části jako nastavení pozic prvního a druhého nanášecího elementu, podnět pro automatickou změnu a také umožnit výměnu na základě rozhodnutí operátora.

Pozice pro správné nastavení nanášecích elementů by měly být nastaveny pouze při prvním použití a následně by měly být totožné. Při výměně opotřebovaných nanášecích elementů za nové, by měly být překontrolovány. V průběhu životnosti karbonového kartáčku může docházet ke drobným korekcím hodnoty správné pozice, aby nanášená vrstva byla stejná u obou elementů, jak je popsáno níže viz porovnání tloušťky vrstvy. Hodnoty nastavení pozic pravítek jsou uvedeny v krajních políčkách nad posuvníkem. Prostřední hodnota ukazuje aktuální pozici. Jestliže operátor uzná za nezbytné provést výměnu nanášecího elementu, tak má dvě možnosti jak to udělat. Buďto zapsat do prostředního políčka hodnotu druhého elementu, nebo přetáhnout posuvník na druhý konec intervalu. Oba způsoby umožňují korektně provést výměnu nanášecích elementů. Zadání hodnot pro výměnu může operátor provést kdykoliv i během procesu nanášení, neboť je algoritmem ošetřeno, aby výměna byla provedena až po dokončení nanášení aktuální vrstvy. Jestliže se nanášecí rameno nachází na koncové pozici a čeká na vypálení dané vrstvy a obsluha očekává dostatečnou časovou prodlevu pro výměnu nanášecího elementu, může použít tlačítko nastavit zdvih. Při zadání dané hodnoty a použitím tohoto tlačítka se provede výměna ihned.

Automatická výměna funguje na principu vyhodnocení průběhu záznamu stejným způsobem jako funkce pro označování kolizních vrstev při ukládání záznamu, jak bylo popsáno výše. Jestliže je překročena nastavená hodnota zrychlení, aplikace vyšle signál pro výměnu nanášecích elementů. Tato hodnota je v programu označena jako mezní rozkmit a má výrazně vyšší hodnotu než problematický rozkmit, neboť problém podněcující změnu musí být opravdu závažný. Uvedená hodnota mezního rozkmitu byla stanovena experimentálně na základě několika stovek měření. Pro přesnější stanovení této hranice by bylo potřeba provést velice rozsáhlý výzkum založený na celé řadě experimentů zaměřených především na problematické tisky, u kterých dochází k obrovským problémům končících zastavením tisku. Na základě získaných hodnot před zastavením tisku z jednotlivých experimentálních měření by bylo možné vytvořit znalostní databázi. Na základě této databáze by byla určena přesná hodnota vibrací, při které je nezbytné nutně vyměnit nanášecí element, neboť překročením této hranice by došlo k zastavení tisku.



Obr. 105 Automatická výměna

Část zdrojového kódu, zajišťující výměnu nanášecího elementu, je vyobrazena na obrázku 106. Kompletní zdrojový kód pro celou aplikaci obsahuje více než 2,5 tisíce řádek.



```
i=0
while i<(len(cas_pole)-1):
    text=text+str(cas_pole[i])+" ; "+str(V_pole[i])+" ; "+str(X_pole[i])+" ; "+str(Y_pole[i])+
    i=i+1

t_ignoros=int(float(vzork.get())*float(dI.get()))
print t_ignoros

if (max(X_pole[t_ignoros:(len(X_pole) - 2)]) - min(
    X_pole[t_ignoros:(len(X_pole) - 2)]) > (float(pR.get()))):
    pripoj="KOLIZE_"+str(round(max(X_pole[t_ignoros:(len(X_pole) - 2)]) - min(
        X_pole[t_ignoros:(len(X_pole) - 2))),2))

else:
    pripoj = ""

if (max(X_pole[t_ignoros:(len(X_pole) - 2)]) - min(
    X_pole[t_ignoros:(len(X_pole) - 2)]) > (float(kartac.get())):
    (globals()["zdvih"].set(zdvihl.get()))
    pripoj = "KOLIZE_VYMENA_"+str(round(max(X_pole[t_ignoros:(len(X_pole) - 2)]) - min(
        X_pole[t_ignoros:(len(X_pole) - 2))),2))

if 5 < 5.1:
    cesta_online_mereni = (T_cesta_onlinemereni.get(1.0, END))
    print cesta_online_mereni

    cesta_online_mereni = (str(cesta_online_mereni)).replace("\n", "")

    cesta_online_mereni = cesta_online_mereni + str(vrstva)+pripoj+".hdz"

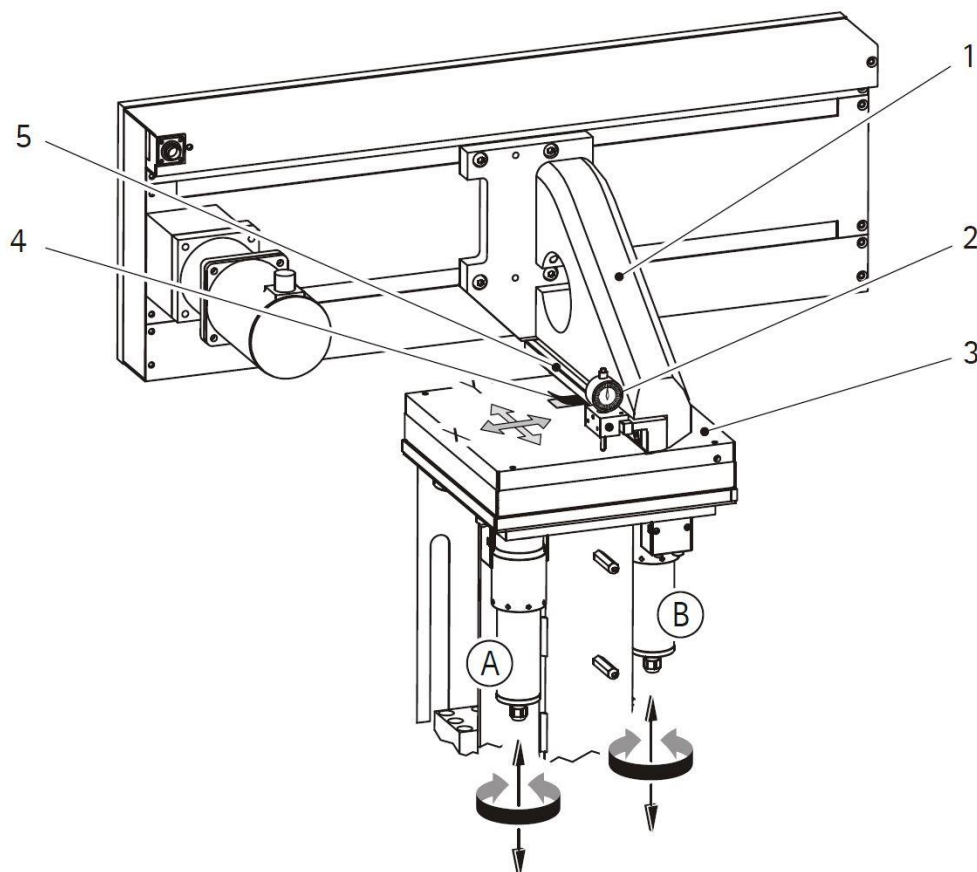
print cesta_online_mereni
saveFile = open(cesta_online_mereni, 'w')
saveFile.write(text)
#print text
saveFile.close()
text=""
vrstva=vrstva+1
print "ukladani hdz na dobrou "
zapnuto = 0
```

Obr. 106 Část kódu zajišťující výměnu

### 3.4.4 Vyrovnání stavební platformy

Příprava tisku se skládá z několika částí, jak již bylo výše zmíněno, jednou z nejdůležitějších částí je příprava stroje. Příprava stroje obnáší provedení série úkonů, které na sebe navazují a jsou nezbytné pro dokonalou přípravu stroje před započítím tisku. Všechny úkony přípravy stroje se při použití dvou-pravítkového provedení nanášecího ramene shodují, ovšem až na vyrovnání pracovní platformy a dále na nutnost nastavit nanášecí pozice pro oba nanášecí elementy.

Pro porovnání jsou zde uvedeny oba způsoby vyrovnání stavební platformy. Vyrovnání stavební platformy standardním způsobem se skládá z několika kroků a schéma vyrovnávání je vyobrazeno na obrázku 107. Na tomto obrázku jsou čísla označeny následující součásti, které vstupují do procesu vyrovnávání: 1 – nanášecí rameno, 2 – číselníkový úchylkoměr, 3 – stavební platforma, 4 – spárové měrky, 5 – pevná lišta. Postup vyrovnání se provádí z důvodu nanesení stejnoměrné tloušťky vrstvy prášku po celé stavební platformě. K nivelaci slouží posuvné prvky označených v obrázku písmeny A a B. Prvek A slouží pro vyrovnání platformy v podélném směru vůči nanášecímu elementu a prvek B slouží pro vyrovnání příčného směru.

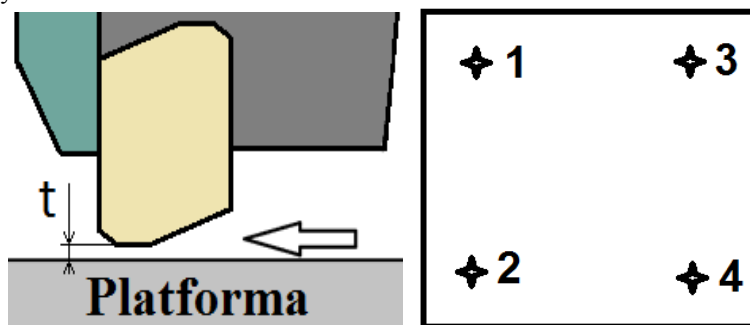


Obr. 107 Vyrovnání platformy [41]

Postup vyrovnání stavební platformy začíná najetím nanášecího ramene nad stavební platformu do levé části. Následně je pevná lišta očištěna pomocí ubrousku a na tuto lištu je nasazen číselníkový úchylkoměr v magnetickém držáku. Tato lišta je rovnoběžná s nanášecím elementem. Pomocí číselníkového úchylkoměru je zjištěna odchylka v podélném směru v několika bodech a následně pomocí nastavovacího prvku je platforma vyrovnána v příčném směru. Poté je nutné zkontrolovat i pravou stranu platformy přesunutím nanášecího ramene a zopakováním tohoto postupu. Jestliže se zde objeví odchylka, tak je nutné vyrovnat i příčný směr pomocí nastavovacího prvku B. Povolená odchylka je 0,03 mm. V posledním kroku je nutné nastavit stavební platformu na požadovanou výšku vůči nanášecímu elementu, neboť jsou platformy používány opakovaně, ovšem jejich výška je kvůli nutnosti přebroušení po každém použití rozdílná. Toto nastavení se provádí pomocí spárových měrek, které se vkládají do mezery mezi nanášecí pravítko a platformu. Po zjištění velikosti mezery je nutné zvednout stavební platformu do takové výšky, aby vzniklá mezera mezi platformou a nanášecím pravítkem byla rovna tloušťce vrstvy tisku, čili v tomto případě 0,04 mm. Nyní je vyrovnání platformy hotové a je možné provést nanášení základní vrstvy.

