

Metodika hodnocení drsnosti povrchu dílů vyráběných technologií spékáním kovových prášků

Bc. Radek Vodinský

Diplomová práce
2020

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek Vodinský**
Osobní číslo: **T180000**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Řízení jakosti**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Metodika hodnocení drsnosti povrchu dílů vyráběných technologií spékáním kovových prášků**

Zásady pro vypracování

1. Popište metodiku výroby dílů spékáním s využitím 3D tisku.
2. Navrhněte metodiku snímání drsnosti povrchů, vzniklých spékáním.
3. Navrhněte statistický způsob hodnocení vzniklých povrchů.
4. Aplikujte navržené postupy na reálné díly.

Forma zpracování diplomové 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. BUMBÁLEK,L.- BUMBÁLEK,B.: Pokrokové trendy v hodnocení textury povrchu, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně.
4. MELOUN, Milan. Kompendium statistického zpracování dat: metody a řešení úlohy včetně CD. Praha: Academia, 2002, 764 s. ISBN 80-200-1008-4

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

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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 užít své dílo – diplomovou 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 diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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 diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tématem diplomové práce je „Metodika hodnocení drsnosti povrchu dílů vyráběných technologií spékáním kovových prášků“. Hlavní částí práce je vyrobení kovových dílů pomocí technologie spékání kovových prášků a následně zkoumání a statistické hodnocení drsnosti jejich povrchu. I když je technika spékání dnes již poměrně běžná, statistické hodnocené drsnosti stále hledá světlo na konci tunelu.

Diplomová práce navrhuje metodiku snímání drsnosti povrchů a jejich následné statistické hodnocení. Tyto navržené metody jsou následně aplikovány na reálné díly, kde je prokázána jejich účinnost.

Klíčová slova: Rapid prototyping, spékání kovových prášků, drsnost povrchu

ABSTRACT

The topic of the diploma thesis is the “Methodology of surface roughness evaluation of parts produced by sintering technologies of metal powders”. The main part of the work is the production of metal parts using the technology of sintering metal powders and then the examination and statistical evaluation of the roughness of their surface. Although the sintering technique is relatively common today, the statistically evaluated roughness is still looking for the light at the end of the tunnel.

The diploma thesis proposes a methodology for sensing the roughness of surfaces and their subsequent statistical evaluation. These proposed methods are then applied to real parts, where their effectiveness is proven.

Keywords: Rapid prototyping, sintering of metal powders, surface roughness

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

OBSAH

ÚVOD	6
I TEORETICKÁ ČÁST	7
1 OBRÁBĚNÍ KOVŮ	8
1.1 KONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ	8
1.2 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ.....	9
2 SELEKTIVNÍ LASEROVÉ SLINOVÁNÍ (SLS)	11
2.1 PRÁŠKOVÁ METALURGIE	11
3 PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU	14
3.1 KONVENČNÍ PARAMETRY (2D).....	14
3.2 PARAMETRY POVRCHU PLOCHY (3D)	17
4 ANALÝZA DAT	18
4.1 ZÁKLADNÍ ANALÝZA	18
4.2 ANOVA	20
4.3 SHLUKOVÁ ANALÝZA	21
II PRAKTICKÁ ČÁST	23
6 VÝROBA LAMELY	24
7 ANALÝZA VYROBENÝCH SÉRIÍ	26
7.1 PŘÍPRAVNÁ FÁZE.....	26
7.2 VÝSLEDNÁ FÁZE.....	29
7.2.1 Výsledky ze série nazvané „Série A“	30
7.2.2 Výsledky ze série nazvané „Série B“	39
ZÁVĚR	45
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	46
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	48
SEZNAM OBRÁZKŮ	49
SEZNAM TABULEK	51

ÚVOD

První zmínka o výrobě trojrozměrných objektů pomocí aditivního vrstvení sahá až do sedmdesátých let a pojí se s názvem Rapid Prototyping. Nicméně první pokus o získání patentu spojeného s touto technologií se objevil až v roce 1981, kdy podal patentovou přihlášku pan Hideo Kodama. Přestože se patent nepodařilo z důvodu nedodání celé dokumentace získat, společnost Kodama vynalezla zařízení, které k vytvrzení fotoreaktivních polymerů používalo UV záření. Stejně jako u jiných raných forem výroby aditiv bylo hlavní myšlenkou, že technologie bude užitečná pro vytváření modelů a prototypů. [1,2]

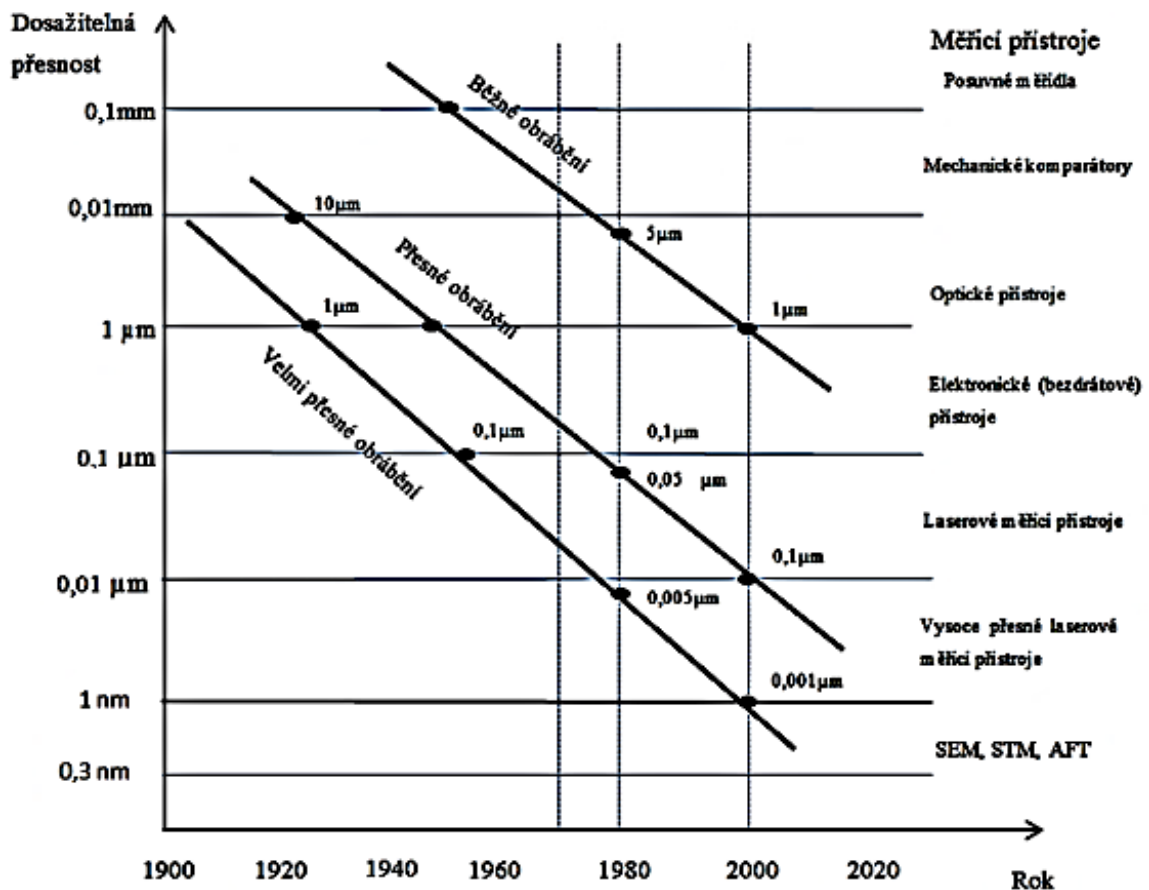
O tři roky později, v roce 1984, tým francouzských vynálezců vedených Alainem Le Mehauteem požádal o první patenty na metodu stereolitografie, která se dodnes stále široce používá. Stereolitografie podobně jako vynález společnosti Kodama spoléhá na UV záření, aby vytvrdla fotopolymery. [1]

Selektivní laserové slinování (SLS) bylo následně patentováno v roce 1987. Jde o proces výroby aditivních vrstev (3D tisk), který se používá k vytváření prototypů i konečných součástí. SLS používá CO₂ lasery k tavení termoplastických a kovových prášků a rychle vytváří složité tvary z odolných materiálů. Výroba aditiv SLS poskytuje celou řadu materiálových možností, což z ní činí ideální technologii pro aplikace, které mají specifické mechanické požadavky. Protože součástka skončí zapouzdřením v neslinovaných práscích, není třeba žádných podpůrných struktur, což šetří čas při návrhu a následném zpracování. [2,3]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OBRÁBĚNÍ KOVŮ

Obrábění kovů je jednou z nejstarších technik, kterou lidstvo používá. S rostoucí schopností obrábění a důrazem nejen na detail, ale především na kvalitu a kontrolu, je kladen důraz na vývoj nových metod nekonvenčního obrábění. [4]



Obrázek 1 Vývoj přesného obrábění [4]

1.1 Konvenční metody obrábění

Mezi běžné metody obrábění patří soustružení, frézování, ale i vrtání či vystružování. Nejčastěji se používají pro hrubší obrábění, kde pak následuje užití dokončovacích operací na zvýšení přesnosti dle požadavků zákazníka.

U přesného obrábění už se předpokládá alespoň základní znalost jakosti povrchu, protože čím jemnější povrch je potřeba obrobit, tím roste cena na danou operaci. Mezi přesné obrábění je zařazeno například broušení, honování či lapování nebo superfinišování. Srovnání dosahovaných parametrů obrobených ploch přehledně zpracoval pan docent Humár (obr. 2). [5]

Obráběné plochy	Metoda obrábění		Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [μm]	
			střední	rozsah	střední	rozsah
vnější rotační	Broušení	hrubovací	10	9 ÷ 11	2,40	0,80 ÷ 3,20
		dokončovací	5	5 ÷ 6	0,40	0,20 ÷ 0,60
		jemné	4	3 ÷ 5	0,20	0,05 ÷ 0,40
	Lapování	dokončovací	4	3 ÷ 4	0,10	0,05 ÷ 0,20
		jemné	2	1 ÷ 2	0,03	0,012 ÷ 0,050
	Superfinišování	dokončovací	4	3 ÷ 5	0,20	0,05 ÷ 0,40
jemné		3	2 ÷ 4	0,06	0,025 ÷ 0,100	
vnitřní rotační	Broušení	hrubovací	10	9 ÷ 11	2,40	1,60 ÷ 3,20
		dokončovací	6	5 ÷ 7	0,80	0,40 ÷ 1,60
		jemné	5	3 ÷ 6	0,20	0,05 ÷ 0,40
	Honování	hrubovací	7	6 ÷ 8	0,40	0,20 ÷ 0,80
		dokončovací	6	5 ÷ 7	0,15	0,10 ÷ 0,20
		jemné	4	3 ÷ 5	0,07	0,05 ÷ 0,10
	Lapování	dokončovací	4	3 ÷ 5	0,20	0,01 ÷ 0,40
		jemné	2	1 ÷ 3	0,03	0,012 ÷ 0,050
rovinné	Broušení	hrubovací	10	9 ÷ 11	2,40	1,60 ÷ 3,20
		dokončovací	6	5 ÷ 7	0,80	0,40 ÷ 1,60
		jemné	5	3 ÷ 6	0,20	0,05 ÷ 0,40
	Lapování	dokončovací	4	3 ÷ 5	0,20	0,10 ÷ 0,40
		jemné	2	1 ÷ 3	0,03	0,012 ÷ 0,050

Obrázek 2 Tabulka přesného obrábění [5]

1.2 Nekonvenční metody obrábění

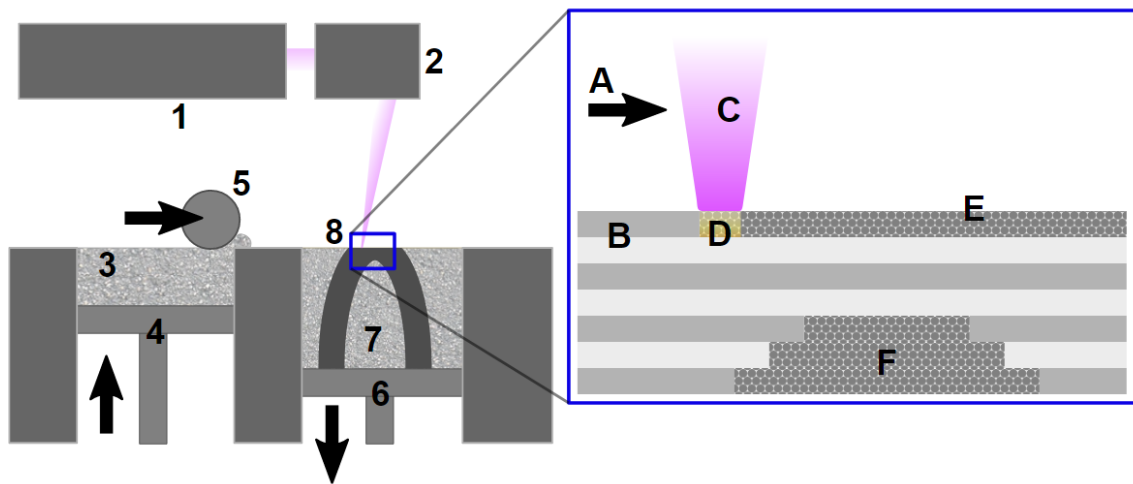
Při nekonvenčním obráběcím procesu nedochází k přímému kontaktu mezi nástrojem a obrobkem. Standardní řezný nástroj a nástrojové úhly se u těchto metod nevyužívají. Pro odstranění nežádoucího materiálu z daného obrobku se u těchto metod používá energie. Energetické působení na materiál je většinou bezsilové a bez vzniku klasických třísek. Jde především o fyzikální, chemické či o kombinaci tepelných a chemických způsobů úběru materiálu. Mezi fyzikální metody obrábění se řadí obrábění elektrickým výbojem. Patří mezi ně elektroerozivní obrábění elektrickou jiskrou a obrábění elektrickým obloukem, kdy je použita vysoká koncentrace energie, materiál taje a odpařuje se. [4,5]

