

Porovnání 2D a 3D skenovacích metod pro snímání povrchů

Bedřich Prachař

Bakalářská práce
2021

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bedřich Prachař**
Osobní číslo: **T18669**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Porovnání 2D a 3D skenovacích metod pro snímání povrchů**

Zásady pro vypracování

- Statistické nalezení a stanovení diferencí mezi vyhodnocováním povrchů ve shodě s ISO 4287, ISO 4288 a dále ISO 25 178.
- Provedení průzkumové analýzy obrobků s využitím bezkontaktního profiloměru.
- Statistické vyhodnocení povrchových komparací naměřených dat dle odpovídajících softwarů.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1999.
2. ČSN EN ISO 4288. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. 1999.
3. ČSN EN ISO 25178-2. Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 2012.
4. MELOUN, Milan. Kompendium statistického zpracování dat: metody a řešení úlohy včetně CD. Praha: Academia, 2002, 764 s. ISBN 80-200-1008-4

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Milena Kubišová, PhD.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **5. ledna 2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2021**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je zkoumání změn v drsnosti povrchu při změnách parametrů ovlivňujících parametry laseru 3D tiskárny. Jedná se o změnu parametrů ovlivňující kvalitu povrchu. Pro výrobu vzorků byla použita technologie spékání kovových prášků, kde na výsledný povrch mají tyto parametry zcela zásadní vliv. Jejich zkoumání je časově značně náročné a nákladné.

Klíčová slova: drsnost povrchu, SLM tisk, 3D tisk, profilometr

ABSTRACT

This bachelor's thesis investigates changes in surface roughness with changes in parameters affecting the parameters of the 3D printer's laser. This is a change in parameters affecting the quality of the surface. The technology of melting of metal powders was used for the production of samples, where these parameters have a fundamental influence on the resulting surface. Each research is very time consuming and expensive.

Keywords: surface roughness, SLM printing, 3D printing, profilometer

„Čím víc se učíme, tím víc odhalujeme svoji nevědomost.“

[Percy Bysshe Shelley]

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 JAKOST POVRCHU	11
1.1 ZÁKLADNÍ NORMY	11
1.2 PROFILOVÉ (2D) PARAMETRY	11
1.2.1 Profil, souřadnicový systém, geometrické parametry	13
1.2.2 Výškové parametry	16
1.2.3 Parametry délkové, tvarové a hodnocení	18
1.3 PLOŠNÉ (3D) PARAMETRY	20
1.4 HODNOCENÍ 2D A 3D METODY DRSNOSTÍ POVRCHŮ	22
1.4.1 Vyhodnocení 2D metod drsností povrchů.....	22
1.4.2 Pravidla-porovnávání měřených hodnot s mezemi tolerancí.....	23
1.4.3 Posuzování parametrů	24
1.4.4 Pravidla a postupy pro kontrolu dotykovými přístroji	25
1.4.5 Vyhodnocení 3D metod drsností povrchů.....	26
2 MĚŘICÍ TECHNIKA	28
2.1 KVANTITATIVNÍ (PARAMETRICKÉ) ROZDĚLENÍ METOD.....	29
2.2 2D MĚŘENÍ	29
2.2.1 Dotykové měření na profilometru	29
2.3 3D MĚŘENÍ	30
2.4 OPTICKÝ PROFILOMĚR ZYGO NEWVIEW-9000.....	31
2.4.1 Software-Zygo Mx	32
2.4.2 Parametry-Objektivy	33
2.4.3 Opt-Scope.....	34
3 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ 3D TISK (DMLS(M))	36
3.1 OBECNĚ O 3D TISKU METODOU DMLS - DMLM.....	36
II PRAKTICKÁ ČÁST	42
5 VZORKY	43
5.1 3D TISK VZORKŮ	43
5.1.1 Použitá technologie tisku	44
5.2 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ.....	44
5.3 NAMĚŘENÉ HODNOTY	46
5.4 VZORKY	47
5.4.1 Vzorek_1	47
5.4.2 Vzorek_2	52
5.4.3 Vzorek_3	57
5.4.4 Vzorek_4	62

5.4.5	Vzorek_5	67
5.4.6	Vzorek_6	72
5.5	VYHODNOCENÍ VZORKŮ	77
5.5.1	Box-plot Ra	77
5.5.2	Box-plot Rz	78
ZÁVĚR		79
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		82
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		84
SEZNAM OBRÁZKŮ		85
SEZNAM TABULEK.....		87

ÚVOD

Předmětem této práce je zkoumání změn vlastností povrchu dílu vytvořeného za pomoci technologie Laser Melting. Dochází zde ke zkoumání změn vlastností povrchu za účelem zkvalitnění databáze materiálu, který se nachází na průmyslovém stroji. Změnu parametrů volíme s cílem dosažení co nejkvalitnějšího povrchu tiskového dílu a optimalizace tiskového času. Materiálové sety (nastavení parametrů) jsou standardně prodávány výrobcem stroje a jedná se o parametry výchozí, které slouží pro zavedení technologie. Nastavení stroje je klíčové a pro dosažení maximální kvality je třeba dalšího rozvoje a zkoumání.

V této práci se proto budeme věnovat změnám drsnosti povrchu základního tvaru, pro který byly použity standardní parametry výrobce, ale taky parametry pozměněnými, zasahujícími do kvality povrchu zkoumaného dílu. Jedná se především o parametry zasahující do parametrů výkonů laseru a rychlosti (pohybu skeneru) laseru. Jsou to parametry zásadní a základní pro tisku, jejich změna zásadním způsobem změní výsledný produkt.

Cílem je tedy projev změny daných parametrů na kvalitu a ovlivnění tisku.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 JAKOST POVRCHU

Povrchová textura (drsnost povrchu), která vzniká při výrobě součásti, je ovlivněná technologickými podmínkami a technologií výroby.

1.1 Základní normy

ČSN EN ISO 4287 – tato mezinárodní norma ustanovuje termíny, parametry a definice, které slouží pro určování struktury povrchu jako je drsnost, vlnitost a základní profil-profilovou metodou. [1]

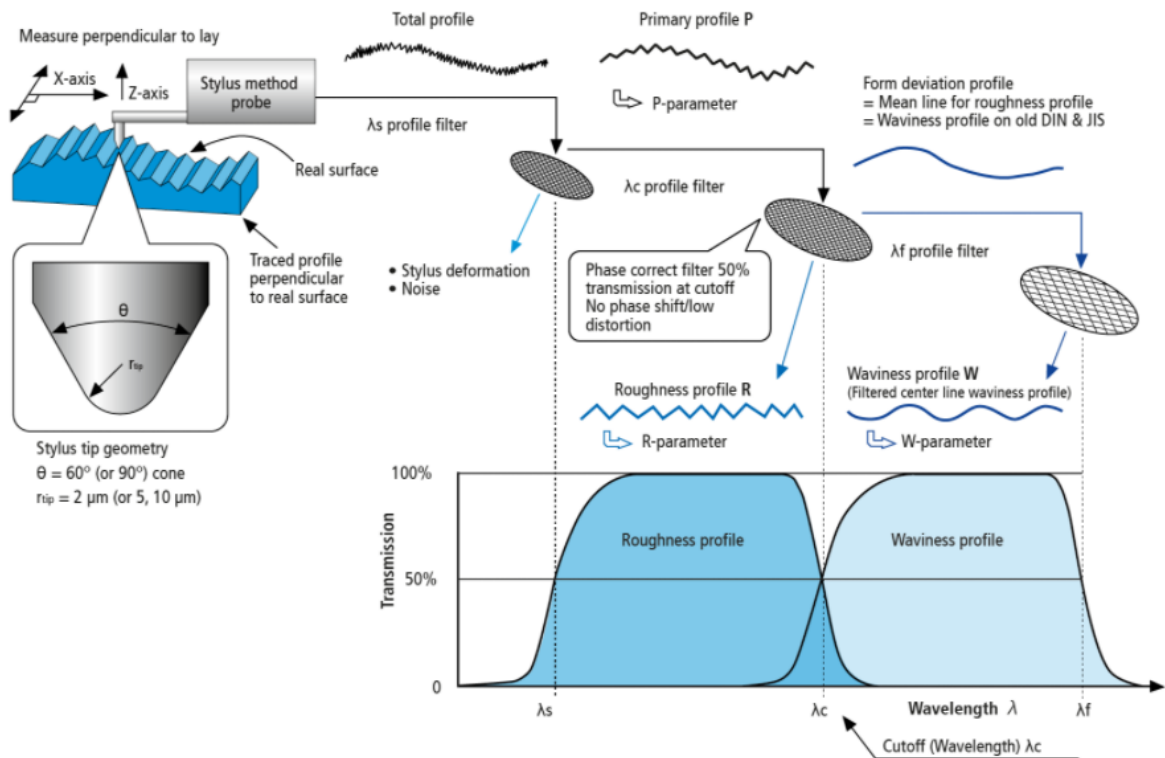
ČSN EN ISO 4288 – mezinárodně uznávaná norma, která stanoví pravidla pro porovnání měřených hodnot s tolerančními mezemi stanovenými pro parametry struktury povrchu v ISO 4287, ISO 12085, ISO 13565-2 a ISO 13565-3. Zároveň také specifikuje standardní pravidla pro výběr mezních vlnových délek cut-off λ_c pro parametry profilu drsnosti podle ISO 4287, měřených pomocí dotykových (hrotových) přístrojů podle ISO 3274. [2]

ISO 25178 – tato část specifikuje termíny, definice a parametry pro stanovení povrchové textury pomocí plošných metod. [3]

1.2 Profilové (2D) parametry

Filtr profilu (*profile filter*): rozděluje profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky. ISO 11562 – stanovuje definici, rozdělení tří filtrů, které mají stejné přenosové charakteristiky, ale nerovné hodnoty cut-off. [1]

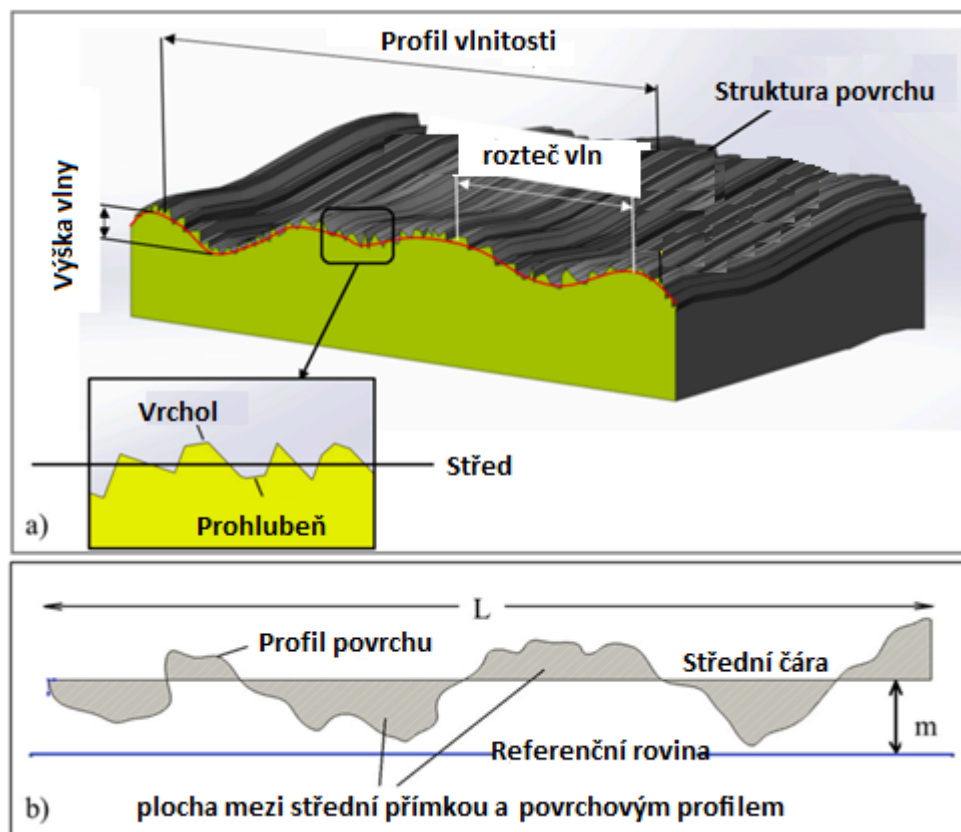
- A) **λ_s filtr profilu** (*λ_s profile filter*): rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln vyskytujícími se na povrchu (Obr. 1),
- B) **λ_c filtr profilu** (*λ_c profile filter*): rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti (Obr. 1),
- C) **λ_f filtr profilu** (*λ_f profile filter*): rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln vyskytujícími se na povrchu (Obr. 1). [1]



Obrázek 1. Přenosová charakteristika profilu [4]

Skutečný povrch (*real surface*): povrch ohraničující těleso. Toto těleso nám odděluje od okolního prostředí. [1]

Profil povrchu (*surface profile*): vzniká jako průsečnice skutečného povrchu s danou rovinou. Běžně volíme rovinu kolmou k rovině rovnoběžné se skutečným povrchem ve vhodném směru. Hodnocení povrchu se provádí tomto povrhu. [1]



Obrázek 2. a) povrchová struktura b) drsnost povrchu [8]

1.2.1 Profil, souřadnicový systém, geometrické parametry

Základní profil (*primary profile*): základ pro vyhodnocení parametrů základního profilu

Profil drsnosti (*roughness profile*): profil odvozený ze základního profilu, který má potlačeny dlouhovlnné složky za použití filtru profilu λ_c , tento profil je úmyslně pozmeněn. Základ pro hodnocení parametrů profilu drsnosti.

Profil vlnitosti (*waviness profile*): odvozuje se postupnou aplikací filtru profilu λ_f a filtru profilu λ_c na základní profil. Filtrem profilu λ_f dochází k potlačení dlouhovlnné složky a za pomoci filtru profilu λ_c dochází k potlačení krátkovlnné složky. Dochází k záměrnému pozmenění profilu. Je základem pro hodnocení parametrů vlnitosti.

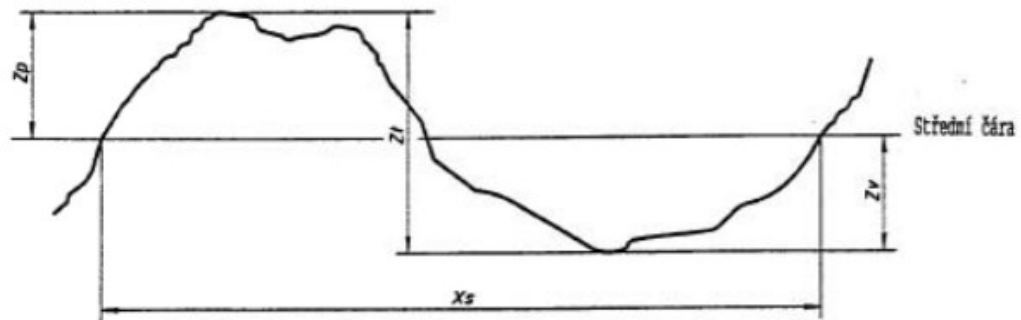
Souřadnicový systém (*coordinate system*): systém, ve kterém jsou definovány parametry struktury povrchu. Zpravidla je využíván pravoúhlý souřadnicový systém, osy tvoří pravotočivou kartézskou soustavu. Osa X ve směru snímání a osa Y ležící kolmo k ose X, ale nacházející se na skutečném povrchu. [1]

Tabulka 1. Základní parametry přehled

Parametry struktury povrchu		Označení	
Výškové	Výstupky a prohlubně	Celková výška profilu	Rt, Wt, Pt
		Největší výška profilu (aritmetická střední hodnota)	Rz, Wz, Pz
		Největší výška výstupku	Rp, Wp, Pp
		Největší výška prohlubně	Rv, Wv, Pv
		Maximální výška profilu	Rmax, Wmax, Pmax
	Průměrné hodnoty	Průměrná aritmetická úchylka	Ra, Wa, Pa
		Průměrná kvadratická úchylka profilu	Rq, Wq, Pq
		Průměrná výška prvku profilu	Rc, Wc, Pc
		Šikmost profilu	Rsk, Wsk, Psk
		Špičatost profilu	Rku, Wku, Pku
Délkové	Průměrná šířka prvku profilu (střední vzdálenost prohlubní)	RSm, WSm, PSm	
Hybridní	Průměrný kvadratický sklon profilu	Rdq, Wdq, Pdq	
Křivkové a příbuzné	Materiálový (nosný) poměr profilu	Rmr(c), Wmr(c), Pmr(c)	
	Vzájemný materiálový poměr (Abbotova křivka)	Rmr, Wmr, Pmr	
	Rozdíl výšky úseku profilu	Rdc, Wdc, Pdc	

Názvy geometrických parametrů

- **P parametr:** vypočítán ze základního profilu (*Primary profile*).
tato vyhodnocovaná délka se rovná délce měřeného prvku; [1]
- **R parametr:** vypočítán z profilu drsnosti (*Roughness profile*). [1]
- **W parametr:** vypočítán z profilu vlnitosti (*Waviness profile*). [1]
- **Prvek profilu** (*profile element*): jedná se o prohlubeň s přilehlým výstupkem profilu (Obr. 3). [1]

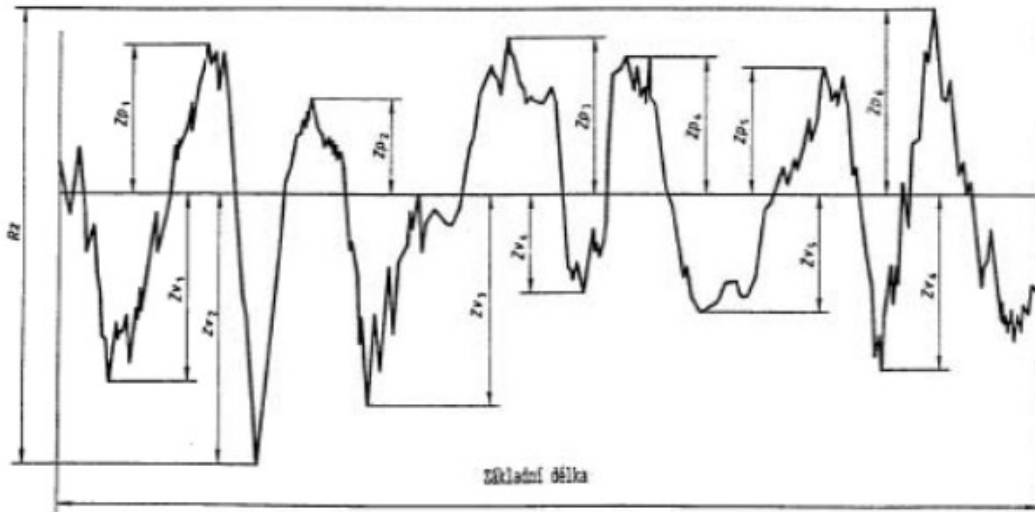


Obrázek 3. Prvek profilu [1]

- **Výstupek profilu – Z_p (profile peak):**
jedná se o maximální vzdálenost od osy **X** v kladném kvadrantu **Y+**.
- **Prohlubeň profilu – Z_v (profile valley):**
jedná se o maximální (minimální) vzdálenost od osy **X** v záporném kvadrantu **Y-**.
- **Omezení výšky a/nebo rozteče (height and/or spacing discrimination):**
jedná se o nejmenší výšku a rozteč výstupků a prohlubní posuzovaného profilu, které mohou být brány v úvahu.
- **Výška prvku profilu – Z_t (profile element height):**
jedná se o vzdálenost mezi nejvyšším a nejnižším bodem.
- **Šířka prvku profilu – X_s (profile element width):**
jedná se o délku prvku profilu v ose **X**. [1]

1.2.2 Výškové parametry

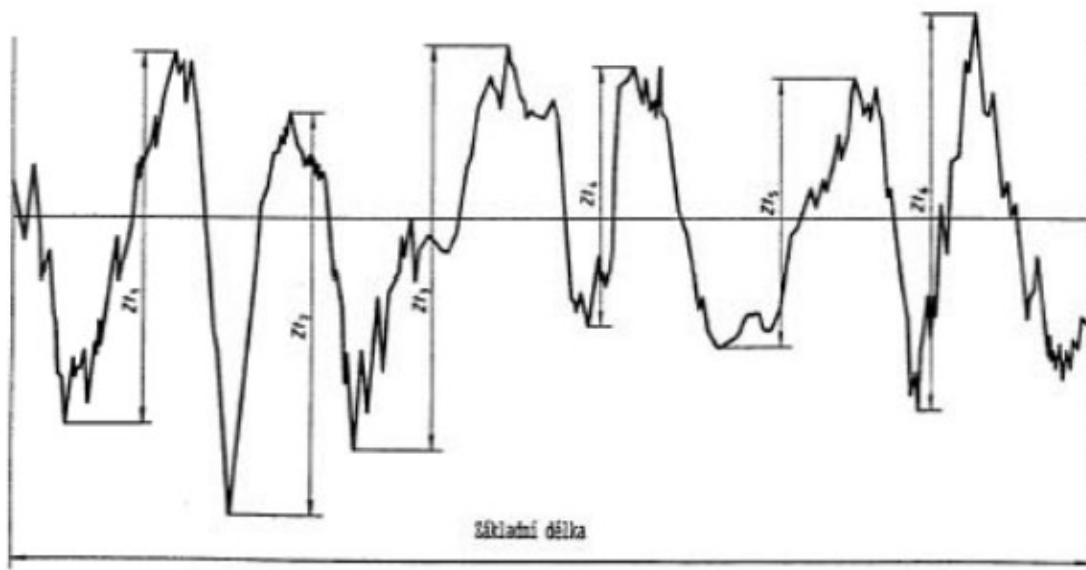
- výstupků a prohlubní:



Obrázek 4. Největší výška profilu [1]

- **Největší výška výstupku profilu P_p , R_p , W_p** (maximum profile peak height):
největší výstupek profilu na rozsahu základní délky Z_p .
- **Největší hloubka prohlubně profilu, P_v , R_v , W_v** (maximum profile valley depth):
nejnižší prohlubeň profilu na rozsahu základní délky Z_v .
- **Největší výška profilu, P_z , R_z , W_z** (maximum height of profile):
udávaná největší vzdáleností, a to součtem hodnot Z_p největší výšky výstupku profilu a Z_v největší hloubky prohlubně profilu z rozsahu základní délky.
- **Průměrná výška prvků profilu, P_c , R_c , W_c** (mean height of profile elements):
průměrná hodnota prvků výšek profilu Z_t v rozsahu základní délky. [1]

$$P_c, R_c, W_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{ti} \quad (1)$$



Obrázek 5. výška prvků profilu [1]

- **Celková výška profilu, Pt, Rt, Wt (total height of profile):** jedná se o součet výšek **Zp** nejvyššího výstupku profilu a hloubky **Zv** nejnížší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky. [1]

Výškové parametry (průměrné hodnoty pořadnic)

- **Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu, Pa, Ra, Wa (arithmetical mean deviation of the assessed profile):** aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic **Z(x)** v rozsahu základní desky. [1]

$$Pa, Ra, Wa = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx \quad (2)$$

- **Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu, Pq, Rq, Wq (root mean square deviation of the assessed profile):** jedná se o kvadratický průměr pořadnic **Z(x)** v rozsahu základní délky. [1]

$$Pq, Rq, Wq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |z^2(x)| dx} \quad (3)$$

- **Šikmost posuzovaného profilu, Psk, Rsk, Wsk (skewness of the assessed profile):** jedná se o podíl průměrných hodnot třetích mocnin pořadnic **Z(x)** a třetí mocniny hodiny **Pq, Rq** nebo **Wq** v rozsahu základní délky. [1]

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |z^3 x| dx \right] \quad (4)$$

- **Špičatost posuzovaného profilu, Pku, Rku, Wku** (*kurtosis of the assessed profile*): jedná se o podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty Pq, Rq nebo Wq v rozsahu základní délky. [1]

$$Rku = \frac{1}{Rq^2} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |z^4 x| dx \right] \quad (5)$$

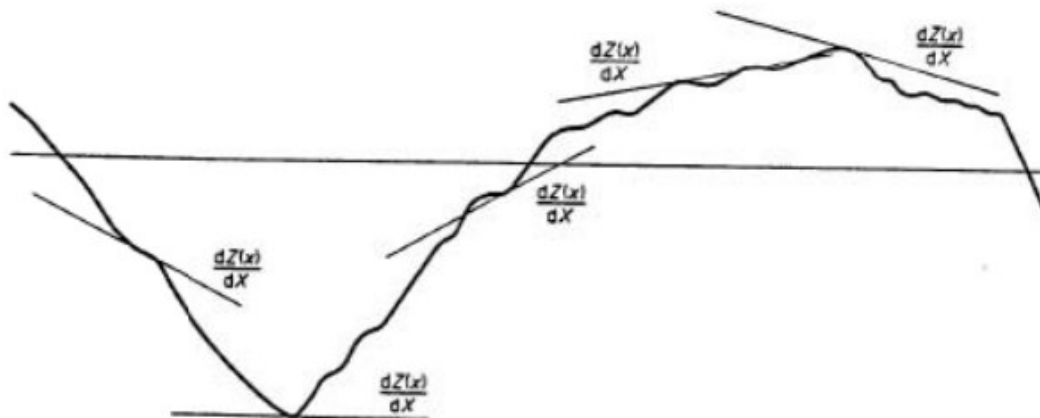
1.2.3 Parametry délkové, tvarové a hodnocení

- **Průměrná šířka prvků profilu, PSm, RSm, WSm** (*mean width of the profile elements*): jedná se o aritmetický průměr šířek Xs prvků v rozsahu základní délky. [1]

$$PSm, RSm, WSm = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m Xs_l \quad (6)$$

Tvarové parametry

- **Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu, PΔq, RΔq, WΔq** (*root mean square slope of the assessed profile*): v rozsahu základní délky volíme kvadratický průměr sklonů pořadnic dZ/dX . [1]



Obrázek 6. Místní sklon [1]

Hodnocení parametrů

Za použití souboru jednotlivých parametrů se rozhodneme, zda je povrch výrobku ve shodě se specifikací, z nichž každý je určen na určité délce. Spolehlivost rozhodnutí se odvíjí od počtu měření v závislosti na porovnávaných délkách. Vady povrchu, jako je například rýha, pór, se nesmí při kontrole povrchu uvažovat. [2]

Parametr profilu drsnosti

V případě, kdy vyhodnocovaná délka pro R-parametry podle ISO4287 se nerovná pěti základním délkám, bude se horní a dolní mez přepočítávat a vztahovat k vyhodnocené délce, která bude rovna pěti základním délkám.

Z čehož plyne: čím je počet měření větší a delší, tím je větší spolehlivost rozhodnutí o vyhodnocování kontrolovaného povrchu specifikací, a tím klesá i parametr nejistoty průměrné hodnoty.

Proces kontroly musí představovat kompromis z hlediska nákladů a přesnosti (spolehlivosti) měření, jelikož s rostoucím počtem měření dochází k nárustu nákladů na měření. [2]

Základní jednotky

V měření drsnosti povrchů se používají nejčastěji jednotky μm – Ra, Rz, Rmax.

Praktickým příkladem může být **μinch (μ'') – mikropalec** – používáno v USA je roven 0,0254mm.

1.3 Plošné (3D) parametry

Tabulka 2. Plošné (3D) parametry

Bodové prvky	
Pík (<i>Peak</i>)	nejvyšší bod na povrchu
Prohlubeň (<i>Pit</i>)	nejnižší bod na povrchu
Bod sedla (<i>Saddle point</i>)	jeden bod příslušného sedla
Čárové prvky	
Přímka kurzu (<i>Course line</i>)	křivka oddělující přilehlé vrchy
Hřebenová přímka (<i>Ridge line</i>)	křivka oddělující přilehlá údolí
Plošné prvky	
Vrch (<i>Hill</i>)	oblast okolo píku taková, že směr všech maximálních cest končí v píku
Údolí (<i>Dale</i>)	oblast okolo prohlubně taková, že směr všech maximálních cest končí v prohlubni
Množina bodů	
Sedlo (<i>Saddle</i>)	sada bodů na povrchu omezeném stupnicí, kde se kříží hřebenové přímky a přímky kurzu

Z důvodů potřeby zvyšování nároků na kvalitu a přesnost výroby, jsou vyžadovány způsoby a metody pro hodnocení a kvalitu. Tyto způsoby se neustále vylepšují a naším cílem je dospět k co nejlepším výsledkům za co nejnižší náklady.