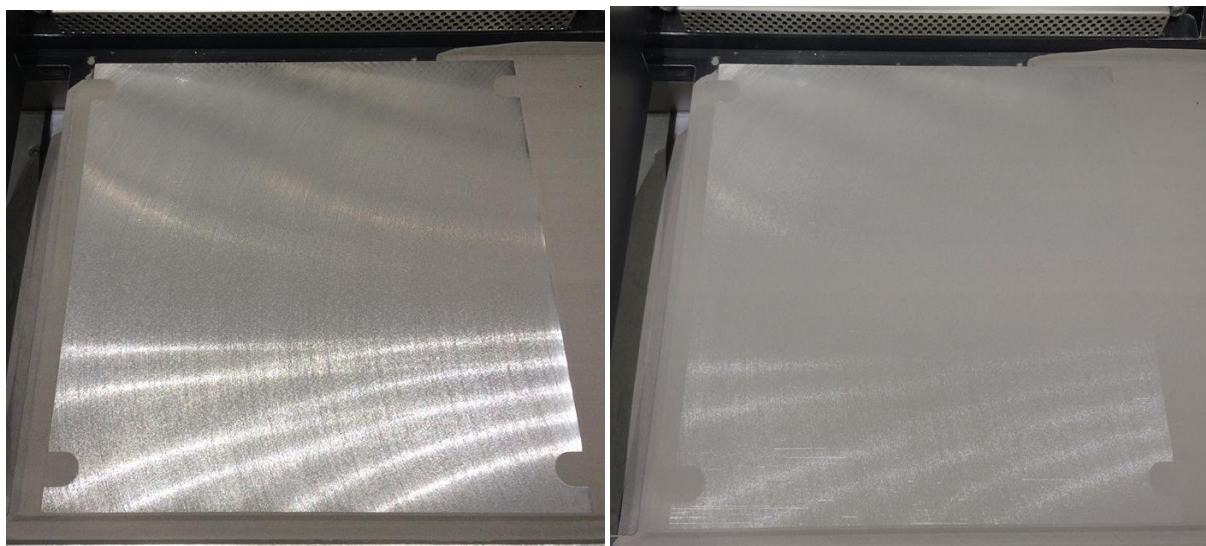
U nové koncepce nanášecího ramene se dvěma nanášecími elementy nebyla pevná lišta integrována do konstrukce, a proto se změnilo znivelování stavební platformy. Proces nivelace je spojen s procesem hledání polohy platformy vůči nanášecímu elementu. Platforma je vyrovnána pomocí spárových měrek tak, že se platformou vyjede do takové výšky, aby spára mezi platformou a nanášecím elementem byla měřitelná spárovými měrkami. Následně se velikost spáry porovnává v několika místech platformy, minimálně ve 4 bodech, jak je naznačeno v obrázku 108. Jestliže je zjištěna různá velikost spáry, je nutné platformu vyrovnat pomocí nastavovacích prvků. Jestliže je platforma dostatečně vyrovnána, tj. že jedna velikost spárové měřky má ve všech zkoušených místech stejný odpor při vsouvání do spáry, může být platforma nastavena na velikost tloušťky vrstvy tisku. Tímto je platforma vyrovnána a je nanášená základní vrstva prášku, ale protože se jedná o dvou-pravítkové provedení, není proces nastavování u konce. Tato pozice je nastavena dorazem jako pracovní pozice pro keramické pravítko. Následně je nezbytně nutné nastavit pracovní pozici karbonového kartáčku, pro případ, že by během tisku došlo k problémům a bylo by potřeba změnit nanášecí element. V tomto případě není možné použít spárové měřky z podstaty ohebnosti štetinek kartáčku, ale nastavování na správnou výšku se provádí postupným nanášením první vrstvy tak, aby byla nanášená tloušťka vrstvy byla totožná jako vrstva vytvořená keramickým pravítkem. Správného nastavení výšky karbonového kartáčku je dosaženo během

několika iterací. Pro tuto pozici se nastaví druhý doraz. Totožnost nanášených vrstev je překontrolována tak, že se pomocí automatického módu přemění na druhý typ nanášecího elementu a provede se nové nanesení vrstvy, přičemž vrstvy musí být totožné.



Obr. 108 Pozice měření spárovými měrkami

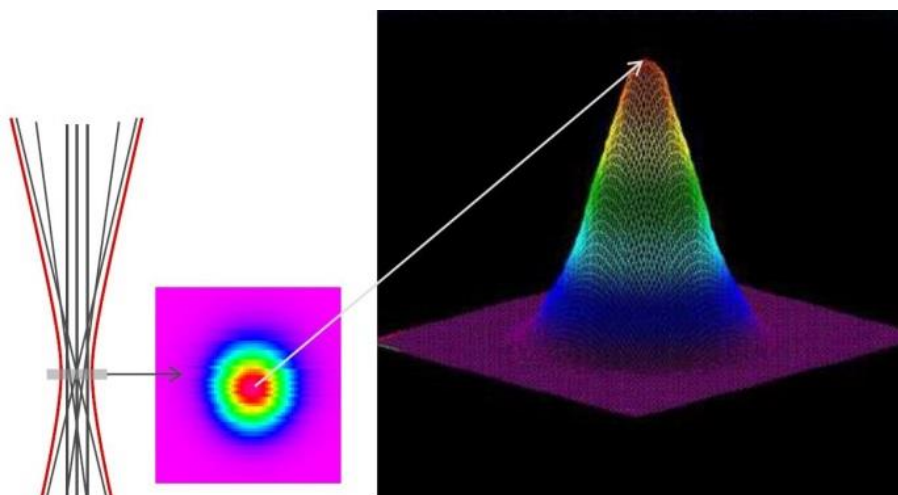
Obrázek 109 demonstruje rozdíl při nastavení tloušťky první vrstvy, přičemž na prvním obrázku je vyobrazena správně nanesená první vrstva prášku o tloušťce 0,04 mm. Tato vrstva prášku je rovnoměrně nanesená a zároveň velice tenká, a proto nejen lesklý broušený povrch ale i stopy brusného kotouče jsou dobře viditelné. Oproti tomu druhý obrázek ukazuje tloušťku vrstvy 0,08 mm. V tomto případě je markantní rozdíl při prosvítání broušeného povrchu platformy skrze nanesenou vrstvu, přičemž odchylka mezi nanesenými vrstvami je pouze 0,04 mm. V tomto případě již nejsou zřetelně viditelné stopy po brusném kotouči. Díky tomuto výraznému rozdílu je nastavení obou nanášecích elementů na stejnou pozici velice jednoduché a s dostatečnou přesností porovnatelné.



Obr. 109 Porovnání vrstev - základní 0,04 a výška vrstvy 0,08 mm

### 3.4.5 Totožná poloha nanášecích elementů

Nejen intenzita laseru má vliv na přesnost tisku, ale i zaostření laseru má významný vliv. Laserový paprsek má při spékání dvě oblasti. V oblasti o přibližné velikosti 80  $\mu\text{m}$  je koncentrována energie laserového záření. V této oblasti probíhá hlavní spékání. V druhé oblasti tvaru mezikruží o velikosti 150-200  $\mu\text{m}$  je teplem ovlivněná oblast, ve které také probíhá spékání. [15]



Obr. 110 *Zaostření laseru [15]*

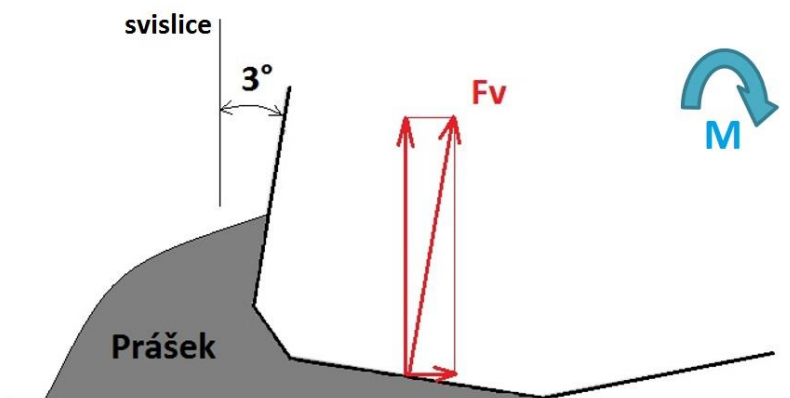
Vzhledem k důležitosti přesného zaostření laserového paprsku musí být dodržena stejná pozice spékané vrstvy. U standardního jedno-pravítkového provedení je toto zajištěno pevnou pozicí nanášecího pravítka v nanášecím rameni. I při použití dvou-pravítkového provedení pomocí překlápění pravítek je nutné, aby tato vzdálenost mezi laserovou optikou a stavební platformou připravenou pro tisk byla totožná. Přenesení této vzdálenosti bylo provedeno tak, že byla stavební platforma nastavena na pozici tisku pro standardní nanášecí rameno. Následně byla celá sestava standardního nanášecího ramena demontována a byla nahrazena sestavou ramena s dvou-pravítkovým provedením. Při nastavení do koncové polohy u keramického kartáčku bylo zjištěno, že zde dochází k rozdílu výšek 0,85 mm. Tuto odchylku bylo třeba eliminovat tak, aby nanášecí element byl vždy ve stejné výšce, bez ohledu na druh nanášecího ramene. Proto byly vytvořeny podložky o tloušťce rovnající se naměřené odchylce. Tyto podložky byly vloženy mezi rám a objímky ložisek, čímž byly nanášecí elementy posunuty níže na požadovaný rozměr. Neboť při testování došlo k dalším závažným problémům, jak bude popsáno níže, byly některé díly sestavy přepracovány a vytištěny znovu, čímž došlo k odstranění i těchto kompenzačních podložek. Obrázek 111 zachycuje najetí dvou-pravítkového nanášecího ramene nad nastavenou platformu pro měření rozdílu.



Obr. 111 *Testování totožné výšky*

### 3.5 Testování dvou-pravítkového nanášecího ramene

Testování automatické změny nanášecího elementu proběhlo bez sebemenších obtíží a je možné konstatovat, že automatická výměna nanášecího elementu funguje velice dobře. Ovšem během prvního testování nanášení prášku došlo k problémům s nanášením tenké vrstvy pomocí keramického pravítka, ale u nanášení pomocí karbonového kartáčku se žádné problémy neprojevíly. Při aplikaci tenké vrstvy keramickým pravítkem nebylo možné dosáhnout kvalitní a především požadované tloušťky první vrstvy i přesto, že keramické pravítko bylo nastaveno na správnou hodnotu. I při následném snižování tloušťky vrstvy na zápornou hodnotu došlo vždy pouze k lehkému nárazu pravítka o hranu stavení platformy a dále byla nanášená vrstva nevhodná. Přibližně na prvních dvou milimetrech stavební platformy bylo vždy jasně zřetelné, že došlo k nárazu pravítka o platformu a ta v tomto místě byla téměř bez naneseného prášku, kdežto zbytek platformy byl pokryt poměrně silnou vrstvou. Tento fenomén se opakoval stále dokola i při následném přenastavení. Při detailním zkoumání bylo zjištěno, že dochází ke klopení bubnu. Tato možnost se zdála být velice nepravděpodobná, neboť doraz bubnu při pracovní poloze keramického pravítka byl situován tak, aby při nárazu pravítka způsobená silová reakce byla směřována proti dorazu a tím byl eliminován možný pohyb bubnu. I přesto docházelo k pohybu bubnu, ovšem na druhou stranu, což bylo v tento okamžik naprosto nesmyslné. Ovšem síla, která zde vznikala, nepůsobila proti dorazu ale opačným směrem, proto bylo zřejmé, že síla není vyvozena od nárazu a zároveň nesměruje proti keramickému pravítku. Pro ověření tohoto tvrzení bylo keramické pravítko vyměněno za ocelové. A při aplikaci vrstvy pomocí nanášecího elementu z HSS nevznikaly žádné potíže a nanášená vrstva byla perfektní. Z tohoto důvodu byla pozornost zaměřena na keramické pravítko a jeho geometrii. Obrázek 112 demonstruje silové rozložení v dané situaci. Neboť došlo k nesprávnému nastavení keramického pravítka při pracovní poloze, tak prášek, který je hnut před pravítkem, byl v tuto chvíli pěchován pod pravítko. Toto pěchování bylo způsobeno geometrií pravítka a vyvozovalo normálovou sílu, která vytvořila takový moment, že byl deformován předepjatý pružný člen, čímž docházelo ke klopení bubnu s pravítky.