U chemického obrábění je dělení složitější. U obrábění elektrochemického či chemického, obrábění paprskem koncentrované energie a obrábění laserem, plazmou, elektronovým a iontovým paprskem je obrobiteľnosť dána především jak tepelnou, tak i elektrickou vodivostí a vzájemnou vazbou atomů a molekul. U obrábění ultrazvukem, kapalinovým paprskem či proudem brusiva nezávisí obrobiteľnosť materiálu na jeho mechanických vlastnostech. [4,5]

Mezi nekonvenční metody obrábění lze zařadit aditivní technologie, které se nazývají 3D tisk, jehož využití postupuje mílovými kroky především u kovového tisku. Zde je rozlišováno dělení podle typu zpracování kovového prášku. První metodou je spékání kovové vrstvy, známé pod anglickou zkratkou SLS (Selective Laser Sintering). Dalšími metodami jsou kovový 3D tisk Selective Laser Melting (SLM) nebo Direct Metal Laser Sintering (DMLS), případně Laser Powder Bed Fusion (LPBF), u kterých nedochází ke spékání vrstvy, ale k jejímu roztavení. [4,5]

2 SELEKTIVNÍ LASEROVÉ SLINOVÁNÍ (SLS)

Technologie aditivní výroby vrstvy SLS zahrnuje použití vysokovýkonného laseru (například laseru na bázi oxidu uhličitého) k roztavení malých částic plastových, kovových, keramických nebo skleněných prášků do hmoty, která má požadovaný trojrozměrný tvar. Laser selektivně fúzuje práškový materiál skenováním průřezů generovaných z trojrozměrného digitálního popisu součásti (například ze souboru CAD nebo skenovacích dat) na povrchu práškového lože. Po naskenování každého průřezu se práškové lože sníží o jednu tloušťku vrstvy, nanese se na něj nová vrstva materiálu a proces se opakuje, dokud se díl nedokončí. [1,6]



Obrázek 3 Selektivní laserový slinovací proces [7]

Popis SLS pomocí obrázku 3:

Selektivní laserový slinovací proces využívá vysokovýkonného laseru (1), jehož směr je vyznačen bodem A a paprsek bodem C, a skenovacího systému (2). Práškový materiál (3) je přiváděn do systému pomocí práškového dodávacího pístu (4) a dále rozprostřen pomocí válce (5). Bod B znázorňuje spékané částice prášku. Zatímco bod E znázorňuje uložené práškové lože a F neslinovaný materiál v předchozích vrstvách. V bodě D probíhá laserové slinování. Po naskenování průřezu se prášková lože (7) sníží o jednu tloušťku vrstvy pomocí pístu (6). Bod 8 znázorňuje vyráběný předmět.

2.1 Prášková metalurgie

Prášková metalurgie, známá také jako slinovací technologie, je technologií, která našla své místo mezi technologiemi, jakými jsou hluboké tažení, přesné lití, kování a konstrukcí plechů včetně děrování. [8]

Při porovnání těchto procesů vyniká technologie slinování v řadě oblastí ve vztahu ke složitosti a procesům. Umožňuje několik procesů kombinovat a dokončit v řadě kroků. Slinovací technologie tedy představuje ekonomicky atraktivní alternativu.

Slinovací technologie je také považována za ekologický proces s minimálním odpadem – obvykle nedosahuje vyšších hodnot než 2-3 % odpadu v procesu.

Při výrobě prášku se používají čtyři hlavní procesy: redukce v pevném stavu, atomizace, elektrolýza a chemizace. [8]

➤ **Redukce pevných látek**

Při redukci v pevném stavu se vybraná ruda rozdrtí, obvykle se smísí s uhlíkem a nechá se projít kontinuální pecí. V peci reaguje produkující uhlík a kyslík z prášku, který zanechává koláč z houbového kovu, ten se následně rozdrtí, oddělí od veškerého nekovového materiálu a proseje se, čímž se získá prášek. Protože není prováděna žádná rafinační operace, závisí čistota prášku na čistotě surovin. Nepravidelné houbové podobné částice jsou měkké, snadno stlačitelné a dávají výlisky dobré předslinkové ("zelené") síly. [8]

➤ **Atomizace**

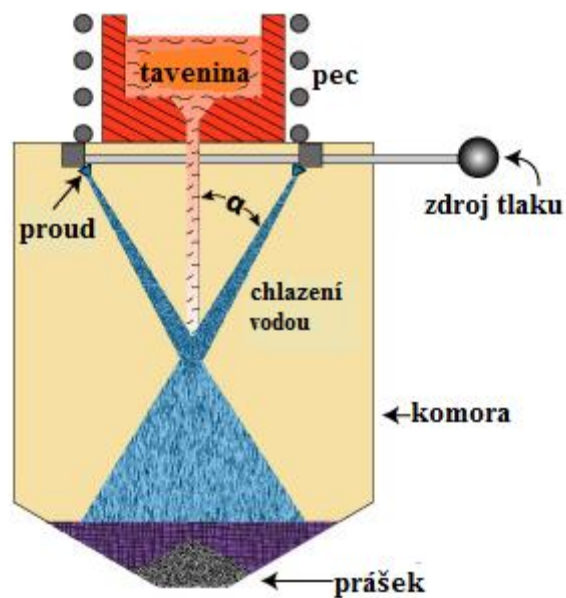
V tomto procesu se roztavený kov rozdělí na malé kapičky a rychle zmrazí, než kapky přijdou do vzájemného kontaktu nebo do kontaktu s pevným povrchem. Typicky se tenký proud roztaveného kovu dezintegruje tak, že je vystaví nárazu vysokoenergetických proudů plynu nebo kapaliny. V zásadě se tato technika používá na všechny kovy, které lze roztavit a které se komerčně používají pro výrobu železa, měď, legované oceli, mosaz, bronz, kovy s nízkou teplotou tání, jako je hliník, cín, olovo, zinek a kadmium, a ve vybraných případech wolfram, titan, rhenium a další materiály s vysokou teplotou tání. [8]

➤ **Elektrolýza**

Výběrem vhodných podmínek, jako je složení a koncentrace elektrolytu, teplota a hustota proudu, může být mnoho kovů uloženo v houbovitém nebo práškovém stavu. Často se vyžaduje další zpracování jako je mytí, sušení, redukce, žihání a drcení a v konečném důsledku se získají prášky s vysokou čistotou a vysokou hustotou. Měď je primární kov vyrobený elektrolýzou, ale tímto způsobem se také vyrábí železo, chrom a hořčík. Kvůli souvisejícím vysokým nákladům na energii je elektrolýza obecně omezena na prášky s vysokou hodnotou, jako jsou měděné prášky s vysokou vodivostí. [8]

➤ **Chemikálie**

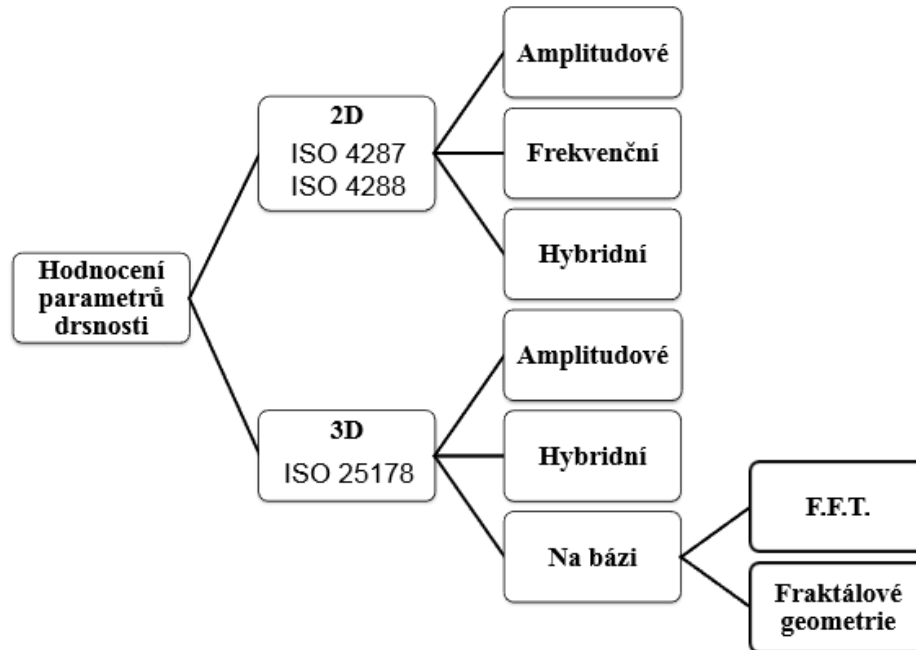
Nejběžnější chemické ošetření práškem zahrnuje redukci oxidu, srážení z roztoků a tepelný rozklad. Vyrobené prášky se mohou vyznačovat velkými změnami ve vlastnostech, a přesto mají přísně kontrolovanou velikost a tvar částic. Prášky s redukováným oxidem jsou často charakterizovány jako "houbovité" v důsledku pórů přítomných v jednotlivých částicích. Prášky vysrážené roztokem mohou poskytovat úzké rozdělení velikosti částic a vysokou čistotu. Tepelný rozklad se nejčastěji používá ke zpracování karbonylových skupin. Tyto prášky, jakmile jsou rozemleté a žíhané, překračují čistotu 99,5 %. [8]



Obrázek 4 Výroba kovového prášku [zpracováno dle 8]

3 PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU

Hodnocení jakosti povrchu je dnes jedním ze základních způsobů posuzování. Hodnocení parametrů drsnosti je rozděleno do dvou skupin na 2D a 3D, jak znázorňuje následující graf (obr. 5), který specifikuje používané normy pro drsnost povrchu:



Obrázek 5 Parametry profilu povrchu [zpracováno dle 9,10,11]

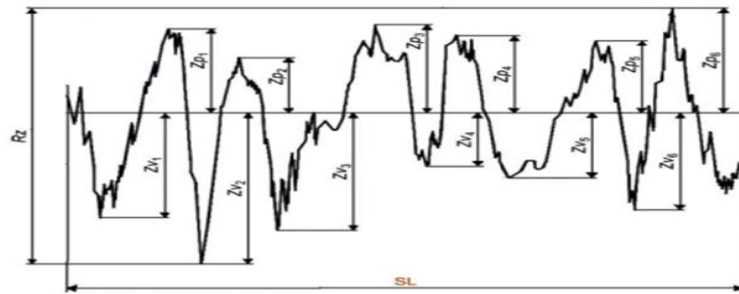
3.1 Konvenční parametry (2D)

Konvenční parametry jsou nejčastěji využívanými parametry pro vyhodnocení struktury snímaného povrchu. Jejich podstata spočívá ve dvourozměrném měření povrchu získaného kontaktním profilometrem. [10]

➤ Výškové parametry (výstupky a prohlubně)

Jsou citovány z norem ČSN EN ISO 4287 a 4288. [10,11]

„*Největší výška výstupku profilu R_p - výška ZP nejvyššího výstupku profilu a rozsahu základní délky*“.



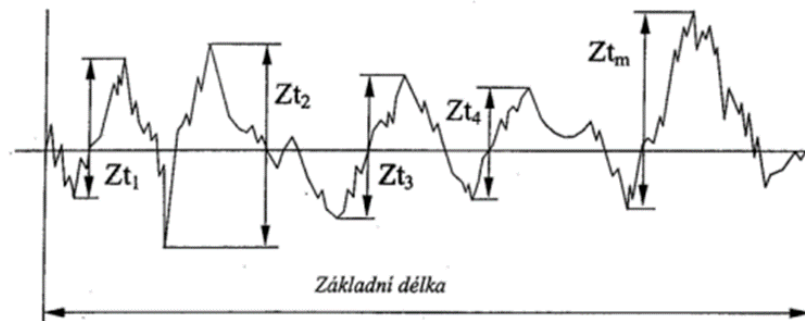
Obrázek 6 Největší výška výstupního profilu [10]

„**Největší hloubka prohlubně profilu R_v** – hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky“.

„**Největší výška profilu R_z** – součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky“.

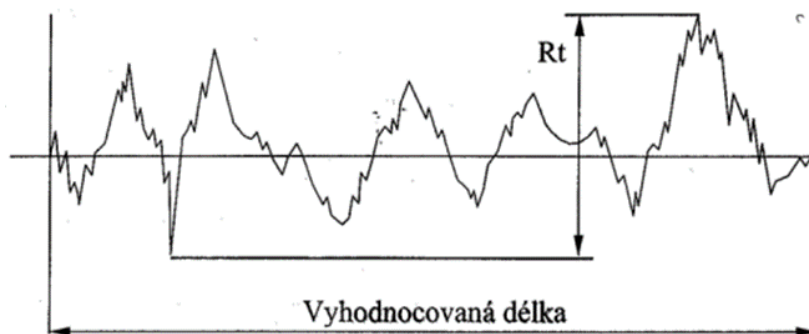
„**Průměrná výška prvků profilu R_c** – průměrná hodnota výšek Z_t prvků profilu v rozsahu základní délky“.

$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{t_i} \quad (1)$$



Obrázek 7 Průměrná výška prvků profilu [10]

„**Celková výška profilu R_t** – součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky“.



Obrázek 8 Celková výška profilu [10]

➤ **Výškové parametry (průměrné hodnoty pořadnic)**

Jedním z nejdůležitějších výškových parametrů je drsnost povrchu ve směru výšky Ra . [9,10]

„*Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu, Ra – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu délky lr “.*

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (2)$$

Obrázek 9 Aritmetická úchylka Ra [10]

„*Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu Rq – kvadratický průměr pořadnic $Z(x)$ v rozsahu délky lr “.*

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

„*Šikmost posuzovaného profilu Rsk – podíl průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty Rq v rozsahu délky lr “.*

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

„**Špičatost posuzovaného profilu Rku** – podíl poměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty Rq v rozsahu základní délky lr “.