Všechny výškové parametry jsou stanoveny na základě plochy určené.

Základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu S_q (*root mean square height of the scale-limited surface*): vymezení průměrné hodnoty čtverce hodnot koordínace uvnitř plochy definice (A). [3]

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A |Z(y, x)| dx, dy} \quad (7)$$

Šikmost omezené stupnice povrchu (*skewness of the scale-limited surface*): kvocient průměrné hodnoty koordinační krychle a hodnot krychle S_q uvnitř plochy (A). [3]

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A |Z^3(y, x)| dx, dy \right] \quad (8)$$

Špičatost omezené stupnice povrchu (*kurtosis of the scale-limited surface*): kvocient průměrné čtvrté mocniny koordínace a hodnoty čtvrté mocniny S_q uvnitř plochy (A). [3]

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A |Z^4(y, x)| dx, dy \right] \quad (9)$$

Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu, S_a (*arithmetical mean height of the scale limited surface*): aritmetický průměr absolutních hodnot koordínace uvnitř určené plochy (A). [3]

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |Z(y, x)| dx, dy \quad (10)$$

1.4 Hodnocení 2D a 3D metody drsností povrchů

1.4.1 Vyhodnocení 2D metod drsností povrchů

Vyhodnocení provádíme pomocí ISO 4288, ve které je uvedeno, jak se parametry vyhodnocují a touto normou bychom se měli řídit.[2]

Odhad parametrů na základní délce

Odhad hodnot parametrů se vypočítá pomocí dat získaných naměřením pouze na základní délce. [2]

Odhad průměrných hodnot parametrů na základní délce

Vypočten vyčíslením z aritmetického průměru odhadu parametru ze všech jednotlivých základních délek. Při použití normalizovaných pěti základních délek, nedoplňujeme symboly indexem, při použití více základních délek zavádíme index s pořadovým číslem. [2]

Definice parametrů na vyhodnocované délce

Pro parametry definující na vyhodnocované délce (P_t , R_t a W_t) je výpočet odhadu hodnot parametru z dat naměřených na vyhodnocované délce, která vychází z normalizovaného počtu základních délek. [2]

Standardní vyhodnocované délky:

Nestanovuje-li výrobní dokumentace jinak, je vyhodnocovaná délka následující:

- pro R-parametry: vyhodnocovaná délka je definovaná v 1.4.3;
- pro P-parametry: vyhodnocovaná délka je rovna délce měřeného prvku;
- pro parametry metodou Motif (Motif-parametry): vyhodnocovaná délka je definována v normě ISO 12085:96.

1.4.2 Pravidla-porovnávání měřených hodnot s mezemi tolerancí

Plochy na kontrolovaných prvcích

Vizuální zkouškou může být zjištěno, že struktura kontrolovaných prvků se jeví jako zcela homogenní. Může být i zcela rozdílná na určitých plochách. Při homogenní struktuře hodnot parametrů určených z povrchu obrobku dojde k porovnání s požadavky ve výrobní dokumentaci nebo požadavky z výkresů. [2]

Pakliže máme na povrchu plochy s rozdílnou strukturou, naměřené hodnoty, které máme změřeny pro každou jednotlivou plochu, použijeme jednotlivě pro porovnání s požadavky výrobní dokumentace nebo požadavky z výkresů. [2]

Jako specifikace horní meze parametrů poslouží plochy na povrchu, jenž mají největší hodnoty parametrů. [2]

Pravidlo 16 %

Jako **horní mez** parametru budeme uvažovat, že maximálně 16 % všech naměřených hodnot vybraných parametrů na vyhodnocované délce přesáhne horní mez specifikovanou požadavky uvedenými ve výrobní dokumentaci nebo na výkrese. [2]

Jako **dolní mez** parametru budeme uvažovat, že maximálně 16 % všech naměřených hodnot vybraných parametrů na vyhodnocované délce bude menších a přesáhne spodní mez specifikovanou požadavky uvedenými ve výrobní dokumentaci nebo na výkrese. [2]

„Při stanovení horní a dolní meze parametru bude použita značka parametru bez indexu "max".“ [2]

V případě vyhovujících hodnot parametrů profilu drsnosti, kdy překročení horní meze smí být v 16 % odpovídá mez určená hodnotou $\mu + \sigma$. Když je větší hodnota σ , tím vzdálenější musí být aritmetický průměr (μ) parametru profilu drsnosti (σ) od specifikované meze (horní hodnota) [2]

Pravidlo maxima

Žádná z měřených hodnot parametrů na celém kontrolovaném povrchu nesmí v průběhu kontroly přesáhnout maximální hodnotu specifikovanou a uvedenou ve výrobní dokumentaci nebo na výkresu. [2]

Nejistota měření

K důkazu o shodě nebo neshodě se specifikací mezních hodnot musí dojít k porovnání měřených hodnot parametrů a uvážení nejistot měření, a to podle pravidel, které stanovuje příslušná norma ISO 14253-1. Dojde-li k porovnání měřených výsledků s mezemi horní a dolní, bude odhad nejistoty měření bez uvážení nehomogenit povrchu, které jsou již započteny s přídavkem 16 %. [2]

1.4.3 Posuzování parametrů

Všeobecně

Pro popis vad povrchu jsou parametry struktury povrchu nepoužitelné, a proto se při kontrole struktury povrchu nesmí a neuvažují vady jako např. póry nebo rýhy povrchu. Proto při rozhodnutí o shodě se specifikací, jestliže je zde povrch obrobku, se používá soubor jednotlivých hodnot parametru struktury povrchu, kde se každý určí na vyhodnocované délce. [2]

O spolehlivosti rozhodnutí, zda měřený povrch vyhovuje či nevyhovuje specifikaci a přesnosti *průměrné hodnoty parametru struktury povrchu získané na témže povrchu, závisí na počtu základních délek ve vyhodnocované délce, na které byly jednotlivé hodnoty parametru struktury povrchu získány, ale taky závisí na počtu vyhodnocovaných délek, tj. na počtu povrchových měření.* [2]

Parametry profilu drsnosti

„Pokud vyhodnocovaná délka pro R-parametry podle normy ISO 4287 se nerovná pěti základním délkám, je jejich horní a dolní mez přepočtena a dána k vyhodnocované délce rovnající se pěti základním délkám.“ [2]

„Vztah σ_n vůči σ_5 je dán následující rovnicí.“ [2]

$$\sigma_5 = \sigma_n \sqrt{(n/5)} \quad (11)$$

„Kde n je počet (menší než 5) použitých základních délek.“ [2]

Spolehlivost měření závisí přímo úměrně na počtu měření a vyhodnocovaných délkách, vyhovuje-li kontrolovaný povrch specifikaci. Nárůst počtů vede ke zvýšení nákladů a časů, proto volíme kompromis.

1.4.4 Pravidla a postupy pro kontrolu dotykovými přístroji

Základní pravidla pro určení mezní vlnové délky cut-off pro měření parametrů profilu drsnosti

„Je-li základní délka specifikovaná požadavkem na výkresu nebo ve výrobní dokumentaci, mezní vlnová délka cut-off λ_c je vybrána rovnou této základní délce. Není-li drsnost specifikována (na výkresu nebo ve výrobní dokumentaci) nebo základní délka není specifikována v dané specifikaci drsnosti, je mezní vlnová délka volena postupem daným v“ další kapitole - Měření parametrů profilu drsnosti. [2]

Měření parametrů profilu drsnosti

„Není-li specifikován směr měření, obrobek je polohován tak, že směr řezu odpovídá největším hodnotám výšek parametrů drsnosti (R_a , R_z). Tento směr bude kolmý k poloze povrchu. Pro izotropní povrchy může být směr řezu libovolný.“ [2]

„Měření je provedeno na té části povrchu, na které lze očekávat kritické hodnoty; to může být posouzeno vizuálním pozorováním. Pro získání nezávislých výsledků jsou jednotlivá měření na této části povrchu rozdělena rovnoměrně.“ [2]

„Pro určení hodnot parametrů profilu drsnosti je potřeba nejprve pohledem rozhodnout, zda profil drsnosti je periodický nebo neperiodický. Na základě tohoto určení, pokud není udáno jinak, následuje postup specifikovaný v normě ISO 4288 (postup pro neperiodický profil drsnosti). Jsou-li použity speciální postupy měření, musí být popsány ve specifikacích a v protokolu o měření.“ [2]

a) Postup pro neperiodický profil drsnosti: pravidla v ČSN EN ISO 4288 [2]

b) Postup pro periodický profil drsnosti: pravidla v ČSN EN ISO 4288 [2]

1.4.5 Vyhodnocení 3D metod drsností povrchů

Definováno normou ČSN EN ISO 25178-2. Tato norma nám rozděluje na dva základní druhy plošných parametrů a to: *Parametr pole* a *Parametr prvku*. Jedná se o nejvýznamnější změny v posuzování hodnocení povrchu a udává směr trendu v metrologii. Zároveň nám definuje soubor parametrů pro hodnocení textury povrchu, kdy každý parametr je označen a specifikován. Členíme je na: výškové, prostorové, hybridní. [3]

Tímto měřením dosáhneme většího počtu vyhodnocovaných dat, které detailně charakterizují prostorový profil zkoumaného povrchu. Tato data nám poskytují více informací (topografické mapy, axonometrický pohled), ale zároveň i reálnější představu o měřeném povrchu. Z tohoto lze vyvodit, že tato data jsou věrohodnější.

Data lze získat dotykovými, nebo optickými snímači. Rozdíly hodnot pozorovaných ploch jsou dány parametry zařízení a jejich konstrukcí. Vždy volíme adekvátní zařízení, které musí plnit požadavky na kvalitu, čas a finance.

Vyhodnocení – získaná data z prostorového (plošného) měření musíme za pomoci filtrů (korelace) doladit pro získání co nejreálnější (nejpřesnější) hodnoty parametrů plochy. [3]

S-Filtr (*S-filter*)

- Filtr odstraňující malou laterální stupnici z povrchu, předpoklad pro dosažení primárního povrchu. [3]

L-Filtr (*L-filter*)

- Filtr odstraňující velkou laterální stupnici z primárního povrchu nebo S-F povrchu. [3]

F-operace (*F-operation*)

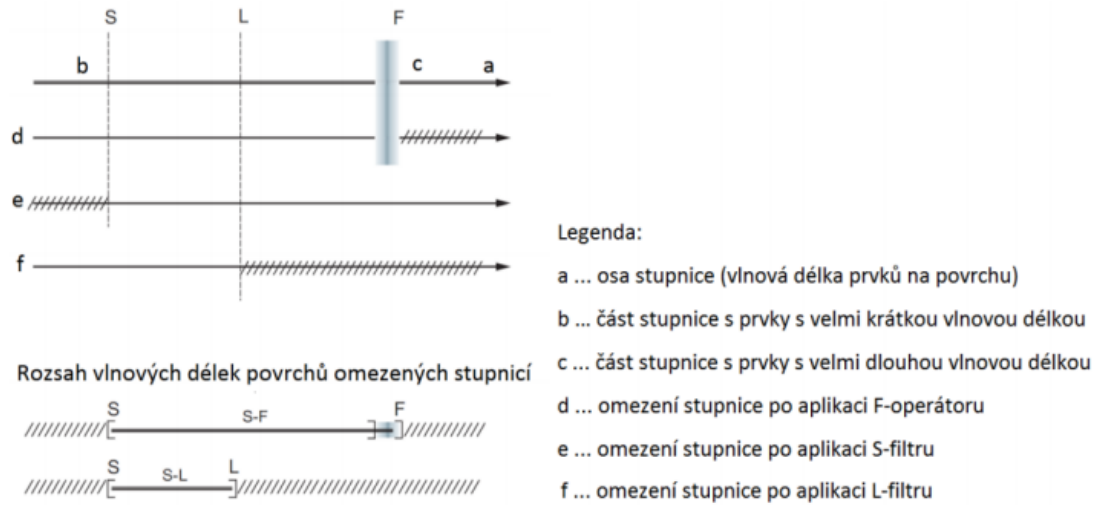
- Operace vylučující vliv tvaru z primárního povrchu (Může omezit velkou laterální stupnici povrchu, nejasná akce. Mnoho L-filtrů je citlivých na tvar a požaduje F-operaci). [3]

S-F povrch (*S-F surface*)

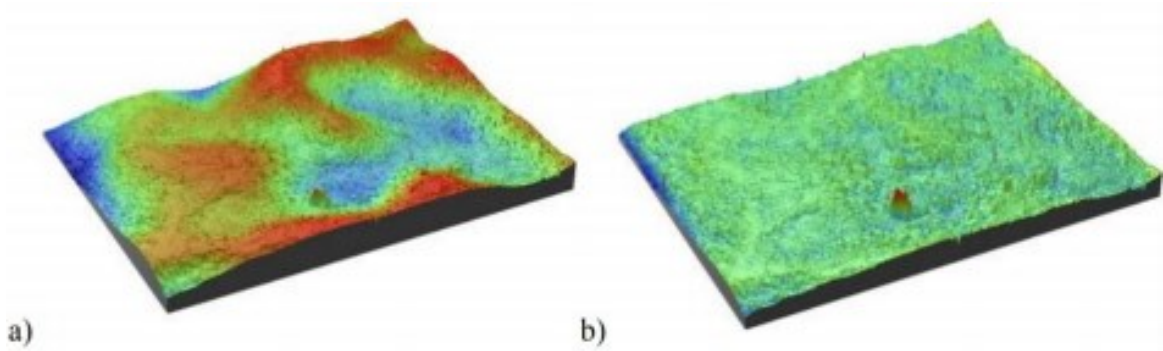
- Odvozeno z primárního povrchu vyloučením vlivu tvaru pomocí F-operace. [3]

S-L povrch (*S-L surface*)

- Odvozeno od S-F povrchu přidáním L-filtru – vyloučení velké stupnice. [3]



Obrázek 7. Vztah mezi jednotlivými filtry [3]

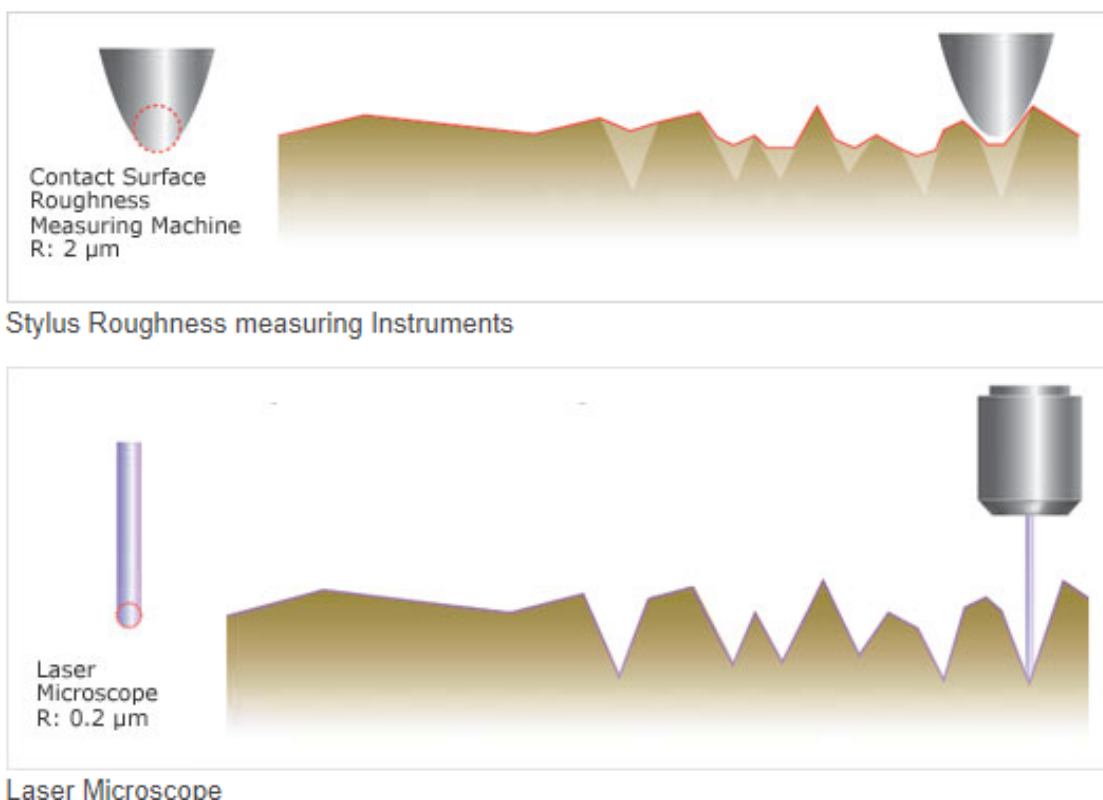


Obrázek 8. F+S filter a) před úpravou b) S+L plocha [4]

2 MĚŘICÍ TECHNIKA

Pro měření drsnosti povrchu volíme zařízení vždy tak, aby nám zohledňovalo především požadavky na danou kvalitu povrchu, přesnost měření, funkčnost daného dílu, rozpočet a mnoho dalších faktorů tím nesoucích, pro námi zvolené technologie. K měření pohledových ploch, nijak funkčních budeme uvažovat co nejjednodušší zařízení a s přibývajícimi nároky na kvalitu, se tyto požadavky budou měnit. Pro třecí plochy uložení klikové hřídele už budeme zavádět „malou laboratoř“.

Pohled na rozdílnou přesnost zařízení můžeme pozorovat níže, kdy dotykovým nástrojem jsme schopni měřit do průměru hrotu, ale nejsou citlivé tolik na nečistoty, vyrábí se ve velké škále rozlišení, přesností, použití a velikostí od nejmenší po složitá laboratorní zařízení. Optický nástroj, který má hrot v ohnisku laseru a disponuje užším paprskem, se dostane do užších míst. [5]



Obrázek 9. Porovnání měření dotykové vs. bezdotykové [13]

2.1 Kvantitativní (parametrické) rozdělení metod

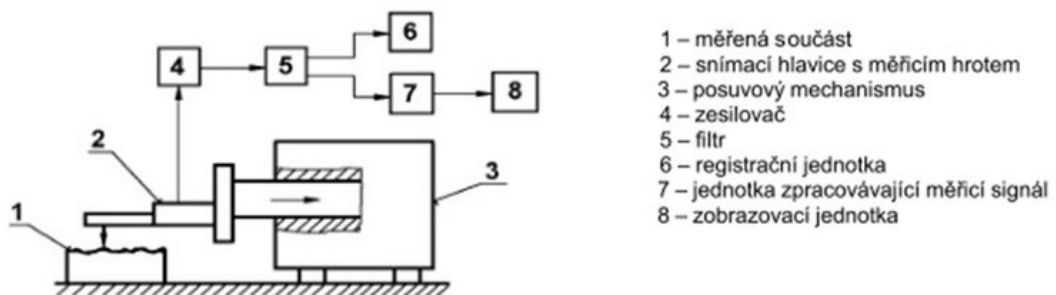
Tabulka 3. Kvantitativní dělení

Dotykové metody měření	Měřící hrot
Bezdotykové metody měření	Světelný řez
	Interference světla
	Konfokální
	Optický hrot
	CLA – Bílé světlo

2.2 2D měření

2.2.1 Dotykové měření na profilometru

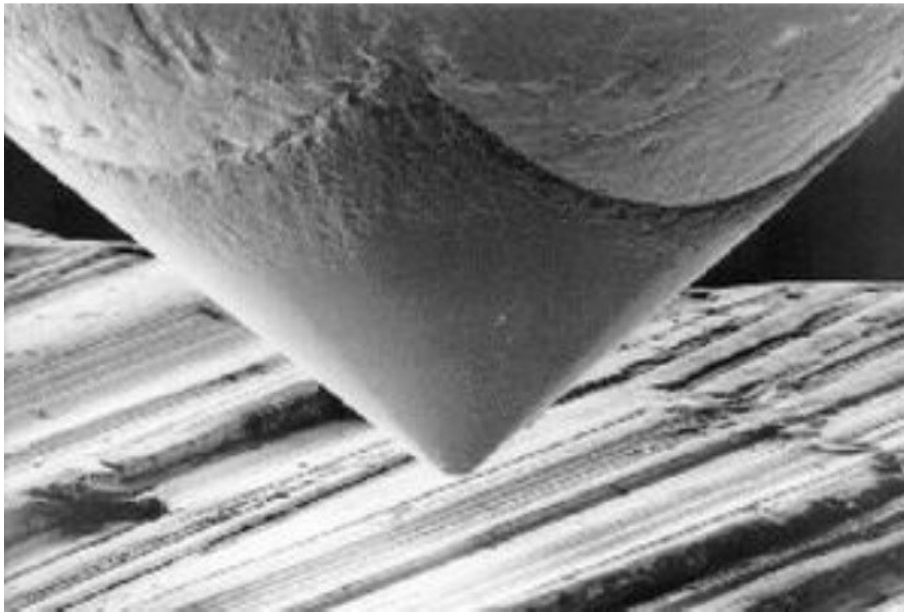
Provádíme měřícím hrotem, kdy dochází ke snímání povrchu dotykem. Toto měření nelze vždy aplikovat v závislosti na tvrdosti povrchu, dostupnosti, struktuře, velikosti hrotu, aj. Hrot nám „klouže“ po povrchu jako jehla po gramofonové desce a tento povrch je převáděn nejčastěji na el. signál, který za pomoci filtrů a převodníků převedeme na cílovou hodnotu. [14]



Obrázek 10. Schéma snímání [15]

Ovlivnění výsledku geometrií hrotu:

- poloměr zaoblení snímacího hrotu (2 μm , 5 μm , 10 μm),
- přitlačná síla zhruba 0,00075 N,
- vrcholový úhel snímacího hrotu 60°, 90°,
- změna rychlosti měřící síly.



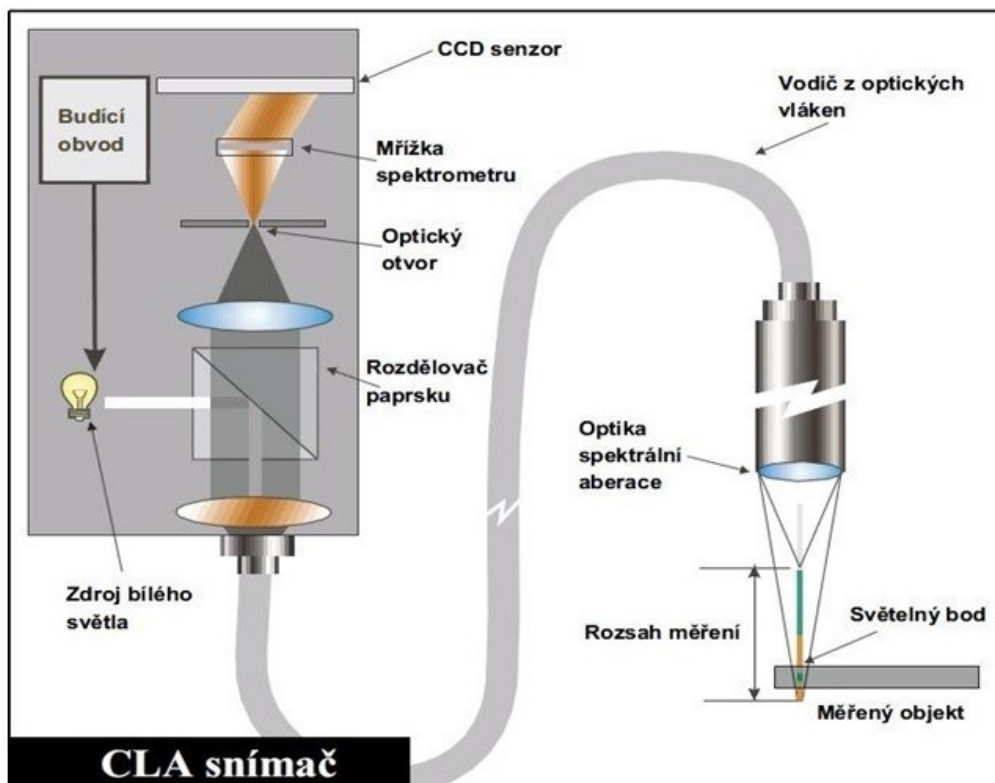
Obrázek 11. Detail hrotu [15]

2.3 3D měření

Na trhu máme několik velkých výrobců. Ti se snaží soustředit nejen na vývoj a přípravu vysoce kvalitních měřicích zařízení, ale také se aktivně zapojují do přípravy a normalizace metodik. Samozřejmostí je vývoj software pro snímání a vyhodnocování povrchů. [10]

Přednosti 3D měření:

- bezdotykové měření,
- rozlišení snímaného povrchu,
- snímáme plochu, nejen určitou část = množství dat,
- menší náchylnost k poškození,
- možnost měřit jinak neměřitelné materiály.



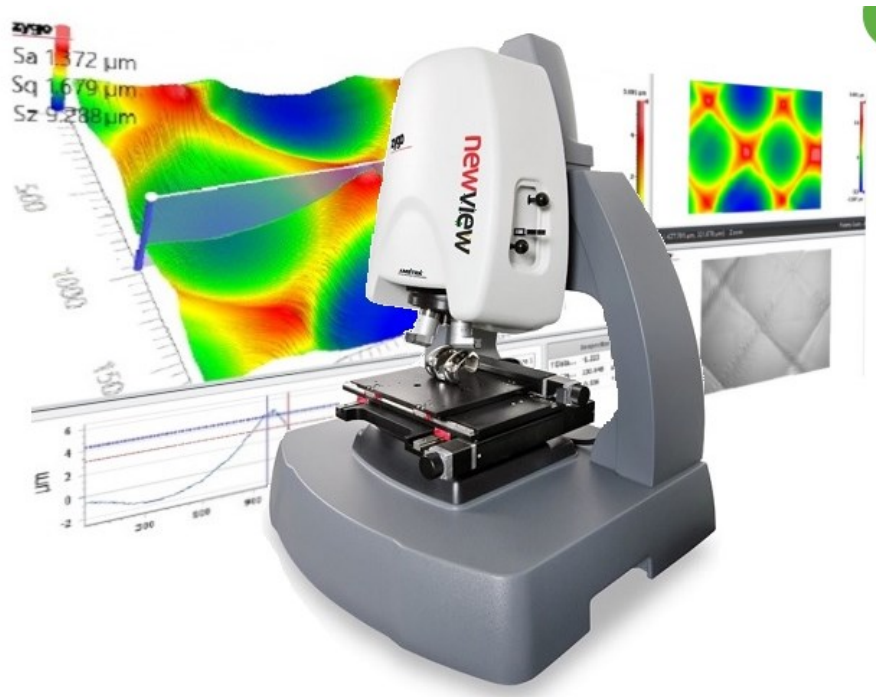
Obrázek 12. CLA snímač [15]

2.4 OPTICKÝ PROFILOMĚR ZYGO NEWVIEW-9000

Pro naše účely byl použit interferometrický systém nové generace s technologií Coherence Scanning Interferometry (CSI), který kombinuje mód vertikálního interferometrického skenování (VSI - Vertical Scanning Interferometry) a mód měření fázového posuvu interferenčních obrazců (PSI – Phase Shifting Interferometry).

Tabulka 4. Parametry ZYGO NEWVIEW-9000 [11]

Opakovatelnost	až 0,08 nm
Maximální rychlost vertikálního skenování	až 171 $\mu\text{m/s}$
Rozsah výšky skenovaného profilu	od 0,1 nm do 20 mm
Dodatečný optický zoom	3 objektivy
Zorné pole	Od 0,04 do 17,5 mm



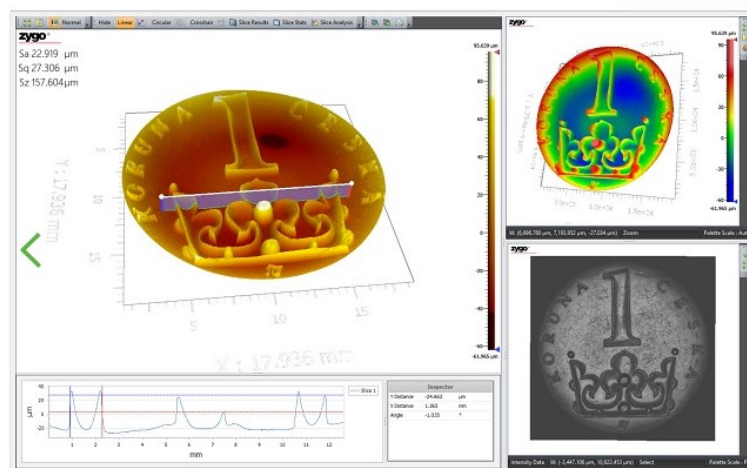
Obrázek 13. NewView 9000 [11]

2.4.1 Software-Zygo Mx

Slouží pro řízení profilometru, ukládání, analýzu a práci s daty. Software lze optimalizovat a specifikovat na potřeby měření.