Obr. 112 Klopení pravítka

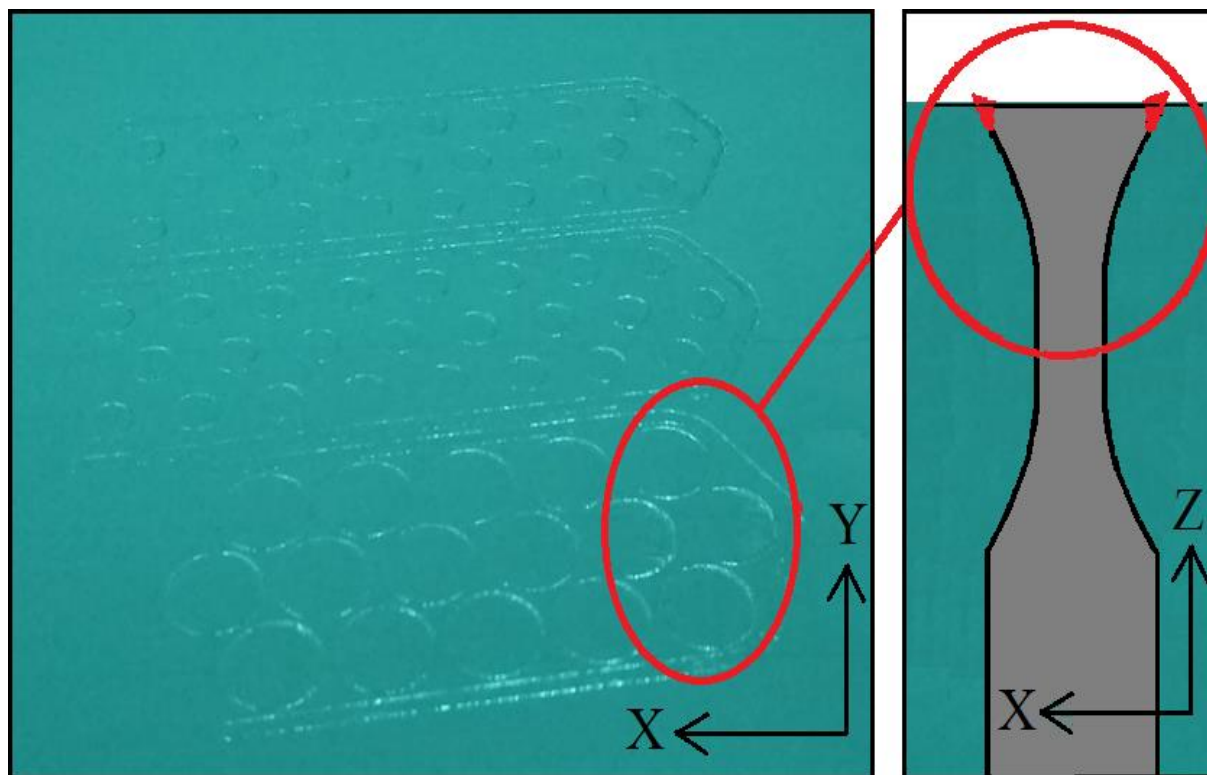
Při navrhování modelu nastala chyba, která byla odhalena až při samotném testování. Problém byl v tom, že při nastavení keramického pravítka do pracovní pozice, došlo k odchylce od svislé polohy o přibližně 3°. Neboť lůžko pro keramické pravítko bylo prve vytvořeno pro větší zdvih motůrku, čili pracovní pozice měla být ve svislé poloze, ale při následné úpravě na skutečný zdvih bylo opomenuto opravit i lůžko. Tato minimální nuance se mohla zprvu zdát nepodstatná, ovšem opak byl pravdou.

Na základě zanalyzovaných problémů při prvním reálném testu dvou-pravítkového provedení, bylo konstatováno, že tyto problémy je možné odstranit pouze úpravou modelu a je zapotřebí některé komponenty vytisknout a obrobít znovu. Jako například držák ložisek, upínací bubnu a pružný člen.

Po úpravě modelu, vytištění, obrobení a kompletaci byla soustava dvou-pravítkového provedení opětovně otestována. Je možné konstatovat, že výše zmíněný problém byl tímto odstraněn a je možné použít tuto sestavu pro reálný tisk.

## 4 Ověření funkčnosti navrženého zařízení v reálném tisku

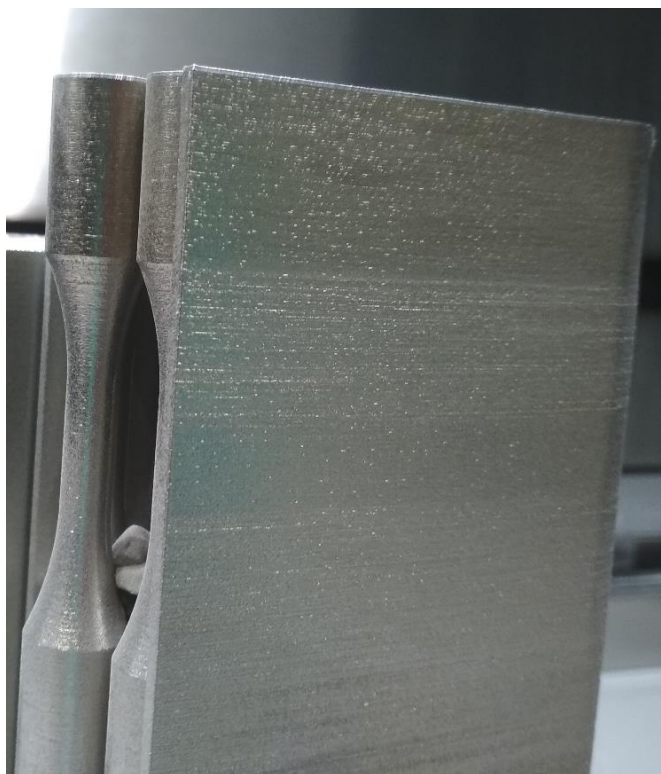
Pro ověření navrženého zařízení v reálném tisku byl vybrán představitel, který byl tisknut už mnohokrát a velice často se u něho objevily velké problémy, a tím je zkušební vzorek pro zkoušku tahem. U tohoto představitele se často objevují problémy, které ve více než polovině případů končí zastavením tisku. Tento problém se výhradně objevuje u tisku zkušebních tyčí orientovaných v ose Z. Po zastavení tisku je potřeba rozhodnout, zda je možné tisk navázat a pokračovat dále. V některých případech se jedná pouze o drobný problém, který se dá vyřešit zvednutím nanášené vrstvy o setinu či dvě setiny milimetru a tisk může být opětovně spuštěn bez otevření procesní komory. Ovšem velice často při zastavení tisku dochází k tak výraznému zvednutí převislého konce nad tištěnou vrstvou, že je nutné otevřít procesní komoru a tento výčnělek ručně upilovat tak, aby bylo možné pokračovat v tisku. V některých případech po navázání tisku se zastavování opakuje, tak je nezbytné model zkušebního vzorku upravit a tisk spustit od začátku. Všemi těmito nepříjemnostmi dochází k výraznému navýšení nákladů na výrobu, přičemž pokud se jedná o tisk, který byl nenávratně zastaven a kvůli tomu je nezbytně nutné upravit model nebo jeho vypořádování, tak jsou náklady několikanásobně vyšší. Problematické místo u tohoto tisku je vyobrazeno na obrázku 113. Jedná se o část zkušebního vzorku, kde dochází k rozšířování vzorku ze zkušebního dřívku na upínací část pomocí rádiusu. Jak je na obrázku v označeném místě vidět, tak při nanesení vrstvy prášku kontury vzorků vystupují nad nanášený povrch a v tomto případě dochází ke kontaktu nanášecího elementu s dílem. Děje se tomu tak především u vyšších vzorků, kdy dochází ke špatnému odvodu tepla a převislé konce jsou přehřívány a mají tendenci se zvedat. Tento problém byl detailně popsán v kapitole Drsnost povrchu u spodní strany dílů.



Obr. 113 Po nanesení vrstvy - zvednuté okraje

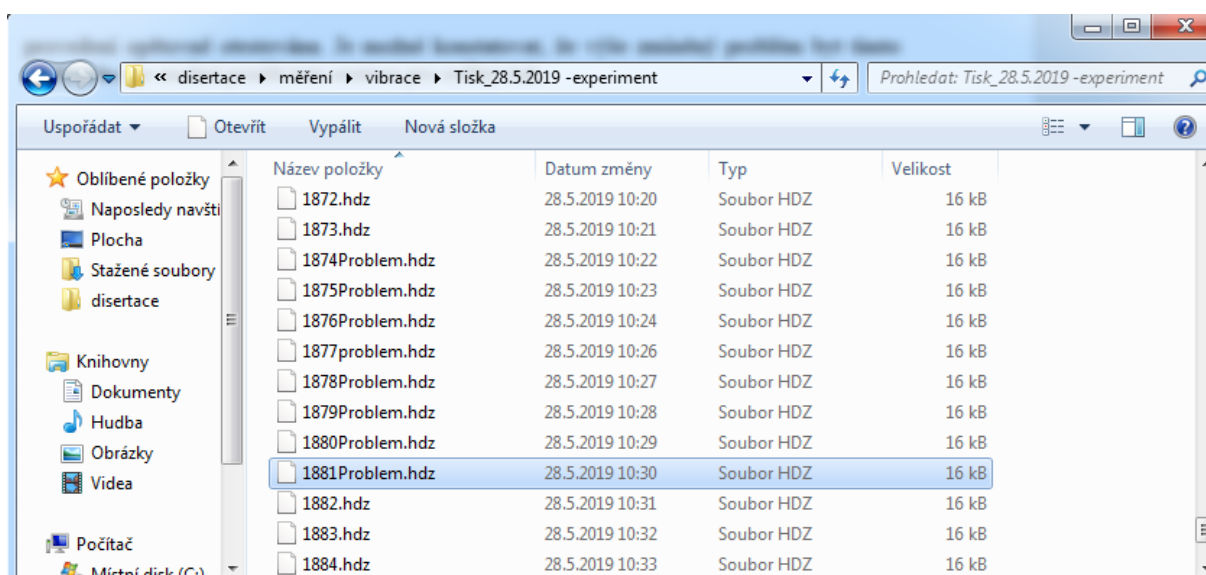
Pro tento případ problematického tisku bylo použito nové koncepce dvou-pravítkového nanášecího ramene umožňující výměnu nanášecího elementu během procesu tisku na základě měření vibrací během nanášení vrstvy prášku. Předpoklad vzniku problémů se potvrdil a při tisku se projevil výše popsany problém s kontaktem nanášecího elementu a tisknutého dílu v inkriminovaném místě.