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

Délkové parametry

„**Průměrná šířka prvků profilu Rsm** - aritmetický průměr šířek Xs prvků profilu v rozsahu základní délky“.

$$Rsm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i \quad (6)$$

3.2 Parametry povrchu plochy (3D)

Hybridní parametry 3D hodnocení charakterizuje propojení amplitudových kritérií s prostorovými, jako jsou např. sklony, zakřivení apod. Takové parametry umožní posuzovat průměrný tvar výstupků nebo složitost tvaru povrchu. [9,12]

Jsou citovány z normy ČSN EN ISO 25178-2. [9]

„**Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu, Sa** – aritmetický průměr absolutních hodnot koordinace uvnitř určené plochy A “.

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

„**Základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu Sq** “

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A |Z(y, x)| dx, dy} \quad (8)$$

„**Šikmost omezené stupnice povrchu** – kvocient průměrné hodnoty koordinační krychle a hodnot krychle Sq uvnitř plochy (A)“

$$Ssk = \frac{1}{Sq^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A |Z^3(y, x)| dx, dy \right] \quad (9)$$

„**Špičatost omezené stupnice povrchu** - kvocient průměrné čtvrté mocniny koordinace a hodnoty čtvrté mocniny Sq uvnitř plochy (A)“

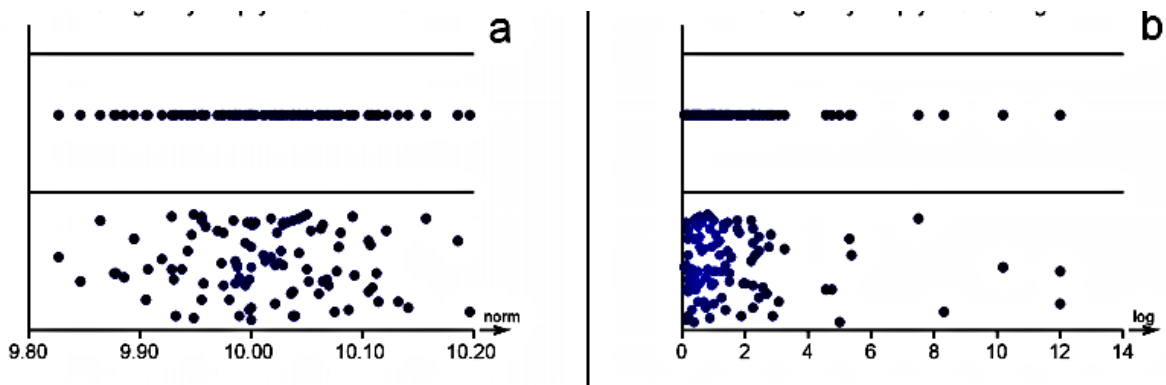
$$Sku = \frac{1}{Sq^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A |Z^4(y, x)| dx, dy \right] \quad (10)$$

4 ANALÝZA DAT

Průzkumová analýza má za úkol vyhodnotit, o jaký typ rozdělení dat jde. Jedná se především o odhalení statistických zvláštností, především stupeň o symetrie a špičatosti daného výběru. [13]

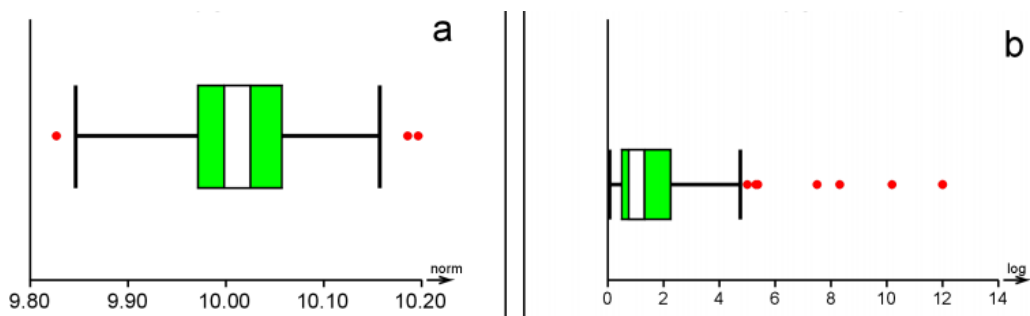
4.1 Základní analýza

Základní analýzou je stanovení, o jaký typ dat se jedná. Používají se hodnoty mediánu (\tilde{X}), průměru (\bar{X}), rozptylu ($\overline{\sigma^2}$), šikmosti a špičatosti. K této analýze jsou používány především různé typy diagramů na bázi rozptylů. [14]



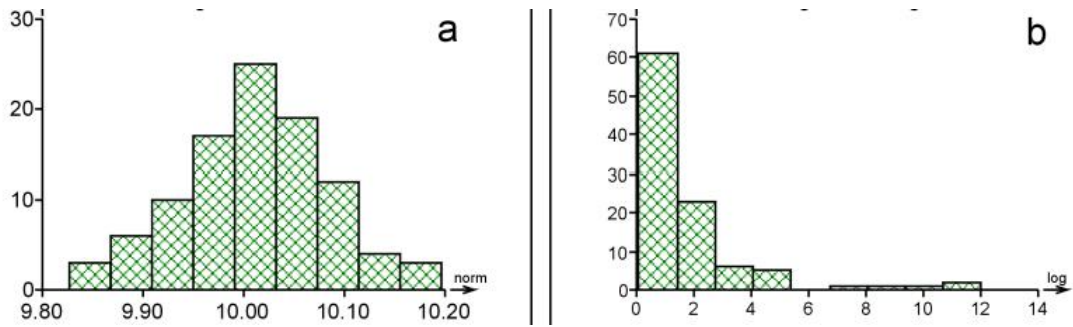
Obrázek 10 Diagramy rozptýlení (a) normální, (b) asymetrické [15]

Další možností, jak určit typ dat, je krabicový graf (box-plotový diagram), který umožňuje přehledně znázornit odhad polohy mediánu a identifikaci odlehlých hodnot. [13]



Obrázek 11 Krabicový graf (a) symetrické rozdělení, (b) asymetrické rozdělení [15]

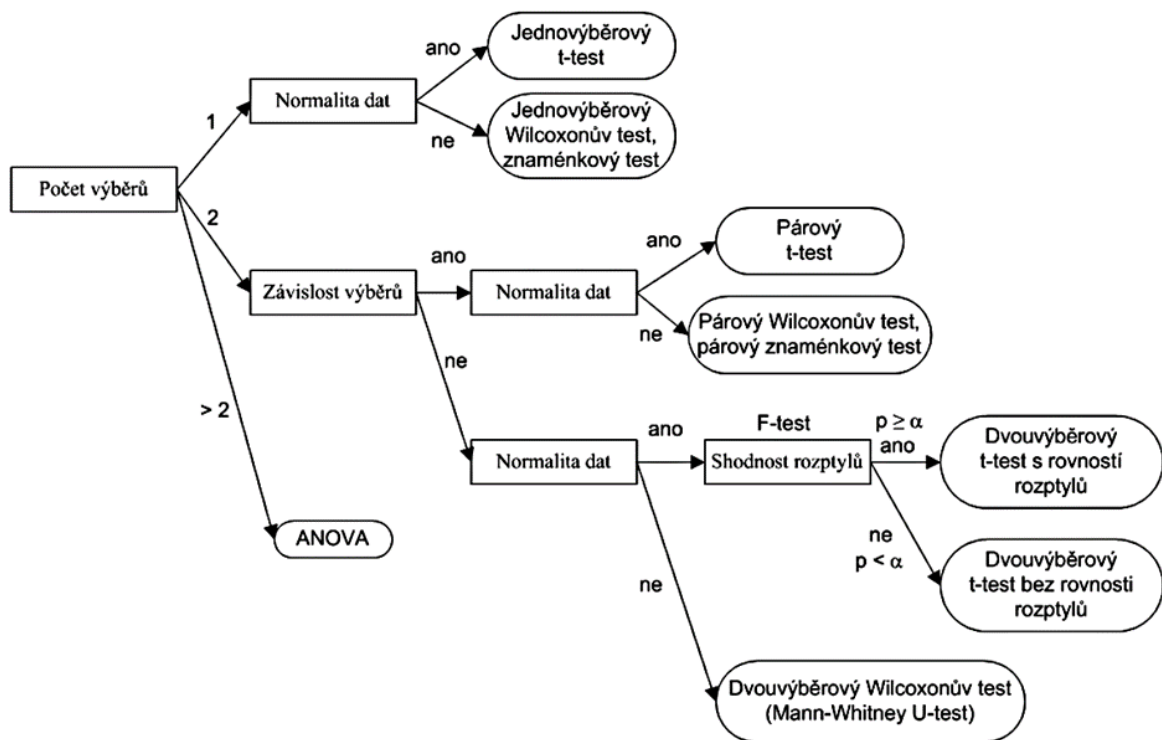
Důležitou součástí analýzy dat je analýza pomocí histogramu, u kterého výšky jednotlivých sloupců vypovídají o empirické hustotě pravděpodobnosti výskytu. Lze z něj stanovit symetrii rozdělení a šikmost dat. [16]



Obrázek 12 (a) histogram normálního rozdělení, (b) asymetrické rozdělení [15]

Histogram je často kombinován s jádrovým odhadem pravděpodobnosti, tento slouží k určení hustoty, šikmosti a špičatosti dat.

Nejjednodušším způsobem, jak přibližně odhadnout, jestli mají data normální rozdělení, je sestavení histogramu. Histogram je sestavován tak, že jsou nanášeny hodnoty sledované veličiny na vodorovnou osu a jejich četnost na svislou osu. Když je zkoumaná veličina spojitá (má nekonečně mnoha hodnot) rozdělíme osu na intervaly. Jejich četnosti určíme jako počty pozorovaných hodnot v jednotlivých intervalech. Při normálním rozdělení souboru by měl histogram připomínat Gaussovu křivku. [15,16]



Obrázek 13 Diagram pro výběr správného testu [zpracováno dle 14]

4.2 ANOVA

ANOVA je formou statistického testování hypotéz, která se používá při analýze experimentálních dat. Výsledek testu (vypočtený z nulové hypotézy a vzorku) se nazývá statisticky významný, pokud je považován za nepravděpodobný, případně že k němu došlo náhodou, za předpokladu pravdivosti nulové hypotézy. Statisticky významný výsledek, pokud je pravděpodobnost (p-hodnota) menší než předem určená prahová hodnota (hladina významnosti), odůvodňuje odmítnutí nulové hypotézy, ale pouze tehdy, pokud pravděpodobnost nulové hypotézy není vysoká. [17,18]

V typické aplikaci ANOVA je nulová hypotéza, když všechny skupiny jsou náhodnými vzorky ze stejné populace. Odmítnutí nulové hypotézy znamená, že rozdíly v pozorovaných účincích mezi léčebnými skupinami nejsou pravděpodobně způsobeny náhodnou náhodou. [15,16]

Konstrukcí testování hypotéz omezuje míru chyb typu I (falešné pozitivy) na úroveň významnosti. Experimentátoři také chtějí omezit chyby typu II (falešné negativy). Míra chyb typu II závisí do velké míry na velikosti vzorku (míra je větší u menších vzorků), úrovni významnosti (pokud je úroveň důkazu vysoká, šance na přehlédnutí objevu jsou také vysoké) a velikosti efektu (menší velikost efektu) je náchylnější k chybě typu II. [17,18]

„Klasická“ ANOVA pro vyvážená data dělá tři věci najednou:

- Jako průzkumná datová analýza ANOVA používá aditivní dekompozici dat a její součet čtverců ukazuje rozptyl každé složky rozkladu (nebo ekvivalentně každou sadu podmínek lineárního modelu).
- Porovnání průměrných čtverců spolu s F- testem - umožňují testování vnořené posloupnosti modelů.
- S ANOVA úzce souvisí lineární model vhodný pro odhady koeficientů a standardní chyby.

		Výsledek testu	
		Platí H_0	Platí H_A
Skutečnost	Platí H_0	Správné rozhodnutí, pravděpodobnost $1 - \alpha$ (spolehlivost testu)	Chyba I. druhu, pravděpodobnost α (hladina významnosti)
	Platí H_A	Chyba II. druhu, pravděpodobnost β	Správné rozhodnutí, pravděpodobnost $1 - \beta$ (síla testu)

Obrázek 14 Tabulka typů chyb [16]

4.3 Shluková analýza

Shluková analýza (též Clusterova analýza, anglicky cluster analysis) je vícerozměrná statistická metoda, která se používá ke klasifikaci objektů. Slouží k třídění jednotek do skupin (shluků) tak, aby si jednotky náležící do stejné skupiny byly podobnější než objekty z ostatních skupin. Shlukovou analýzu je možné provádět jak na množině objektů, z nichž každý musí být popsán prostřednictvím stejného souboru znaků, které má smysl v dané množině sledovat, tak na množině znaků, které jsou charakterizovány prostřednictvím určitého souboru objektů, nositelů těchto znaků. [18,19]

Metoda shlukování - Wardova metoda

Wardova metoda vychází z analýzy rozptylu. Slučuje takové shluky, kde je minimální součet čtverců. Obecně lze říci, že je tato metoda velmi účinná, nicméně má tendenci vytvářet poměrně malé shluky. Vzdálenosti objektů se měří čtvercovou euklidovskou vzdáleností. [19]

5 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je vytvoření metodiky hodnocení pro kontrolu parametrů drsnosti povrchu typu lamela vytvořeného aditivní technologií, pro případ neznámých tiskových parametrů. Dále je pro tuto práci nezbytné navrhnout statistický způsob hodnocení u neznámých tiskových parametrů. Nakonec jsou tyto postupy aplikovány na reálné díly.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 VÝROBA LAMELY

Pro zpracování metodiky hodnocení drsnosti povrchu byly jako produkt vybrány lamely. Tyto lamely byly vyrobeny na 3D tiskárně, konkrétně se jednalo o model EOS M290. Tento model je vhodný pro aditivní výrobu vysoce kvalitních kovových dílů a umožňuje nákladově efektivní výrobu kovových dílů.