Hlavní výhody software:

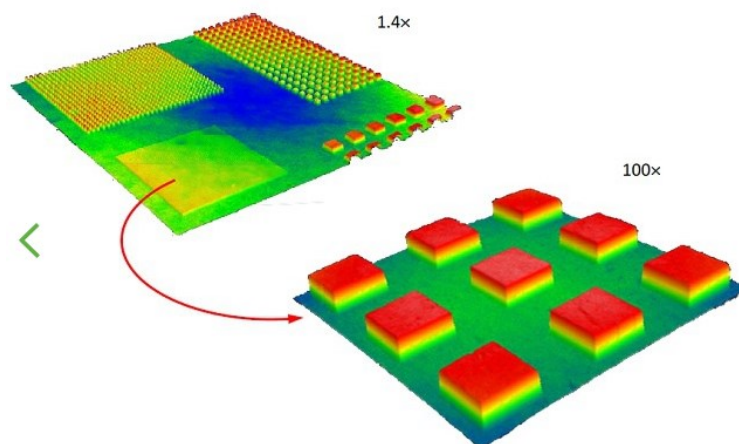
- chytré nastavení pro automatiku jako je nalezení povrchu nebo možnost nastavení automatických podmínek pro dané měření,
- integrovaná SPC statistika,
- interaktivní 3D mapy (zvětšování, zmenšování, orientace, rotace),
- flexibilní analýza s širokou možností kvantifikace výsledků, aplikace filtračních funkcí,
- „V rámci výstupů je možné pracovat s nastavením povolených odchylek v souladu s výrobními standardy, což usnadňuje a urychluje rutinní měření.“ [11]



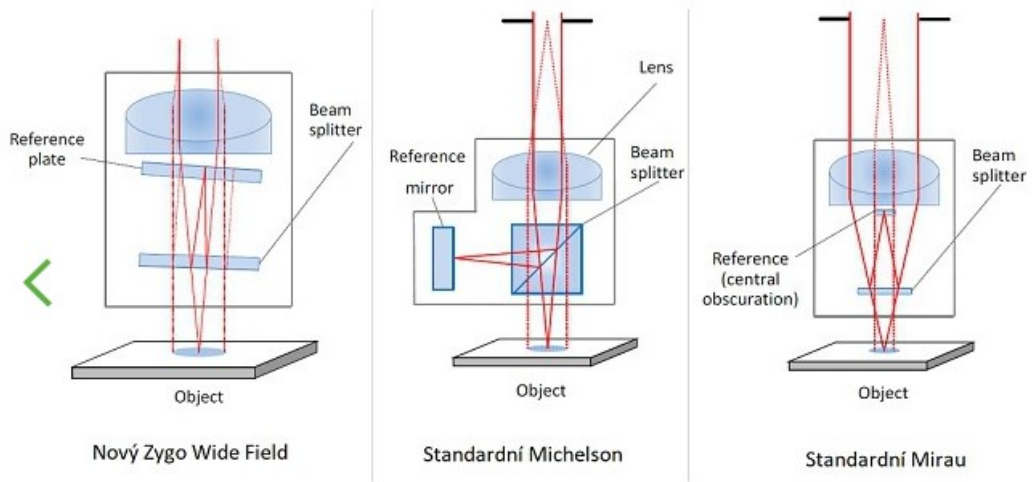
Obrázek 14. Software Zygo MX [11]

2.4.2 Parametry-Objektivy

- „zvětšení,
- pracovní vzdálenost,
- úhel naklonění,
- zorné pole profilometru,
- laterální rozlišení (nikoliv rozlišení v ose Z).“ [11]



Obrázek 15. Detail zvětšení [11]



Obrázek 16. Druhy čoček [11]

2.4.3 Opt-Scope

Trojrozměrné bezdotykové měření struktury povrchu interferometrem s bílým světlem.

Vlastnosti:

- Měření drsnosti povrchu (ISO25178)
- Až 100x rychlejší oproti dotykovému měření
- Rychlá změna výběru optiky
- Robotický pojezd měřicího stolu, Stitching – překrývání dat, odlumení aktivní
- DEAP analýza – algoritmus pro strukturu dat [4]

Tabulka 5. Parametry - Opt-Scope

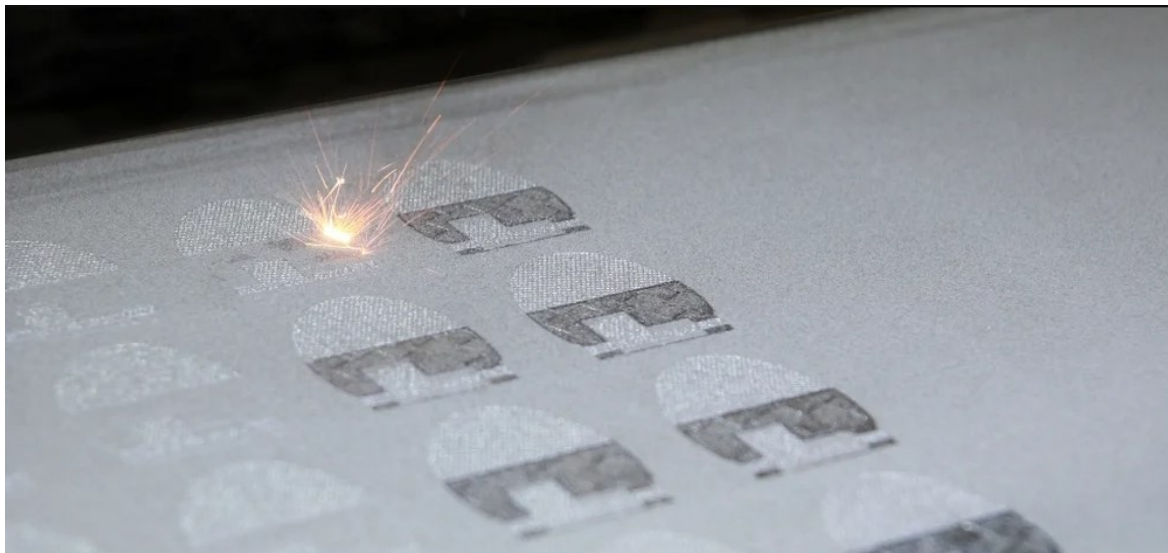
Vertikální rozsah měření	20 nm
Rozlišení	0,01 Nm
Přesnost	+ - (0,1 + [H/1000]) μm



Obrázek 17. Opt-Scope (3D) [4]

S rostoucí poptávkou po prostorovém měření dat a hodnocení textur povrchů se rozvíjí nabídka měřicí techniky. Dochází ke zpracování většího počtu dat za kratší čas a k dosažení znatelnější přesnosti (objektivnosti) a získání co nejvíce informací o daném povrchu. Toto vede ke zlepšení výrobních procesů a dosažení co nejlepší kvality (např.: průběh opotřebení, tření, těsnění, únavové vlastnosti, proces stárnutí). Umožní nám kvalitní studium geometrických a rozměrových změn profilu povrchu v různých etapách výrobních procesů součástí.

3 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ 3D TISK (DMLS(M))

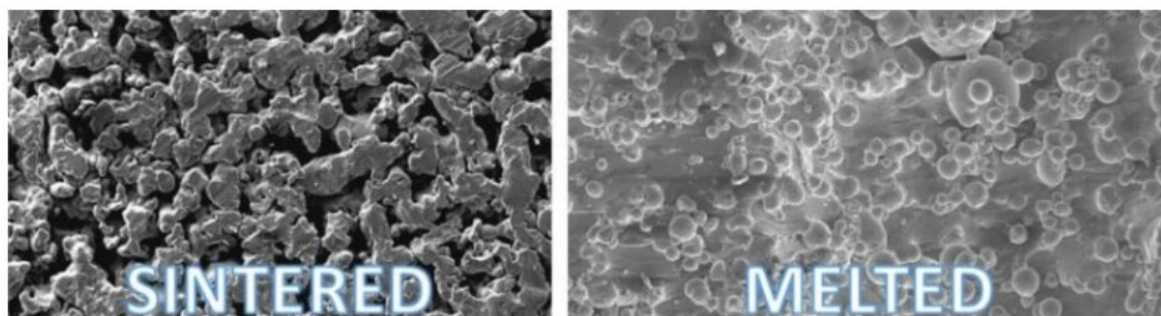


Obrázek 18. Ukázka tisku do vrstvy prášku [16]

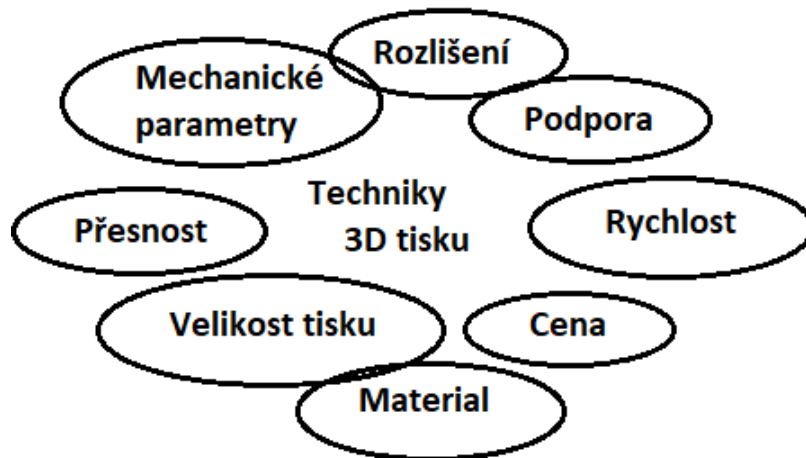
3.1 Obecně o 3D tisku metodou DMLS - DMLM

(DMLS) – *Direct metal laser sintering* - **spékání**, také známo jako **(SLS)** – *selective laser sintering* a naopak **(SLM)** – *selective laser melting* - **tavení**, **(DMLM)** – *Direct metal laser melting*: jedná se o aditivní 3D tisk (tvorba vrstvy po vrstvě), který se používá k výrobě prototypů, složitých a komplikovaně vyrobitelných součástí. V posledních letech jde i o hromadnou produkci, efektivní a cenově dostupnou technologii.

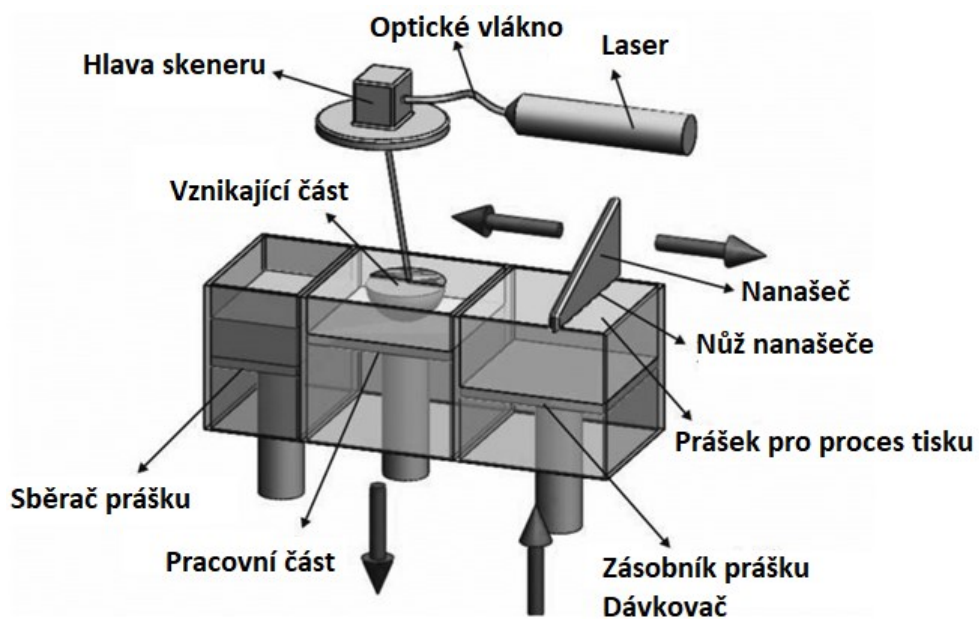
Rozdíl v popisovaných metodách je na molekulární úrovni, kdy metody DMLS, SLS a SLM, DMLS od sebe rozděluje proces „spékání prášku“ do výsledného tvaru. [8]



Obrázek 19. Spečený prášek (vlevo), Roztavený prášek (vpravo) [18]

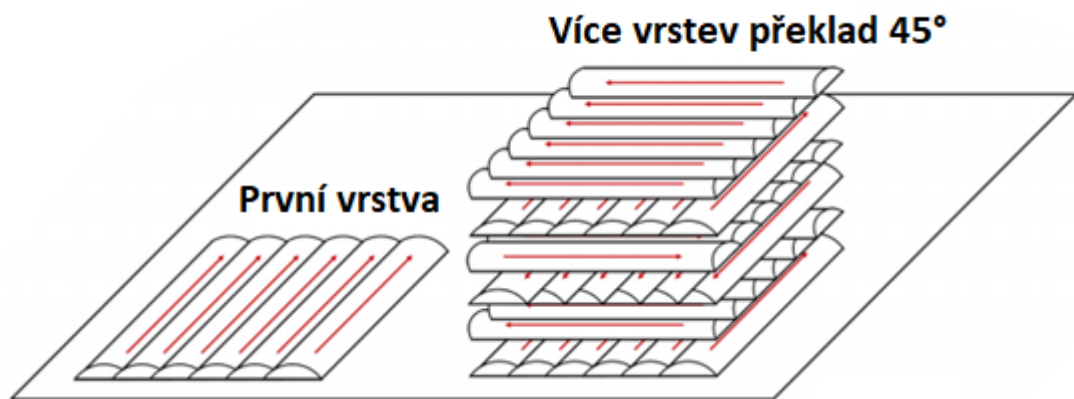


Obrázek 20. Klíčové vlastnosti 3D tisku [12]



Obrázek 21. Schéma 3D tiskárny [12]

Na základním schéma tiskárny vidíme komoru pro vznik tisku, je to místo, kde je upevněna tisková deska, která je v komoře o minimální koncentraci kyslíku. Na tuto desku nanašeč nanese vrstvu prášku, na který laser dle programu a nastavení pomocí skeneru a řídicí elektroniky vysvítí jednotlivé dráhy výrobku. Poté dojde k opětovnému nanesení prášku. Proces se opakuje stále dokola, dokud nedojde k nanesení poslední vrstvy.



Obrázek 22. Strategie laseru [6]

Na obrázku je ukázka propojení jednotlivých vrstev. Základní, ale důležitý parametr tisku.

DMLS, SLS

- Spékání prášku probíhá při nižší teplotě a ta má vliv na výslednou porozitu, částice zahřívá tak, že dochází ke spojení povrchu molekul prášku. S tím souvisí potřeba nižšího výkonu laseru a rozdílné rychlosti pohybu laseru.
- Výhodou je, že můžeme tisknout materiály ze slitin obsahujících materiály různých teplot tání.
- Výsledný produkt tisku je více porézní, ale metoda umožňuje tisk například i kombinace kovu a polymeru - **Alumid** což je kombinace nylonu a hliníku.
- Velké využití v medicíně – protézy, náhrady kostní a jiné. [20]

DMLM, SLM

- Metoda tisku, při které se ohřívá prášek, dokud se úplně nerozpustí v kapalinu → menší porozita

Pracovní materiál pro proces 3D tisku je jemný prášek, který má typickou velikost částic 20 – 40 mikrometrů. Může se jednat o prášky nerezové oceli, slitiny niklu, titanu, hliníku, drahých kovů. Velikost a tvar částic má zásadní vliv na rozlišení detailů. Menší velikost a menší vrstva prášku umožňuje lepší rozlišení výsledného dílu.[6]

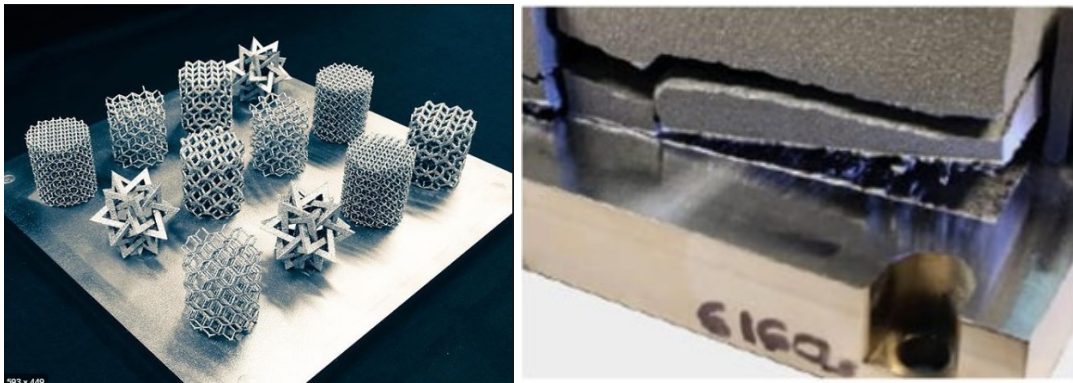
Budování (tisk) objektu vzniká vrstva po vrstvě, a to umožňuje výrobu složitých dílů, které není možné jednoduše vyrobit pomocí obráběcích či formovacích procesů. [19]

Výhody: - vlastnosti hotových dílů jsou srovnatelné s díly odlitými ze stejného materiálu;

- kovový prášek, který není slinut (spojen) je opakovatelně použitelný, ale i zde existují omezení.

Nevýhody: - Cena kovových prášků, doba tisku;

- jemné částice → Toxické a zdraví škodlivé → vliv na zdraví → ochrana;
- hořlavost → nutno použít inertní plyn;
- doba tisku, porozita, vnitřní pnutí, zbytkový stres, který vede k destrukci, nebo poškození dílu.

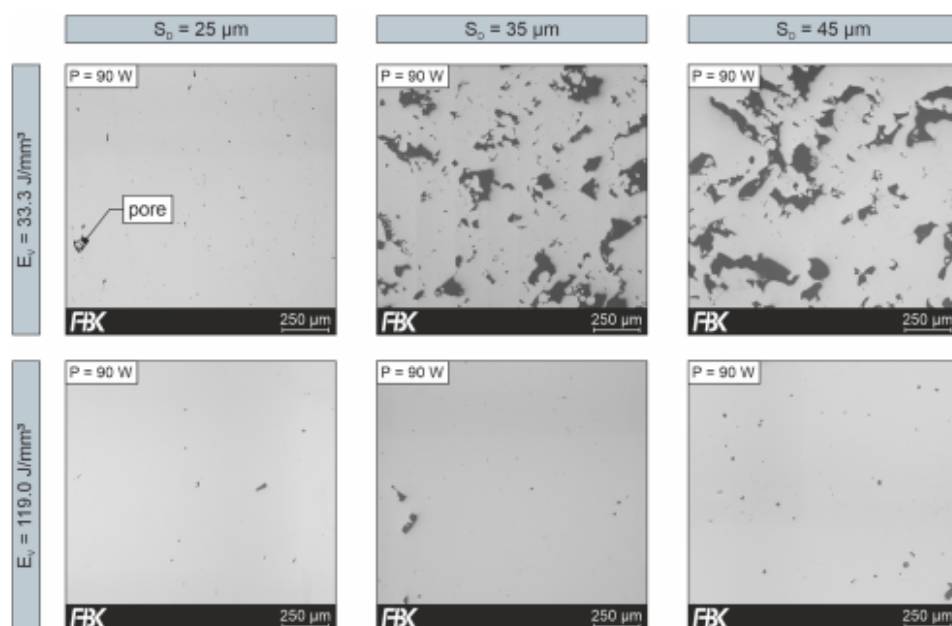


Obrázek 23. Dokončený tisk (vlevo), Tisková vada (vpravo)

Zbytkový stres a zbytkové napětí je výsledkem smrštění a roztažnosti, chlazení a ohřevu, ke kterému dochází během procesu 3D kovového tisku. Pokud zbytkové napětí překročí pevnost v tahu podkladu nebo tiskového materiálu, mohou nastat vady jako je deformace podkladu nebo praskliny v dílu. [8]

Tabulka 6. Příklady užití prášků

Třída	Druh materiálu	Typické použití
Ocel	AMS6514, 18Ni300 MaragingSteel MS1	Série vstřikovacích nástrojů, mechanické strojírenské díly
	EN 1.2709 ToolSteel 1.2709	Série vstřikovacích nástrojů, mechanické strojírenské díly
	ASTM A681 ToolSteel H13	Horké pracovní aplikace, výkovky, tlakové líc Nástroje a nástroje pro vytlačování za tepla
	EN 10084 CaseHardeningSteel 20MnCr5	Aplikace pro automobilový průmysl a všeobecné strojírenství, ozubená kola, náhradní díly
	Stainless steel 17-4 / 1.4542 StainlessSteel GP1	Funkční prototypy a díly pro sériovou výrobu, strojírenství a lékařská technologie
	1.4540, UNS S15500 StainlessSteel PH1	Funkční prototypy a díly pro sériovou výrobu, strojní součásti
	1.4441, UNS S31673, F138 StainlessSteel 316L	Konstrukční součásti pro agresivní prostředí mohou být používána pro lékařské pomůcky, např. endoskopie a ortopedie
	1.4404, UNS S31603 StainlessSteel 316L VPro	Lisovací a slinovací aplikace, které vyžadují vysokou úroveň produktivity
	Precipitation hardening tool Steel StainlessSteel CX	Série vstřikovacích nástrojů pro korozivní plasty a gumy, strojírenské díly
	1.4542, UNS17400, A564M StainlessSteel 17-4PH	Kyselinové a korozivzdorné konstrukční díly, lékařské nástroje (chirurgické nástroje, ortopedické instrumentace)



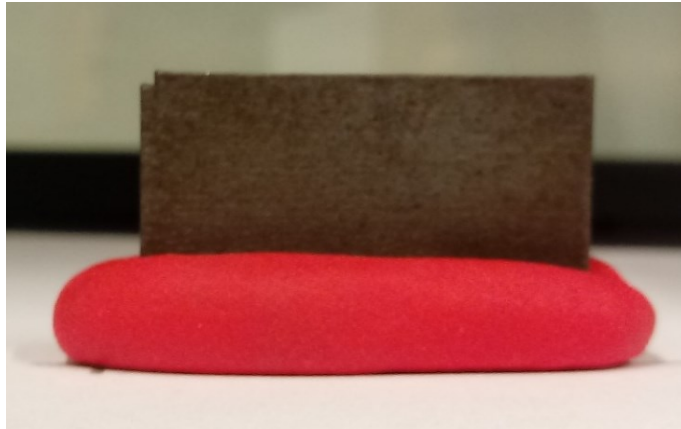
Obrázek 24. Vliv energie laseru na vnitřní porositu [19]

4 CÍLE PRÁCE

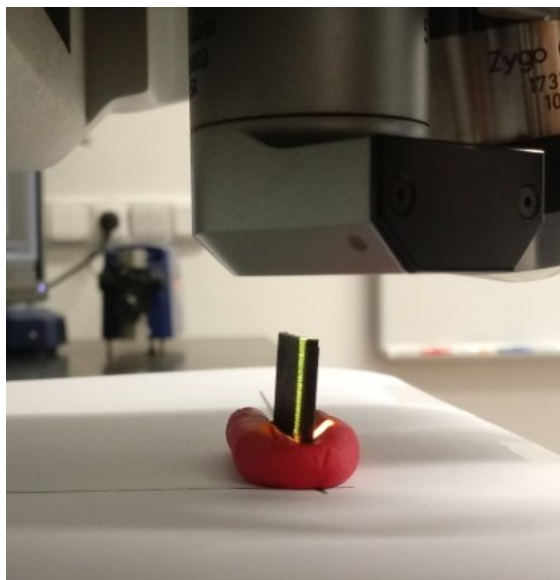
Cílem bakalářské práce je ověřit nastavení parametrů 3D tiskárny, vyhodnocení tiskových parametrů, protože se jedná o parametry ovlivňující kvalitu a drsnost povrchů pro použitý prášek. U jednotlivých vzorků z kovu dojde ke kontrole bezkontaktní metodou. Na základě tohoto provedeného měření, kdy snímáme vhodné plochy povrchu tělesa, doporučíme vhodnou změnu parametrů a případné technologické změny, které jsou možným výsledkem experimentu.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 VZORKY



Obrázek 25. Usazení vzorku



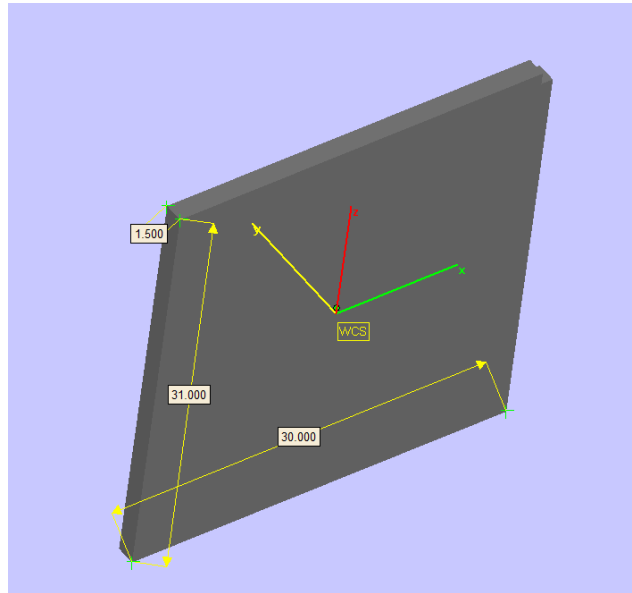
Obrázek 26. Pohled na měření

5.1 3D tisk vzorků

Použité vzorky o rozměrech 30 x 31 x 1,5 mm byly vyrobeny na SLM stroji ConceptLaserM2, který disponuje 400 W vláknovým laserem, pod atmosférou z dusíku s obsahem kyslíku do 0,5 %. Velikost nanášené vrstvy je 40 μm , objemová hustota energie dle tabulek parametrů J/mm s použitím skenovací strategie s proměnným pootočením vrstvy o 90° a modulací energie pro rychlost skenování.

Pro základní výpočet energie je použit vztah dle výrobce stroje:

$$Energie\ vstupu = \frac{výkon\ laseru}{(rychlost\ laseru * výška\ vrstvy)} \quad [J/mm^2] \quad (12)$$



Obrázek 27. 3D model vzorku

5.1.1 Použitá technologie tisku

Pro tisk byla použita základní technologie tisku doporučená výrobcem stroje. Změnou parametrů pro tisk povrchu výrobku se snažíme docílit co nejlepších hodnot parametrů povrchu. Proto jako první krok volíme změnu parametrů rychlosti pohybu paprsku laseru. V návaznosti po tomto experimentu uvažujeme o změnách výkonových. Zde musíme postupovat pomalu, neboť náhlou změnou výkonu můžeme vyvolat mnoho negativních změn a mohlo by dojít až k poškození stroje a tomu se chceme vyhnout. Stejně tak by při přílišném namáhání laseru, došlo k jeho degradaci výkonu a snížení životnosti.

5.2 Měření a vyhodnocení

Vzorky byly tištěny na jednom stroji v jeden den s různými parametry pro jednotlivé díly. Jedná se o parametry ovlivňující tisk povrchu, které mají zásadní vliv na kvalitu povrchu.

Byl použit jeden stroj, aby nedošlo k ovlivnění parametrů a kvality tisku.

