

Statistické hodnocení obtížně měřitelných povrchů

Radek Szkandera



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Radek Szkandera
Osobní číslo:	T24853
Studijní program:	B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Statistické hodnocení obtížně měřitelných povrchů

Zásady pro vypracování

- Literární rešerše k problematice hodnocení povrchů.
- Statistické nalezení a stanovení diferencí mezi vyhodnocováním povrchů ve shodě s ISO 21920-1, ISO 21920-2 a ISO 25178.
- Proveďte kontrolu povrchů pomocí mikroskopu.
- Dále bude udělána analýza povrchů na bezkontaktním profiloměru.
- Následně budou naměřená data drsnosti povrchu statisticky hodnocena.

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

Seznam doporučené literatury:

1. ČSN EN ISO 21920-1: Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Profil – Část 1: Indikace textury povrchu. (2023) (01.06.2023). Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
2. ČSN EN ISO 21920-2: Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Profil – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. (2023) (01.06.2023). Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
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, Jiří MILITKÝ a Martin HILL. *Statistická analýza vícerozměrných dat v příkladech*. Praha: Academia, 2012. Gerstner. ISBN 978-80-200-2071-0

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

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

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

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 10. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- 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 mohu užít 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, považují 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(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Tato Bakalářská práce je zaměřená na problematiku statistické hodnocení obtížně měřitelných povrchů, proto se v teoretické části zabývá tradičními a inovativními obráběcími technologiemi, dále pak standardy a metody pro hodnocení povrchových vlastností a nakonec statickou analýzou měřených dat. V praktické části se provedla analýza povrchu za pomoci bezkontaktního 3D profilometru a získaná data byla statisticky vyhodnocena.

Klíčová slova: tradiční obráběcí technologie, inovativní obráběcí technologie, hodnocení jakosti povrchu, metody hodnocení povrchu, metrologie

ABSTRACT

This Bachelor thesis focuses on the issue of statistical evaluation of difficult to measure surfaces, so in the theoretical part it deals with traditional and innovative machining technologies, as well as standards and methods for evaluation of surface properties and finally static analysis of measured data. In the practical part, the surface was analysed using a contactless 3D profiler and the data obtained was statistically evaluated.

Keywords: traditional machining technologies, innovative machining technologies, surface quality assessment, surface assessment methods, metrology

Tímto bych chtěl moc poděkovat celé své rodině, která mě při studiu povzbuzovala a byla mi oporou.

Chtěl bych také moc poděkovat za povzbuzení, cenné rady, odborné vedení, velkou ochotu a trpělivost mé vedoucí bakalářské práce Ing. Mileně Kubišové, Ph.D.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 PŘEHLED METOD OBRÁBĚNÍ POVRCHU	13
1.1 TRADIČNÍ TECHNIKY OBRÁBĚNÍ	13
1.1.1 Soustružnické procesy	13
1.1.2 Frézovací technologie	13
1.1.3 Techniky vrtání a vyvrtávání	14
1.1.4 Povrchové úpravy broušením.....	15
1.2 INOVATIVNÍ METODY OBRÁBĚNÍ	15
1.2.1 Obrábění vysokorychlostním vodním paprskem	15
1.2.2 Elektroerozivní technologie	16
1.2.3 Metody s elektrojiskrovým efektem.....	16
1.2.4 Technologie ultrazvukového opracování	17
1.2.5 Elektrochemické obrábění povrchu.....	17
1.2.6 Plazmové zpracování materiálů	18
1.2.7 Laserové obráběcí procesy	18
1.2.8 Technologie s elektronovým paprskem	19
1.3 KOMPARATIVNÍ ANALÝZA OBRÁBĚCÍCH METOD	20
1.3.1 Výhody a omezení tradičních technik.....	20
1.3.2 Potencionál inovativních technologií.....	20
1.3.3 Srovnání a aplikace	21
2 STANDARDY PRO HODNOCENÍ POVRCHOVÝCH VLASTNOSTÍ	22
2.1 OBLASTI POUŽITÍ A TECHNICKÉ POŽADAVKY (ČSN EN ISO 21920-1).....	22
2.1.1 Předmět normy a oblast použití.....	22
2.1.2 Volba výrobní technologie	22
2.2 DOPORUČENÍ PRO VÝBĚR TECHNOLOGIE (ČSN EN ISO 21920-2).....	22
2.2.1 Cíl normy – přesná a funkční specifikace	23
2.2.2 Pravidla výběru parametrů	23
2.3 NORMY PRO PLOŠNÉ HODNOCENÍ TEXTURY (ČSN EN ISO 25178)	23
2.3.1 Charakteristika normy	24
2.3.2 Základní parametry plošné struktury	24
3 METODIKY HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU	25
3.1 PARAMETRY PRO POSOUZENÍ DRSNOSTI	25
3.2 KRITÉRIA PRO VOLBU MĚŘÍCÍ TECHNIKY	25
3.3 METODY MĚŘENÍ A ANALÝZA POVRCHU.....	26
3.3.1 Dotyková profilometrie	26
3.3.2 Bezkontaktní optické měření.....	26
3.3.3 Laserová skenovací technika.....	26
3.3.4 Atomová silová mikroskopie (AFM)	26