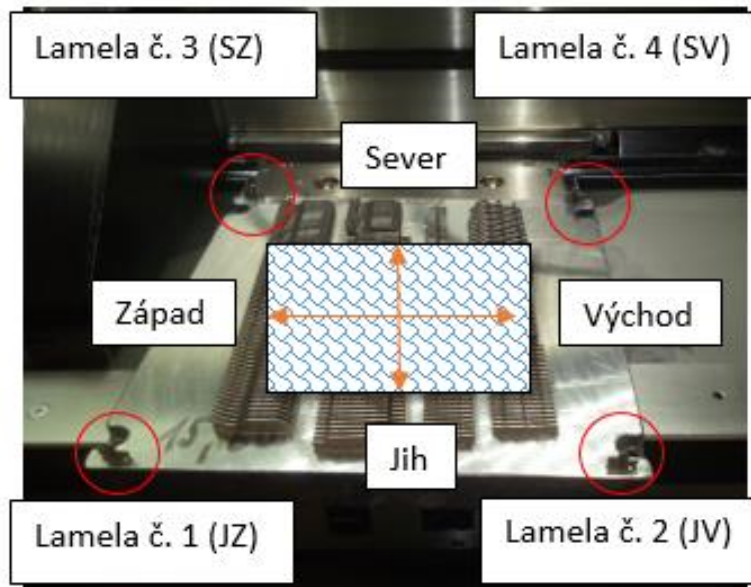
Prvním krokem pro zpracování metodiky hodnocení drsnosti povrchu byla samotná výroba lamely. V rámci zpracování vhodné metodiky, vlastního hodnocení, byly vyrobeny dvě série lamel – série A a série B. Pro obě tyto série bylo zvoleno stejné materiálové složení.

Vybraný materiál pro výrobu lamely:

- Materiálové složení lamel
 - Fe (balance)
 - Ni (17 - 19 hm %)
 - Co (8.5 - 9.5 hm %)
 - Mo (4.5 - 5.2 hm %)
 - Ti (0.6 - 0.8 hm %)
 - Al (0.05 - 0.15 hm %)
 - Cr, Cu (each ≤ 0.5 hm %)
 - C (≤ 0.03 hm %)
 - Mn, Si (each ≤ 0.1 hm %)
 - P, S (each ≤ 0.01 hm %)
- Hustota: 8.0 - 8.1 g/cm³

Na výrobu obou sérií je navázáno laboratorní měření a následné statistické vyhodnocení dat, které bylo provedeno na přístroji Optický interferenční profiloměr řady NewView NV8000 a systému Zygo. Tento systém je běžně využíván pro hodnocení povrchů a na vyhodnocení jejich opotřebení.

Přípravou pro tvorbu vlastního hodnocení bylo zavedení souřadnicového systému rozložení lamel, který slouží k hodnocení kontrolních lamel na tiskové desce (obr. 15). Tento souřadnicový systém je základním bodem pro vytvoření vlastního hodnocení.



Obrázek 15 Orientace hodnocených lamel na desce

7 ANALÝZA VYROBENÝCH SÉRIÍ

Pro vypracování metrologicky-statistického postupu hodnocení drsnosti byl zvolen postup, který se skládá ze dvou fází:

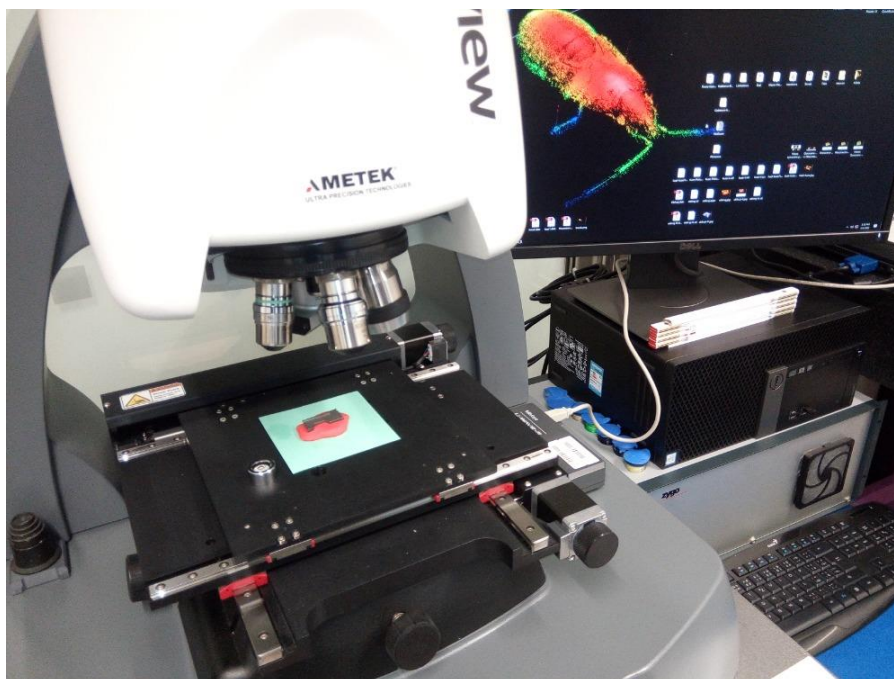
- přípravná fáze – nastavení přístroje a samotné měření,
- výsledná fáze – zpracování a vyhodnocení měření.

7.1 Přípravná fáze

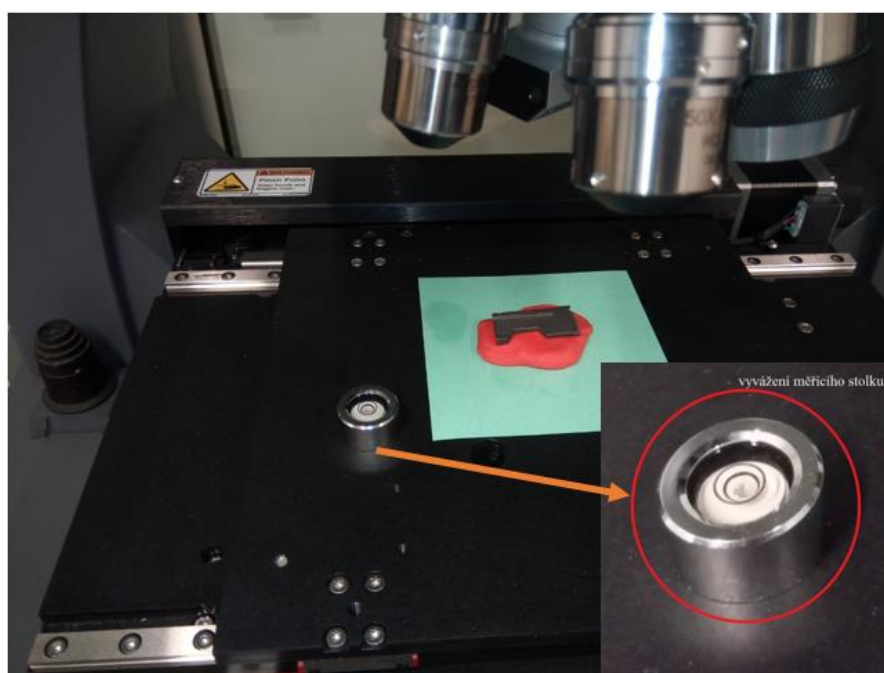
Prvním krokem v přípravné fázi je kontrola laboratorních podmínek v místnosti, konkrétně kontrola vhodné teploty (obr. 16).



Obrázek 16 Kontrola laboratorních podmínek



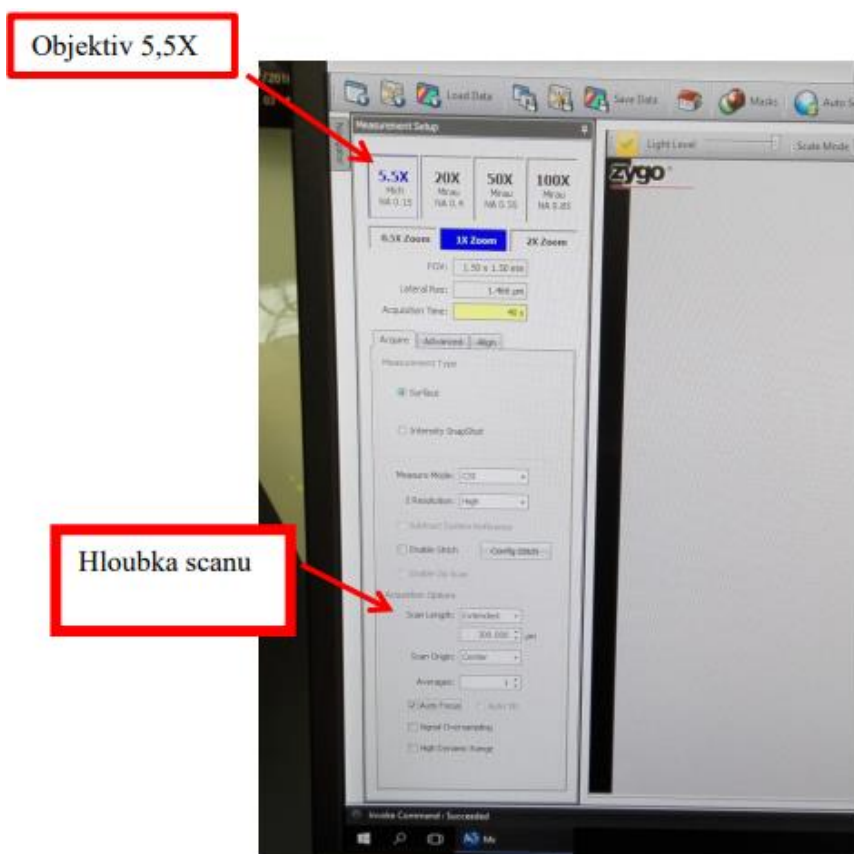
Obrázek 17 Umístění vzorku na měřicí stůl



Obrázek 18 Vytváření měřicího stolku



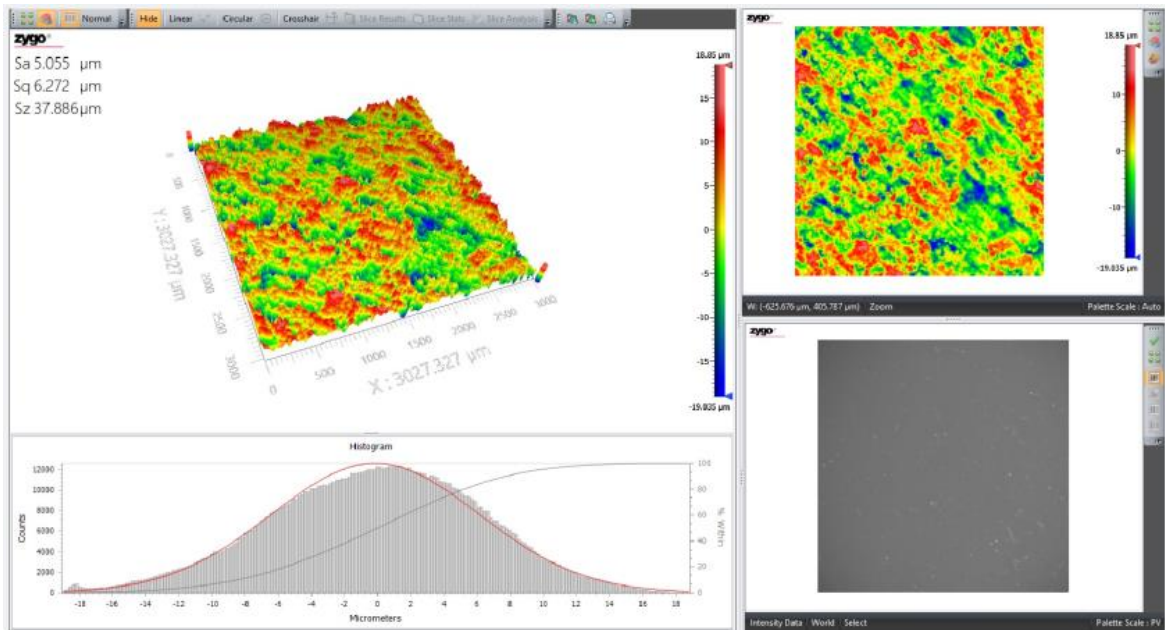
Obrázek 19 Nastavení filtru pro měření



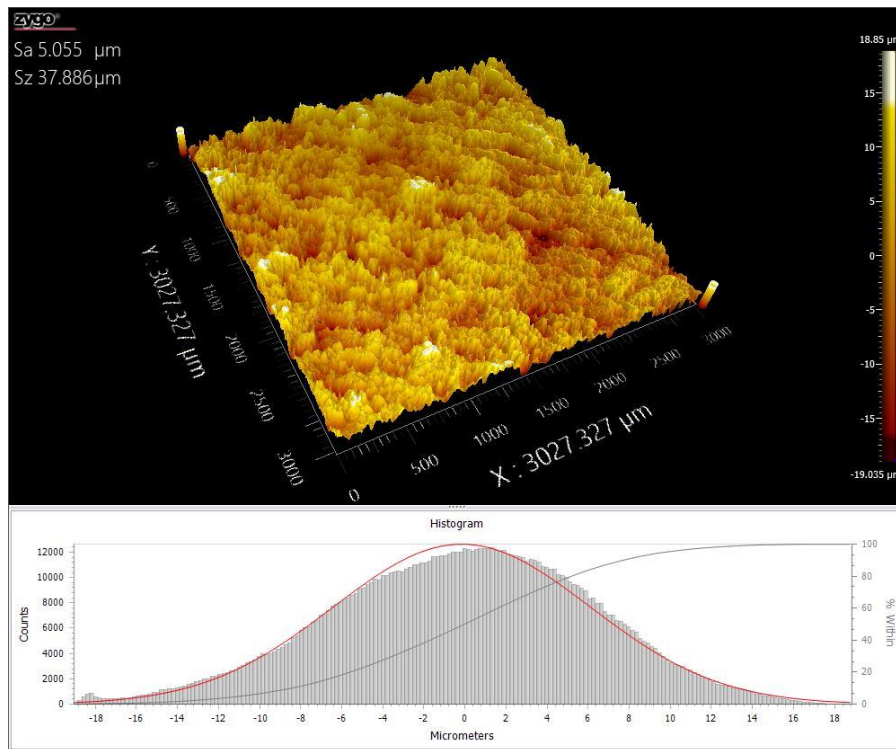
Obrázek 20 Nastavení měření

7.2 Výsledná fáze

V rámci výsledné fáze proběhlo vyhodnocení výsledných měření (obr. 21 a 22) a jejich další statistické zpracování. Jak bylo uvedeno v úvodu praktické části, byly vyrobeny dvě série A a B. Obě série byly vyhodnoceny za pomoci statistických metod.