Na základě měření vibrací nanášecího ramene během nanášení práškového lože byla iniciována změna nanášecího elementu z keramického pravítka na karbonový kartáček. Díky této změně se podařilo tisk dokončit bez zastavení, jak ukazuje obrázek 114. Přejít nanášecích elementů se nachází na rozhraní upínací části a přechodového rádiusu. Tato oblast je poměrně dobře identifikovatelná, neboť má lehce tmavší barvu povrchu. Změna nanášecího elementu během procesu tisku nikterak neovlivní mechanické vlastnosti, jak bylo ověřeno v kapitole Zkouška tahem druhá etapa.



Obr. 114 Dokončený tisk

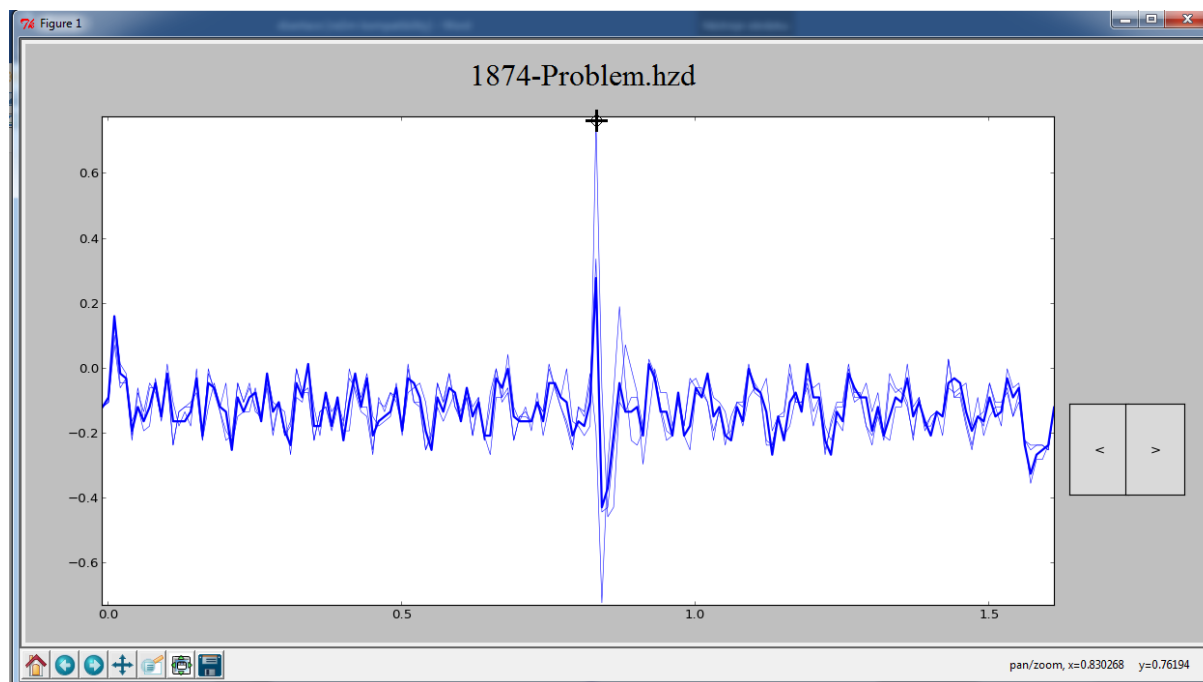
Program měří vibrace během procesu nanášení práškového lože a záznamy z každé vrstvy ukládá do složky s číslem dané vrstvy, jestliže se během tisku vyskytnou problémy s vyšší hodnotou rozkmitu než 0,25 G, tak jednotlivé vrstvy označí příponou *problém*. Díky této funkci je velice jednoduchá identifikace problému, jak je vidět na obrázku 115. Dále je jednoduché identifikovat vrstvu, kdy došlo k výměně nanášecího elementu, neboť je to poslední vrstva s koncovkou *problém*. Po výměně se nepředpokládá, že by byl detekován další problém při použití karbonového kartáčku, neboť pro detekování problému by musel díl narážet o plechovou část kartáčku. To je velice nepravděpodobné, neboť by díl musel vystupovat minimálně 1,5 mm nad nanášenou plochu.



Obr. 115 Složka s uloženými a označenými záznamy

Na základě automatického označení vrstev s problémem byly vybrány pro porovnání tři vrstvy a to tak, aby byl vidět stoupající charakter vzniklého problému. První vrstva, u které se projevil problematický rozkmit, byla označena číslem vrstvy 1874. Záznam průběhu je na obrázku 116 znázorněn tučnou modrou čarou. Přibližně v polovině nanášení se objevil významný rozkmit o velikosti cca 0,7 G a dále byl průběh nanášení bez známek

dalších významnějších kontaktů nanášecího pravítka s díly. Poloha významného rozkmitu odpovídá poloze prvních zkušebních vzorků na platformě. Druhou vrstvou pro hodnocení byla zvolena vrstva 1877. Tato vrstva je označena tenkou modrou barvou a v inkriminovaném místě dosahovala rozkmitu cca 0,8 G. Ovšem oproti prvnímu záznamu je patrný rozdíl u druhého kladného výkmitu. Tento druhý výkmit dosahoval hodnoty 0,55 G. Jako poslední byl vybrán záznam přesahující hranici stanovenou pro výměnu nanášecího elementu a byla to vrstva s číslem 1881. Hraniční rozkmit, podněcující změnu nanášecího elementu, byl nastaven na hodnotu 1,5 G. I tento záznam byl také znázorněn v grafu tenkou modrou čarou. Ovšem díky odlišnosti velikosti naměřených hodnot výkmitu v inkriminovaném místě jsou od sebe záznamy jednoduše odlišitelné. V maximální kladné hodnotě je kurzor a tato hodnota odpovídá 0,76 G, ovšem nejvyšší záporná hodnota je 0,77 G, což znamená, že výsledný rozkmit má hodnotu 1,53 G. Jak je u všech záznamů jasně patrné, jedná se o stejný problém, pouze měl stoupající charakter, takže je naprosto zřejmé, že bez výměny nanášecího elementu by jistě došlo k zastavení tisku, jako již několikrát předtím.



Obr. 116 Průběh problému

Tímto experimentálním ověřením byla potvrzena bezchybná funkčnost zařízení pro měření vibrací během procesu nanášení vrstvy prášku, aplikace HD3D detektor kolizí, nového nanášecího ramene, funkčnost automatického módu výměny nanášecích elementů během procesu tisku a dalších zařízení a komponent vytvořených v rámci DP.

## 5 Přínosy DP a doporučení pro další bádání

Prvním z přínosů předkládané DP je detailní popis vlivu keramického a karbonového nanášecího elementu na 3D tisk kovových součástí metodou DMLS, přičemž zkoumání bylo velice komplexní a bylo provedeno v následujících oblastech:

- **Podíl nečistot ve struktuře**
- **Zkouška tahem**
- **Metalografie**
- **Zkouška rázem v ohybu**
- **Zkouška cyklického zatěžování**
- **Přesnost**
- **Drsnost**

Ve výše uvedených oblastech bylo porovnáváno keramické pravítko a karbonový kartáček, neboť doposud nebyl vliv karbonového kartáčku popsán a dokonce nebyly výrobcem deklarovány mechanické vlastnosti při jeho použití. Tato práce slouží jako evaluace karbonového kartáčku, neboť ve výše uvedených oblastech dosahoval téměř totožných kvalitativních i kvantitativních parametrů jako keramické pravítko.

Druhý z hlavních přínosů DP pro obor 3D tisku je zkonstruování a otestování funkčnosti unikátního dvou-



pravitkového nanášecího ramene s adaptivním řízením, které má ambice doplnit stávající monitorovací systémy s cílem předcházet kolizním tiskům. Díky tomuto systému je možné v reálném čase monitorovat nanášecí proces kovového prášku a na základě měření vibrací rozhodnout o nutnosti změny nanášecího elementu. V případě překročení stanovené mezní hladiny vibrací nanášecího ramene je iniciována změna nanášecího elementu bez nutnosti přerušení procesu tisku. Monitorování procesu i změna nanášecího elementu jsou realizovány v automatickém módu čili bez zásahu obsluhy.

Závěrem je možné konstatovat, že vytvořená zařízení a získané výsledky jsou přínosné jak pro akademickou, tak pro aplikovanou sféru. Výsledkem této DP z hlediska akademického jsou vědecké články, výzkumné zprávy, funkční vzorky, rozsáhlé experimenty s velkým množstvím výsledků a především podání patentové přihlášky s názvem Adaptivní systém nanášení kovového prášku pro AM. Aplikační část podtrhuje podání univerzitního projektu gama na komercializaci vytvořeného adaptivního systému nanášení kovového prášku při 3D tisku, jenž si klade za cíl optimalizovat vytvořený systém a přizpůsobit jej pro průmyslové využití. Dále byla podepsána smlouva NDA s firmou EOS GmbH Electro Optical Systems s cílem společně spolupráce na vývoji na více pravitkovém nanášecím rameni a možnostech tento systém začlenit do sériové výroby.

Na základě této DP vyplynulo několik zásadních výzkumných směrů, kterým by bylo vhodné se intenzivně věnovat, prohlubovat znalostní databáze a díky tomu tuto příležitost v co nejkratším čase přetransformovat v konkurenční výhodu RTI. Tato témata jsou velmi aktuální a je více než vhodné načerpané poznatky publikovat v celosvětových publikačních databázích.