Objemová hustota energie laseru

$$\Psi = \frac{P_L}{v_s D_s \Delta y_s} \quad [\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}] \quad (13)$$

Kde: Ψ - je objemová hustota energie P_L - výkon laseru v_s - skenovací rychlost D_s - tloušťka vrstvy Δy_s - vzdálenost šrafování ($50 \mu\text{m}$ – hodnota průměru paprsku laseru)

Tabulka 7. Hustota energie vůči rychlosti laseru

Objemová hustota energie		
Vzorek	$\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$	v_s [mm/s]
Vzorek_1	690	100
Vzorek_2	345	200
Vzorek_3	230	300
Vzorek_4	138	500
Vzorek_5	98,57	700
Vzorek_6	76,67	900

Z tabulky Objemové hustoty energie laseru v porovnání k rychlosti vidíme přímou úměru výsledné hustoty energie v závislosti na rychlost laseru. Tyto hodnoty jsou podloženy od výrobce stroje.

5.3 Naměřené hodnoty

Tabulka 8. Hodnoty Ra

počet měření	Vzorek_1	Vzorek_2	Vzorek_3	Vzorek_4	Vzorek_5	Vzorek_6
1. Ra	5,647	9,259	9,904	9,911	6,718	16,716
2. Ra	5,624	4,403	9,188	7,991	12,062	11,628
3. Ra	5,478	5,951	9,682	8,167	9,259	10,414
4. Ra	5,495	4,753	9,381	8,493	10,259	12,359
5. Ra	5,674	5,147	9,357	8,913	10,297	13,492
6. Ra	5,571	6,369	9,259	9,001	9,357	12,739
7. Ra	5,614	5,743	9,789	9,097	11,139	11,993
8. Ra	5,684	5,943	9,487	8,739	9,975	12,001
9. Ra	5,549	6,039	9,279	9,462	9,923	13,351
10. Ra	5,597	5,982	9,875	8,029	10,357	12,693

Tabulka 9. Hodnoty Rz

počet měření	Vzorek_1	Vzorek_2	Vzorek_3	Vzorek_4	Vzorek_5	Vzorek_6
1. Rz	51,421	75,937	69,281	79,649	103,27	92,784
2. Rz	51,857	75,857	95,416	82,487	86,188	82,583
3. Rz	51,776	75,776	79,564	80,943	95,618	104,561
4. Rz	51,287	75,579	78,592	81,193	97,394	100,099
5. Rz	51,658	75,487	94,427	79,991	94,683	98,978
6. Rz	51,597	75,834	91,764	80,146	94,791	99,128
7. Rz	51,541	75,593	92,197	81,001	94,991	99,739
8. Rz	51,628	75,617	90,463	79,879	96,097	98,978
9. Rz	51,729	75,799	76,937	81,367	96,079	100,803
10. Rz	51,579	75,739	86,183	80,781	95,003	101,085

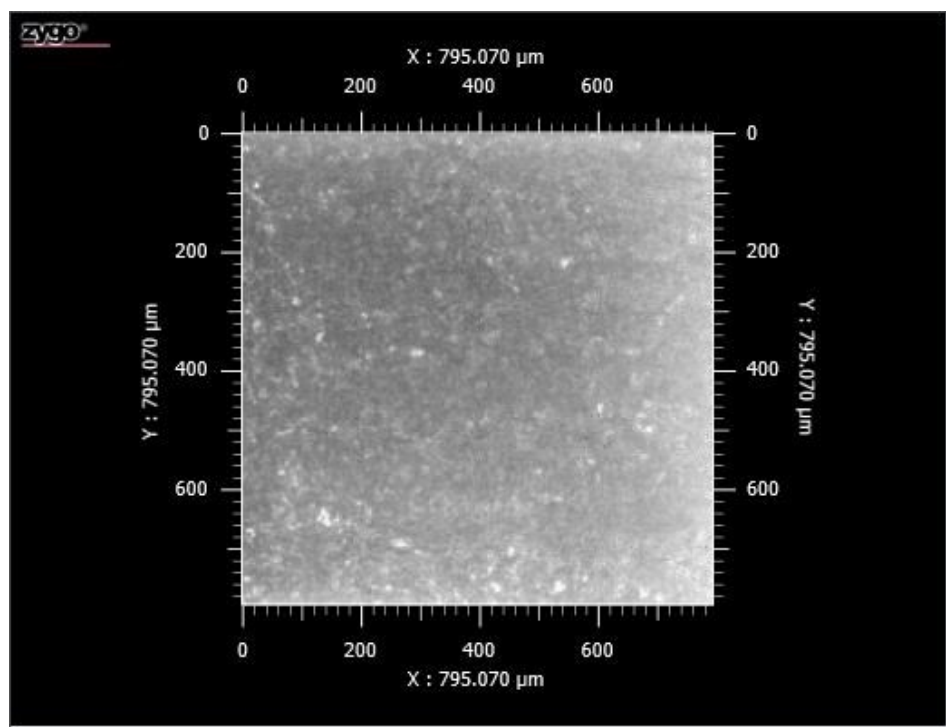
5.4 Vzorky

5.4.1 Vzorek_1

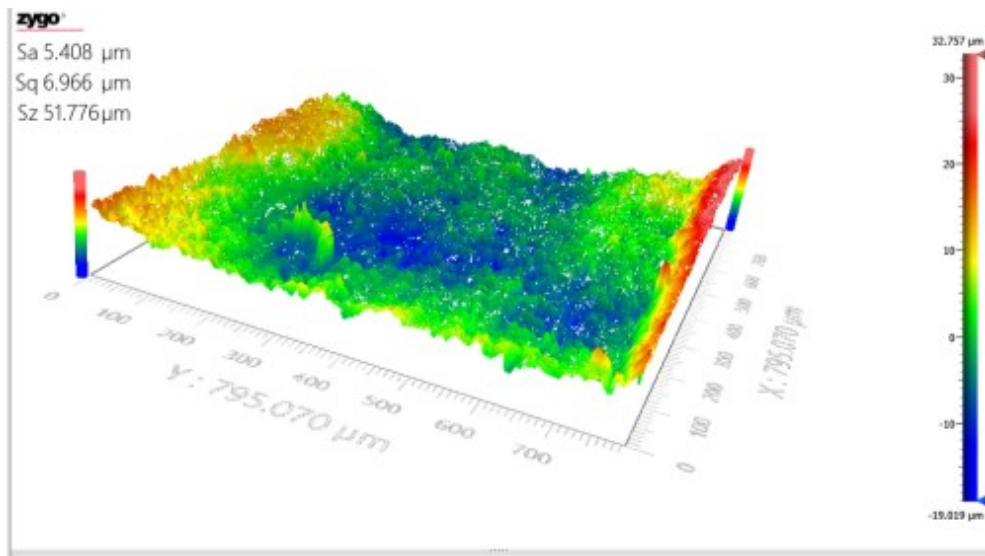
U Vzoreku_1 jsme uvažovali, že snížením rychlosti pohybu laseru dosáhneme co nejlepšího povrchu, a proto volíme experimentálně rychlost pohybu laseru 100 mm/s. Touto změnou dojde k navýšení plošné energie na hodnotu 34,5 J/mm² a prodloužení pohybu laseru o 2/3 oproti výchozímu (Vzorek_3). To je z hlediska výroby hodnota, která prodlužuje dobu tisku, ale pro nás je to ukazatel úvahy pro vyhodnocení jakožto nejlepšího výsledku v pokračování a uvažování o změnách výkonu laseru a zkoumání vlivu na tisk.

Tabulka 10. Hodnoty nastavení pro Vzorek_1

Vzorek_1 – nastavené parametry		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Výška nanášené vrstvy	0,04	mm
Výkon laseru	138	Watt
Rychlost pohybu paprsku laseru	100	mm/s
Energie přenesená laserem na plochu	34,50	J/mm ²

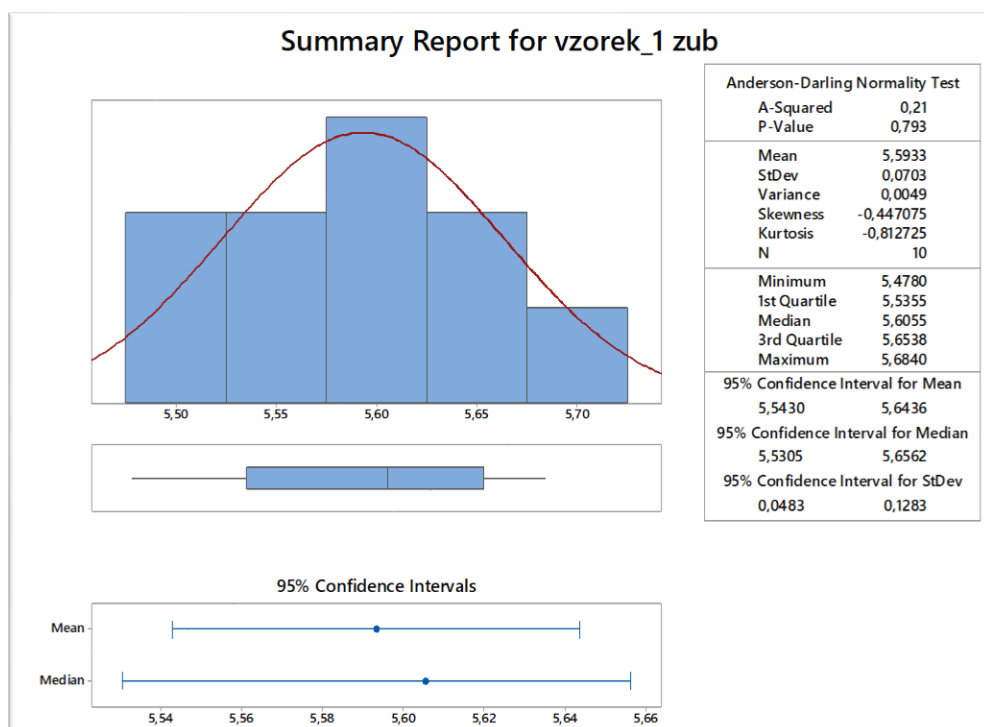


Obrázek 28. Detail snímaného povrchu Vzorek_1



Obrázek 29. 3D snímek povrchu pro Vzorek_1

Pro měření byla využita snímaná plocha $0,63 \text{ mm}^2$, na které byly zjištěny hodnoty dle nastavení pro Vzorek_1. Byla provedena exploratorní analýza dat pomocí programu Minitab na základě Anderson-Darling testu normality a Grubbsova testu. Tento postup volíme u všech vzorků. K vyhodnocení volíme parametry Ra a Rz.



Obrázek 30. Sumarizace dat pro parametry Ra Vzorek_1

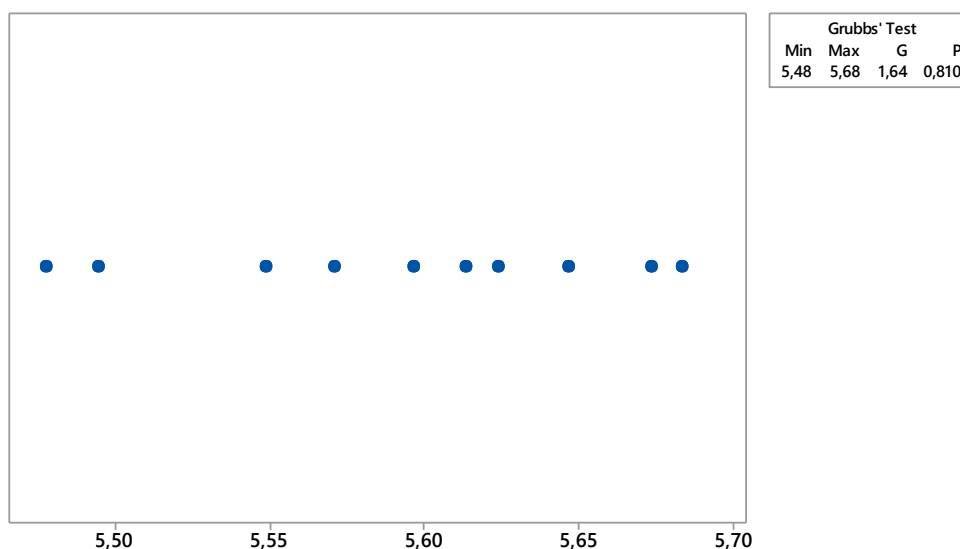
Tabulka 11. Sumarizace Ra Vzorek_1

Sumarizace dat pro parametry Ra Vzorek_1		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Střední hodnota	5,5933	μm
Směrodatná odchylka	0,0703	μm
Minimum	5,478	μm
Průměrná hodnota	5,6055	μm
Maximum	5,684	μm

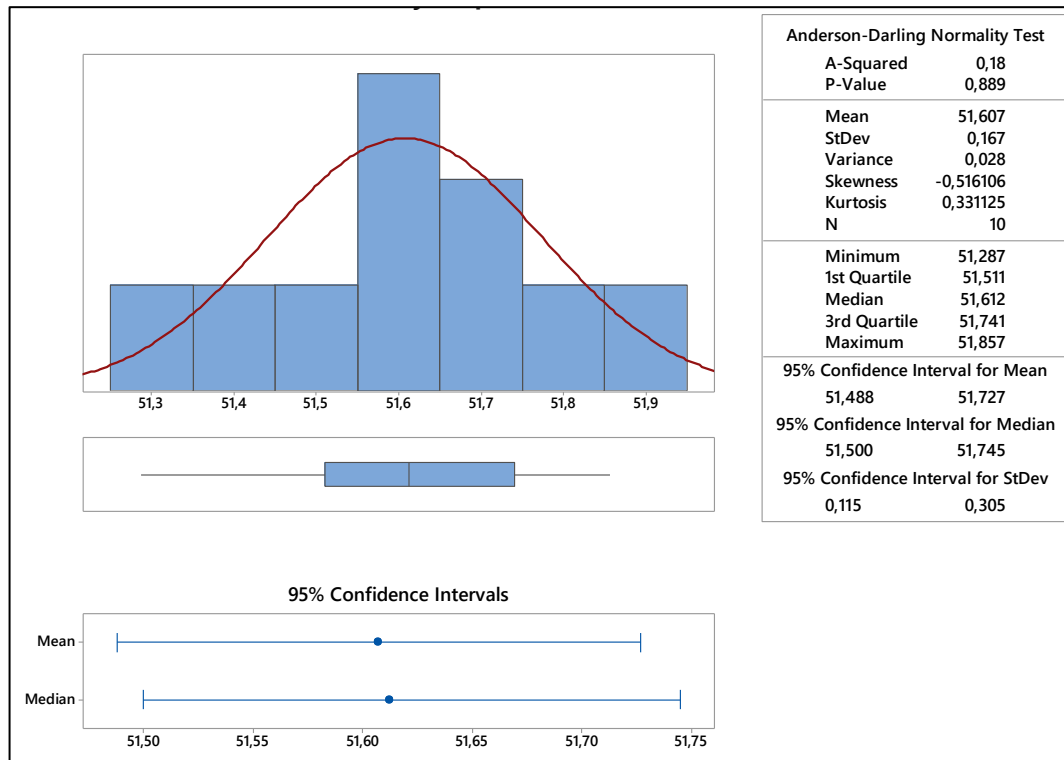
Ze sumarizace vzorků Anderson-Darlingova testu normality víme, že hodnota **P** pro Ra nám vyšla 0,793 a je větší než 0,05 (5 %), což můžeme považovat za normální rozdělení dat, a tedy nezamítáme hypotézu o normálním rozdělení dat. Vše s pravděpodobností $\alpha = 0,05$ (5 %).

Následně pomocí Grubbsova testu odlehlých hodnot se snažíme odhalit odlehlé hodnoty a zodpovědět otázku v případě $P \leq 0,05$ o jakou chybu se jedná, zda se jedná o hrubou chybu. Tento postup opakujeme u všech vzorků obdobně.

Outlier Plot of vzorek_1 zub



Obrázek 31. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_1

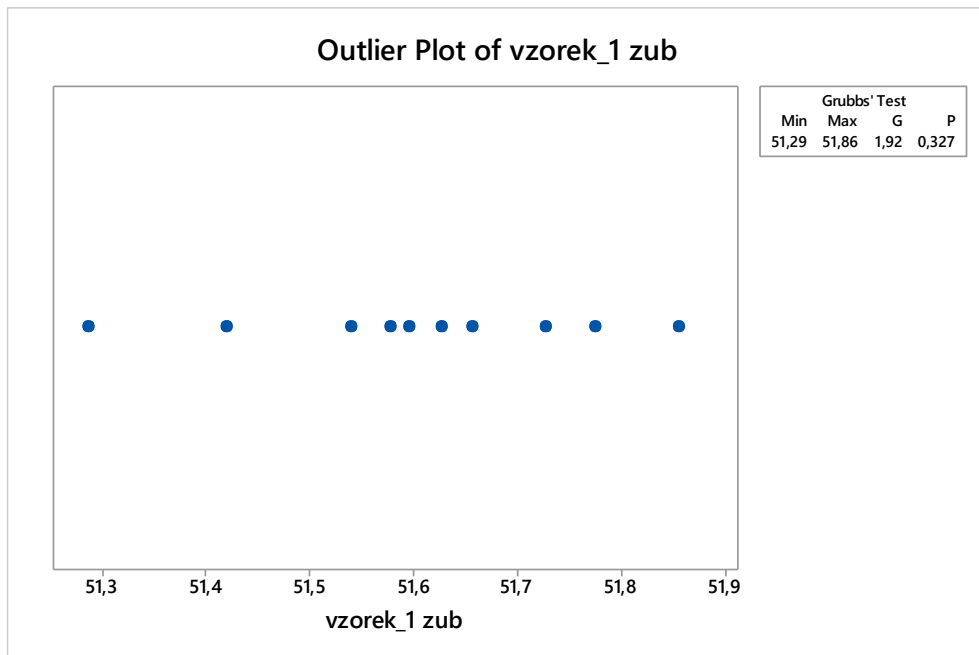


Obrázek 32. Sumarizace dat pro parametry Rz Vzorek_1

Tabulka 12. Sumarizace Rz Vzorek_1

Sumarizace dat pro parametry Rz Vzorek_1		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Střední hodnota	51,607	μm
Směrodatná odchylka	0,167	μm
Minimum	51,587	μm
Průměrná hodnota	51,612	μm
Maximum	51,857	μm

Z naměřených hodnot Rz pro Vzorek_1 pozorujeme ustálení hodnot, pro toto sestavení parametrů. Pomocí Anderson-Darlingova testu normality víme, že hodnota **P** pro Rz nám vyšla 0,889 a je větší než 0,05 (5 %), což můžeme považovat za normální rozdělení dat, tudíž nezamítáme hypotézu o normálním rozdělení dat. Vše s pravděpodobností $\alpha = 0,05$ (5 %).



Obrázek 33. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_1

Následně pomocí Grubbsova testu odlehlých hodnot se snažíme odhalit odlehlé hodnoty a zodpovědět otázky v případě $P \leq 0,05$ o jakou chybu se jedná, zda se jedná o hrubou chybu. Tento postup opakujeme u všech vzorků obdobně.

Vzorek_1 vychází jako konzistentní, a to jak kvalitou povrchu, tak i vzhledově

Pro zachování tiskové rychlosti jako u referenčního Vzorku_3 bychom museli nastavit:

Tabulka 13. Uvažované parametry

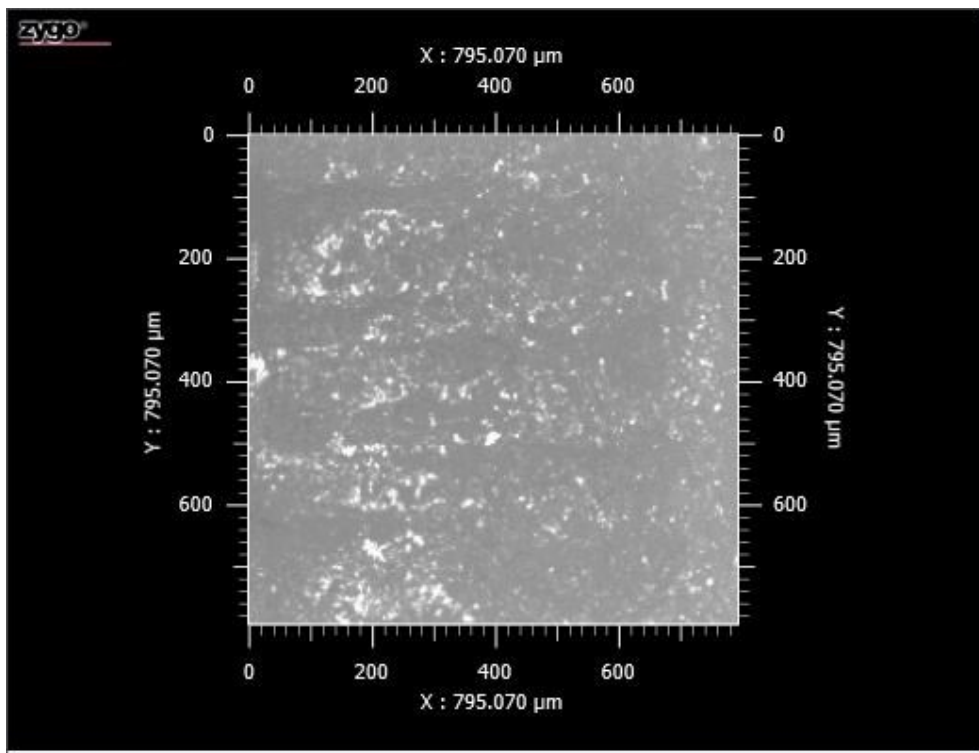
Uvažované parametry		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Výška nanášené vrstvy	0,04	mm
Výkon laseru	138 na 414	Watt
Rychlost pohybu paprsku laseru	100 na 300	mm/s
Energie přenesená laserem na plochu	34,50	J/mm ²

5.4.2 Vzorek_2

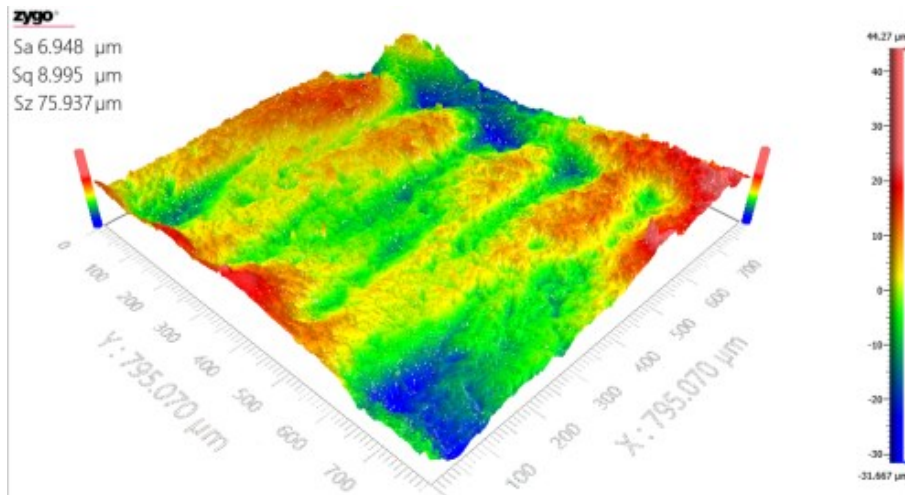
Pro Vzorek_2 jsme uvažovali, že snížením rychlosti pohybu laseru dosáhneme co nejlepšího povrchu a experimentálně volíme rychlost pohybu laseru 200 mm/s. Touto změnou dojde k navýšení energie na hodnotu 17,25 J/mm² a prodloužení pohybu laseru o 1/3 času oproti výchozímu vzorku (Vzorek_3). Což je z hlediska výroby přijatelnější hodnota než u Vzorku_1, ale pro nás slouží jako ukazatel úvahy v případě vyhodnocení jakožto nejlepšího výsledku v pokračování a uvažování o změnách výkonu laseru.

Tabulka 14. Hodnoty nastavení pro Vzorek_2

Vzorek_2 – nastavené parametry		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Výška nanášené vrstvy	0,04	mm
Výkon laseru	138	Watt
Rychlost pohybu paprsku laseru	200	mm/s
Energie přenesená laserem na plochu	17,25	J/mm ²

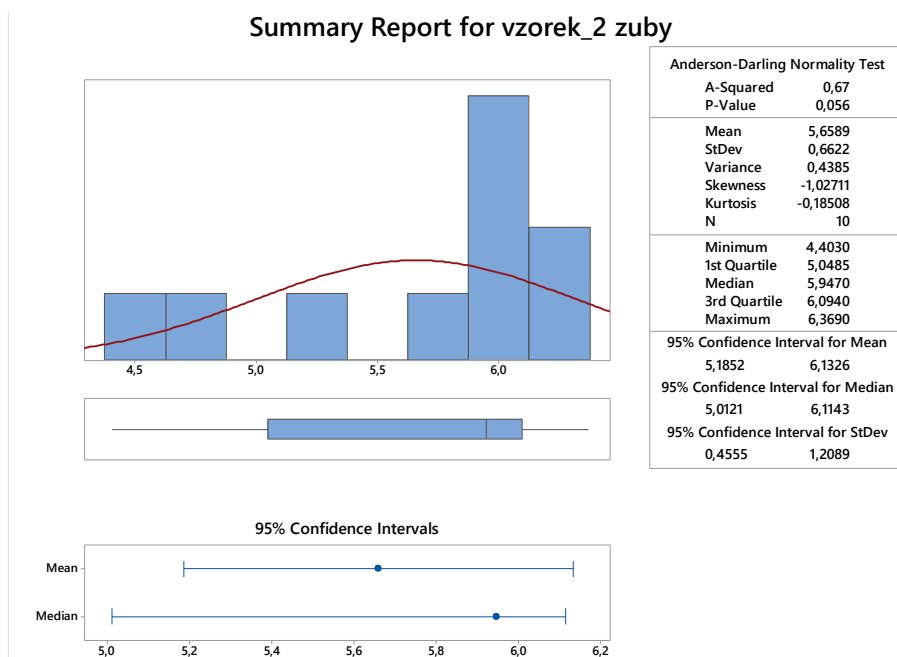


Obrázek 34. Detail snímaného povrchu Vzorek_2



Obrázek 35. 3D snímek povrchu pro Vzorek_2

Pro měření byla využita snímaná plocha 0,63 mm², na které byly zjištěny hodnoty dle nastavení pro Vzorek_2. Postupujeme jako u Vzorku_1. Musíme provést exploratorní analýzu dat pomocí programu Minitab na základě Anderson-Darling testu normality a Grubbova testu. Tento postup volíme u všech vzorků. K vyhodnocení volíme parametry Ra a Rz.