Obrázek 21 Výsledné měření



Obrázek 22 Detail výsledku měření včetně Gaussovy křivky

7.2.1 Výsledky ze série nazvané „Série A“

Série typu A byla klasifikována bez závady. Požadovaná drsnost povrchu Sa byla menší nebo rovna 8um (obr. 23).

Vlastní postup při vlastní kontrole probíhal: každá lamela dostala označení podle zavedeného souřadnicového systému (obr. 15).

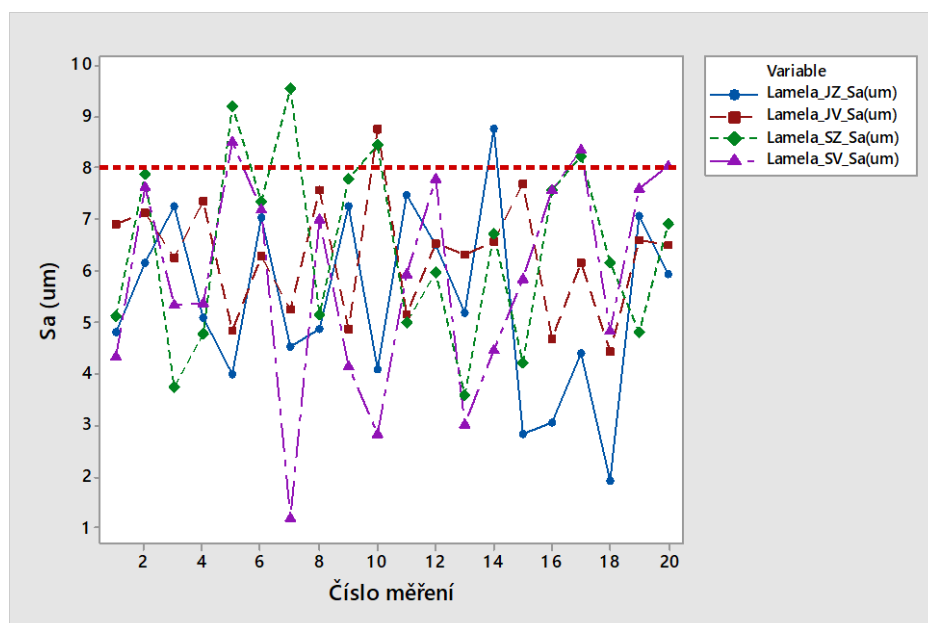
	Lamela_JZ_Sa(um)	Lamela_JV_Sa(um)	Lamela_SZ_Sa(um)	Lamela_SV_Sa(um)
1	4,79	6,90	5,12	4,33
2	6,16	7,11	7,87	7,61
3	7,26	6,25	3,72	5,35
4	5,09	7,33	4,77	5,36
5	3,98	4,84	9,21	8,49
17	4,40	6,14	8,21	8,34
18	1,91	4,41	6,16	4,83
19	7,07	6,58	4,80	7,60
20	5,94	6,48	6,91	8,02

Obrázek 23 Naměřené parametry drsnosti

Dále byla lamela proměřena na 3D bezkontaktním skenerem NewView™ 8000 s opakovatelností $n = 20$.

Následně byl proveden graf časové řady, který zohledňoval jednotlivá měření vůči sobě a měl za úkol zjistit, zda při měření nevznikaly nepřijatelné trendy nebo hrubé chyby.

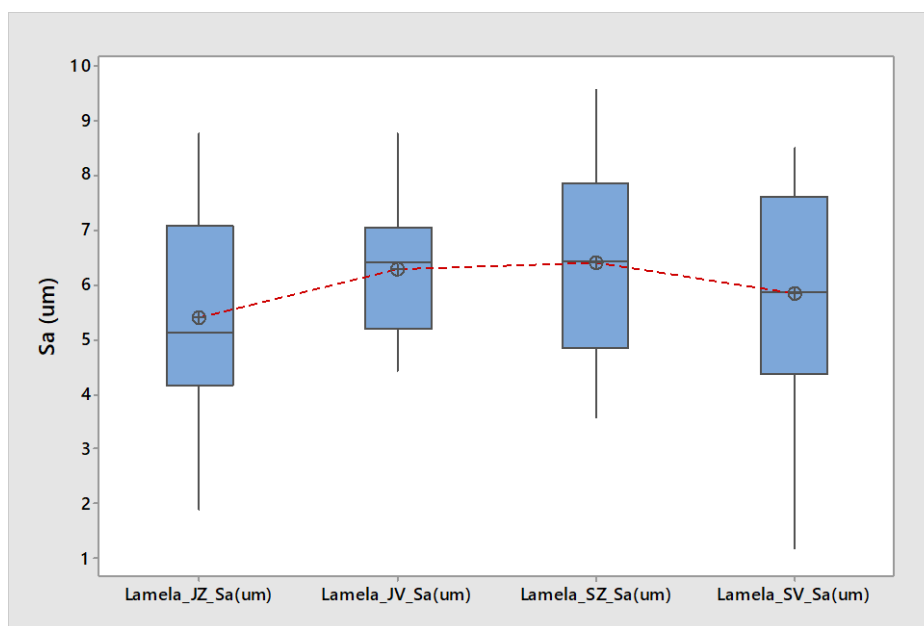
Již z tohoto grafu (obr. 24) je zřejmé, že určitý počet měření je vyšší než povolená hranice.



Obrázek 24 Graf časových řad

Vzniká otázka, zda lamely JZ, JV, SZ a SV mají statisticky významné rozdíly v rozptylech a aritmetických průměrech parametrů Sa.

Dále je nutno vizuálně zobrazit jednotlivé kvartily naměřených parametrů Sa kontrolních lamel za účelem posouzení rozptylů jednotlivých kvartilech. Data je nyní možné posoudit, zda se v nich nenachází vychýlené hodnoty.

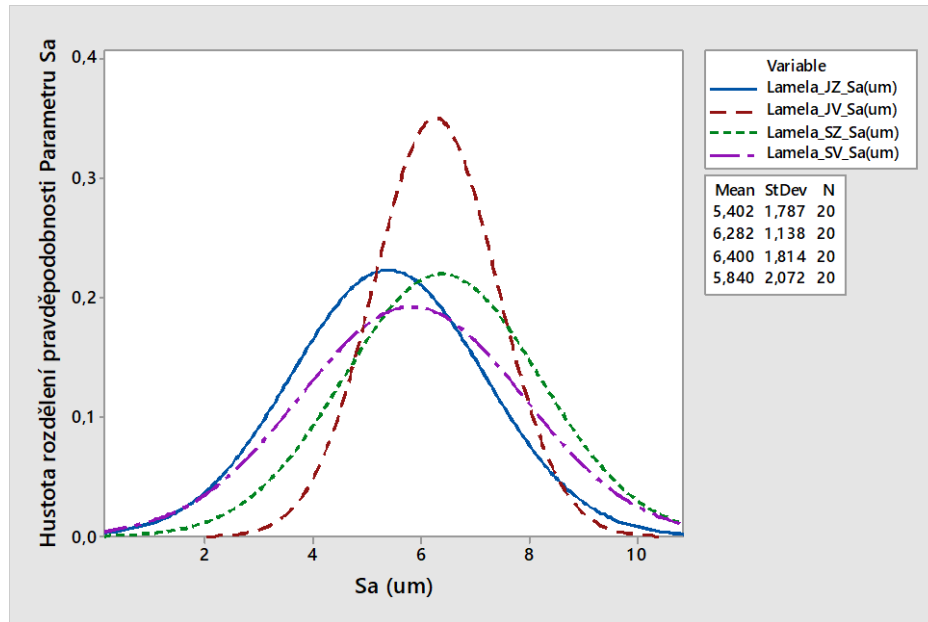


Obrázek 25 Boxplotový diagram série A

Z výše uvedeného grafu (obr. 25) je možno vyčíst, že existují značné rozptyly, ale vychýlení se nezdá významné.

Dále se pokračuje zobrazením grafu hustot rozdělení pravděpodobností parametrů Sa jednotlivých lamel.

Poté se prakticky provede kontrola pomocí grafu normálního rozdělení (obr. 26), čímž se obdrží představa o poloze aritmetických průměrů a velikosti směrodatných odchylek jednotlivých povrchů.



Obrázek 26 Graf normálního rozdělení

Zdá se, že lamela JV se významně odlišuje od ostatních. Je tedy nutno provést testování rozptylů a následně aritmetických průměrů dle tzv. metodiky jednocestné ANOVY. Aplikuje se metodika jednocestná ANOVA.

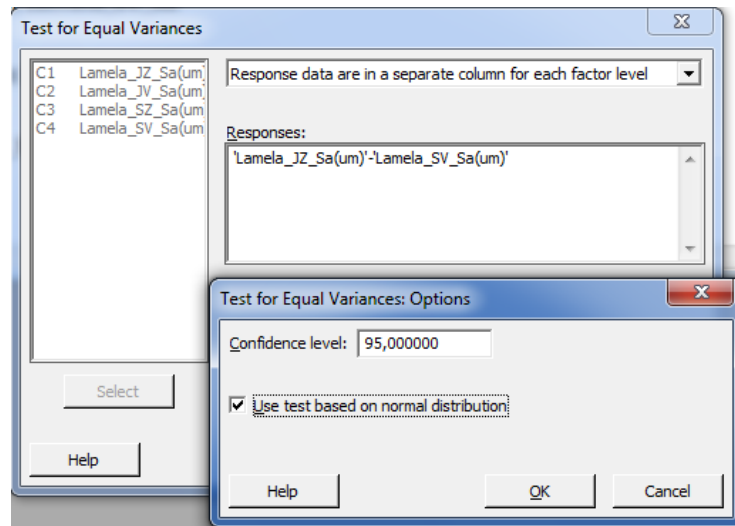
➤ Test rozptylů (obr. 27 a 28):

Stanoví se nulová a alternativní hypotéza a taktéž chybu prvního druhu $\alpha = 0,05$.

$$H_0: \sigma_{Sa}^2(JZ) = \sigma_{Sa}^2(JV) = \sigma_{Sa}^2(SZ) = \sigma_{Sa}^2(SV)$$

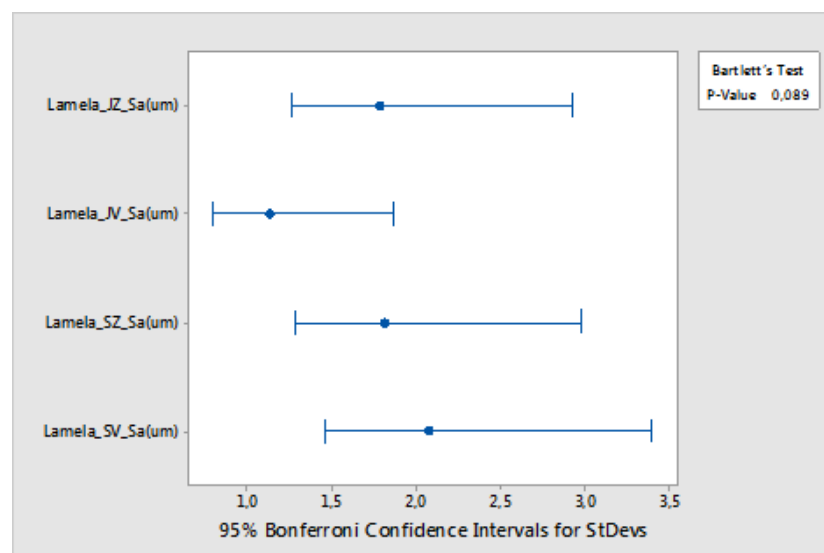
$$H_a: \text{NON}$$

$$1-\alpha = 0,95$$



Obrázek 27 Normální rozdělení

➤ Výsledek



Obrázek 28 Bartletův test

Null hypothesis – All variances are equal

Nulová hypotéza – všechny varianty jsou si rovny

Alternative hypothesis At least one variance is different

Alternativní hypotéza – nejméně jedna varianty je odlišná

Significance level $\alpha = 0,05$

Chyba prvního druhu stanovena operátorem na úroveň 5%

Tabulka 1 Test rozptylů - série A

Sample	N	StDev	CI
Lamela_JZ_Sa (um)	20	1,78702	(1,26657; 2,92657)
Lamela_JV_Sa (um)	20	1,13793	(0,80652; 1,86356)
Lamela_SZ_Sa (um)	20	1,81429	(1,28590; 2,97123)
Lamela_SV_Sa (um)	20	2,07226	(1,46873; 3,39369)

➤ Výsledek:

P-Value = 0,089

Protože $p > 0,05$ ($p = 0,089$), na základě provedeného testu s pravděpodobnosti $1-\alpha = 0,95$ nelze zamítnout H_0 .