- Prvním budoucím směrem výzkumu je detailní zmapování dvou-pravitkové koncepce nanášecího ramene z hlediska mezní hodnoty vibrací iniciující tuto změnu. Výzkum by se měl zaměřit především na vytvoření znalostní databáze mezní hodnoty pro inicializaci změny nanášecího elementu. Pro přesné stanovení této hranice je potřeba provést velké množství experimentů zaměřených především na problematické tisky, u kterých dochází k problémům končících zastavením tisku a na základě naměřených hodnot před zastavením tisků vytvořit znalostní databázi. Na základě této databáze bude možné determinovat přesnou hranici, kdy je naprosto nezbytné vyměnit nanášecí element, aby nedošlo k zastavení tisku. Na základě experimentů nebude hodnocena pouze aktuální hodnota vibrací v dané vrstvě, ale program bude zohledňovat předešlé průběhy a bude predikovat budoucí chování a na základě těchto výsledků bude moci efektivně rozhodnout o nutnosti změny nanášecího elementu. Ovšem tvorba této znalostní databáze a predikčního softwaru přesahuje rámec DP.
- Dále by se výzkum měl ubírat směrem vývoje a optimalizace dvou-pravitkové koncepce nanášecího ramene, které bylo v rámci této práce vyvinuto jako nízkonákladový prototyp s řadou nedostatků a slabých míst. Pro sériové použití bude nezbytné provést dlouhodobé testování a na základě těchto zjištění provést optimalizaci koncepce popřípadě tuto koncepci přepracovat. Současně je třeba věnovat pozornost měřicímu zařízení a řídicímu systému. Měřicí zařízení by bylo vhodné přepracovat tak, aby zde byly využity kvalitnější součástky a tím byla zajištěna bezproblémová funkčnost. V neposlední řadě je vhodné vyvíjet vytvořenou aplikaci a rozšiřovat jí o další funkce, které zvýší uživatelský komfort a budou přispívat ke zvýšení efektivnosti 3D tisku kovů.
- Posledním výzkumným směrem je prohlubování znalostní databáze mechanických vlastností tištěného materiálu. Rozšíření znalostí chování tištěného materiálu o další zkoušky a analýzy jako například zkouška šíření trhliny, míjivé cyklické zatížení atd. Tyto zjištěné materiálové vlastnosti dát do korelace s celosvětovými publikacemi a zároveň hledat vhodné praktické využití tohoto materiálu v průmyslové praxi.

## 6 Závěr

Předkládaná disertační práce si kladla za cíl zvýšení efektivity 3D tisku kovových součástí metodou DMLS a to díky vytvoření unikátního nanášecího ramene, které umožňuje měření vibrací během tisku a zároveň umožňuje výměnu nanášecího elementu při vzniku problému během tisku bez přerušení tisku. Ovšem pro úplné a zároveň úspěšné naplnění tohoto primárního cíle bylo zapotřebí splnit několik sekundárních cílů, bez kterých by toho nebylo možné dosáhnout.

Prvotním cílem práce bylo provést analýzu současného stavu nanášení tenké vrstvy práškového lože během 3D tisku a na základě této analýzy vytipovat slabá místa procesu. Tato místa následně detailně popsat, určit příčiny a zvážit možnosti zmírnění případně úplné eliminace těchto slabých míst. Na základě těchto poznatků byla navržena metoda změny nanášecího elementu. Pro ověření, zda změna nanášecího elementu má vliv na mechanické vlastnosti, rozměrovou přesnost a drsnost vytištěných součástí, byl proveden rozsáhlý výzkum porovnávající vytištěné součásti pomocí keramického pravítka a karbonového kartáčku.

Nejprve byl proveden výzkum statických a dynamických vlastností v závislosti na druhu použitého nanášecího elementu, a to u materiálu MS1. Statická zkouška tahem potvrdila, že mechanické vlastnosti 3D tištěného materiálu jsou anizotropní. Hodnoty mechanických vlastností vzorků tištěných ve směru osy X dosahují lepších výsledků než vzorky tištěné ve směru osy Z. Toto tvrzení podtrhuje i fakt, že průměrná hodnota meze pevnosti v ose X byla 1195 MPa a hodnoty v ose Z přibližně o 10 % nižší. Všechny naměřené hodnoty mechanických vlastností dosahovaly vyšších hodnot, nežli deklaruje výrobce. **Pracovní hypotéza o vlivu zastavení tisku a opětovném navázání tisku bez ohledu na použitý nanášecí element, byla vyvrácena.** Při zkoušení dynamických vlastností pomocí zkoušky vrubové houževnatosti došlo k výraznější odchylce naměřených hodnot při teplotě 20 °C. Vzorky vytištěné v ose X pomocí karbonového kartáčku dosahovaly o 19 % nižší hodnoty vrubové houževnatosti KCV, ovšem při teplotě - 40 °C a + 200 °C byly srovnatelné. Je potřeba konstatovat, že byly zkoušeny pouze 3 vzorky při každé teplotě. Z tohoto důvodu byl další výzkum zaměřen na zkoušení při teplotě 20 °C. Vzorky byly vytištěny v odlišné orientaci oproti první sérii, a to v ose Z, a bylo zvoleno 6 vzorků od každého nanášecího elementu. Nejlepších výsledků bylo dosaženo změnou z keramického pravítka na kartáček, kdy průměrná hodnota KCV byla 179 J. Karbonový kartáček dosáhl téměř totožné průměrné hodnoty KCV, ovšem jedno měření bylo vyloučeno na základě nahodilé chyby. A se proto výsledná vrubová houževnatost karbonového kartáčku a keramického pravítka lišila pouze o 5 J ve prospěch karbonového kartáčku. Průměrná hodnota KVC u karbonového byla stanovena na 168,9 J. Pomocí mikroskopie byl zkoumán podíl nečistot ve struktuře vytištěných dílů a na základě výsledků je možné konstatovat, že nebyl shledán rozdíl mezi konkurenty.

Z hlediska cyklického zatížení dosahuje nejlepších výsledků změna nanášecích elementů, kdy mez únavy byla stanovena na 550 MPa oproti tomu jeho konkurenti dosáhli meze únavy 530 MPa. Toto bylo velkým překvapením, neboť byla předpokládána zhoršená mez únavy právě u změny nanášecího elementu během procesu tisku, ale opakované měření potvrdilo tuto hodnotu. Dokonce některé vzorky dosáhly 10 miliónů cyklů při vyšší zátěži (560 MPa a 570 MPa), ale při opakovacích měření meze únavy nebyla dosažena.

Z provedených experimentů plyne, že napětí 530 MPa je limitní hodnota pro mez kluzu u 3D tištěného materiálu bez ohledu na použitý nanášecí element, neboť všechny zkoušené vzorky s napětím 530 MPa a nižším dosáhly meze únavy. Při porovnání spojnic keramického pravítka a karbonového kartáčku je pozorován pouze minimální rozdíl, a to vždy do 10 MPa. Podle normy ČSN 420363 pro měření meze únavy u vysoko-pevnostních ocelí je tolerance meze únavy  $\pm 15$  MPa, takže pozorovaný rozdíl není přisuzován změně nanášecího elementu. **Předpoklad výrazně zhoršených dynamických vlastností s ohledem na použitý nanášecí element byl vyvrácen.**

Aby mechanické vlastnosti byly co nejvíce autentické situaci, kdy dojde ke změně nanášecího elementu během tisku, byl proveden experimentální tisk tahových vzorků s přerušením uprostřed zkušební části vzorků a s manuální a posléze i s automatickou výměnou nanášecího elementu. Pomocí automatické výměny nanášecích elementů byly následně dotištěny i vzorky pro vrubovou houževnatost a cyklické zatěžování. Díky tomuto experimentu byly zachyceny a popsány mechanické vlastnosti velice blízké reálnému procesu výměny. Na základě zjištěných výsledků je možné konstatovat, že změna nanášecího elementu se neprojeví na mechanických vlastnostech výsledného tisku.

Jedním z dílčích cílů práce byl provést výzkum přesnosti a drsnosti vytištěných součástí. V rámci výzkumu přesnosti bylo provedeno mnoho měření různorodých prvků s širokou škálou rozměrů a tvarů. Přesnost kovového 3D tisku nelze jednoznačně určit, neboť není totožná například u malých plno-objemových dílů, tvarově komplikovaných tenkostěnných dílů atd. Z tohoto důvodu bylo měřeno velké množství různých představitelů integrovaných v jedné součásti a na základě výsledků je možné tvrdit, že rozdíl mezi tisky jednotlivými konkurenty byl minimální a odchylka byla vždy do  $\pm 0,03$  mm. **Pracovní hypotéza o vlivu nanášecího elementu na přesnost tištěných dílů, která byla založena na faktu, že keramické pravítko nanáší vždy stejnou tloušťku vrstvy díky své tuhosti, čímž by mělo dosahovat lepších výsledků. Oproti**

**tomu karbonový kartáček nezaručuje nanášení vždy stejné tloušťky vrstvy, a proto byl předpoklad, že by se toto mohlo projevit na přesnosti dílů. Tato pracovní hypotéza byla vyvrácena.**

Drsnost 3D tištěných součástí je závislá na úhlu náklonu vůči stavební platformě, ovšem tento vliv je druhořadý, neboť nejvýznamněji drsnost povrchu ovlivňuje pozice plochy tzn. zda plocha je horní či spodní. Spodní strany vzorků vykazují velmi špatný povrch, kdy většina naměřených hodnot v rozmezí náklonu 35° - 60° vykazuje drsnost Ra vyšší hodnotu než 20 μm. Nejhorší drsnost plochy byla naměřena Ra 26,9 μm. Okolo úhlu 60° se nachází přechodová oblast, kde dochází ke skokovému zlepšení drsnosti, neboť hodnoty drsnosti u obou konkurentů se u hodnoty 55° a 65° téměř shodují. Od hodnoty 65° se drsnosti spodní strany dostávají pod hranici 8 μm a výrazně klesají až pod 5 μm při 85°. Oproti tomu drsnost u svrchní strany vzorků nevykazovala tak obrovské rozdíly, jako spodní strana. Zde se drsnost Ra pohybovala v rozmezí 12,3 μm až 4,5 μm. Z výsledků není patrné, že by se výsledky jednotlivých nanášecích elementů výrazně odlišovaly. Pásma, kdy je drsnost lepší u jednoho a následně zas u druhého z konkurentů, je možné sledovat, ale nejsou nikterak významná.

Po rozsáhlém výzkumu a vývoji vlivu nanášecího elementu na proces 3D tisku, jenž vyžadoval znalosti a zkušenosti z mnoha oblastí, které nejsou zrovna denním chlebem strojních inženýrů, jako například oblast elektrotechniky a programování, bylo vyvinuto a úspěšně otestováno měřicí zařízení na zaznamenávání vibrací během nanášení vrstev prášku. K tomuto zařízení byl vytvořen program, který dokáže zachytit a vyhodnotit vzniklé vibrace s dostatečnou rychlostí a přesností. Tento program byl nazván HD3D detektor kolizí.

Hlavním cílem bylo vytvoření unikátního dvou-pravítkového provedení nanášecího ramene s možností změny pravítka během tisku bez nutnosti přerušování tisku, přičemž každé z pravítek má odlišné vlastnosti při nanášení prášku. Tímto doposud nepopsaným řešením nanášení prášku s možností výměny pravítka během tisku byl potvrzen předpoklad výrazného snížení zmetkovitosti, která bylo zapříčiněno přerušením nebo úplným zastavením tisků z důvodů například rozkmitání podpor (dílů), deformace dílů atd. Použitím dvou-pravítkového ve spojení s aplikací HD3D detektor kolizí, která byla vytvořena v rámci této práce, je možné monitorovat proces nanášení vrstev prášku při 3D tisku. Na základě naměřených hodnot je možné pozorovat vznik a průběh výše zmíněných problémů a v případě, že situace má zhoršující se charakter, tak díky tomuto programu je možné reagovat automatickou výměnou nanášecího elementu bez zásahu obsluhy. Mezní hodnota pro výměnu nanášecího elementu byla stanovena experimentálně na základě několika stovek měření. Pro přesnější stanovení této hranice by bylo potřeba provést mnoho experimentů zaměřených především na problematické tisky, u kterých dochází k problémům končících zastavením tisku a na základě naměřených hodnot před zastavením tisků vytvořit znalostní databázi. Na základě této databáze by bylo možné determinovat přesnou hranici, kdy je naprosto nezbytné vyměnit nanášecí element, aby nedošlo k zastavení tisku.