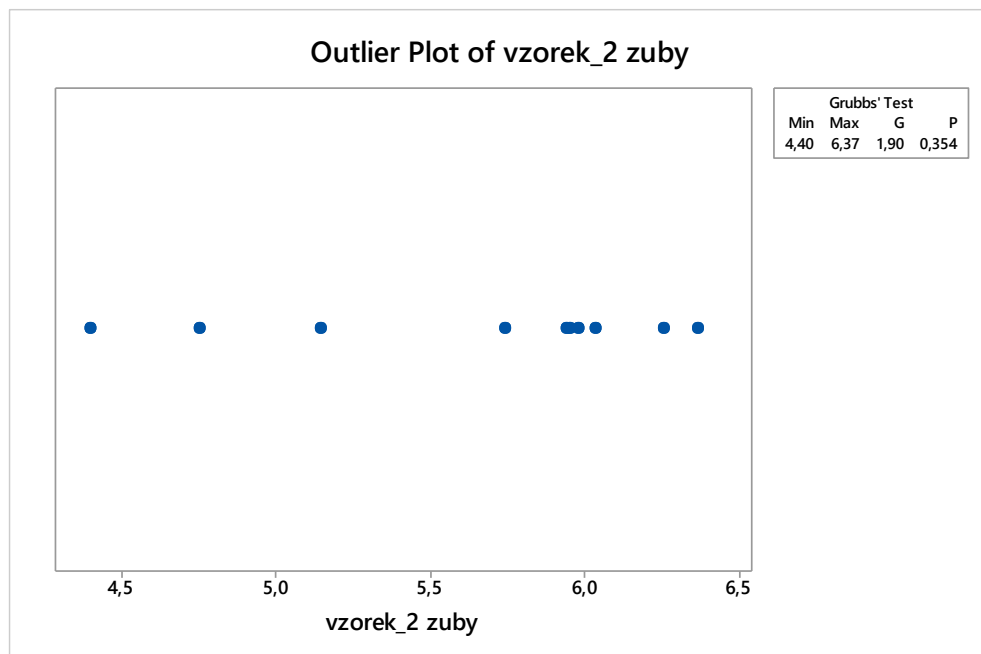


Obrázek 36. Sumarizace dat pro parametry Ra Vzorek_2

Tabulka 15. Sumarizace Ra Vzorek_2

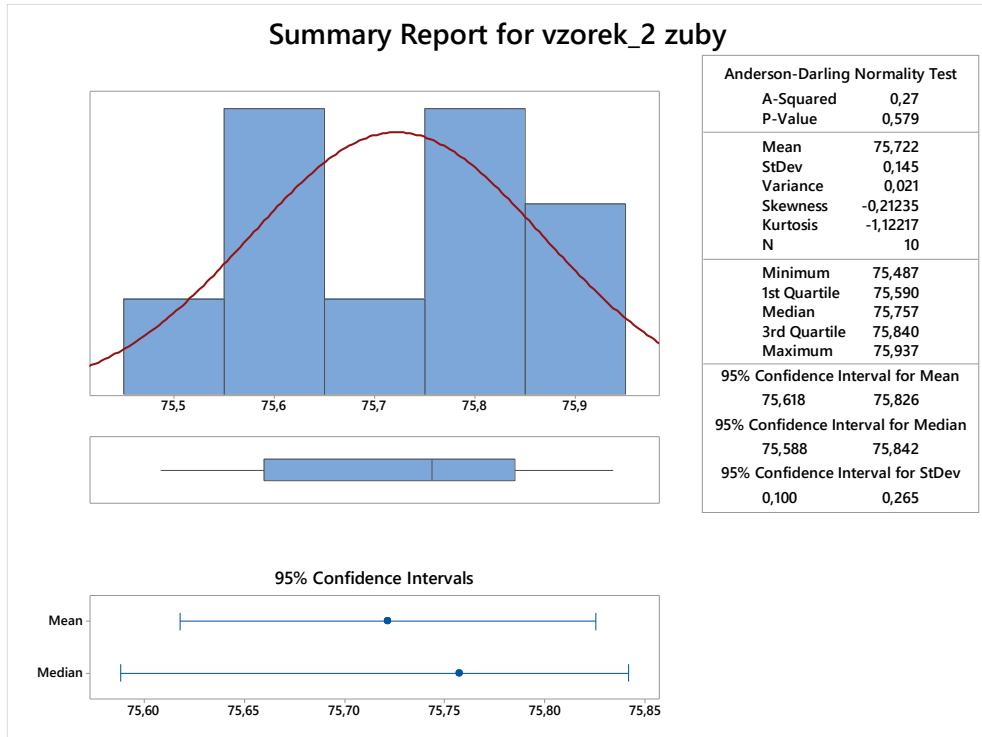
Sumarizace dat pro parametry Ra Vzorek_2		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Střední hodnota	5,6599	μm
Směrodatná odchylka	0,6622	μm
Minimum	4,403	μm
Průměrná hodnota	5,947	μm
Maximum	6,639	μm

Ze sumarizace vzorků Anderson-Darlingova testu normality víme, že hodnota **P** pro Ra nám vyšla 0,056 a je větší než 0,05 (5 %), což můžeme považovat za normální rozdělení dat a tedy nezamítáme hypotézu o normálním rozdělení dat. Vše s pravděpodobností $\alpha = 0,05$ (5 %). Tento postup volíme u všech vzorků.



Obrázek 37. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_2

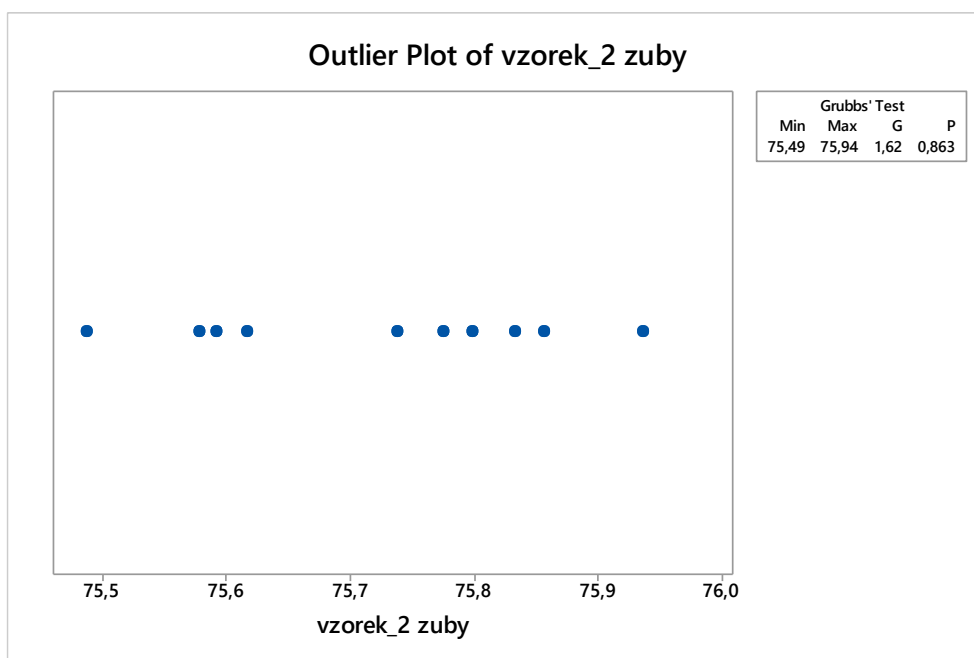
Následně pomocí Grubbsova testu odlehlých hodnot se snažíme odhalit odlehlé hodnoty a zodpovědět otázky v případě $P \leq 0,05$. Zde je vše v pořádku. Tento postup volíme u všech vzorků.



Obrázek 38. Sumarizace dat pro parametry Rz Vzorek_2

Tabulka 16. Sumarizace Rz Vzorek_2

Sumarizace dat pro parametry Rz Vzorek_2		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Střední hodnota	75,722	μm
Směrodatná odchylka	0,145	μm
Minimum	75,487	μm
Průměrná hodnota	75,757	μm
Maximum	75,937	μm



Obrázek 39. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_2

U Vzorku_2 bylo použito více energie a prodloužena doba tisku. Pozorujeme trend zlepšení kvality povrchu na úkor času tisku ve srovnání se Vzorkem_3

Zde již můžeme uvažovat o případné úpravě parametrů rychlosti při zachování energie, to znamená, že by se jednalo o navýšení výkonu laseru na 207 W z původních 138 W a hodnota rychlosti navráćena na původní hodnotu 300 mm/s, díky čemuž dosáhneme zkvalitnění tisku za stejný čas.

Tabulka 17. Uvažované parametry

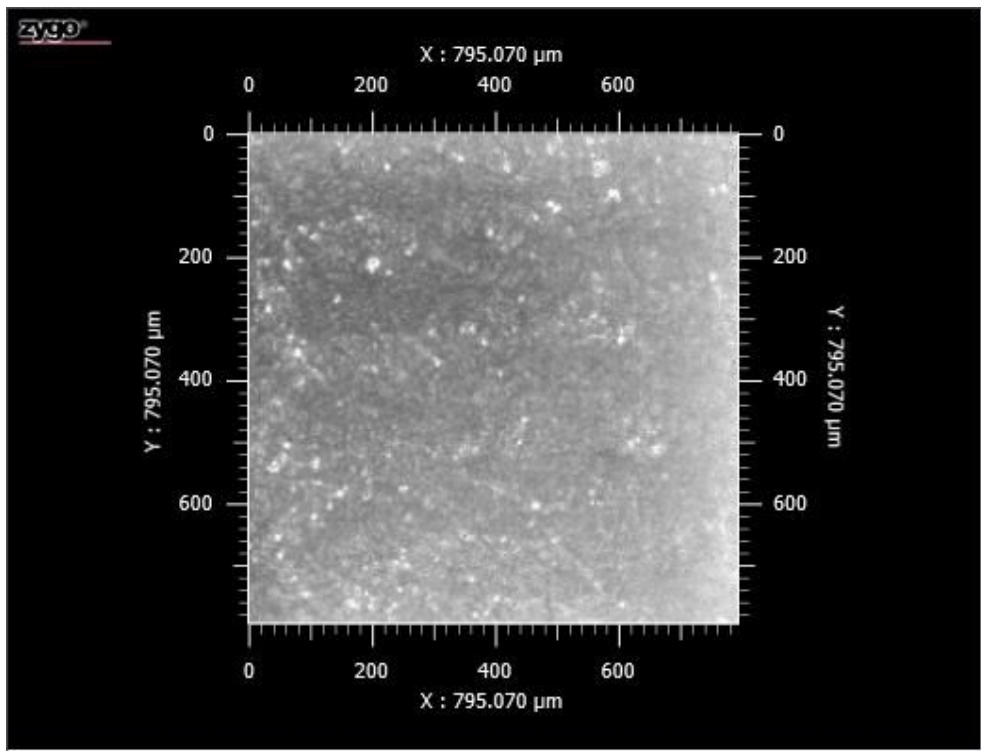
Uvažované parametry		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Výška nanášené vrstvy	0,04	mm
Výkon laseru	138 na 207	Watt
Rychlost pohybu paprsku laseru	200 na 300	mm/s
Energie přenesená laserem na plochu	17,25	J/mm ²

5.4.3 Vzorek_3

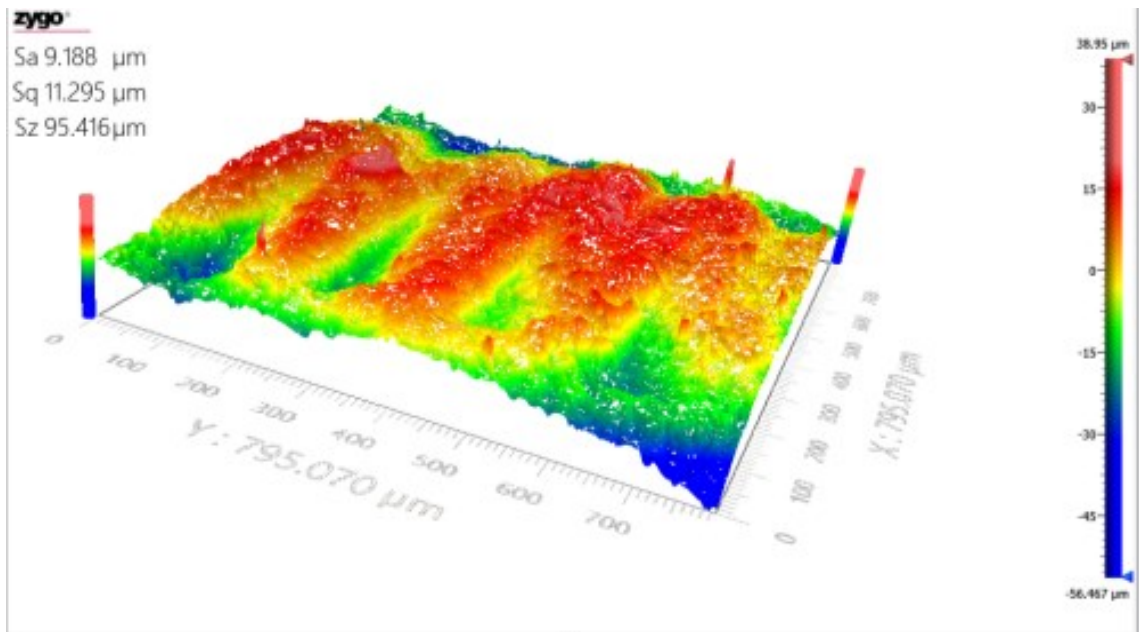
Toto nastavení pro Vzorek_3 jsme uvažovali tak, že je pro nás validační (výchozí), tudíž necháme rychlost pohybu laseru 300 mm/s. Zde je hodnota energie 11,5 J/mm² a slouží nám jako výchozí nastavení, vůči kterému porovnáváme okolní vzorky (Vzorek_1, Vzorek_2, Vzorek_4, Vzorek_5 a Vzorek_6).

Tabulka 18. Hodnoty nastavení pro Vzorek_3

Vzorek_3 – nastavené parametry		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Výška nanášené vrstvy	0,04	mm
Výkon laseru	138	Watt
Rychlost pohybu paprsku laseru	300	mm/s
Energie přenesená laserem na plochu	11,50	J/mm ²

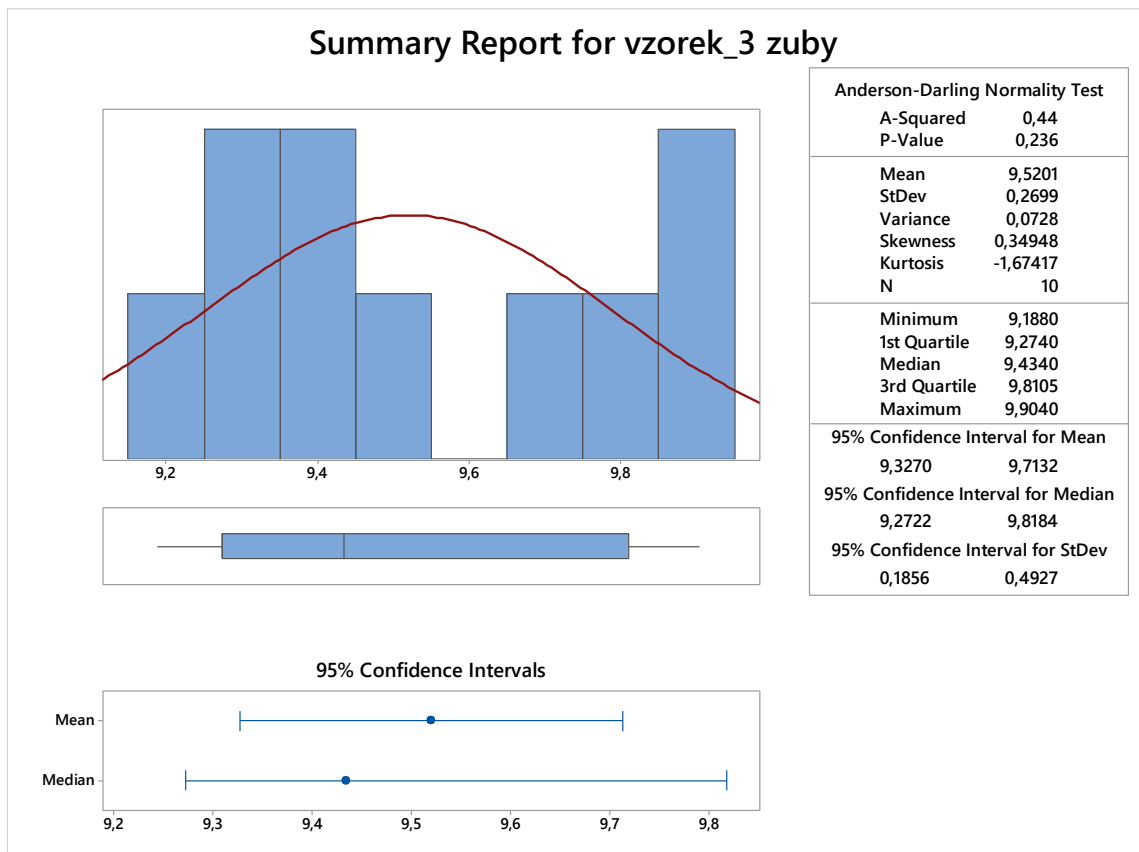


Obrázek 40. Detail snímaného povrchu Vzorek_3



Obrázek 41. 3D snímek povrchu pro Vzorek_3

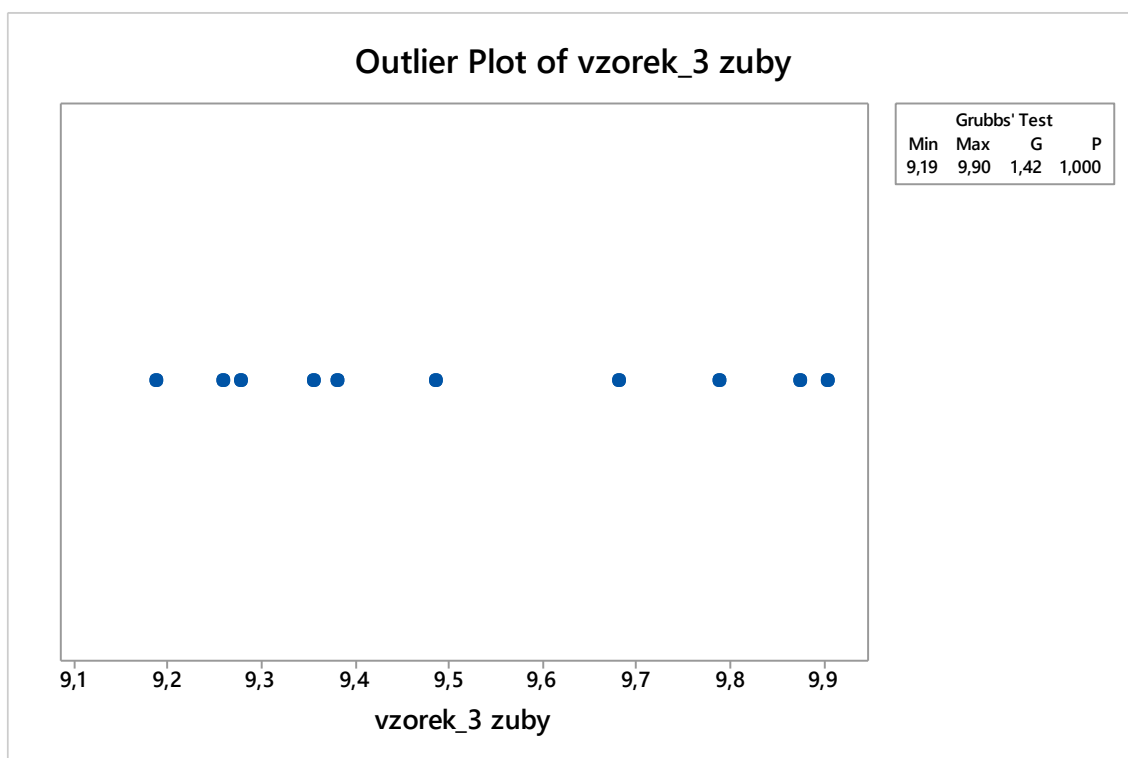
Z obrázku jsou patrné dráhy laseru, které poukazují na nedokonalý povrch, který vzniká při pohybu laseru.



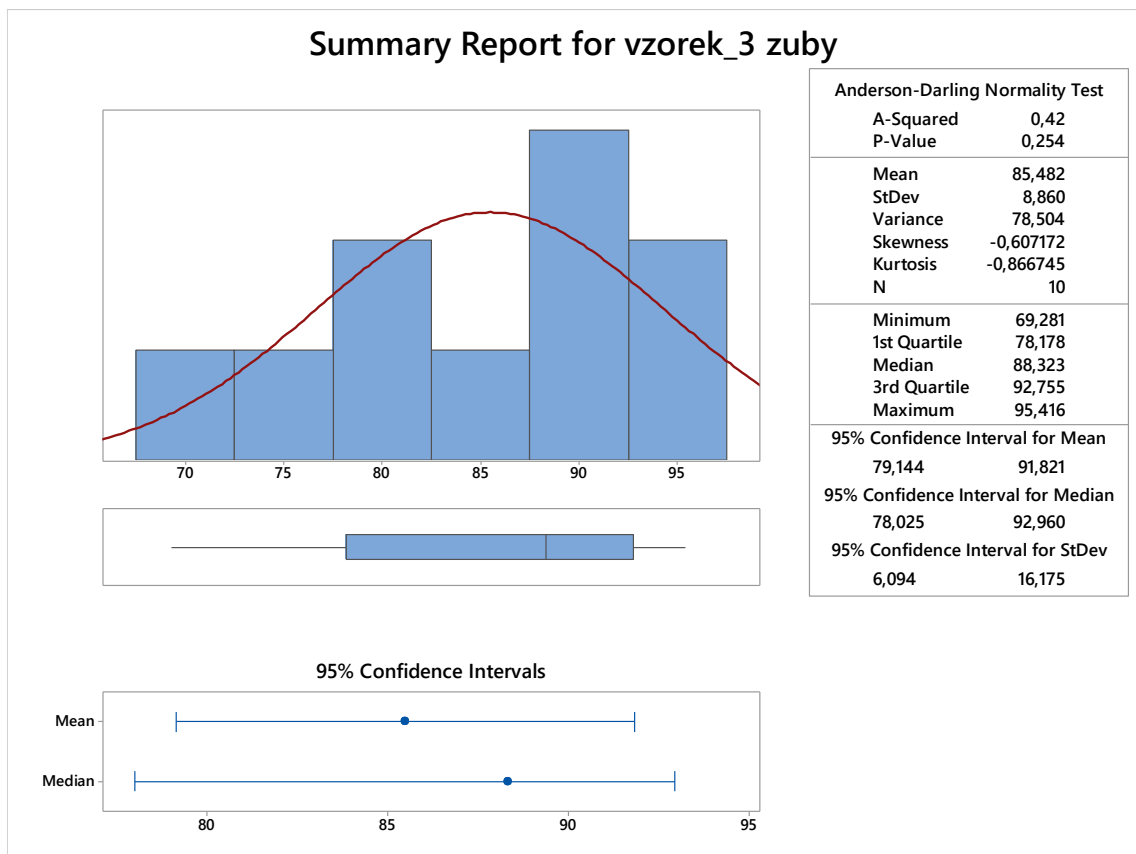
Obrázek 42. Sumarizace dat pro parametry Ra Vzorek_3

Tabulka 19. Sumarizace Ra Vzorek_3

Sumarizace dat pro parametry Ra Vzorek_3		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Střední hodnota	9,5201	μm
Směrodatná odchylka	0,2699	μm
Minimum	9,188	μm
Průměrná hodnota	9,434	μm
Maximum	9,904	μm



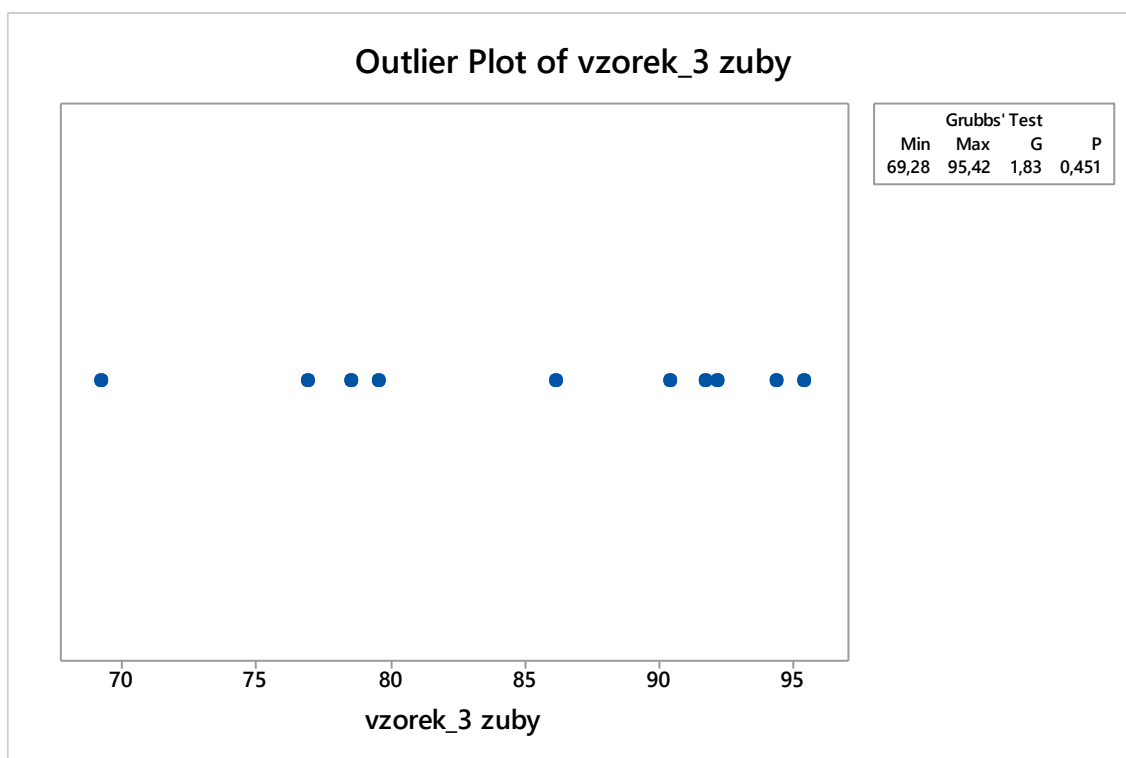
Obrázek 43. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_3



Obrázek 44. Sumarizace dat pro parametry Rz Vzorek_3

Tabulka 20. Sumarizace Rz Vzorek_3

Sumarizace dat pro parametry Rz Vzorek_3		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Střední hodnota	85,482	μm
Směrodatná odchylka	8,860	μm
Minimum	69,281	μm
Průměrná hodnota	88,323	μm
Maximum	95,416	μm



Obrázek 45. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_3

Ze Vzorku_3 je patrné, že dle naměřených hodnot a detailu povrchu se nacházíme uprostřed, a to mezi kvalitou a rychlostí (náklady) tisku.

Pro dosažení lepší kvality uvažujeme: u Vzorku_1 a Vzorku_2 dojde ke snížení rychlosti laseru, díky kterému dosáhneme většího přenosu energie. U Vzorku_1 dochází k nárůstu energie na trojnásobek a u Vzorku_2 na jeden a půl násobek.

Pro dosažení rychlejšího tisku s co nejmenší ztrátou uvažujeme: u Vzorku_4 nastavujeme snížení přenosu energie na 60 % původního výkonu, u Vzorku_5 dochází ke snížení na 43 % a u Vzorku_6 na 33 %.

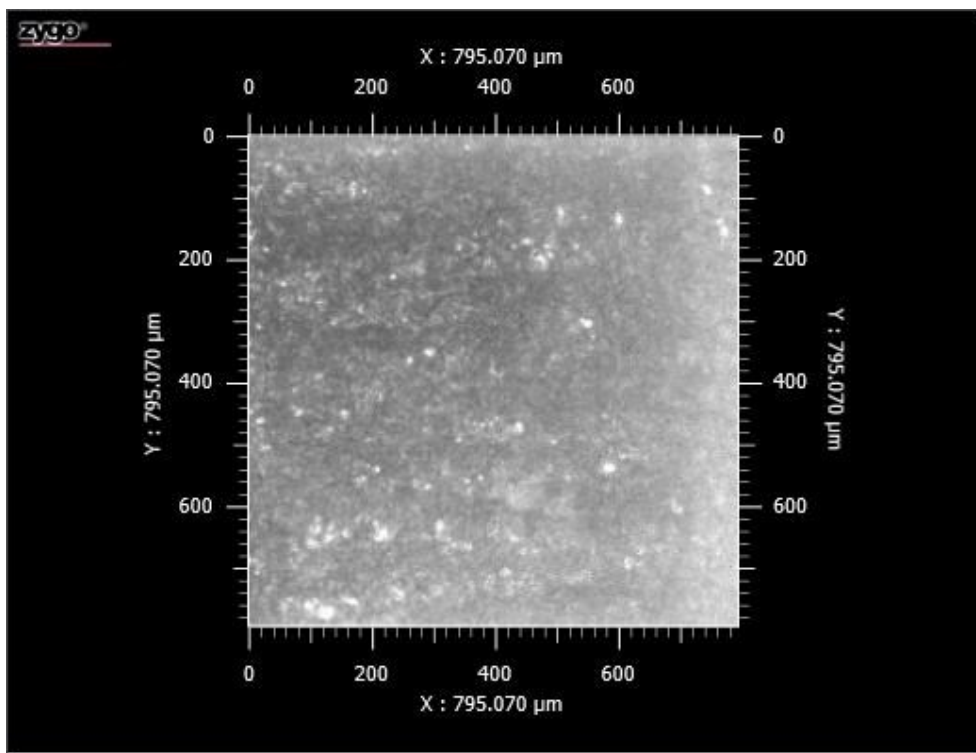
Tyto hodnoty nastavujeme záměrně ve větším rozsahu, aby došlo ke zřetelnému ovlivnění vytvoření závislosti a rychlosti trendu změn.