A tím je platné tvrzení, že rozptyly parametru Sa na lamelách JZ, JV, SZ a SV se statisticky **významně neliší**.

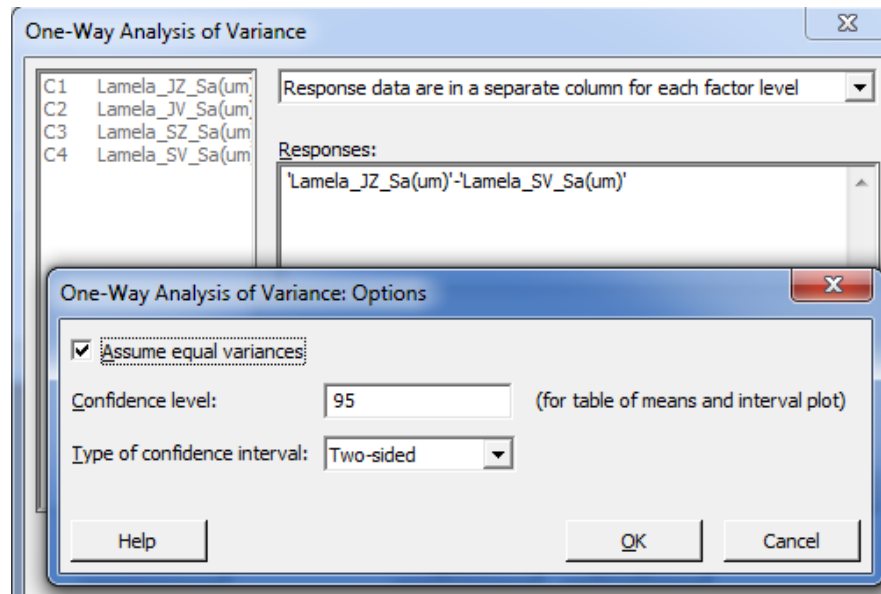
➤ Nyní následuje vlastní jednocestná ANOVA test (obr. 29)

Stanoví se nulová a alternativní hypotéza a též chybu prvního druhu $\alpha = 0,05$

$$H_0: \mu_{Sa(JZ)} = \mu_{Sa(JV)} = \mu_{Sa(SZ)} = \mu_{Sa(SV)}$$

$$H_a: \text{NON}$$

$$1-\alpha=0,95$$



Obrázek 29 Jednocestná Anova

Null hypothesis - All means are equal

Nulová hypotéza – všechny průměry jsou si rovny

Alternative hypothesis At least one mean is different

Alternativní hypotéza – nejméně jeden průměr je odlišný

Significance level $\alpha = 0,0$

Equal variances were assumed for the analysis.

Chyba prvního druhu stanovena operátorem na úroveň 5%

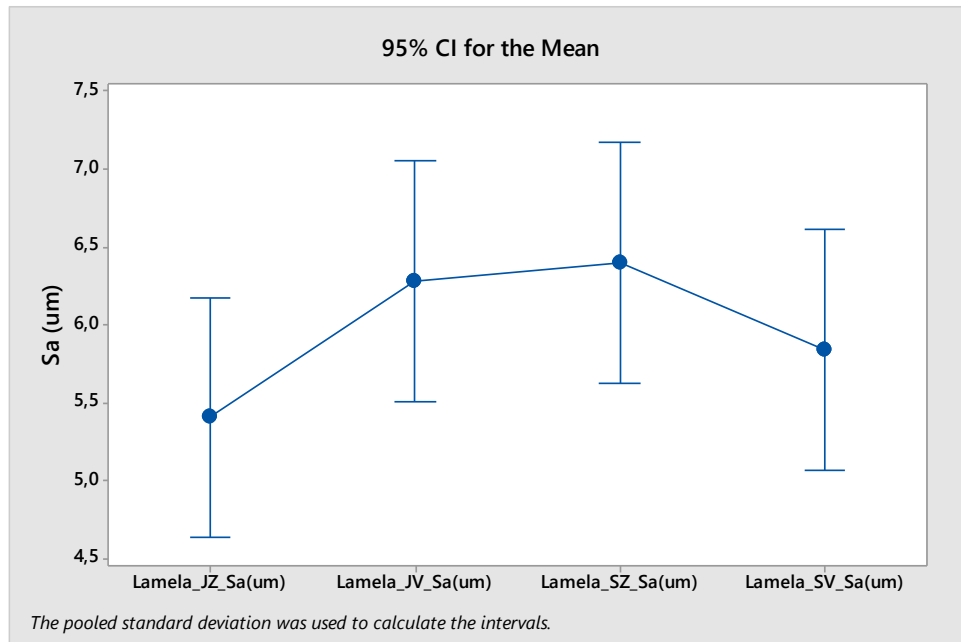
Tabulka 2 Jednocestná ANOVA – série A

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
Lamela_JZ_Sa (um)	20	5,402	1,787	(4,629; 6,176)
Lamela_JV_Sa (um)	20	6,282	1,138	(5,508; 7,056)
Lamela_SZ_Sa (um)	20	6,400	1,814	(5,627; 7,174)
Lamela_SV_Sa (um)	20	5,840	2,072	(5,066; 6,614)

➤ Výsledek:

P-Value = 0,258

Pooled StDev = 1,73740



Obrázek 30 Graf průměrů

Protože $p > 0,05$ ($p = 0,258$), na základě provedeného testu s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ nemohu zamítnout H_0 .

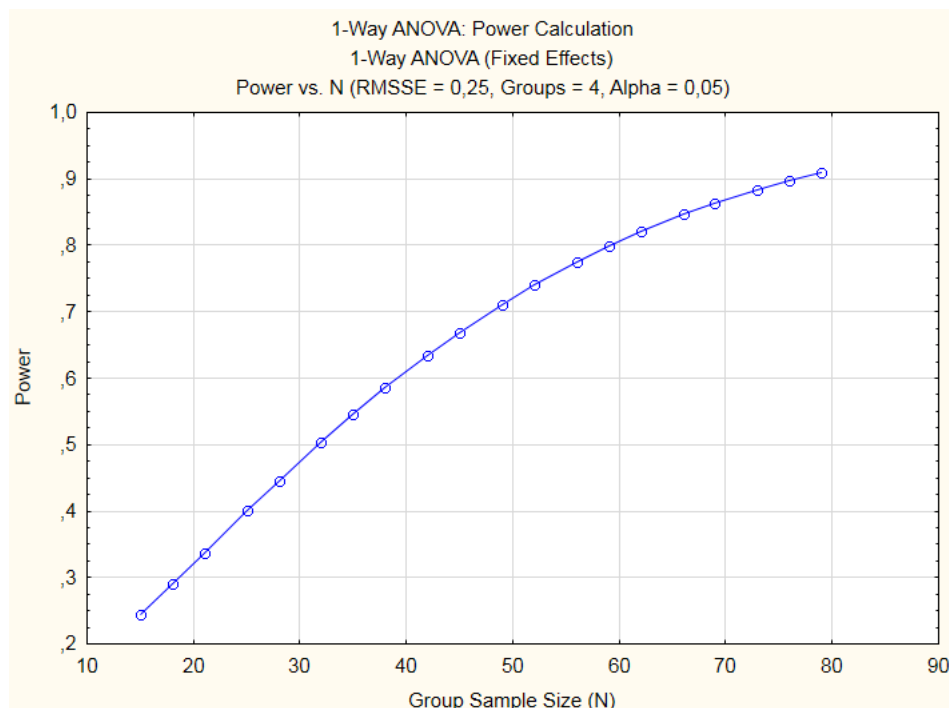
Lze tedy tvrdit, že aritmetické průměry parametru Sa na lamelách JZ, JV, SZ a SV se statisticky významně neliší (obr. 30).

Zcela prakticky to znamená, že tisk se podařil a aritmetické průměry parametru Sa kontrolních lamel kolísají pouze náhodně.

Z grafu uvedeného níže (obr. 31) plyne jeden základní problém.

Při opakovatelnosti $n = 20$ vzorků ve skupině dle grafu lze konstatovat, že síla výše uvedené metody Anova, a tedy nezamítnutí H_0 má sílu pouze mírně nad 30 %.

Toto je však malá síla tvrzení s ohledem na fakt, že při vlastních měření byly nalezeny nepřilíš četné a však existující hodnoty Sa přesahující povolenou hranici 8 μm .



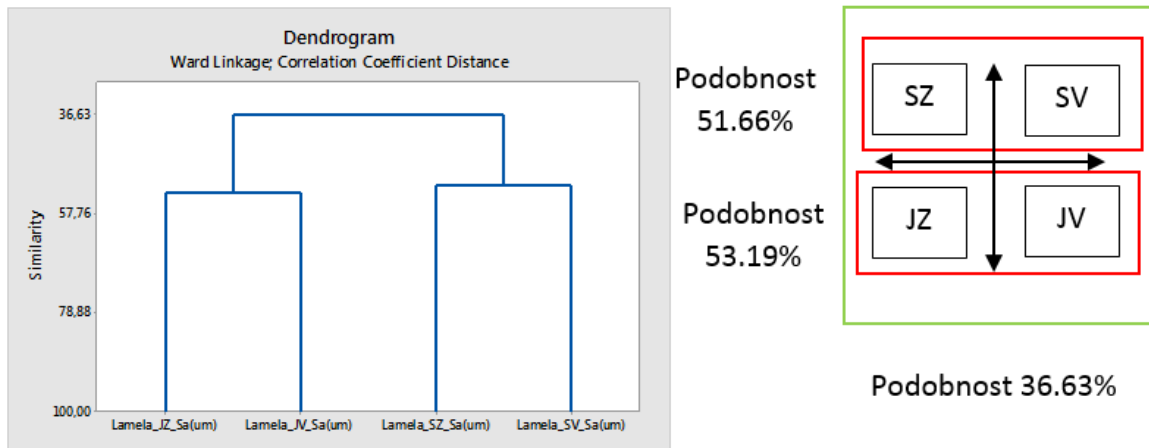
Obrázek 31 Jednocestná Anova

Graf jednocestné Anovy (obr. 31) byl vytvořen v programu STATISTICA verze 10.0.

Bude ve čtyřech skupinách (tedy lamely JZ, JV, SZ a SV) po 20-ti měření, síla tvrzení, že odhady aritmetických průměrů parametru S_a pro lamely JZ, JV, SZ a SV, je menší než 35%.

To znamená, že test je relativně slabý a aby měl alespoň 80 % spolehlivost, počet měření ve skupinách by se musel zvýšit na přibližně 60 měření. To však z hlediska časového, finančního i velikostního není možné.

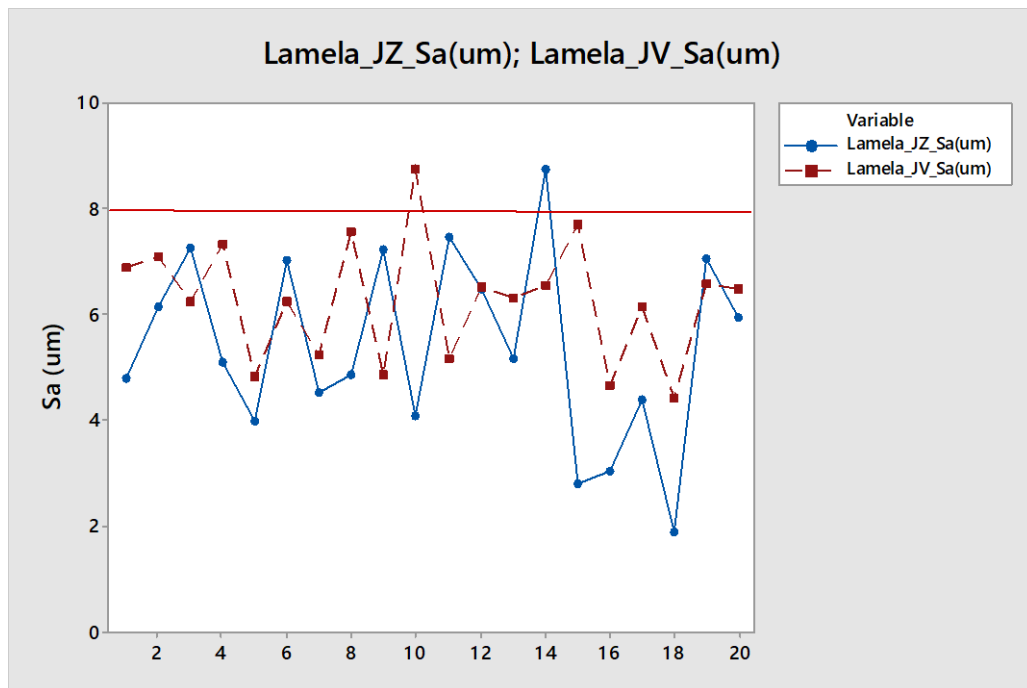
Proto je nutno postupovat odlišnou metodou a pokusit se zjistit, jaká je podobnost kontrolních lamel. K tomuto se využije Clusterová analýza - Metoda Wardova (obr. 32).