Využitím dvou-pravítkového nanášecího ramene pro tisky s reálnými problémy byla potvrzena bezchybná funkčnost zařízení pro měření vibrací během procesu nanášení vrstvy prášku, aplikace HD3D detektor kolizí, nového nanášecího ramene, funkčnost automatického módu výměny nanášecích elementů během procesu tisku a dalších zařízení a komponent vytvořených v rámci DP. Díky vyvinutému zařízení v rámci DP došlo k výraznému snížení vícenákladů vznikajících kvůli zastavení tisku způsobeného střetem keramického pravítka a tištěných dílů.

## Použitá literatura

- [1] CONCEPT LASER Inc. *The Pace of Innovation and the Speed of Business*. [cit. 2016-11-20] Dostupný z: <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2015/12/the-pace-of-innovation-and-the-speed-of-business/>
- [2] SEKYRA, VÍT. *Výroba dílů technologií DMLS a jejich porovnání s jinými konvenčními technologiemi z hlediska ekonomické náročnosti*. V Brně 2011. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=41825](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41825), Diplomová práce. VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. JOSEF SEDLÁK, Ph.D.
- [3] ČAPKOVÁ, V. *Technologické aspekty stavby kovových součástí metodou rapid prototyping*. V Plzni 2013. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/9318> Bakalářská práce. Vedoucí práce Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
- [4] SLM SOLUTION gmbh. *Selective laser melting at its best*. [cit. 2016-11-20] Dostupný z: <http://hniforum.no/cmsAdmin/uploads/slm-presentasjon-brattv-g.pdf>
- [5] MAPAL. *Mass Manufactures Drills to Perfection with 3D Printing*. [cit. 2017-1-20] Dostupný z: <http://www.notey.com/external/5302972/mapal-mass-manufactures-drills-to-perfection-with-3d-printing-technology-3d-printing-industrial-production-metal-3d-printing-slm-mass-3d-printing.html>
- [6] MAPAL. *How to 3D Print Precision Drills*. [online]. [cit. 2017-1-20] Dostupný z: <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2015/11/how-to-3d-print-precision-drills/>
- [7] EOS. *Podklady ke školení EOS basic training – Interní dokumentace*
- [8] MATERIALISE. *Ring*. [online]. [cit. 2017-1-20] Dostupný z: <http://software.materialise.com/magics-tree-support-module>
- [9] CALIGNANO, F. *Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting*. 2014. *Materials and Design* 64 (2014) 203–213. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306914005755>
- [10] O. POYRAZ, E. YASA, G. AKBULUT, A. ORHANGUL, S. PILATIN. *Investigation Of Support Structures For Direct Metal Laser Sintering (Dmls) Of In625 Parts*. TUSAS Engine Industries, Inc. Eskisehir, Turkey. Dostupný z: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-45-Poyraz.pdf>
- [11] J. JACOBSMÜHLEN, S. KLESZCZYNSKI, G. WITT, AND D. MERHOF. *Elevated Region Area Measurement for Quantitative Analysis of Laser Beam Melting Process Stability*. Dostupný z: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-44-zurJacobsmuehlen.pdf>
- [12] WANG, Di. *Study on the designing rules and processability of porous structure based on selective laser melting (SLM)*. 2013).
- [13] O., AREMU, I. MASKERY, C. TUCK, I. A., ASHCROFT, R.D., WILDMAN, AND R.I.M, Hague. *A Comparative Finite Element Study Of Cubic Unit Cells For Selective Laser Melting*. EPSRC Centre for Innovative Manufacturing in Additive Manufacturing, Faculty of Engineering, University of Nottingham, Nottingham, NG7 2RD, UK.
- [14] EOS. *Material Management for Metal Materials*. [online]. [28.2.2017]. Dostupné z: <http://www.eos.info/material-management-metal>
- [15] EOS. *Školící materiály – Exposure editor, Job preparation*. Interní dokumentace.
- [16] EOS. *Data sheet MaragingSteel MS1*. EOS. [online]. [cit. 2019-08-10]. Available from: [http://gpiprototype.com/images/PDF/EOS\\_MaragingSteel\\_MS1\\_en.pdf](http://gpiprototype.com/images/PDF/EOS_MaragingSteel_MS1_en.pdf).
- [17] KUČEROVÁ, L. ZETKOVÁ, I. *Metallography of 3D Printed 1.2709 Tool Steel*. In *MANUFACTURING TECHNOLOGY*. February 2016, Vol. 16, No.1. s. 140 -144. ISSN 1213–2489
- [18] DANIEL THOMAS. *The Development of Design Rules for Selective Laser Melting*. Ph.D. Thesis National Centre for Product Design & Development Research University of Wales Institute. Available from: <https://repository.cardiffmet.ac.uk/dspace/handle/10369/913>

- [19] BINELI A. R. R. PERES A. P. G., JARDINI 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. ISSN: 0100-7386
- [20] INNOMIA a.s., *STL formát*. [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://www.innomia.cz/stl>
- [21] GIBSON, I., ROSEN, D. W., STUCKER, B. (2010) *Additive Manufacturing Technologies: Generalized Additive Manufacturing Process Chain*. Springer
- [22] REINARZ AND G. WITT, "Process Monitoring in the Laser Beam Melting Process - Reduction of Process Breakdowns and Defective Parts," in Proceedings of Materials Science & Technology 2012, 2012.
- [23] H. KRAUSS AND M. ZAEH, "Investigations on Manufacturability and Process Reliability of Selective Laser Melting," *Physics Procedia*, vol. 41, no. 0, pp. 815 – 822, 2013, lasers in Manufacturing (LiM 2013). [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389213001673>
- [24] S. KLESZCZYNSKI, J. Y. JACOB SMÜHLEN, B. REINARZ, J. T. SEHRT, G. WITT, D. Merhof. *Improving Process Stability of Laser Beam Melting Systems*. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/36613621.pdf>
- [25] F.-J. GÜRTLER, M. KARG, M. DOBLER, S. KOHL, I. TZIVILSKY AND M. SCHMIDT. *Influence of powder distribution on process stability in laser beam melting: Analysis of melt pool dynamics by numerical simulations*. in SOLID FREEFORM FABRICATION PROCEEDINGS; 1099-1117; Annual international solid freeform fabrication symposium. [Online]. Available: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2014-087-Guertler.pdf>
- [26] ZETKOVA, I., ZETEK, M., DANA, M., KUTLWASER, J. *Critical Parameters of Metal Laser Sintering with its Impact on Geometrical Accuracy of a Component*. *Manufacturing Technology*, 2016, Vol. 16, No. 5, s. 1216-1222. ISSN: 1213-2489
- [27] HANZL, P. *The influence of a volume fraction on load capacity of the gyroid structure made of maraging steel using the DMLS technology*. Pilsen 2016. Thesis. Supervisor Ing. Zetek, Ph.D
- [28] HANZL, P., ZETEK, M., BAKŠA, T., KROUPA, T. *The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts*. In *Procedia Engineering*. Viedeň: Elsevier, 2015. s. 1405-1413. ISBN: 978-3-901509-99-5, ISSN: 1877-7058
- [29] S. MOYLAN, J. SLOTWINSKI, A. COOKE, K. JURRENS, M. A. DONMEZ. *Lessons Learned in Establishing the NIST Metal Additive Manufacturing Laboratory*. June 2013. cit. 2019-11-19]. Dostupný z: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/TechnicalNotes/NIST.TN.1801.pdf>
- [30] Design for Additive Metal Manufacturing Part I. [online]. Webové stránky [www.additivemet.com](http://www.additivemet.com) [cit. 2019-09-29]. Dostupné z: <https://www.additivemet.com/wp-content/uploads/2016/07/design.pdf>
- [31] A. TOWNSEND, N. SENIN, L. BLUNT, R.K. LEACH, J.S. TAYLOR, *Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review*, *Precision Engineering*, Volume 46, 2016, Pages 34-47, ISSN 0141-6359
- [32] Additive Metal Manufacturing Inc. *Design for Additive Metal Manufacturing Part I Design for Minimum Impact of DMLS Geometrical Constraints*. Canada, [online]. [cit. 2019-09-10]. Available from: <https://www.additivemet.com/wp-content/uploads/2016/07/design.pdf>
- [33] SENTHILKUMARAN K, PANDEY PM, RAO PVM (2009) *Influence of building strategies on the accuracy of parts in selective laser sintering*. *Materials & Design* 30 (8):2946-2954. doi:10.1016/j.matdes.2009.01.009
- [34] S. KLESZCZYNSKI, ZUR JACOB SMÜHLEN, J., SEHRT, J.T., & WITT, G., "Error detection in laser beam melting systems by high resolution imaging," in Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium 2012, University of Texas, Austin, United States of America, 2012.
- [35] INNOMIA. *Leštění forem*. [online]. [cit. 2019-08-20] Dostupný z: <http://www.innomia.cz/sluzby/lesteni-forem>