5.4.4 Vzorek_4

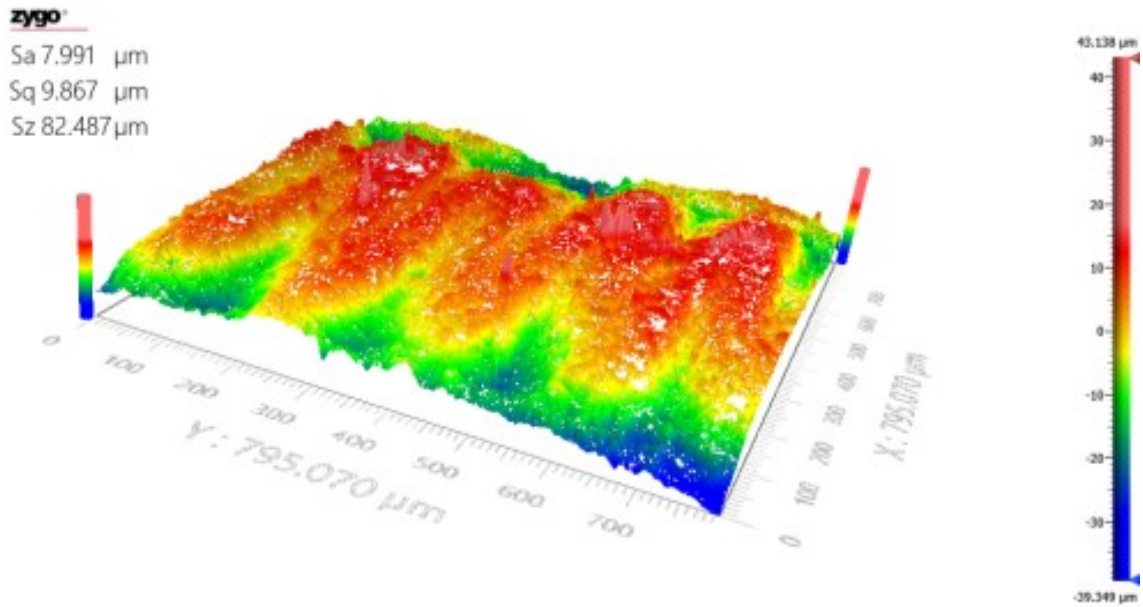
Pro Vzorek_4 jsme uvažovali, že zvýšením rychlosti pohybu laseru ztratíme částečně kvalitu povrchu, ale doba tisku se nám zkrátí, a proto experimentálně volíme rychlost pohybu laseru 500 mm/s. Touto změnou dojde ke snížení energie na hodnotu 6,9 J/mm² a zkrácení pohybu laseru o 66,7 % oproti výchozímu vzorku (Vzorek_3). Což je z hlediska výroby příznivá hodnota, ale pro nás slouží jako ukazatel úvahy v případě vyhodnocení jakožto nejlepšího výsledku v pokračování a dokončení potřebných testů pro zavedení.

Tabulka 21. Hodnoty nastavení pro Vzorek_4

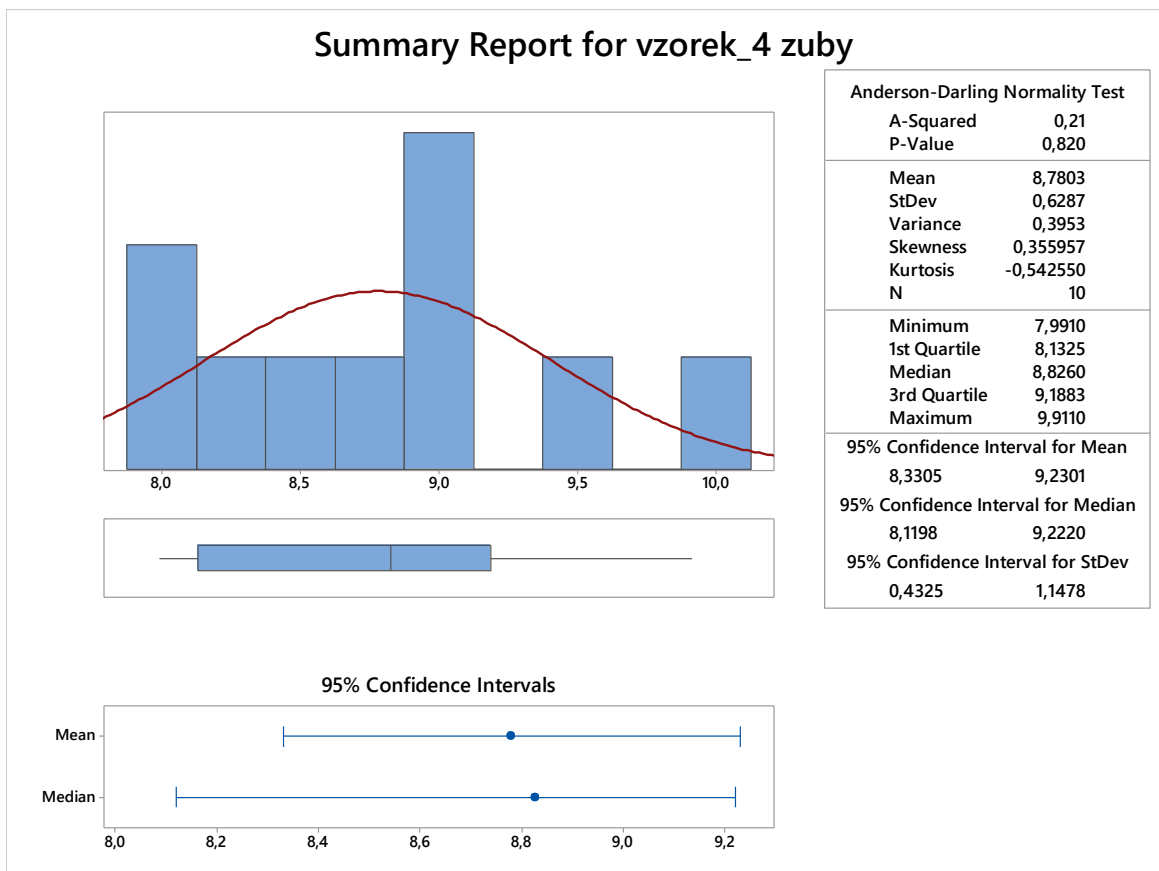
Vzorek_4 – nastavené parametry		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Výška nanášené vrstvy	0,04	mm
Výkon laseru	138	Watt
Rychlost pohybu paprsku laseru	500	mm/s
Energie přenesená laserem na plochu	6,90	J/mm ²



Obrázek 46. Detail snímaného povrchu Vzorek_4



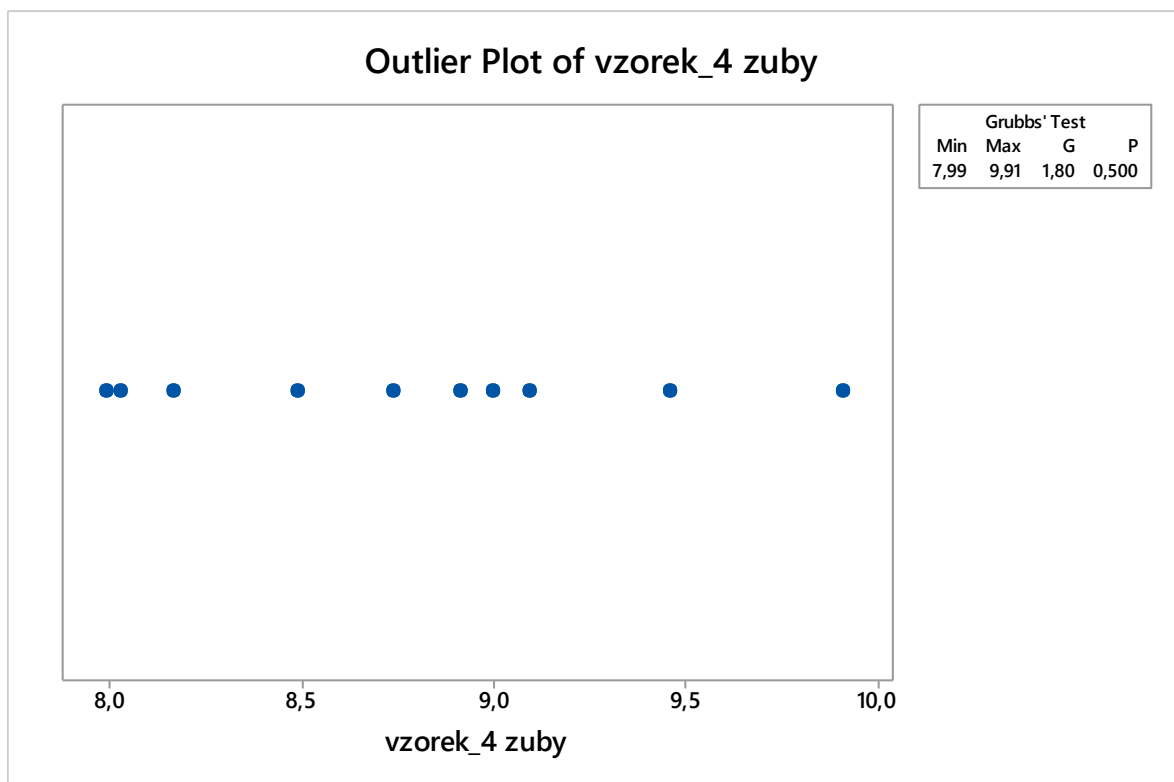
Obrázek 47. 3D snímek povrchu pro Vzorek_4



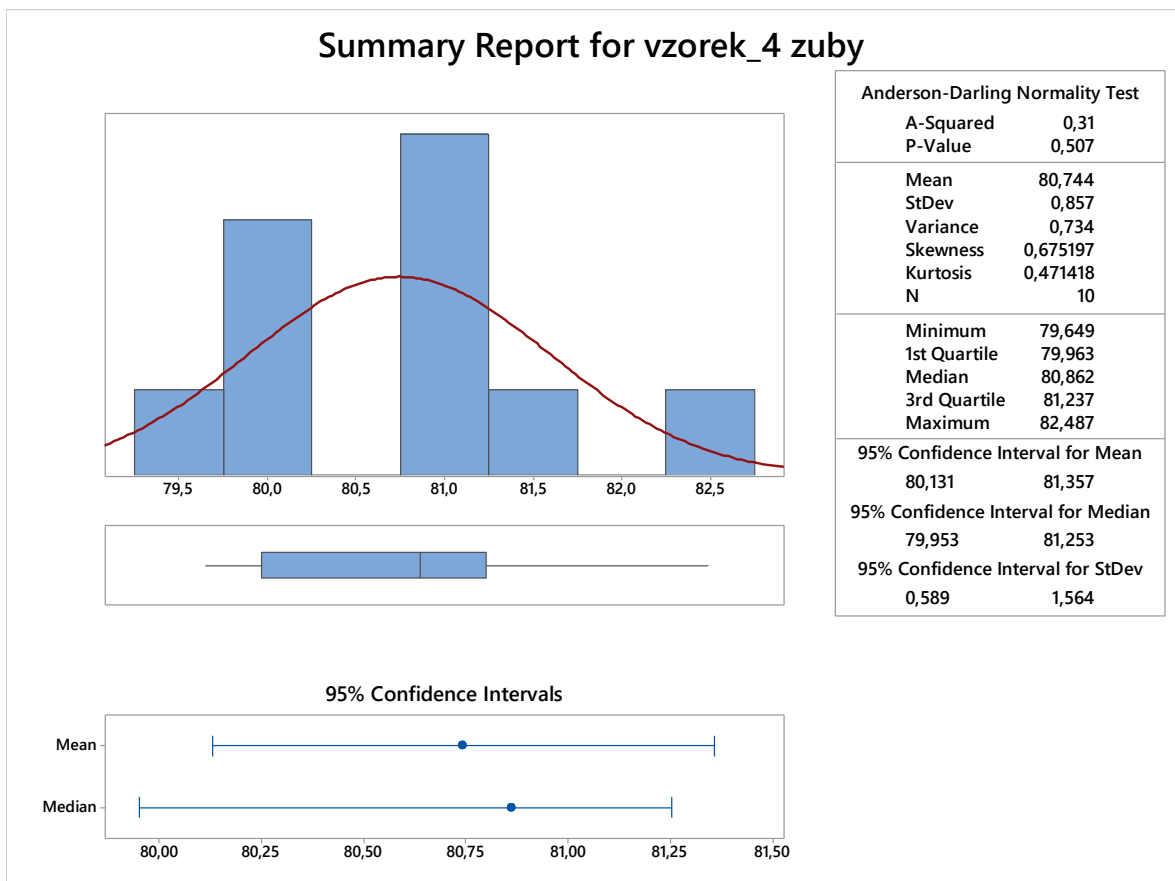
Obrázek 48. Sumarizace dat pro parametry Ra Vzorek_4

Tabulka 22. Sumarizace Ra Vzorek_4

Sumarizace dat pro parametry Ra Vzorek_4		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Střední hodnota	8,7803	μm
Směrodatná odchylka	0,6287	μm
Minimum	7,991	μm
Průměrná hodnota	8,826	μm
Maximum	9,911	μm



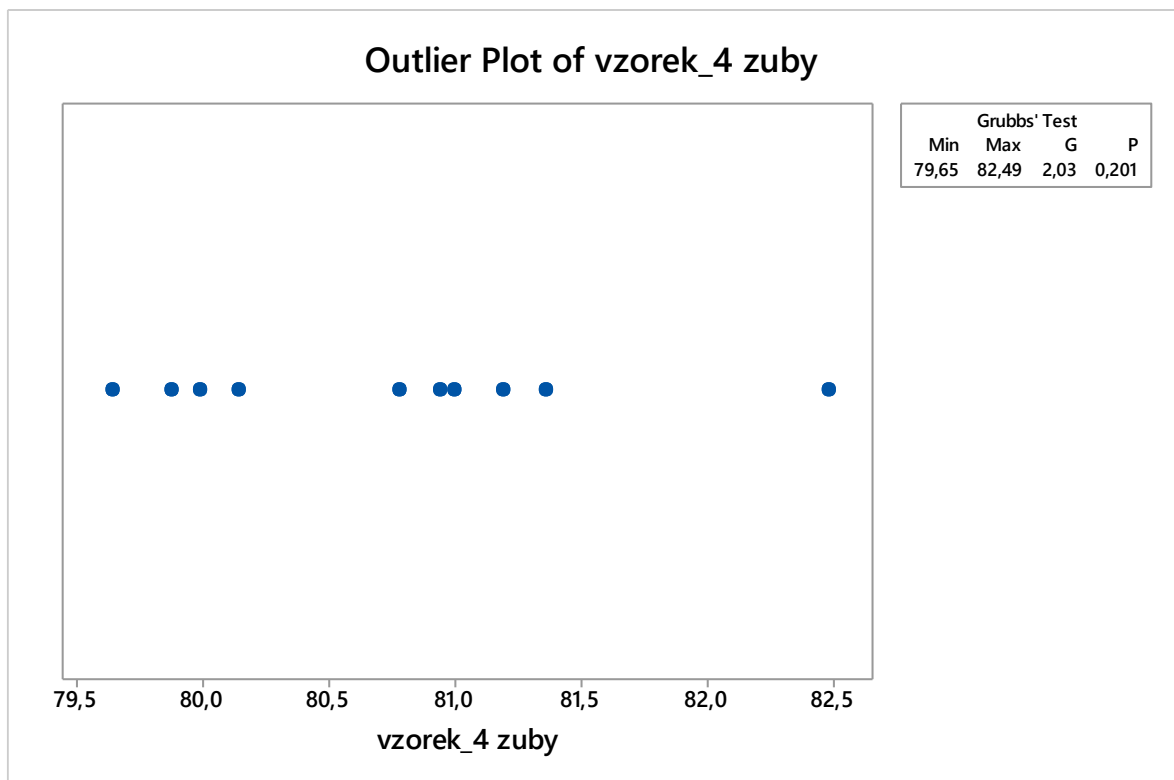
Obrázek 49. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_4



Obrázek 50. Sumarizace dat pro parametry Rz Vzorek_4

Tabulka 23. Sumarizace Rz Vzorek_4

Sumarizace dat pro parametry Rz Vzorek_4		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Střední hodnota	80,744	μm
Směrodatná odchylka	0,857	μm
Minimum	79,649	μm
Průměrná hodnota	80,862	μm
Maximum	82,487	μm



Obrázek 51. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_4

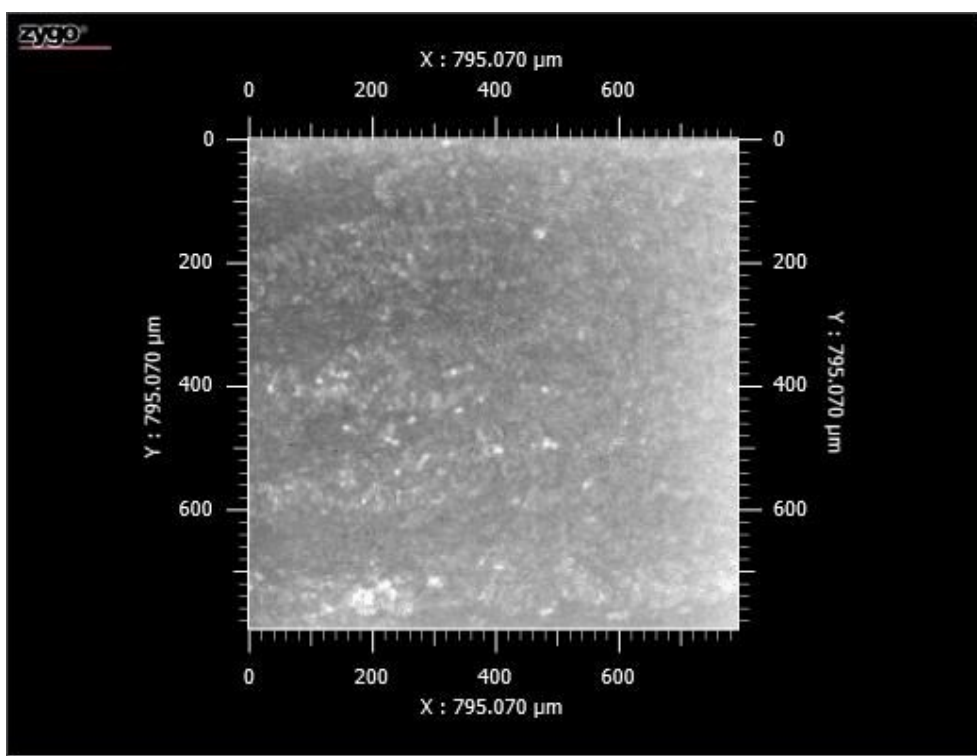
Vzorek_4 jako jediný vzorek se sníženou hodnotou laseru a zvýšenou hodnotou rychlosti dosáhl lepšího výsledku povrchu za snížení času tisku. Prošel testy bez obsahu odlehlých hodnot. Rychlost tisku byla zvýšena o 66 % oproti Vzorku_3.

5.4.5 Vzorek_5

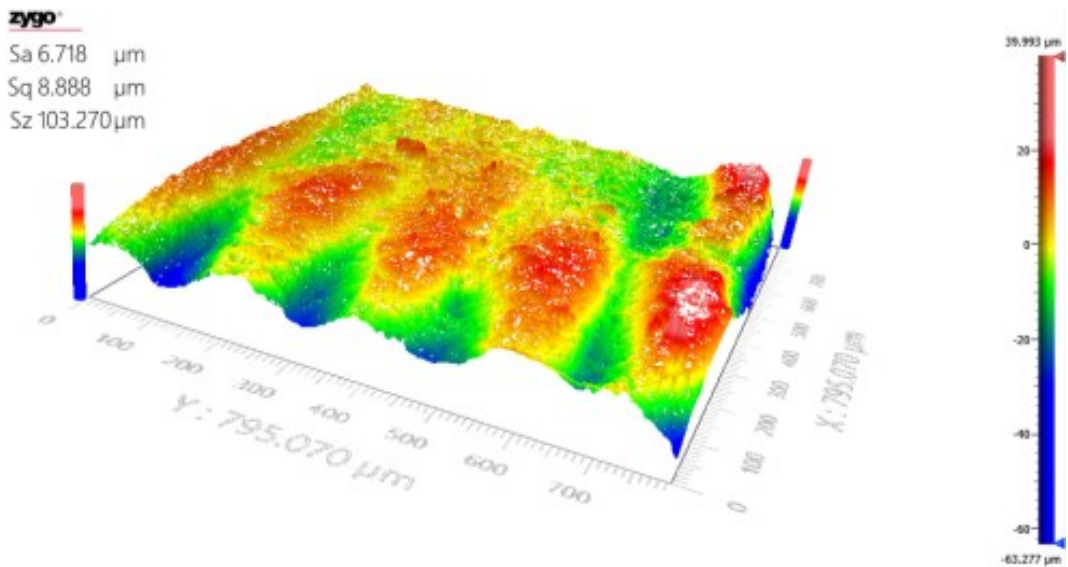
Pro Vzorek_5 jsme uvažovali, že zvýšením rychlosti pohybu laseru dosáhneme zhoršení povrchu na uspokojivou míru, zároveň kratší dobu tisku a experimentálně volíme rychlost pohybu laseru 700 mm/s. Touto změnou dojde ke snížení energie na hodnotu 4,93 J/mm² a zkrácení pohybu laseru o 133,4 % oproti výchozímu vzorku (Vzorek_3). To je z hlediska výroby zajímavá hodnota, ale pro nás slouží jako ukazatel úvahy v případě vyhodnocení a možnosti v pokračování a dokončení potřebných testů pro zavedení.

Tabulka 24. Hodnoty nastavení pro Vzorek_5

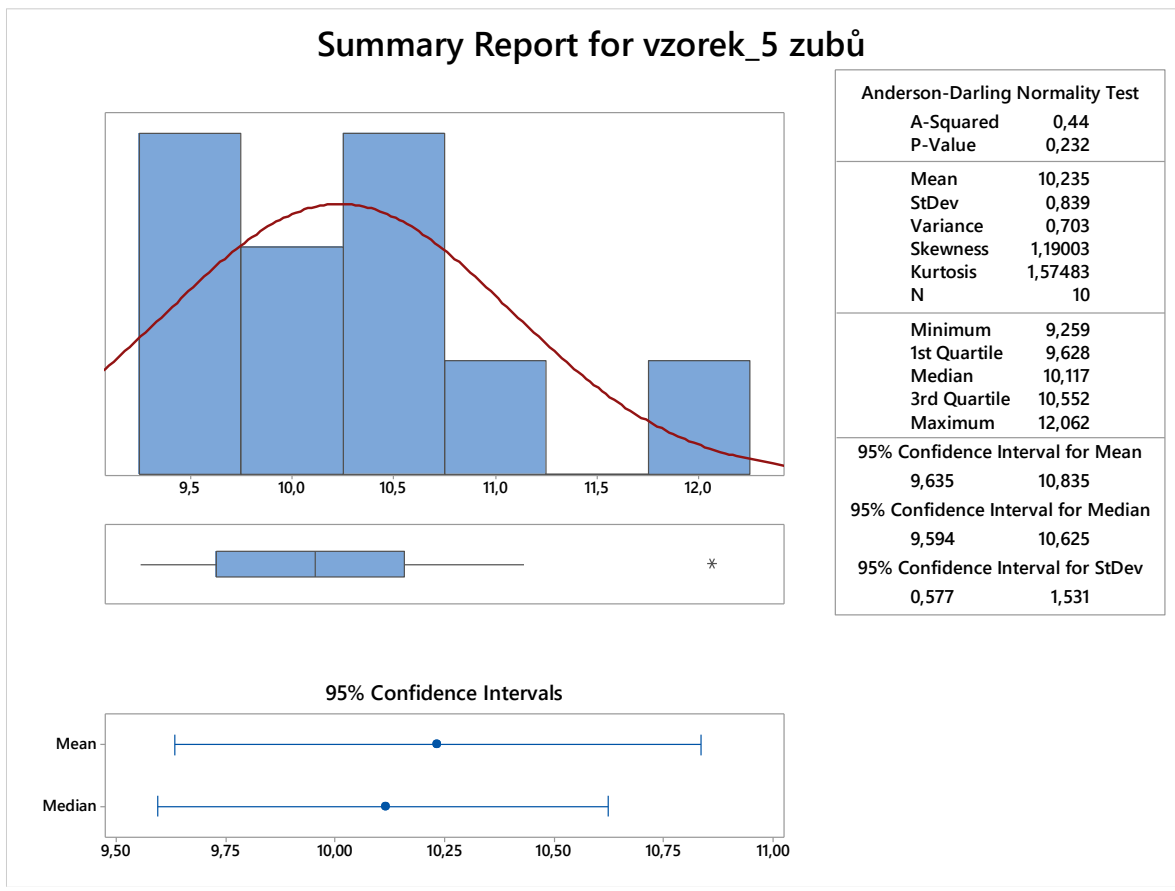
Vzorek_5 – nastavené parametry		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Výška nanášené vrstvy	0,04	mm
Výkon laseru	138	Watt
Rychlost pohybu paprsku laseru	700	mm/s
Energie přenesená laserem na plochu	4,93	J/mm ²



Obrázek 52. Detail snímaného povrchu Vzorek_5



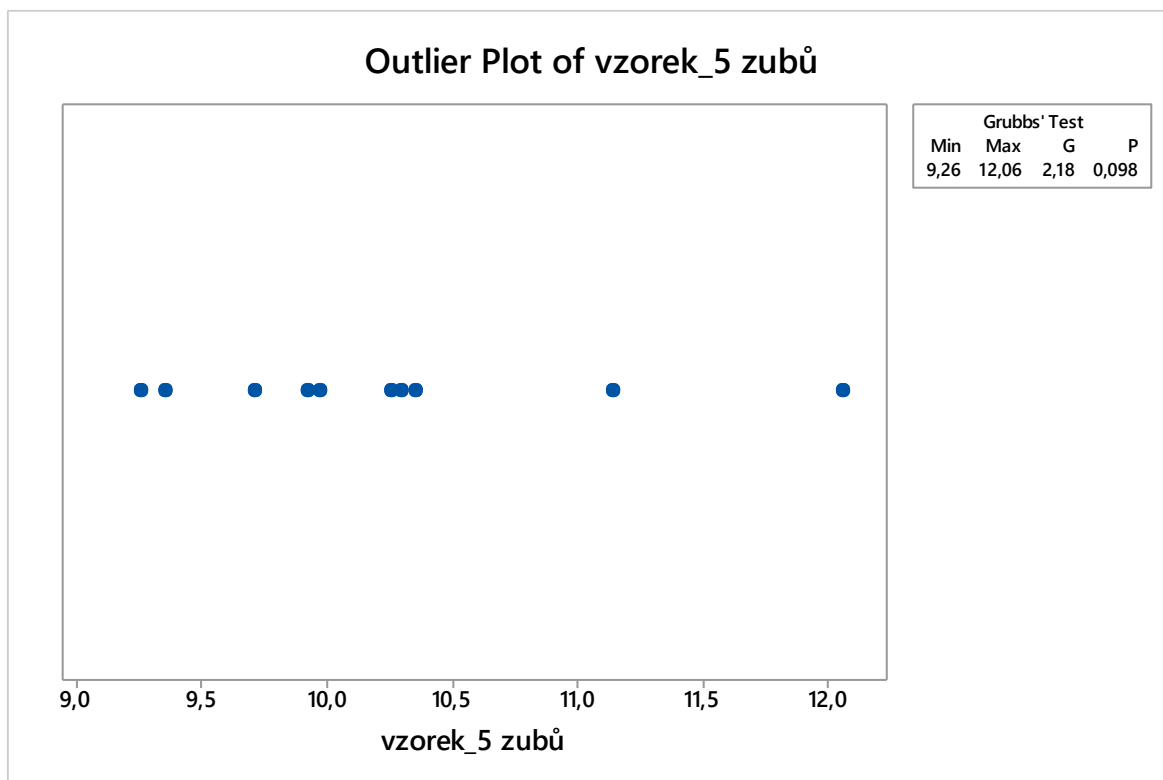
Obrázek 53. 3D snímek povrchu pro Vzorek_5