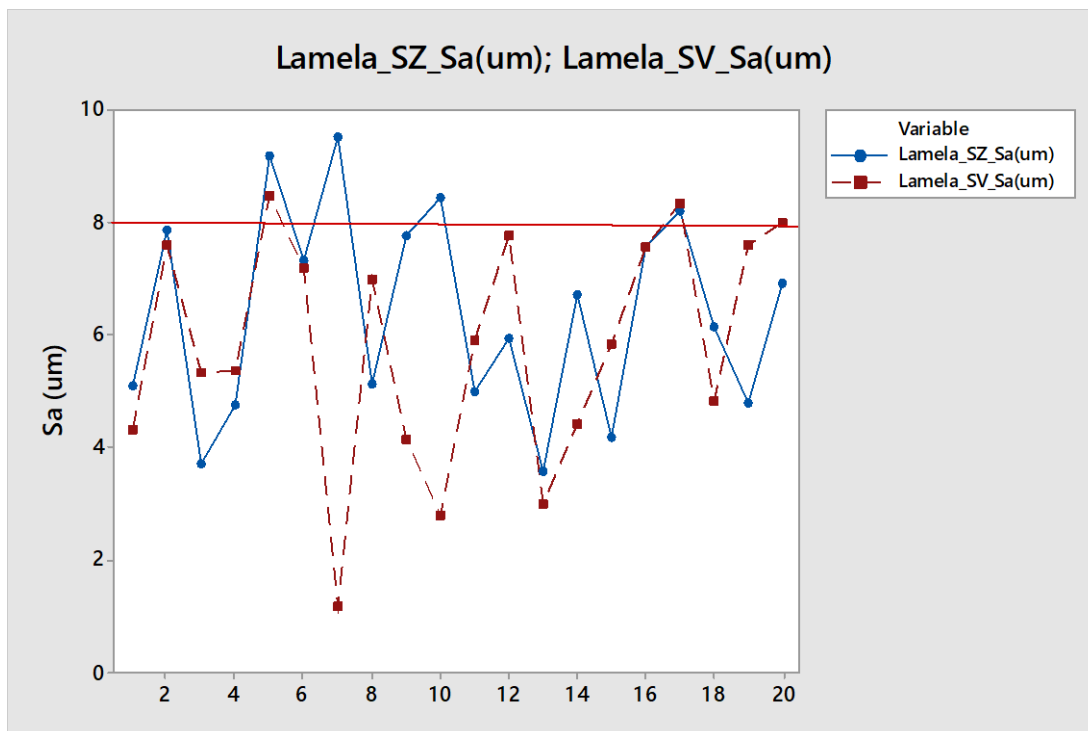
Obrázek 32 Dendrogram pro sérii A

Na rozdíl od metody ANOVA je zde vidět, že podobnost lamel tisknutých na SEVERU (obr. 34) je rozdílná od tisku na JIHU (obr. 33).

Toto je zcela jasně vidět z grafu naměřených parametrů Sa pro SEVER a JIH



Obrázek 33 Měření na JIHu



Obrázek 34 Měření na SEVERu

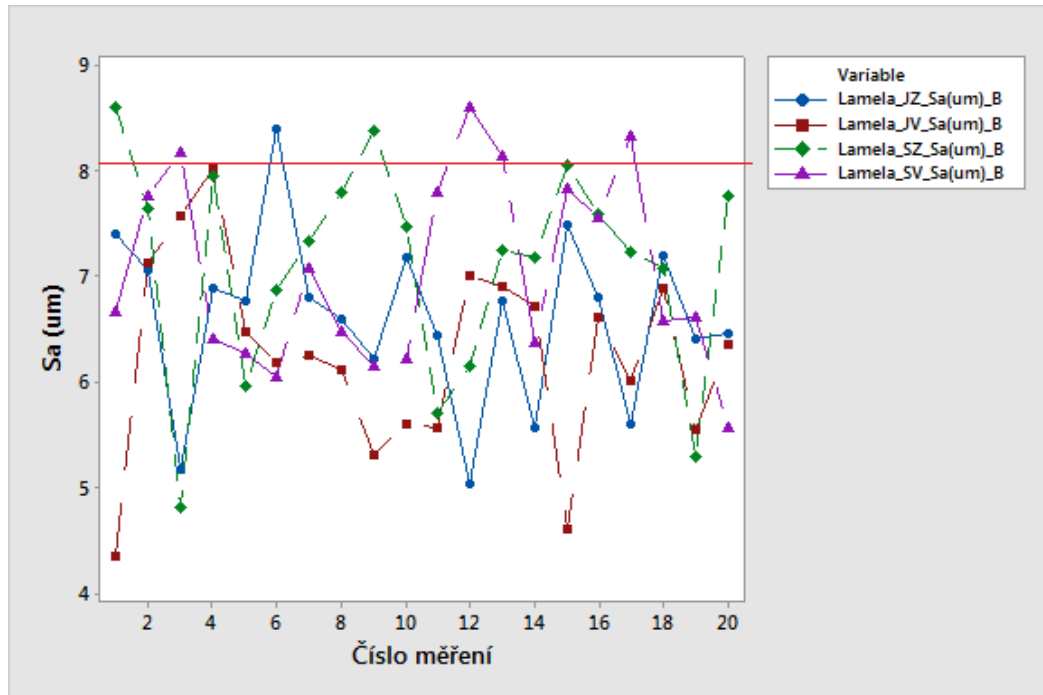
Sever je i více problematický z hlediska překročení limitního parametru $Sa \leq 8$.

7.2.2 Výsledky ze série nazvané „Série B“

Série B byla dle s dostupných informací z hlediska tvaru a počtu stejná jako série A, ale byly u ní změněny tiskové parametry. Obdržená informace spočívala pouze ve faktu, že došlo ke změně technologických podmínek bez bližšího určení.

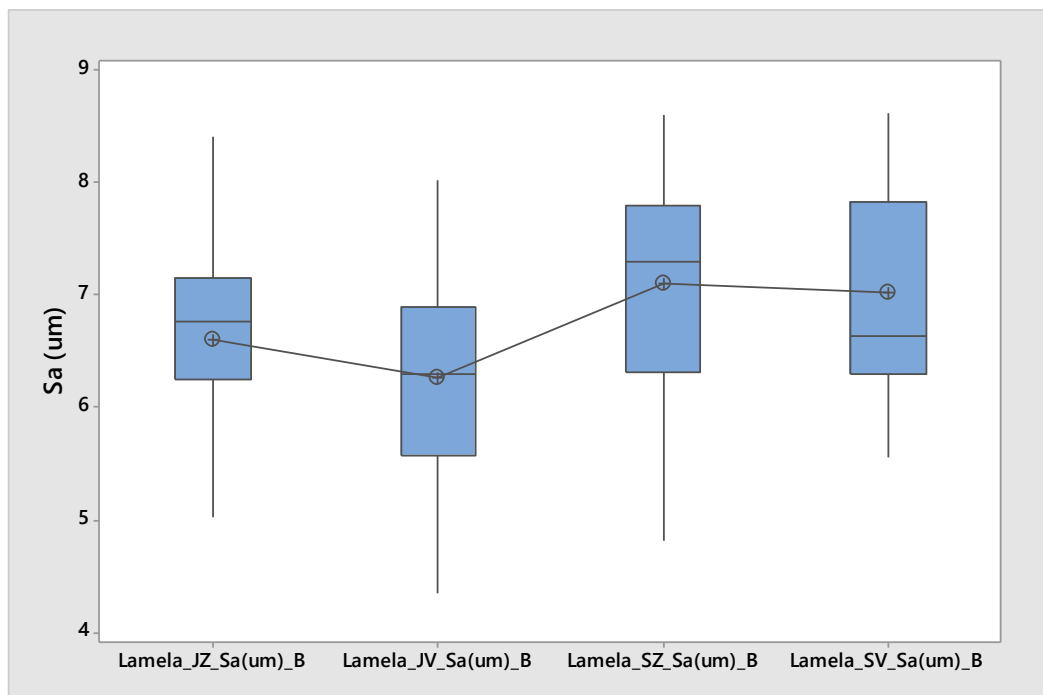
Parametr Sa , jednotky μm , opakovatelnost na lamele $n=20$

Diagram časové řady (obr. 35) ukazuje, že určitý počet měření je vyšší než povolená hranice, navíc se zdá, že parametry lamely SZ a lamely SV jsou posunuty směrem k horní hranici indikující povolenou hodnotu $Sa = 8 \mu\text{m}$

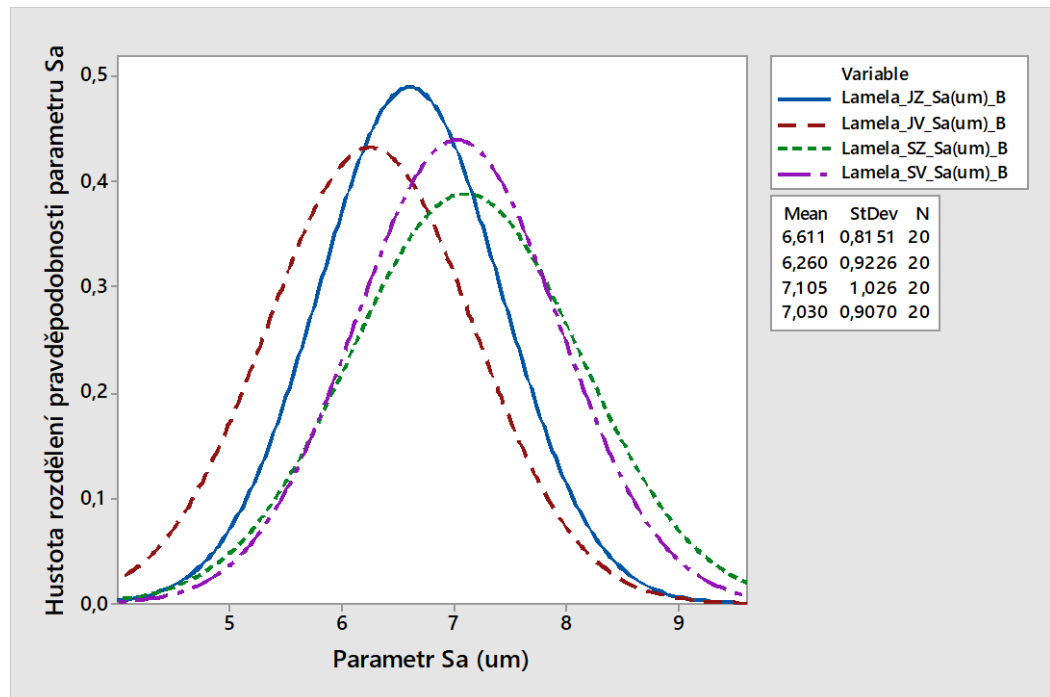


Obrázek 35 Graf časových řad

Boxplotový diagram (obr. 36) tuto domněnku nevyklučuje, a navíc se zdá, že u těchto lamel jsou i významnější rozptyly.



Obrázek 36 Boxplotový diagram série B



Obrázek 37 Graf normálního rozdělení

Skutečně se zdá, že lamela SZ a Lamela SV je posunutá směrem ke kladným hodnotám.

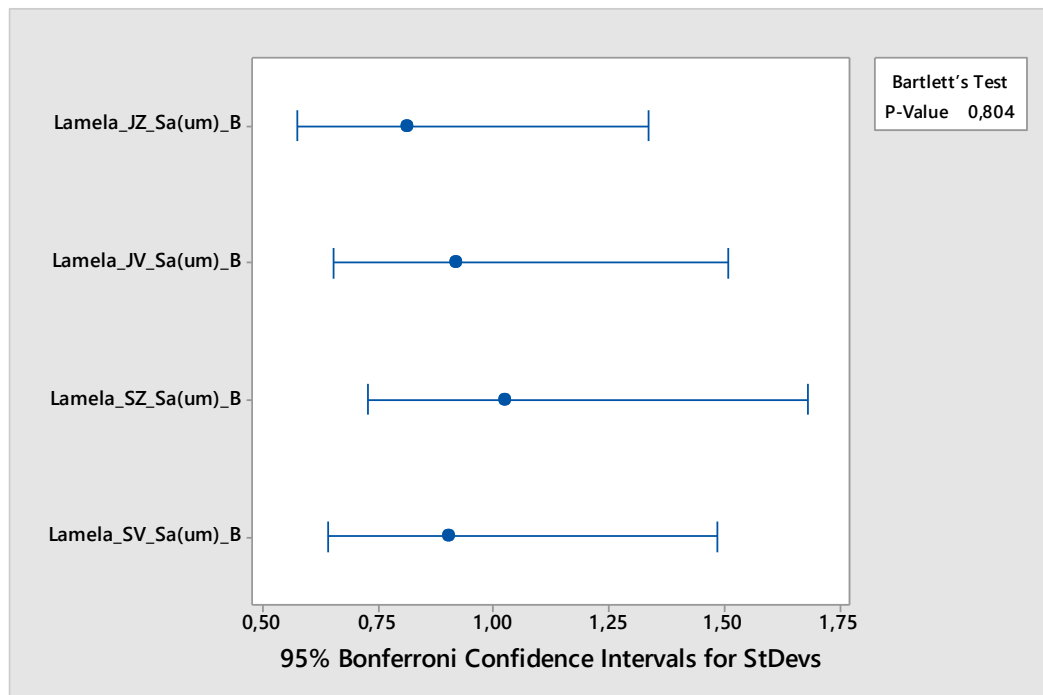
Následuje tedy aplikace metodiky ANOVA jednocestná.

➤ Test rozptylů (obr. 38):

$$H_0: \sigma_{Sa(JZ)}^2 = \sigma_{Sa(JV)}^2 = \sigma_{Sa(SZ)}^2 = \sigma_{Sa(SV)}^2$$

$H_a: NON$

$1-\alpha=0,95$



Obrázek 38 Bartletův test

Protože $p > 0,05$ ($p = 0,804$), na základě provedeného testu s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ nemohu zamítnout H_0 .

Tvrdím tedy, že rozptyly parametru Sa na lamelách JZ, JV, SZ a SV se statisticky významně neliší.

Nyní následuje vlastní jednocestný ANOVA test

➤ jednocestná ANOVA test

$$H_0: \mu_{Sa(JZ)} = \mu_{Sa(JV)} = \mu_{Sa(SZ)} = \mu_{Sa(SV)}$$

$H_a: NON$

$$1 - \alpha = 0,95$$

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis At least one mean is different

Significance level $\alpha = 0,05$

Equal variances were assumed for the analysis.