- [36] Drsnost povrchu dle DIN EN ISO [online]. Webové stránky JENOPTIK [cit. 2019-09-29]. Dostupné z: <https://www.hommel-etamic.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
- [37] DAŇA, M., ZETKOVÁ, I., HANZL, P., HRONEK, O. *ACCURACY OF HOLES CREATED BY 3D PRINTING (DMLS)*. In *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*. Vienna: DAAAM International, 2017. s. 467-473. ISBN: 978-3-902734-11-2, ISSN: 1726-9679
- [38] 3D printing industry. *A Look into Powder Materials for Metal 3D Printing*. [online]. 2013 [cit. 2018-11-18]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/a-look-into-powder-materials-for-metal-3d-printing-57788/>
- [39] ZETKOVÁ, I. *Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem* V Plzni 2017. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html>, Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [40] BOLZANO. *Materiálový list VACO 180*. [online]. 2019 [cit. 2019-09-15]. Dostupné z: [http://www.bolzano.cz/assets/files/materialove\\_listy/Vaco%20180\(1\).pdf](http://www.bolzano.cz/assets/files/materialove_listy/Vaco%20180(1).pdf)
- [41] EOS. *Manuál EOS M290 - Základní instrukce k obsluze stroje EOS*, Interní dokumentace
- [42] CAELERS, M. *Study of in-situ monitoring methods to create a robust SLM proces Preventing collisions between recoater mechanism and part in a SLM machine*. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/5479/409f1d1aef90bf22af63e9d30e281fc25c94.pdf> Diplomová práce. KTH Royal institute of technology - Stockholm, Švédsko 2017
- [43] T. CRAEGHS, BECHMANN, F., BERUMEN, S., & KRUTH, J.P., "Feedback control of layerwise laser melting using optical sensors," *Physics Procedia*, vol. 5, pp. 505 - 514, 2010.
- [44] T. CRAEGHS, CLIJSTERS, S., YASA, E., & KRUTH, J.P., "Online quality control of selective laser melting," in *Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium 2011*, University of Texas, Austin, United States of America, 2011: Katholieke Universiteit Leuven.
- [45] DAŇA M., ZETKOVÁ I., HANZL P. *Need for support structures depending on overhang size*. In *MM (Modern Machinery) Science Journal*, December 2016. [online]. [cit. 2019-10-25]. Dostupný z: [http://www.mm-science.eu/content/file/archives/MM\\_Science\\_2016192.pdf](http://www.mm-science.eu/content/file/archives/MM_Science_2016192.pdf)
- [46] D. WANG , Y. YANG , R. LIU , D. Xiao , and J. Sun , " Study on the designing rules and processability of porous structure based on selective laser melting (SLM)," *J. Mater. Process. Technol.* 213(10), 1734–1742 (2013)
- [47] DAŇA, M., ZETKOVÁ, I., HANZL, P. *The Influence of a Ceramic Recoater Blade on 3D Printing using Direct Metal Laser Sintering*. *Manufacturing Technology*, 2019, roč. 19, č. 1, s. 23-28. ISSN: 1213-2489
- [48] DAŇA, M. ZETKOVÁ, I. HANZL, P. *Prining of Thin Walls using DMLS*. In *MANUFACTURING TECHNOLOGY*. October 2016, Vol. 16, No.4. s. 883 -896. ISSN 1213–2489
- [49] EPMA European Powder Metallurgy Association. *Introduction to additive manufacturing technology - A guide for Designers and Engineers*. Dostupné z: [http://www.epma.com/doc\\_details/427-introduction-to-additive-manufacturing-technology](http://www.epma.com/doc_details/427-introduction-to-additive-manufacturing-technology)
- [50] RUBEŠOVÁ, K; JENÍČEK, S; KÁŇA, J& ZETKOVÁ, I; (2016). *Microstructure of MS1 Maraging Steel in 3D-Printed Products After Semi-Solid Processing*, *Proceedings of the 27th DAAAM International Symposium*, pp.0467-0472, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-08-2, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria
- [51] EOS, 'Data Sheet EOS M290', [Online]. [cit. 2020-8-20] dostupné z: [https://cdn0.scrvt.com/eos/413c861f2843b377/51d966b8b31d/EOS\\_System\\_Data\\_Sheet\\_EOS\\_M\\_290\\_EN\\_V6\\_Web.pdf](https://cdn0.scrvt.com/eos/413c861f2843b377/51d966b8b31d/EOS_System_Data_Sheet_EOS_M_290_EN_V6_Web.pdf).
- [52] FOUSOVÁ, M. VOJTĚCH, D. KUBÁSEK, J. DVORSKÝ, D. MACHOVÁ, M. *3D Printing as an Alternative to Casting, Forging and Machining Technologies*. In *MANUFACTURING TECHNOLOGY*. November 2015, Vol. 15, No.5. s. 809-814. ISSN 1213–2489
- [53] ANTONYSAMY A. A. *Microstructure, Texture and Mechanical Property Evolution during Additive Manufacturing of Ti6Al4V Alloy for Aerospace Applications*. Manchester 2012.

- Doctoral thesis. Supervisor Prof. Philip Prangnell. Dostupný z:  
<https://www.escholar.manchester.ac.uk/uk-ac-man-scw:160535>
- [54] HANZL, P., ZETEK, M., BAKŠA, T., KROUPA, T. *The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts*. In *Procedia Engineering*. Vídeň: Elsevier, 2015. s. 1405-1413. ISBN: 978-3-901509-99-5 , ISSN: 1877-7058
- [55] JIRKOVÁ, H., ZETKOVÁ, I., CAJTHAMLOVÁ, Š., OPATOVÁ, K., RUBEŠOVÁ, K., KUČEROVÁ, L. *Vliv směru tisku při přechování vzorků vyrobených 3D tiskem z maragingové oceli MS1*. *Kovárenství*, 2019, roč. 70, č. říjen 2019, s. 14-18. ISSN: 1213-9289
- [56] Interní podklady k projektu CZ.02.1.01/0.0/0.0/18\_069/0010040 -Výzkum aditivních technologií pro budoucí uplatnění ve strojírenské praxi - RTI plus.
- [57] EOS. *Flexible Monitoring for Additive Manufacturing EOS*. Online [24.6.2020]. Dostupné z:  
<https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/software-3d-printing/monitoring-software>
- [58] ROTT, M. *Možnosti monitorování 3D tisku kovů V Plzni 2019*. Dostupné z:  
<https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html>, Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni
- [59] EOS. *Školící materiály – Monitoring systems*. Interní dokumentace.
- [60] ČSN 420363. *Norma zkoušky únavy kovů*. Praha: Český normalizační institut
- [61] MELOUN, M., MILITKÝ, J. (2013). *Kompendium statistického zpracování dat*. Praha: Karolinum

## Seznam vlastních publikací

### Seznam publikací vztahujících se k tématu disertační práce:

- [1] DAŇA, M., ZETKOVÁ, I., HANZL, P. The Influence of a Ceramic Recoater Blade on 3D Printing using Direct Metal Laser Sintering. *Manufacturing Technology*, 2019, roč. 19, č. 1, s. 23-28. ISSN: 1213-2489
- [2] MONKOVÁ, K., ZETKOVÁ, I., KUČEROVÁ, L., ZETEK, M., MONKA, P., DAŇA, M. Study of 3D printing direction and effects of heat treatment on mechanical properties of MS1 maraging steel. *Archive of Applied Mechanics*, 2019, roč. 89, č. 5, s. 791-804. ISSN: 0939-1533
- [3] DAŇA, M., ZETKOVÁ, I., HANZL, P. Přesnost otvorů vytvořených pomocí 3D tisku metodou Direct Metal Laser Sintering. *Strojírenská technologie*, 2018, roč. 23, č. 1, s. 7-12. ISSN: 1211-4162
- [4] NOZAR, M., ZETKOVÁ, I., HANZL, P., DAŇA, M. Aspekty výroby kovových součástí pomocí 3D tisku. *Strojírenská technologie*, 2018, roč. 23, č. 1, s. 23-30. ISSN: 1211-4162
- [5] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., DAŇA, M. Issues of lattice structures production via metal additive manufacturing. *Manufacturing Technology*, 2017, roč. 17, č. 6, s. 853-857. ISSN: 1213-2489
- [6] DAŇA, M., ZETKOVÁ, I., HANZL, P. Vliv orientace tenkých stěn při tisku pomocí metody DMLS. *Strojírenská technologie*, 2017, roč. 22, č. 1, s. 13-20. ISSN: 1211-4162
- [7] DAŇA, M., ZETKOVÁ, I., HANZL, P. Tisk převislých konců bez použití podpor pomocí metody DMLS. *Strojírenská technologie*, 2017, roč. 22, č. 1, s. 7-13. ISSN: 1211-4162
- [8] ZETKOVÁ, I., ZETEK, M., DAŇA, M., KUTLWAŠER, J. Critical Parameters of Metal Laser Sintering with its Impact on Geometrical Accuracy of a Component. *Manufacturing Technology*, 2016, roč. 16, č. 5, s. 1216-1222. ISSN: 1213-2489
- [9] DAŇA, M., ZETKOVÁ, I., HANZL, P. Printing of Thin Walls using Method DMLS. *Manufacturing Technology*, 2016, roč. 16, č. 5, s. 883-889. ISSN: 1213-2489
- [10] DAŇA, M., ZETKOVÁ, I., HANZL, P. Need for support structures depending on overhang size. *MM Science Journal*, 2016, roč. 2016, č. December, s. 1597-1601. ISSN: 1803-1269

### **Stat' ve sborníku**

- [1] ZETKOVÁ, I., KUČEROVÁ, L., ZETEK, M., ČESÁNEK, J., HANZL, P., DAŇA, M., NOZAR, M., KÁŇA, Evaluation of Metal Powder for Additive Manufacturing of Maraging Steel. In *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*. Vienna: DAAAM International, 2017. s. 410-416. ISBN: 978-3-902734-11-2, ISSN: 1726-9679
- [2] DAŇA, M., ZETKOVÁ, I., HANZL, P., HRONEK, O. ACCURACY OF HOLES CREATED BY 3D PRINTING (DMLS). In *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*. Vienna: DAAAM International, 2017. s. 467-473. ISBN: 978-3-902734-11-2, ISSN: 1726-9679
- [3] NOZAR, M., ZETKOVÁ, I., HANZL, P., DAŇA, M. A Customer's View on Key Aspects of Metal Additive Manufacturing. In *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*. Vienna: DAAAM International, 2017. s. 957-966. ISBN: 978-3-902734-11-2, ISSN: 1726-9679
- [4] DAŇA, M., ZETKOVÁ, I., HANZL, P. Tisk tenkých stěn pomocí metody DMLS. In *MANUFACTURING TECHNOLOGY - PILSEN 2017: Conference proceeding*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 1-10. ISBN: 978-80-261-0636-4

### **Ověřená technologie**

- [1] ZETKOVÁ, I., ZETEK, M., DAŇA, M., HANZL, P., KEPKA, M. *Optimalizace výroby tenkostěnných dílů 3D tiskem*. 2019.
- [2] ZETKOVÁ, I., ZETEK, M., HANZL, P., DAŇA, M. *Optimalizace výroby prototypového dílu - UFK600*. 2016.
- [3] ZETKOVÁ, I., ZETEK, M., DAŇA, M., HANZL, P. *Optimalizace výroby prototypového dílu - kryty kovové UFK 600*. 2016.



### Funkční vzorek

- [1] DAŇA, M., HANZL, P., ZETKOVÁ, I, ZETEK, M. *Přípravek pro upnutí platformy s vytištěnými díly na pásovou pilu.* 2015.
- [2] DAŇA, M., ZETKOVÁ, I, HANZL, P. *Upravená platforma pro 3d tisk.* 2015.
- [3] DAŇA, M., HANZL, P., ZETKOVÁ, *Vzorek pro měření tenkých stěn.* 2016.
- [4] DAŇA, M., HANZL, P., ZETKOVÁ, I, ZETEK, M. *Vzorek pro měření minimální velikosti mezery.* 2016.
- [5] HANZL, P., ZETKOVÁ, I, DAŇA, M. *Optimalizovaný porézni vzorek pro tlakovou zkoušku.* 2016.
- [6] DAŇA, M., HANZL, P., ZETKOVÁ, I, ZETEK, M. *Vzorek pro měření převislých konců.* 2016.
- [7] HANZL, P., ZETKOVÁ, I, DAŇA, M. *Upínací systém pro opravu zápustek navařováním DMLS procesem.* 2016.