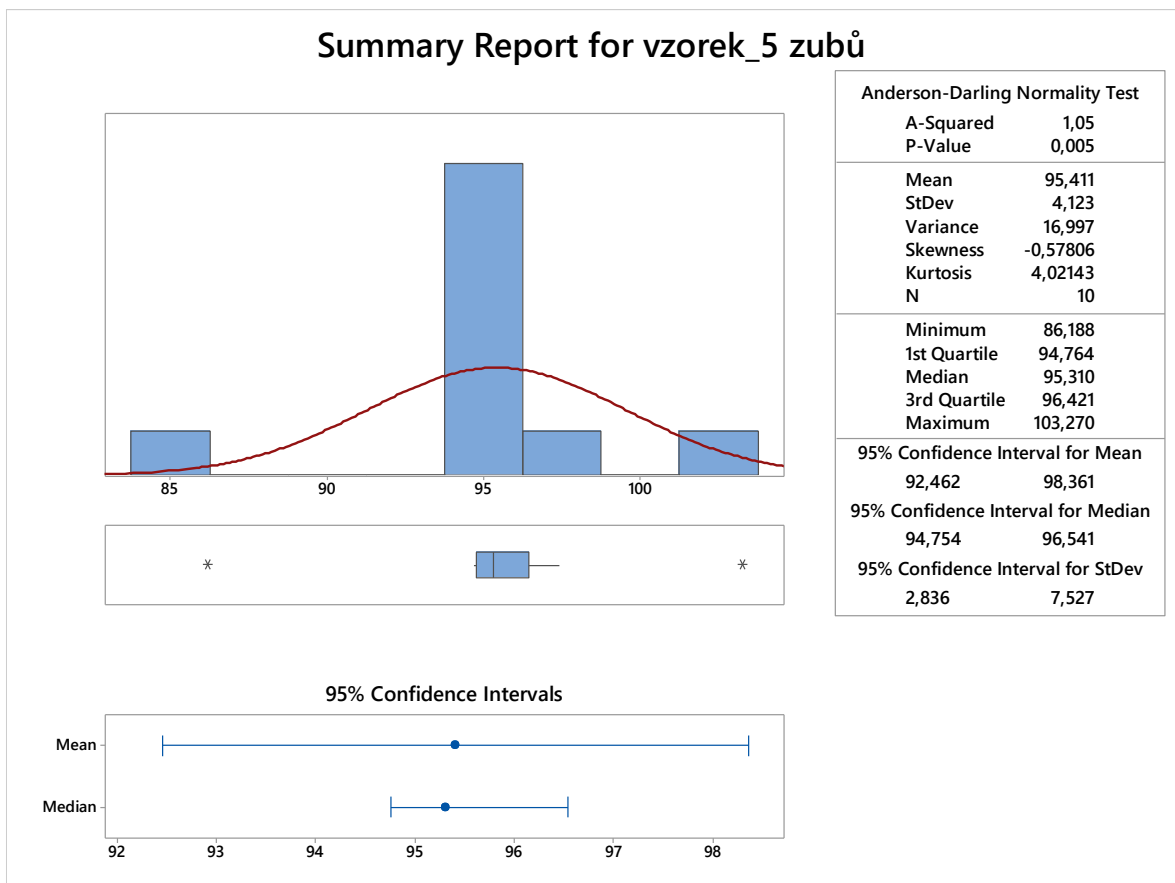
Obrázek 54. Sumarizace dat pro parametry Ra Vzorek_5

Tabulka 25. Sumarizace Ra Vzorek_5

Sumarizace dat pro parametry Ra Vzorek_5		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Střední hodnota	10,235	μm
Směrodatná odchylka	0,839	μm
Minimum	9,259	μm
Průměrná hodnota	10,117	μm
Maximum	12,062	μm



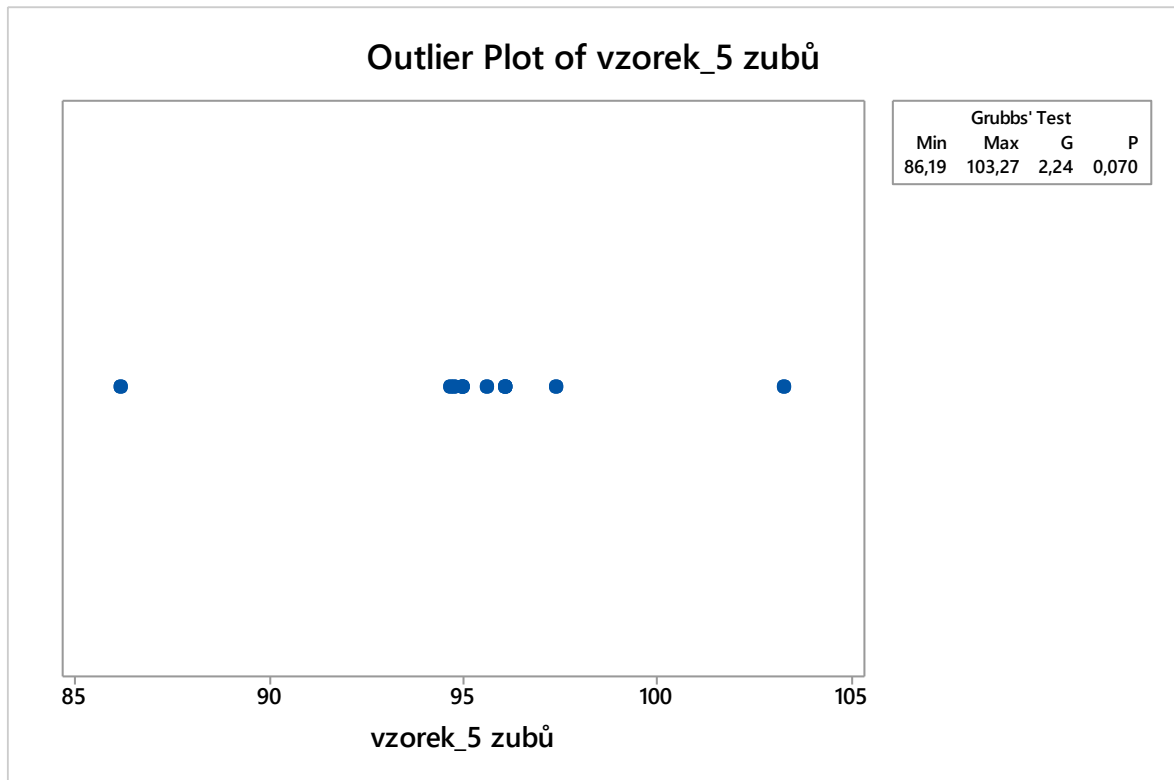
Obrázek 55. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_5



Obrázek 56. Sumarizace dat pro parametry Rz Vzorek_5

Tabulka 26. Sumarizace Rz Vzorek_5

Sumarizace dat pro parametry Rz Vzorek_5		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Střední hodnota	95,411	μm
Směrodatná odchylka	4,123	μm
Minimum	86,188	μm
Průměrná hodnota	95,310	μm
Maximum	103,270	μm



Obrázek 57. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_5

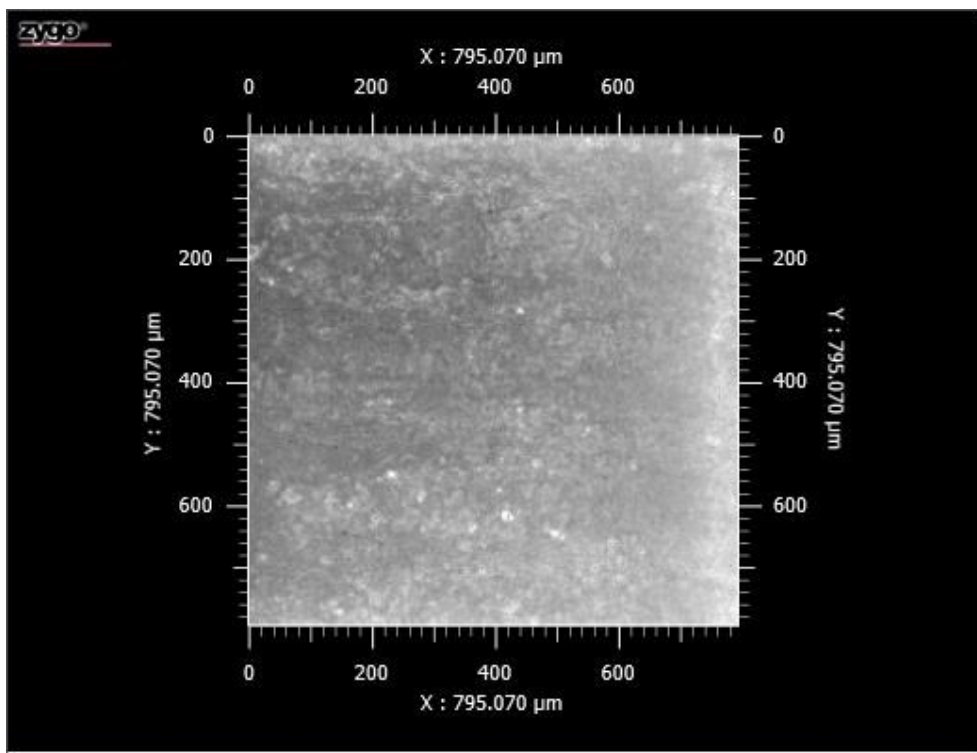
Vzorek_5, ztratil 57 % energie. Zde došlo ke zhoršení struktury povrchu za cenu zrychlení tisku. Tento vzorek jako jediný obsahuje odlehlé hodnoty. Tuto skutečnost lze přisoudit 43 % energie laseru a lze z něj vyvodit důsledek jen částečného spojení vnitřní vrstvy s horní vrstvou. Toto lze ověřit řadou testů.

5.4.6 Vzorek_6

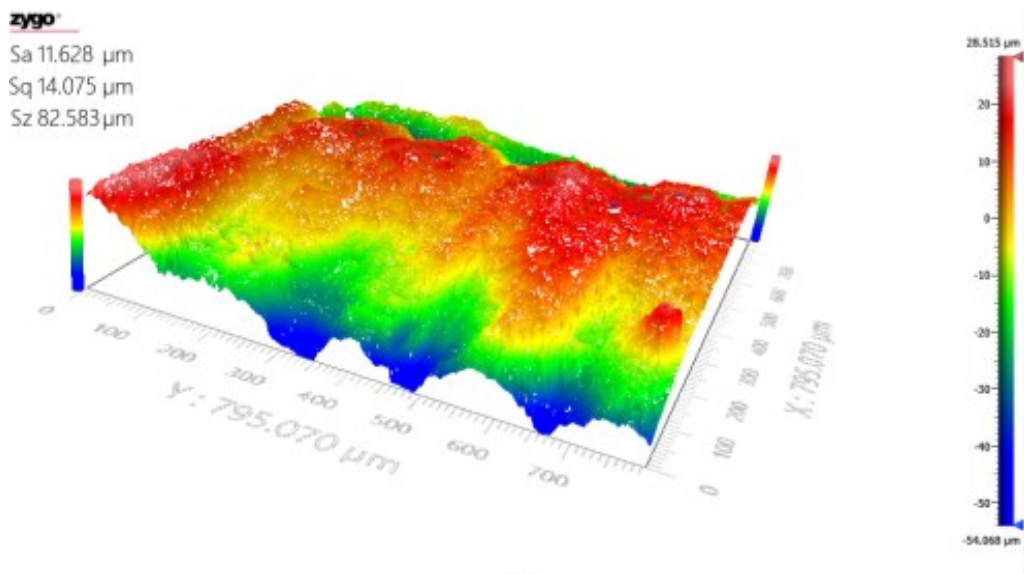
Pro Vzorek_6 jsme uvažovali, že zvýšením rychlosti pohybu laseru dosáhneme přijatelného povrchu, za snížený čas, tudíž volíme experimentálně rychlost pohybu laseru 900 mm/s. Touto změnou dojde ke snížení energie na hodnotu 3,83 J/mm² a zkrácení pohybu laseru o 200 % oproti výchozímu vzorku (Vzorek_3). Z hlediska výroby se jedná o pozitivní hodnotu, ale pro nás slouží jako ukazatel trendu.

Tabulka 27. Hodnoty nastavení pro Vzorek_6

Vzorek_6 – nastavené parametry		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Výška nanášené vrstvy	0,04	mm
Výkon laseru	138	Watt
Rychlost pohybu paprsku laseru	900	mm/s
Energie přenesená laserem na plochu	3,83	J/mm ²

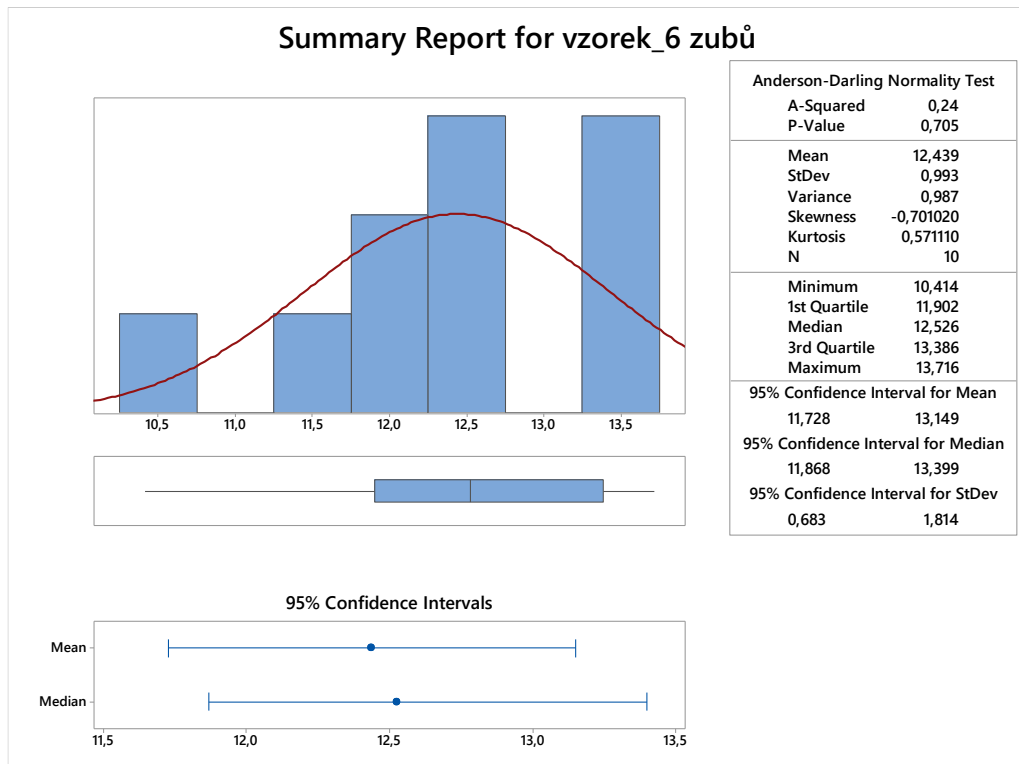


Obrázek 58. Detail snímaného povrchu Vzorek_6



Obrázek 59. 3D snímek povrchu pro Vzorek_6

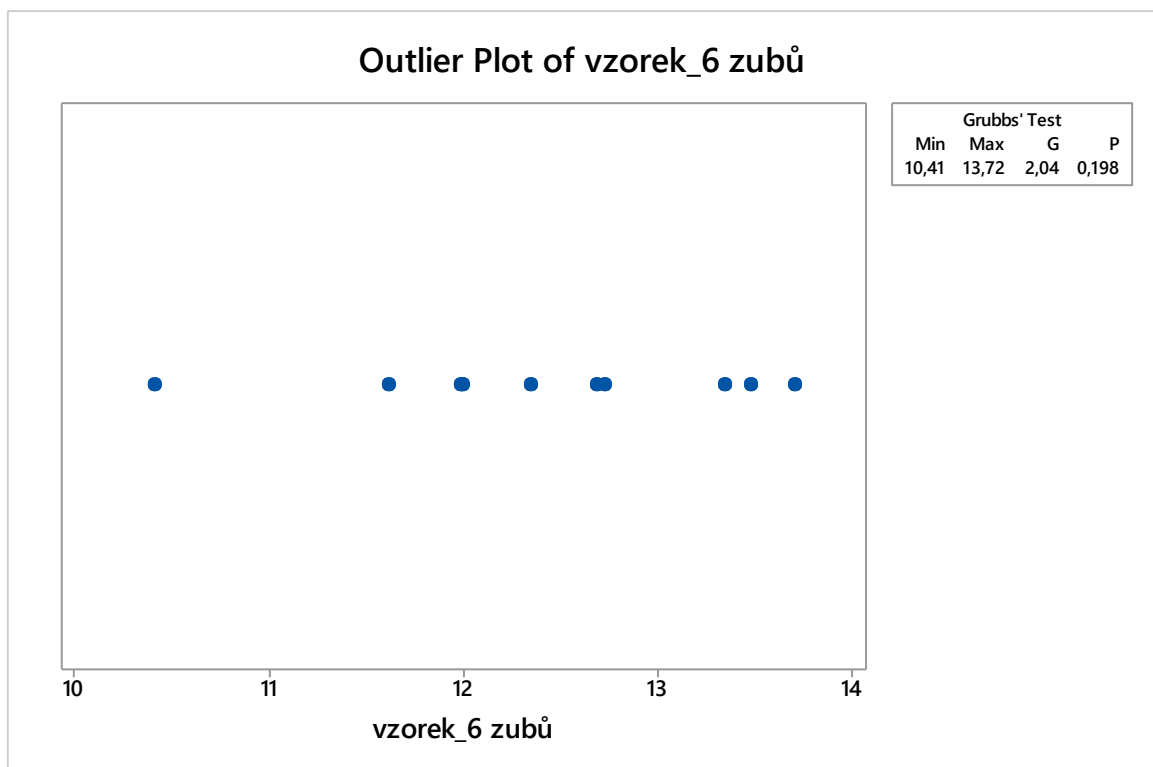
Povrch Vzorku_6 se zdá být v pořádku, více by prozradil rozměrový test, který dokáže odhalit, zda došlo ke spojení vrchní vrstvy s výplní. U hodnot energie pro Vzorek_6 se lze již obávat této skutečnosti.



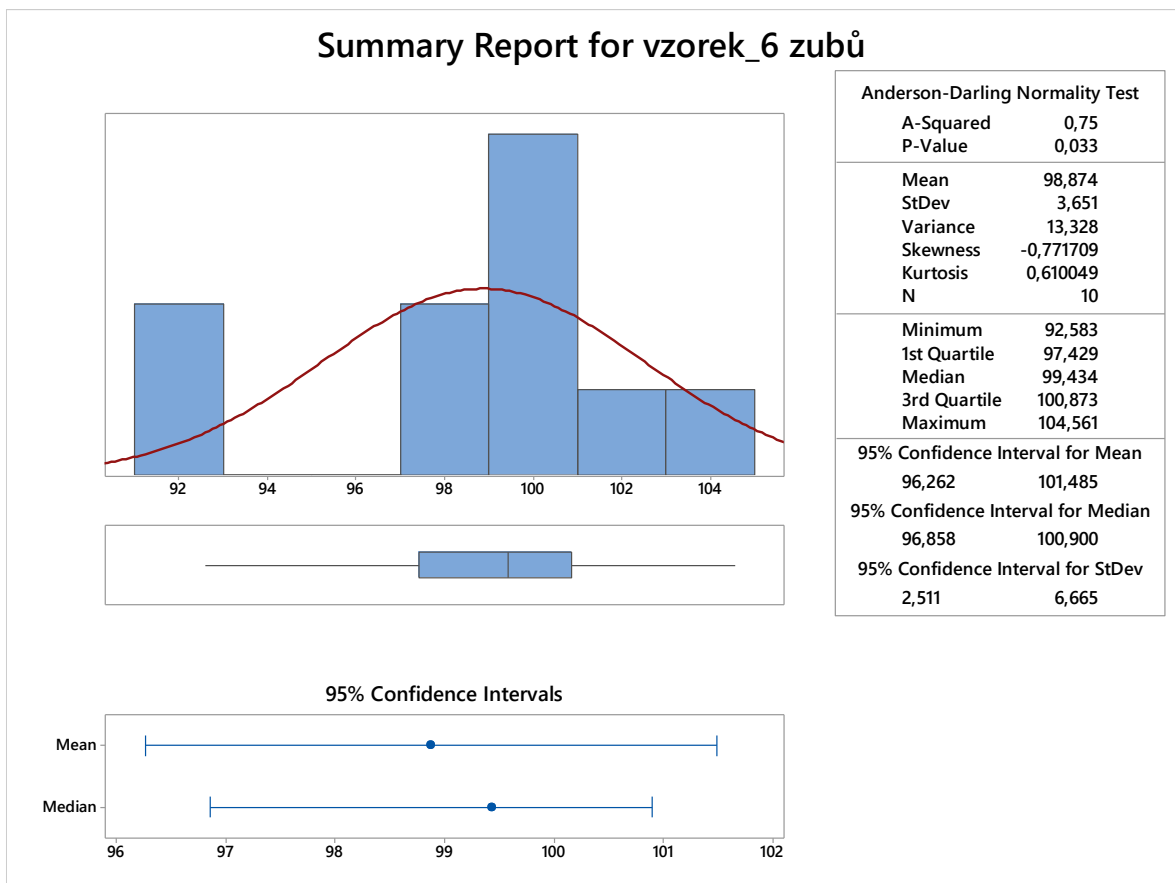
Obrázek 60. Sumarizace dat pro parametry Ra Vzorek_6

Tabulka 28. Sumarizace Ra Vzorek_6

Sumarizace dat pro parametry Ra Vzorek_6		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Střední hodnota	12,439	μm
Směrodatná odchylka	0,993	μm
Minimum	10,414	μm
Průměrná hodnota	12,526	μm
Maximum	13,716	μm



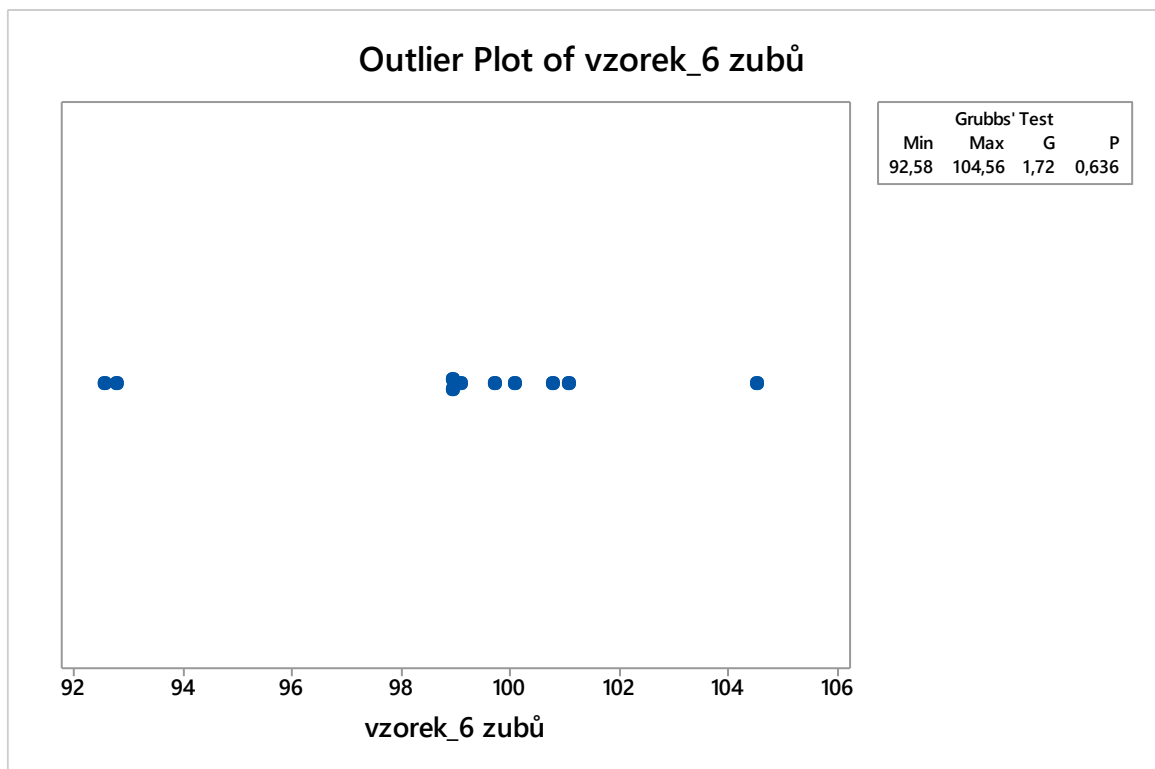
Obrázek 61. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_6



Obrázek 62. Sumarizace dat pro parametry Rz Vzorek_6

Tabulka 29. Sumarizace Rz Vzorek_6

Sumarizace dat pro parametry Rz Vzorek_6		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Střední hodnota	98,874	μm
Směrodatná odchylka	3,651	μm
Minimum	92,583	μm
Průměrná hodnota	99,434	μm
Maximum	104,561	μm



Obrázek 63. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_6

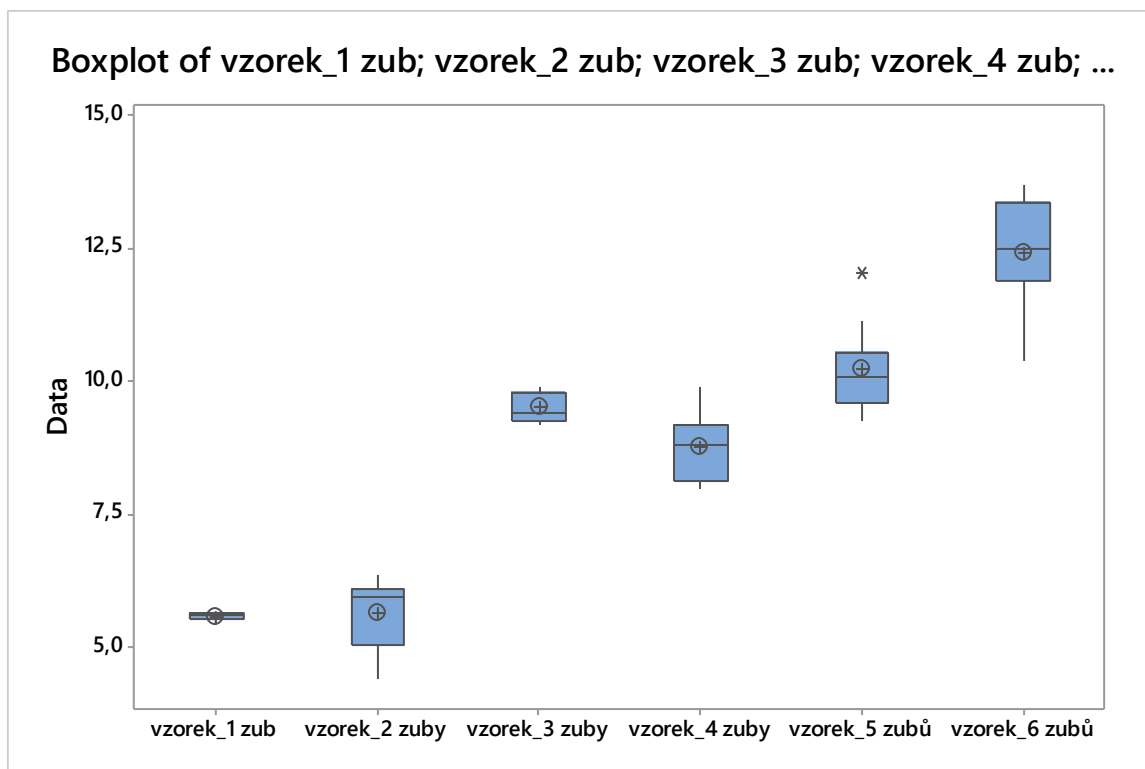
Vzorek_6 klasifikujeme z hlediska drsnosti jako vzorek pro nás již nežádoucí a pro případné testování jako nevhodný. V případě potřeby dalšího rozvoje tohoto vzorku následným zkoumáním zvážíme, zda byla energie laseru dostatečná, jestli došlo ke spojení vnitřní vrstvy s vnější vrstvou, a to ověřením rozměrových parametrů, případnými testy rozměrů, pevnostní zkouškou či jinými testy.