P-Value = 0,016

Tabulka 3 Jednocestná ANOVA – série B

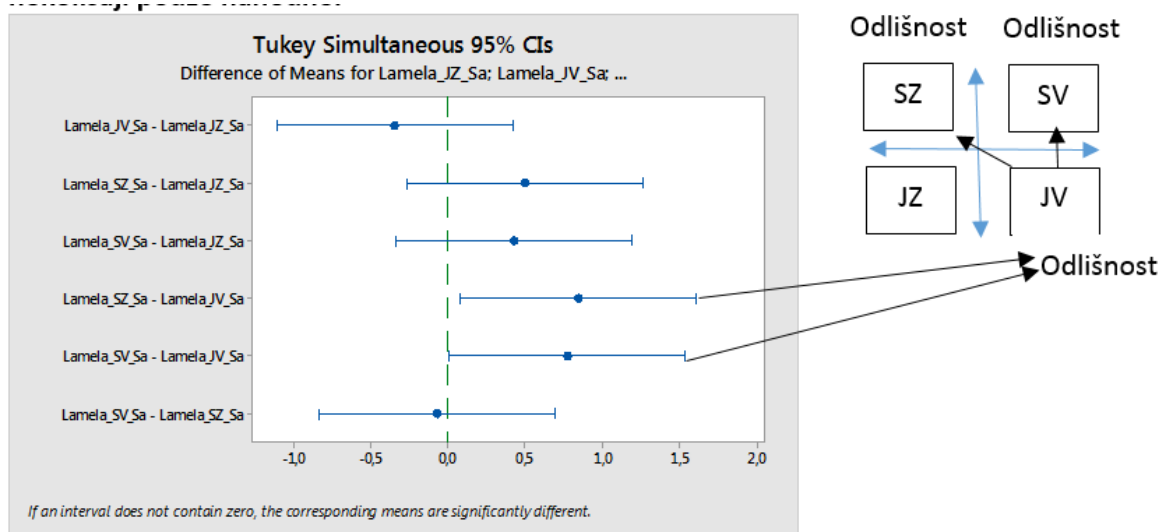
Factor	N	Mean	StDev	95% CI
Lamela_JZ_Sa (um)	20	6,611	0,815	(6,201; 7,021)
Lamela_JV_Sa (um)	20	6,260	0,923	(5,850; 6,670)
Lamela_SZ_Sa (um)	20	7,105	1,026	(6,695; 7,515)
Lamela_SV_Sa (um)	20	7,030	0,907	(6,620; 7,440)

➤ Výsledek:

Pooled StDev = 0,920787

Protože $p < 0,05$ ($p = 0,016$), na základě provedeného testu s pravděpodobnosti $1 - \alpha = 0,95$ se zamítá H_0 . Je tedy platné tvrzení, že aritmetické průměry parametru Sa na lamelách JZ, JV, SZ a SV se statisticky významně liší.

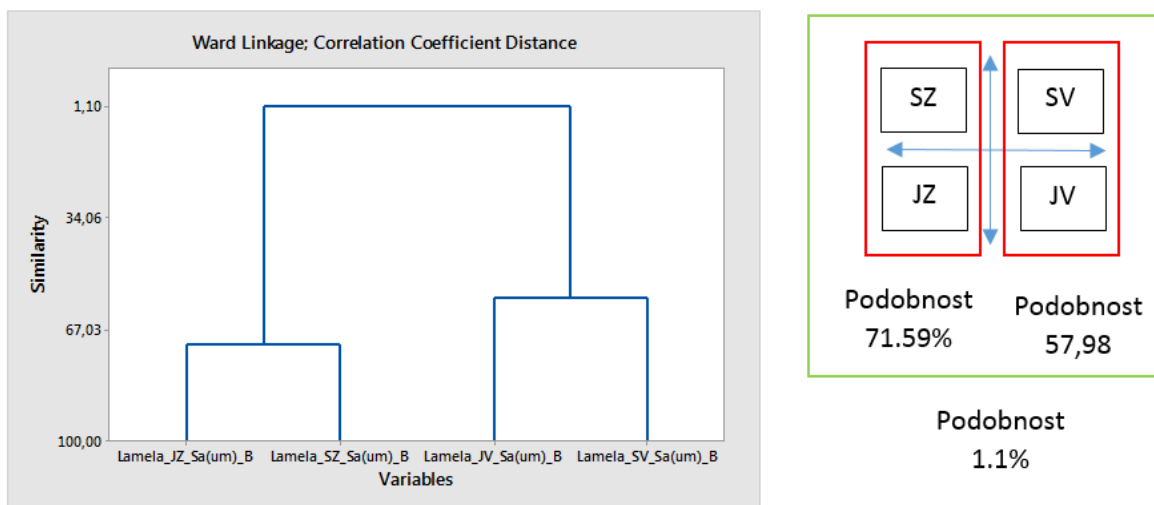
Zcela prakticky to znamená, že tisk je problematický a aritmetické průměry kontrolních lamel nekolísají pouze náhodně.



Obrázek 39 Lamela JV vůči lamele SZ

A zde je vidět (obr. 39), že skutečně lamela JV vůči lamele SZ se liší významně. Dále lamela JV se liší významně od lamely SV.

Clusterová analýza (obr. 40) nachází informaci o podobnosti podrobněji:



Obrázek 40 Clusterová analýza

ZÁVĚR

Účelem předkládané diplomové práce bylo vytvoření metrologicko-statistického postupu pro hodnocení drsnosti povrchu součástí typu lamela, vytvořené pomocí aditivních technologií.

Komplexně byl nejprve implementován vlastní souřadnicový systém na geografické bázi pro jednoznačné určení polohy tzv. testovacích lamel, které slouží pro hodnocení drsnosti povrchu.

Prvním krokem bylo vždy skenování, za využití 3D skeneru ZYGO NEW VIEW 8000, kde charakteristická skenovaná plocha byla zvolena 3 mm x 3mm. Po aplikaci příslušných 3D filtrů a vypuštění vlnitosti, byl vyhodnocen parametr drsnosti S_a , který byl ve shodě s ISO 25178.

Pro zajištění dostatečné opakovatelnosti bylo skenování provedeno 20x, pro každou testovací lamelu ze série A i série B.

Dalším krokem byla kontrola vzniku systematických trendových složek při skenování, a dále přítomnost hrubých chyb. K tomuto účelu byl využit graf časové řady měření ve smyslu EDA analýzy. Poté následoval test normálního rozdělení a rozptylů v kvartilech.

Klíčovou částí této práce bylo využití statistické techniky jednocestná ANOVA s konfidenční úrovní $1-\alpha=0,95$. Po stanovení nulové a alternativní hypotézy a následném provedení výpočtu, následoval závěr stanovený dle hodnoty p .

Procentuální podobnost povrchů lamel byla finálně určena dle vícerozměrné statistické metody Clustrová analýza, konkrétně Wardovou metodou.

Touto metodikou byly nalezeny problémy s podobností povrchu kontrolních lamel z hlediska drsnosti, konkrétně parametru S_a , i když nejsou známy podmínky vlastního tisku.

Navržená metoda tedy demonstruje, jak je možno v provozních podmínkách určit kvalitu a podobnost součástí typu lamela, bez znalosti přesných technologických podmínek jejich tisku, pouze na základě skenování a hodnocení amplitudového parametru S_a .

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SAVINI, A. a G.G. SAVINI. A short history of 3D printing, a technological revolution just started. *2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON)* [online]. IEEE, 2015, 1-8 [cit. 2020-03-13]. DOI: 10.1109/HISTELCON.2015.7307314. ISBN 978-1-5090-0065-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7307314/>.
- [2] LOU, Alex a Carol GROSVENOR. Selective Laser Sintering, Birth of an Industry. In: *The University of Texas at Austin* [online]. Texas, 2012, 06.12.2012 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry>.
- [3] DECKARD, Carl R. *Method and apparatus for producing parts by selective sintering*. 1986. Spojené státy americké. US4863538 Patent. Uděleno 05.09.1989. Zapsáno 17.10.1986. Dostupné také z: <https://www.google.com/patents/US4863538>
- [4] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [5] HUMÁR, Anton. *Technologie I - Technologie obrábění - 3. část*. Brno, 2005. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. Vysoké učení technické v Brně.
- [6] MAEDA, K. a T.H.C. CHILDS. Laser sintering (SLS) of hard metal powders for abrasion resistant coatings. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2004, 149(1-3), 609-615 [cit. 2020-05-13]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.02.024. ISSN 09240136.
- [7] GRINGER. SLS Schematic. In: *Wikimedia Commons* [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation, 6 December 2010, last edited on 13 March 2019, at 01:44. [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SLS_schematic.svg.
- [8] ANGELO, P.C. a R. SUBRAMANIAN. *Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications*. New Delhi: PHI Learning Pvt., 2008. ISBN 978-81-203-3281-2.
- [9] 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. 52 s. Třídící znak: 01 4451.

- [10] ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 1999. 24 s. Třídící znak: 01 4450.
- [11] ČSN EN ISO 4288. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 1999. 16 s. Třídící znak: 01 4449.
- [12] BS ISO 16269-4:2010. Statistical interpretation of data — Part 4: Detection and treatment of outliers. Londýn: British Standards Institution. 66 s.
- [13] GRUBBS, Frank E. *Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples*. *Technometrics* [online]. 1969, 11(1), 1-21 [cit. 2020-05-13]. DOI: 10.1080/00401706.1969.10490657. ISSN 0040-1706. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00401706.1969.10490657>
- [14] BARNETT, Vic a Tobyx LEWIS. *Outliers in Statistical Data, 3rd Edition*. 3. Kalifornská univerzita: Wiley, 1994. ISBN 978-0-471-93094-5.
- [15] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Interaktivní statistická analýza dat*. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2173-9.
- [16] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Kompendium statistického zpracování dat*. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2196-8.
- [17] WHITEHOUSE, D. J. *Handbook of surface and nanometrology*. Second edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2011], xxiii, 975 s. ISBN 9781420082012.
- [18] SHESKIN, David. *Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures*. 3rd ed. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, c2004, xxxiii, 1193 s. ISBN 1584884401.
- [19] LEHMANN, Enrich L. a Joseph P. ROMANO. *Testing Statistical Hypotheses*. 3. New York: Springer, 2005. ISBN 978-0-387-27605-2.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Ra	Střední aritmetická drsnost
Rmr	Materiálový poměr profilu
Rp	Největší výška výstupku profilu
Rq	Střední kvadratická úchylka profilu drsnosti
Rt	Celková výška profilu
Rv	Největší hloubka prohlubně profilu
Rz	Největší výška profilu
Sa	Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu
Sq	Základ průměrné výšky povrchu
Ssk	Šikmost omezené stupnice povrchu
Sku	Špičatost omezené stupnice povrchu
2D	Dvojměrný prostor
3D	Trojměrný prostor
H0	Nulová hypotéza
HA	Alternativní hypotéza
M	Medián
mm	Milimetr
μm	Mikrometr
Fe	Železo
C	Uhlík
Ni	Nikl
Co	Kobalt
Mo	Molybden
Ti	Titan
Al	Hliník
Cr	Chrom
Cu	Měď
Mn	Mangan
Si	Křemík
P	Fosfor
S	Síra
Hm%	Hmotnostní procento

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Vývoj přesného obrábění [4].....	8
Obrázek 2 Tabulka přesného obrábění [5].....	9
Obrázek 3 Selektivní laserový slinovací proces [7].....	11
Obrázek 4 Výroba kovového prášku [zpracováno dle 8]	13
Obrázek 5 Parametry profilu povrchu [zpracováno dle 9,10,11]	14
Obrázek 6 Největší výška výstupního profilu [10].....	15
Obrázek 7 Průměrná výška prvků profilu [10]	15
Obrázek 8 Celková výška profilu [10].....	16
Obrázek 9 Aritmetická úchylka Ra [10]	16
Obrázek 10 Diagramy rozptýlení (a) normální, (b) asymetrické [15]	18
Obrázek 11 Krabicový graf (a) symetrické rozdělení, (b) asymetrické rozdělení [15]	18
Obrázek 12 (a)histogram normálního rozdělení, (b) asymetrické rozednění [15].....	19
Obrázek 13 Diagram pro výběr správného testu [zpracováno dle 14]	19
Obrázek 14 Tabulka typů chyb [16]	21
Obrázek 15 Orientace hodnocených lamel na desce.....	25
Obrázek 16 Kontrola laboratorních podmínek	26
Obrázek 17 Umístění vzorku na měřicí stůl	27
Obrázek 18 Vyvážení měřícího stolku.....	27
Obrázek 19 Nastavení filtru pro měření	28
Obrázek 20 Nastavení měření.....	28
Obrázek 21 Výsledné měření.....	29
Obrázek 22 Detail výsledku měření včetně Gaussovy křivky	29
Obrázek 23 Naměřené parametry drsnosti.....	30
Obrázek 24 Graf časových řad.....	30
Obrázek 25 Boxplotový diagram série A	31
Obrázek 26 Graf normálního rozdělení	32
Obrázek 27 Normální rozdělení.....	33
Obrázek 28 Bartletův test	33
Obrázek 29 Jednocestná Anova	35
Obrázek 30 Graf průměrů	36
Obrázek 31 Jednocestná Anova.....	37
Obrázek 32 Dendrogram pro sérii A.....	38
Obrázek 33 Měření na JIHu.....	38
Obrázek 34 Měření na SEVERu.....	39

Obrázek 35 Graf časových řad.....	40
Obrázek 36 Boxplotový diagram série B.....	40
Obrázek 37 Graf normálního rozdělení	41
Obrázek 38 Bartletův test	42
Obrázek 39 Lamela JV vůči lamele SZ	43
Obrázek 40 Clusterová analýza	44

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Test rozptylů - série A	34
Tabulka 2 Jednocestná ANOVA – série A	35
Tabulka 3 Jednocestná ANOVA – série B	43