### Výzkumná zpráva

- [1] NOZAR, ZETEK, M., HANZL, P., ZETKOVÁ, DAŇA, M. *3D tisk na Al-Si matrici.* Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem, 2018.
- [2] ZETKOVÁ, I, DAŇA, M., ZETEK, M., HANZL, P., NOZAR, *Ověřená technologie 3D tisku.* ZF Engineering Plzeň s.r.o., 2018.
- [3] ZETKOVÁ, I, DAŇA, M., ZETEK, M., HANZL, P., NOZAR, *optimalizace odvzdušňovače.* Doosan Škoda Power s.r.o. (dříve Škoda Power s.r.o.; dříve Škoda Power a.s. Škoda Energo, s.r.o.), 2018.
- [4] ZETKOVÁ, I, ZETEK, M., DAŇA, M., HANZL, P., NOZAR, *Optimalizace tenkostěnného dílu vřetena stroje.* Škoda Machine Tool, a.s., 2018.
- [5] ZETKOVÁ, I, ZETEK, M., DAŇA, M., HANZL, P., NOZAR, *Optimalizace kovových dílů.* ZF Engineering Plzeň s.r.o., 2018.
- [6] ZETKOVÁ, I, DAŇA, M., ZETEK, M., HANZL, P., NOZAR, *Ověření tisknutelnosti dílu dle poptávky.* ZPA Industry a.s., 2018.
- [7] ZETKOVÁ, I, ZETEK, M., DAŇA, M., HANZL, P., NOZAR, *Ověření všeobecných zásad a pravidel 3D tisku.* Škoda Machine Tool, a.s., 2017.
- [8] ZETKOVÁ, I, ZETEK, M., DAŇA, M., HANZL, P., NOZAR, *Optimalizace výroby prototypového dílu - kryty kovové UFK600.* Škoda Machine Tool, a.s., 2017.
- [9] ZETEK, M., ZETKOVÁ, I, DAŇA, M., HANZL, P. *Tisknutelnost optimalizovaných dílů.* WITTE Nejdek, spol. s r.o., 2016.
- [10] ZETKOVÁ, I, ZETEK, M., DAŇA, M., HANZL, P. *Možnosti 3D tisku větších komponent.* COMTES FHT a.s., 2016.
- [11] ZETEK, M., ZETKOVÁ, I, HANZL, P., DAŇA, M. *Analýza možností technologie 3D tisku pro výrobu kovových dílů.* COMTES FHT s.r.o., 2015.
- [12] ZETKOVÁ, I, ZETEK, M., HANZL, P., DAŇA, M. *Analýza možností technologie DMLS pro stavbu kovových dílů 3D tiskem.* SVÚM a.s., Areál výzkumných ústavů, 2015.

**Seznam ostatních publikací nevztahujících se k tématu:**

- [1] DAŇA, M., ZETKOVÁ, I., MACH, J. Mechanical Properties of Inconel Alloy 718 Produced by 3D Printing using DMLS. *Manufacturing Technology*, 2018, roč. 18, č. 4, s. 559-562. ISSN: 1213-2489
- [2] HAMBERGER, A., DAŇA, M., KROFT, L. Technologie výroby a návrh vložky válce maloobjemového motocyklu. *Strojírenská technologie*, 2017, roč. 22, č. 2, s. 76-80. ISSN: 1211-4162
- [3] DAŇA, M., ZETEK, M., SCHORNÍK, V. Cutting tool life when tapping nickel based super alloy. *Manufacturing Technology*, 2017, roč. 17, č. 1, s. 18-23. ISSN: 1213-2489
- [4] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., DAŇA, M. Nový návrh porézniho tlakového vzorku a posouzení jeho vyrobiteľnosti technologií Direct Metal Laser Sintering. *Strojírenská technologie*, 2017, roč. 22, č. 1, s. 20-25. ISSN: 1211-4162
- [5] HAMBERGER, A., DAŇA, M. Měření výkonových charakteristik motocyklového motoru. *Strojírenská technologie*, 2017, roč. 22, č. 2, s. 81-87. ISSN: 1211-4162
- [6] DAŇA, M., ZETEK, M., SCHORNÍK, V. Effect of cutting edge geometry on cutting forces when drilling Inconel 718. *Manufacturing Technology*, 2017, roč. 17, č. 1, s. 24-29. ISSN: 1213-2489
- [7] DAŇA, M. Technologie výroby a návrh přepouštěcích kanálů ve válci maloobjemového motocyklu. *Strojírenská technologie*, 2014, roč. 19, č. 2, s. 72-77. ISSN: 1211-4162

**Stat' ve sborníku**

- [1] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., DAŇA, M. Uniaxial Tensile Load of Lattice Structures Produced by Metal Additive Manufacturing. In *ICKTI 2018 - NOVÉ POZNATKY V TECHNOLOGIÍCH A TECHNOLOGICKÉ INFORMACE '18 - SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ*. Ústí nad Labem, ČR: Ústav technologií a materiálů, Fakulta strojního inženýrství, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Česká republika, 2018. s. 57-61. ISBN: 978-80-7561-114-7
- [2] KROUPA, T., DAŇA, M., ZETEK, M. Abrasive waterjet cutting. In *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*. Vienna: Danube Adria Association for Automation and Manufacturing, DAAAM, 2017. s. 493-499. ISBN: 978-3-902734-11-2, ISSN: 1726-9679
- [3] KROUPA, T., DAŇA, M., ZETEK, M. Using of waterjet technology for cutting aluminium alloy. In *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*. Vienna: Danube Adria Association for Automation and Manufacturing, DAAAM, 2017. s. 486-492. ISBN: 978-3-902734-11-2, ISSN: 1726-9679
- [4] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., DAŇA, M. A Comparison of Lattice Structures in Metal Additive Manufacturing. In *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*. Vienna: DAAAM International, 2017. s. 481-485. ISBN: 978-3-902734-11-2, ISSN: 1726-9679
- [5] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., DAŇA, M. Gyroidní porézni struktura a vlivy na přesnost měření její únosnosti. In *ERIN 2017: Papers Proceedings*. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2017. s. 187-195. ISBN: 978-80-7561-056-0
- [6] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., DAŇA, M. Přínos nového návrhu porézniho tlakového vzorku a jeho vyrobiteľnost technologií Selective Laser Melting. In *MANUFACTURING TECHNOLOGY - PILSEN 2017: Conference proceeding*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 1-9. ISBN: 978-80-261-0636-4
- [7] KROUPA, T., SCHORNÍK, V., DAŇA, M., ZETEK, M. Comparing the effects of modifying milling tool geometry on durability. In *proceedings of the 26th DAAAM-2015*. Vienna: DAAAM International, 2016. s. 753-761. ISBN: 978-3-902734-07-5, ISSN: 1726-9679
- [8] SCHORNÍK, V., BAKŠA, T., DAŇA, M. Modern trends in design and testing of milling cutters. In *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*. Vienna: DAAAM International, 2016. s. 683-687. ISBN: 978-3-902734-07-5, ISSN: 1726-9679
- [9] DAŇA, M., ZETEK, M., SCHORNÍK, V. Tapping tool life when machining inconel 718. In *Proceedings of the 26th DAAAM International Symposium*. Vienna: DAAAM International, 2016. s. 715-719. ISBN: 978-3-902734-07-5, ISSN: 1726-9679
- [10] DAŇA, M., ZETEK, M., SCHORNÍK, V. Effect of cutting edge geometry on cutting tool life when drilling inconel 718. In *Annals of DAAAM International 2015*. Vienna: Danube Adria Association for Automation and Manufacturing, DAAAM, 2016. s. 709-714. ISBN: 978-3-902734-07-5, ISSN: 1726-9679

[11] SCHORNÍK, V., ZETEK, M., DAŇA, M. The influence of working environment and cutting conditions on milling nickel – based super alloys with carbide tools. In *Procedia Engineering*. Vídeň: DAAAM International Vienna, 2015. s. 1262-1269. ISBN: 978-3-901509-99-5, ISSN: 1877-7058

[12] DAŇA, M., ZETKOVÁ, I., SCHORNÍK, V. Production technology and design of transfer ports in a cylinder of a small-volume motorcycle. In *Procedia Engineering*. Vídeň: DAAAM International Vienna, 2015. s. 1324-1331. ISBN: 978-3-901509-99-5, ISSN: 1877-7058

[13] SCHORNÍK, V., DAŇA, M., ZETKOVÁ, I. The influence of the cutting conditions on the machined surface quality when the CFRP is machined. In *Procedia Engineering*. Vídeň: Elsevier, 2015. s. 1270-1276. ISBN: 978-3-901509-99-5, ISSN: 1877-7058

#### Ověřená technologie

[1] DAŇA, M., HANZL, P., ZETKOVÁ, I. *Úprava motocyklového válce na čtyř-kanálovou koncepci*. Plzeň, 2018.

#### Funkční vzorek

[1] ZETKOVÁ, I., ZETEK, M., DAŇA, M., HANZL, P. *Spojovací elementy krytu převodového mechanismu*. 2019.

[2] DAŇA, M., ZETKOVÁ, I., HANZL, P. *Upínací přípravek pro motocyklový válec*. 2018.

[3] HANZL, P., ZETKOVÁ, I., DAŇA, M. *Upínací systém přesného navaření materiálu pro opravu čelistí DMLS procesem*. 2018.

[4] ZETKOVÁ, I., ZETEK, M., DAŇA, M., HANZL, P. *Optimalizovaný systém tenkostěnných vnitřních mazacích kanálů převodového mechanismu*. 2018.

[5] FARSKÝ, J., DAŇA, M., ZETEK, M. *Ložisko typu J0-02*. 2018.

[6] DAŇA, M., ZETKOVÁ, I., HANZL, P. *Upínací přípravek hlavy válce*. 2018.

[7] DAŇA, M., HANZL, P., ZETKOVÁ, I. *Přípravek pro upnutí malých řezných kotoučků*. 2017.

[8] DAŇA, M., HRONEK, O., ZETEK, M. *Upínací přípravek pro leštění vzorků*. 2017.

[9] DAŇA, M., HANZL, P., ZETKOVÁ, I. *Univerzální upínací přípravek řezných kotoučů s 6 mm stopkou*. 2017.

[10] DAŇA, M., HANZL, P., ZETKOVÁ, I. *Upínací přípravek součásti s kuželovou dírou*. 2017.

[11] DAŇA, M., HANZL, P., ZETKOVÁ, I. *Upínací podložka statoru snímače*. 2017.

[12] DAŇA, M., HANZL, P., ZETKOVÁ, I. *Upínací přípravek vložky*. 2017.

[13] DAŇA, M., HANZL, P., ZETKOVÁ, I. *Upravená podložka pro upnutí statoru snímače*. 2017.

[19] DAŇA, M., HANZL, P., ZETKOVÁ, I. *Oběžné kolo čerpadla*. 2016.

[20] DAŇA, M., HANZL, P., ZETKOVÁ, I. *Odlehčené kolo turbodmychadla*. 2016.

[23] BARVÍŘ, Z., ZETKOVÁ, I., DAŇA, M. *Vějířová hlava motoru motocyklu Jawa 50*. 2015.

[24] BARVÍŘ, Z., ZETKOVÁ, I., DAŇA, M. *Upínací přípravek pro upnutí motocyklové hlavy*. 2015.

[25] DAŇA, M., SCHORNÍK, V., ZETKOVÁ, I. *Vrtací přípravek*. 2015.

[26] DAŇA, M., SCHORNÍK, V., ZETKOVÁ, I. *Funkční vzorek pro testy závitování*. 2015.

[27] SCHORNÍK, V., DAŇA, M., BAKŠA, T. *Trn pro upínání ořvňavacích kotoučů*. 2015.

[28] DAŇA, M., SCHORNÍK, V., ZETKOVÁ, I. *Přípravek na lepení*. 2015.

[29] DAŇA, M., SCHORNÍK, V., ZETKOVÁ, I. *Funkční vzorek pro testy vrtání*. 2015.

[30] DAŇA, M., HANZL, P., ZETKOVÁ, I., ZETEK, M. *Platforma pro opravu razníků*. 2015.

## **Přílohy**