Z pohledu využití se už jedná spíše o nekvalitní tisk s nekonzistentní kvalitou.

5.5 Vyhodnocení vzorků

5.5.1 Box-plot Ra

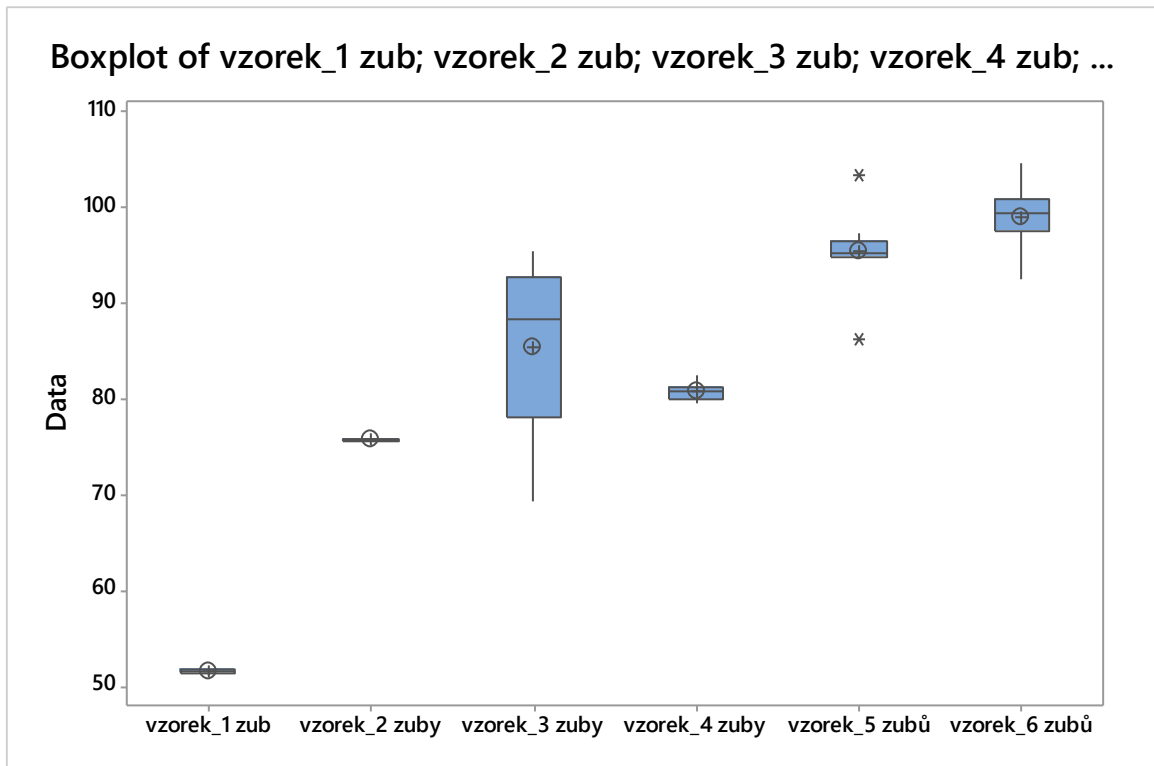
V programu Minitab byly vytvořeny box-plotové diagramy pro naše hodnoty.



Obrázek 64. Box-plotový diagram pro parametry Ra

Z box-plotového diagramu Ra pozorujeme rozptyl hodnot jednotlivých vzorků. Zde je patrné, že u Vzorku_1 a Vzorku_2 došlo k nárůstu kvality. Vzorek_3 vykazuje vyvážené hodnoty. Vzorek_4, který je v tisku o 66 % rychlejší než Vzorek_3, můžeme považovat za výhodnější a z hlediska kvality povrchu vyhovující. Vzorek_5 a Vzorek_6 nám ukazují trend, jakým náš výzkum směřuje a poukazuje na začátek limitu metody 3D tisku z hlediska kvality a funkce. Hodnoty Vzorku_5 a Vzorku_6 lze považovat za hraniční hodnoty a spíše nevyhovující.

5.5.2 Box-plot Rz

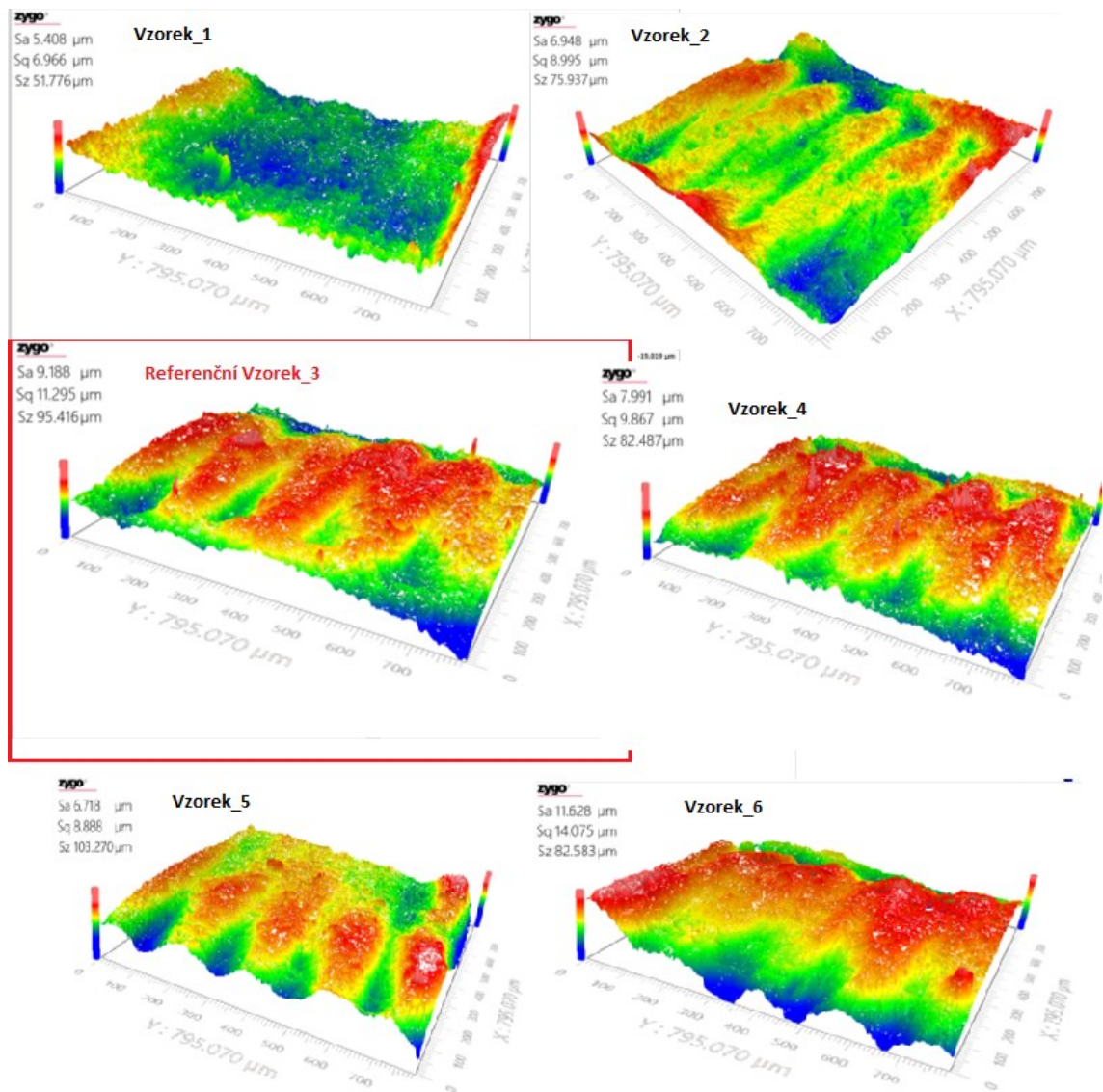


Obrázek 65. Box-plotový diagram pro parametry Rz

Z box-plotového diagramu Rz pozorujeme rozptyl hodnot jednotlivých vzorků a je jasně patrné, že u Vzorku_1 a Vzorku_2 došlo k nárůstu kvality. Vzorek_3 vykazuje výrazný rozptyl hodnot. Vzorek_4, který je v tisku o 66 % rychlejší než Vzorek_3, můžeme považovat opět za výhodnější a z hlediska kvality povrchu a rychlosti tisku. Vzorek_5 a Vzorek_6 nám ukazuje trend, jakým se náš výzkum ubírá a poukazuje na začátek limitu metody 3D tisku z hlediska kvality a funkce. Hodnoty Vzorku_5 lze považovat za hraniční hodnoty pro nastavení parametrů obvodu prvku.

ZÁVĚR

Grafické porovnání měřených povrchů zkoumaných vzorků

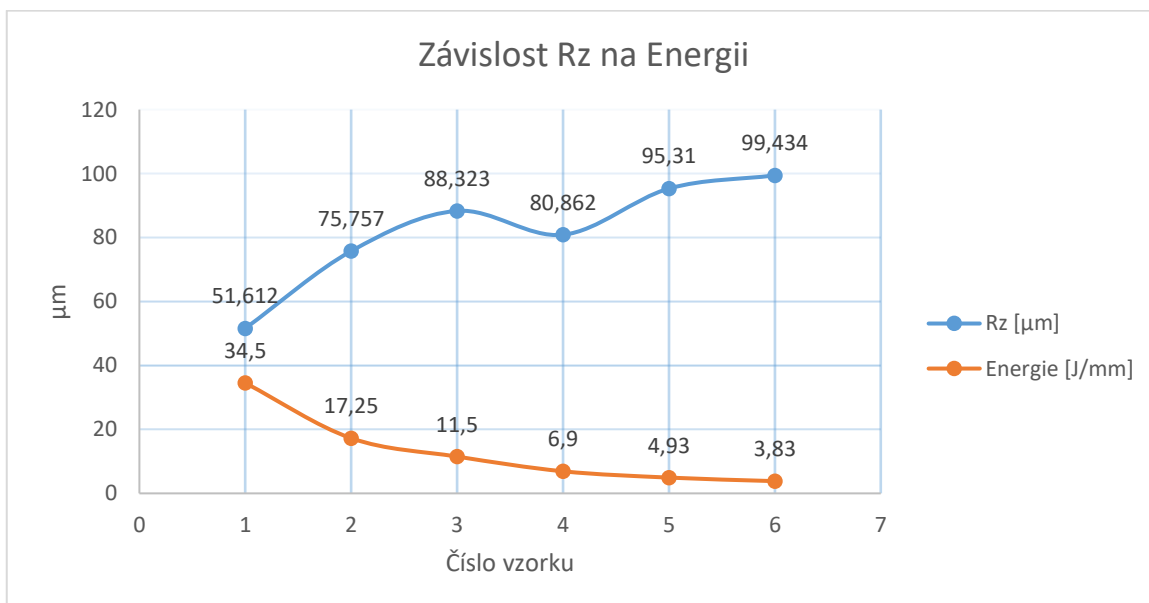


Obrázek 66. Porovnání vzorků

Z obrázků lze pozorovat trend změny povrchů jednotlivých vzorků v závislosti na pozměněných parametrech tisku.

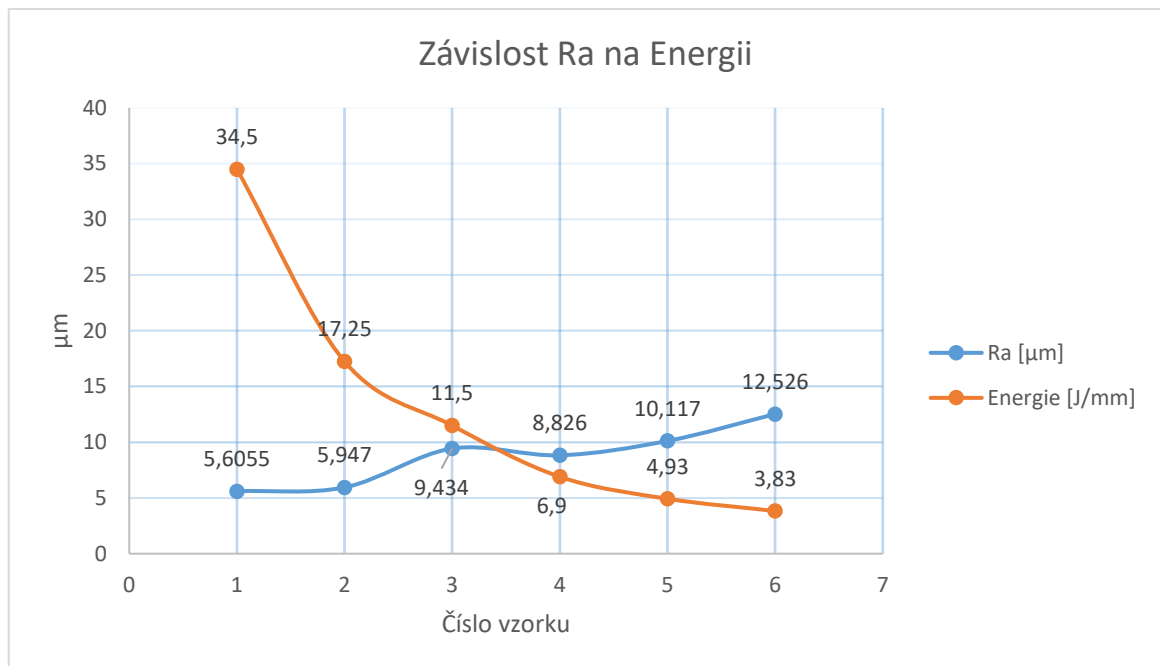
Tabulka 30. Sumarizace hodnot

Nastavení tisku	Parametr	Vzorek_1	Vzorek_2	Vzorek_3	Vzorek_4	Vzorek_5	Vzorek_6	Jednotka
	Výška nanášené vrstvy	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Výkon laseru	138	138	138	138	138	138	138	Watt
Rychlost pohybu paprsku laseru	100	200	300	500	700	900		mm/s
Energie přenesená laserem na přímku	34,5	17,25	11,5	6,9	4,93	3,83		J/mm
Rz	Střední hodnota	51,607	75,722	85,482	80,744	95,411	98,874	μm
	Minimum	51,587	75,487	69,281	79,649	86,188	92,583	
	Průměrná hodnota	51,612	75,757	88,323	80,862	95,31	99,434	
	Maximum	51,857	75,937	95,416	82,487	103,27	104,561	
Ra	Střední hodnota	5,5933	5,6599	9,5201	8,7803	10,235	12,439	
	Minimum	5,478	4,403	9,188	7,991	9,259	10,414	
	Průměrná hodnota	5,6055	5,947	9,434	8,826	10,117	12,526	
	Maximum	5,684	6,639	9,904	9,911	12,062	13,716	



Obrázek 67. Závislost Rz na energii

Vývoj trendu Rz + Ra a energie předané laserem. Na těchto grafech můžeme pozorovat vliv změny kvality povrchu a energie vstupující do tisku. Čím více energie do procesu dodáme, tím je drsnost povrchu menší a rozptýl hodnot nižší.



Obrázek 68. Závislost Ra na energii

Při predikci parametrů uvažujeme tyto vlivy: čas tisku, životnost laseru, případná rekuperace použitého prášku. Naším cílem je dosáhnout co nejlepšího nastavení parametrů tisku, tzn. co nejlepší kvality drsnosti povrchů v co nejkratším čase.

Z výsledků našeho měření pozorujeme:

- Oblast pro nové experimenty a pokračování v rozvoji parametrů se nachází v oblasti Vzorek_1 až Vzorek_4.
- Vzorek_1 je trendem kvality, velmi konzistentní, Vzorek_4 představuje trend rychlosti.
- U vzorků Vzorek_5 a Vzorek_6 je patrná malá objemová hustota laseru a ta vede k neúčinnému spojení obvodových vrstev. Pro vyvrácení této skutečnosti lze přejít k tisku kalibračního vzorku, kvůli nastavení rozměrové korekce a hodnot parametrů laseru. Tak by se daly vypořádat změny na rozměrech vzorku.
- Vzorek_1 z pohledu kvality tisku dosáhl pro nás maximálně uspokojivého výsledku kvality povrchu, rozptyl hodnot se ustálil.

Pro možnost zavedení do výroby musíme vytvořit několik testů, a to pro kalibrační parametry nového nastavení rozměrů, tisk validačních vzorků pro zkoumání změn u tisku nerovných a nakloněných ploch, kontaminaci prášku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1999
- [2] ČSN EN ISO 4288. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. 1999
- [3] ČSN EN ISO 25178-2. Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 2012
- [4] Accretech [online]. Mnichov: ACCRETECH (Europe), 2019 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.accretech.eu/cs/mereni-struktury-povrchu/>
- [5] M. Arvinth Davinci, N.L. Parthasarathi, Utpal Borah, Shaju K. Albert, Effect of the tracing speed and span on roughness parameters determined by stylus type equipment, Measurement, Volume 48, 2014, Pages 368-377, ISSN 0263-2241, /10.1016/j.measurement.2013.11.023.
- [6] Direct Metal Laser Sintering (DMLS) [online].[cit. 2021-04-19]. <https://all3dp.com/>
- [7] Zhiheng Hu, Yang Qi, Balasubramanian Nagarajan, Xiaojia Nie, Hu Zhang, Haihong Zhu, Xiaoyan Zeng, Top surface roughness evolution during selective laser melting of AlCu5MnCdVA aluminum alloy, Journal of Manufacturing Processes, Volume 64, 2021, Pages 1180-1195, ISSN 1526-6125, /10.1016/j.jmapro.2021.01.051.
- [8] Basavraj Gadagi, Ramesh Lekurwale, A review on advances in 3D metal printing, Materials Today: Proceedings, 2020, ISSN 2214-7853, /10.1016/j.matpr.2020.10.436.
- [9] Hamed Kalami, Jill Urbanic, Exploration of surface roughness measurement solutions for additive manufactured components built by multi-axis tool paths, Additive Manufacturing, Volume 38, 2021, 101822, ISSN 2214-8604, /10.1016/j.addma.2020.101822.
- [10] NOVÁK, Zdeněk. Prostorové měření a hodnocení textury povrchu přístroji Taylor Hobson Ltd. [online]. Brno, WWW: <http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2_Novak_3D_mereni_textury.pdf>.

- [11] OPTIXS [online]. Praha: Lasery a přístrojová technika,2020 [cit. 2021-5-2]Profiloměr newview 9000, Dostupné z: <https://www.optixs.cz/mereni-povrchu-38k/opticke-profilomery-87k/opticky-profilomer-newview-9000-153p#>
- [12] Ze-Xian Low, Yen Thien Chua, Brian Michael Ray, Davide Mattia, Ian Saxley Metcalfe, Darrell Alec Patterson, Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques, *Journal of Membrane Science*, Volume 523, 2017, Pages 596-613, ISSN 0376-7388, /10.1016/j.memsci.2016.10.006.
- [13] Advanced Measurement Performance. Olympus IMS [online]. [cit. 2018-06-20]. <https://www.olympus-ims.com/cs/metrology/ols4000/#>
- [14] Shyh-Tsong Lin, Sheng-Lih Yeh, Yi-Chun Wang, Meng-Zhu Chen, Laser profilometer using a Fabry–Perot etalon and an objective, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 203, 2013, Pages 47-51, ISSN 0924-4247, /10.1016/j.sna.2013.08.001.
- [15] ELUC [online]. Olomoucký kraj: Investice do rozvoje vzdělávání, 2020 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1103>
- [16] EOS. EOSinfo [online]. Munich, 2021 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en>
- [17] MICHIGAN METROLOGY, LLC. [online]. [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <http://michmet.com/>
- [18] Additivalab [online]. ADDITIVA Srl, 2021 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.additivalab.com/laser-sintering-vs-laser-melting/>
- [19] Greco, Sebastian & Gutzeit, Kevin & Hotz, Hendrik & Kirsch, Benjamin & Aurich, Jan. (2020). Selective laser melting (SLM) of AISI 316L—impact of laser power, layer thickness, and hatch spacing on roughness, density, and microhardness at constant input energy density. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. /10.1007/s00170-020-05510-8.
- [20] F. Fina, A. Goyanes, S. Gaisford, A. W. Basit, Selective laser sintering (SLS) 3D printing of medicines, *International Journal of Pharmaceutics*, Volume 529, Issues 1–2, 2017, Pages 285-293, ISSN 0378-5173, /10.1016/j.ijpharm.2017.06.082.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Sa	-Průměrná aritmetická úchylka povrchu
Sq	-Průměrná kvadratická úchylka (RMS) povrchu
St	-Celková výška povrchu
Sp	-Maximální výška výstupků
Sv	-Maximální hloubka prohlubní
Ssk	-Šikmost křivky rozdělení výšek
Sku	-Špičatost křivky rozdělení výšek
Smr	-Nosný poměr v dané hloubce
Sdc	-Výškový rozdíl řezů povrchem
Smvr	-Střední hodnota poměru nezaplňného objemu
Smmr	-Střední hodnota poměru materiálového objemu
SPc	-Počet výstupků na ploše
Sds	-Hustota výstupků povrchu
Sal	-Délka odpovídající nejrychlejšímu poklesu autokorelační funkce
Str	-Poměrný aspekt textury povrchu
Std	-Směr textury povrchu
Sdq	-Kvadratický sklon povrchu
Ssc	-Aritmetický průměr zakřivení výstupků povrchu
Sdr	-Poměrná rozvinutá styková plocha
Ψ	-objemová hustota energie
P _L	-výkon laseru
v _s	-skenovací rychlost
D _s	-tloušťka vrstvy
Δy_s	-vzdálenost šrafování

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Přenosová charakteristika profilu [4]	12
Obrázek 2. a) povrchová struktura b) drsnost povrchu [8]	13
Obrázek 3. Prvek profilu [1]	15
Obrázek 4. Největší výška profilu [1].....	16
Obrázek 5. výška prvků profilu [1].....	17
Obrázek 6. Místní sklon [1]	18
Obrázek 7. Vztah mezi jednotlivými filtry [3]	27
Obrázek 8. F+S filter a) před úpravou b) S+L plocha [4].....	27
Obrázek 9. Porovnání měření dotykové vs. bezdotykové [13].....	28
Obrázek 10. Schéma snímání [15].....	29
Obrázek 11. Detail hrotu [15]	30
Obrázek 12. CLA snímač [15].....	31
Obrázek 13. NewView 9000 [11]	32
Obrázek 14. Software Zygo MX [11].....	33
Obrázek 15. Detail zvětšení [11]	33
Obrázek 16. Druhy čoček [11].....	34
Obrázek 17. Opt-Scope (3D) [4].....	35
Obrázek 18. Ukázka tisku do vrstvy prášku [16].....	36
Obrázek 19. Spečený prášek (vlevo), Roztavený prášek (vpravo) [18]	36
Obrázek 20. Klíčové vlastnosti 3D tisku [12].....	37
Obrázek 21. Schéma 3D tiskárny [12].....	37
Obrázek 22. Strategie laseru [6]	38
Obrázek 23. Dokončený tisk (vlevo), Tisková vada (vpravo).....	39
Obrázek 24. Vliv energie laseru na vnitřní porositu [19]	40
Obrázek 25. Usazení vzorku	43
Obrázek 26. Pohled na měření	43
Obrázek 27. 3D model vzorku	44
Obrázek 28. Detail snímaného povrchu Vzorek_1	47
Obrázek 29. 3D snímek povrchu pro Vzorek_1	48
Obrázek 30. Sumarizace dat pro parametry Ra Vzorek_1.....	48
Obrázek 31. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_1.....	49
Obrázek 32. Sumarizace dat pro parametry Rz Vzorek_1.....	50
Obrázek 33. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_1.....	51

Obrázek 34. Detail snímaného povrchu Vzorek_2	52
Obrázek 35. 3D snímek povrchu pro Vzorek_2	53
Obrázek 36. Sumarizace dat pro parametry Ra Vzorek_2.....	53
Obrázek 37. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_2.....	54
Obrázek 38. Sumarizace dat pro parametry Rz Vzorek_2.....	55
Obrázek 39. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_2.....	56
Obrázek 40. Detail snímaného povrchu Vzorek_3	57
Obrázek 41. 3D snímek povrchu pro Vzorek_3	58
Obrázek 42. Sumarizace dat pro parametry Ra Vzorek_3.....	58
Obrázek 43. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_3.....	59
Obrázek 44. Sumarizace dat pro parametry Rz Vzorek_3.....	60
Obrázek 45. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_3.....	61
Obrázek 46. Detail snímaného povrchu Vzorek_4	62
Obrázek 47. 3D snímek povrchu pro Vzorek_4	63
Obrázek 48. Sumarizace dat pro parametry Ra Vzorek_4.....	63
Obrázek 49. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_4.....	64
Obrázek 50. Sumarizace dat pro parametry Rz Vzorek_4.....	65
Obrázek 51. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_4.....	66
Obrázek 52. Detail snímaného povrchu Vzorek_5	67
Obrázek 53. 3D snímek povrchu pro Vzorek_5	68
Obrázek 54. Sumarizace dat pro parametry Ra Vzorek_5.....	68
Obrázek 55. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_5.....	69
Obrázek 56. Sumarizace dat pro parametry Rz Vzorek_5.....	70
Obrázek 57. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_5.....	71
Obrázek 58. Detail snímaného povrchu Vzorek_6	72
Obrázek 59. 3D snímek povrchu pro Vzorek_6	73
Obrázek 60. Sumarizace dat pro parametry Ra Vzorek_6.....	73
Obrázek 61. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_6.....	74
Obrázek 62. Sumarizace dat pro parametry Rz Vzorek_6.....	75
Obrázek 63. Grubbsův test odlehlých hodnot pro Vzorek_6.....	76
Obrázek 64. Box-plotový diagram pro parametry Ra.....	77
Obrázek 65. Box-plotový diagram pro parametry Rz.....	78
Obrázek 66. Porovnání vzorků	79
Obrázek 67. Závislost Rz na energii	80
Obrázek 68. Závislost Ra na energii	81

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Základní parametry přehled.....	14
Tabulka 2. Plošné (3D) parametry	20
Tabulka 3. Kvantitativní dělení	29
Tabulka 4. Parametry ZYGO NEWVIEW-9000 [11]	31
Tabulka 5. Parametry - Opt-Scope	34
Tabulka 6. Příklady užití prášků	40
Tabulka 7. Hustota energie vůči rychlosti laseru.....	45
Tabulka 8. Hodnoty Ra	46
Tabulka 9. Hodnoty Rz.....	46
Tabulka 10. Hodnoty nastavení pro Vzorek_1	47
Tabulka 11. Sumarizace Ra Vzorek_1	49
Tabulka 12. Sumarizace Rz Vzorek_1	50
Tabulka 13. Uvažované parametry	51
Tabulka 14. Hodnoty nastavení pro Vzorek_2	52
Tabulka 15. Sumarizace Ra Vzorek_2	54
Tabulka 16. Sumarizace Rz Vzorek_2	55
Tabulka 17. Uvažované parametry	56
Tabulka 18. Hodnoty nastavení pro Vzorek_3	57
Tabulka 19. Sumarizace Ra Vzorek_3	59
Tabulka 20. Sumarizace Rz Vzorek_3	60
Tabulka 21. Hodnoty nastavení pro Vzorek_4	62
Tabulka 22. Sumarizace Ra Vzorek_4	64
Tabulka 23. Sumarizace Rz Vzorek_4	65
Tabulka 24. Hodnoty nastavení pro Vzorek_5	67
Tabulka 25. Sumarizace Ra Vzorek_5	69
Tabulka 26. Sumarizace Rz Vzorek_5	70
Tabulka 27. Hodnoty nastavení pro Vzorek_6	72
Tabulka 28. Sumarizace Ra Vzorek_6	74
Tabulka 29. Sumarizace Rz Vzorek_6	75
Tabulka 30. Sumarizace hodnot.....	80