3.3.5	Stylusová profilometrie	27
3.3.6	3D skenovací metody	27
4	STATISTICKÁ ANALÝZA MĚŘENÝCH DAT	28
4.1	PRŮZKUMNÁ DATOVÁ ANALÝZA (EDA).....	28
4.2	ZÁKLADNÍ STATISTICKÉ METODY	28
4.2.1	Popisná statistika	28
4.2.2	Inferenční analýza	28
4.2.3	Regresní modely.....	28
4.3	VIZUALIZACE A GRAFICKÁ REPREZENTACE DAT	29
4.3.1	Histogramové zobrazení.....	29
4.3.2	Krabicové grafy (boxplot).....	29
4.3.3	Časové řady a bodové graf	29
5	DEFINOVÁNÍ CÍLŮ A VÝZKUMNÝCH OTÁZEK	30
II	PRAKTICKÁ ČÁST	31
6	EXPERIMENTÁLNÍ VYBAVENÍ A MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE	32
7	POPIS VZORKŮ A METODIKY MĚŘENÍ.....	33
8	ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	35
8.1	VYHODNOCENÍ PARAMETRŮ DRSNOSTI (RA)	35
8.2	ANALÝZA HODNOT STRUKTURY (Rz)	42
8.3.1	Vyobrazení 3D struktury vzorků.....	54
8.3.2	Homogenita vs. heterogenita povrchu.....	55
	ZÁVĚR.....	57
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	59
	SEZNAM OBRÁZKŮ	63
	SEZNAM TABULEK.....	65
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	66
	SEZNAM PŘÍLOH.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.

ÚVOD

Posouzení kvality povrchů technických komponent je jednou z klíčových oblastí moderní strojírenské metrologie. V současné době, kdy se strojírenství neustále vyvíjí směrem k automatizaci a zvyšování přesnosti, roste význam metod, které umožňují nejen přesné, ale také opakovatelné měření povrchových vlastností, včetně těch obtížně měřitelných. Tento trend je umocněn zaváděním moderních obráběcích technologií, které jsou schopny produkovat povrchy s výrazně odlišnou texturou a strukturou.

Zajištění vysoké kvality povrchu je v mnoha průmyslových odvětvích nezbytné nejen pro dosažení požadovaných mechanických vlastností, ale také pro zajištění funkčnosti a dlouhodobé životnosti komponent. Například v automobilovém či leteckém průmyslu hraje kvalita povrchů klíčovou roli při zajišťování bezpečnosti a efektivity výrobků. Proto je důležité využívat pokročilé metody hodnocení jakosti povrchu, které poskytují spolehlivé a reprodukovatelné výsledky.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na porovnání metod měření drsnosti povrchů podle standardů ISO 21920-1, ISO 21920-2 a ISO 25178. Cílem je provést systematickou analýzu rozdílů mezi přístupy používanými při hodnocení těchto parametrů a poskytnout přehled o jejich vhodnosti v praxi. Výzkum se opírá o experimentální měření provedené bezkontaktním profilometrem, jehož výstupy budou následně statisticky zpracovány.

Výsledky této práce poskytnou přehled o možnostech a omezeních jednotlivých měřicích metod a jejich aplikovatelnosti v průmyslovém prostředí. Součástí je také kritické hodnocení získaných dat a návrhy na optimalizaci měřicích postupů. Výsledky mohou sloužit jako metodický základ pro další výzkum v oblasti metrologie povrchů a pro praktické využití při kontrole kvality technických součástí.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 PŘEHLED METOD OBRÁBĚNÍ POVRCHU

1.1 Tradiční techniky obrábění

1.1.1 Soustružnické procesy

Soustružení je jednou z nejzákladnějších obráběcích metod, které vytváří kvalitu povrchu pomocí různých obráběcích technik, jako jsou otáčky vřetena, rychlost posuvu a hloubka řezu. Pomocí soustružení lze vyrábět osově symetrické tvary za použití jednobodových nástrojů a tím vytváří povrchovou úpravu válcového obrobku. [1]

Řezná hrana je užívána v jednobodovém nástroji k úběru materiálu. Nástroj je obvykle držen v neměnné situaci, zatímco obrobek se otáčí kolem osy otáčení. U děrování jsou některé nástroje také drženy na středové ose vřetena, která má omezení posuvu a rychlosti. [2]

Na základě tradiční formy soustruhu může být soustružení prováděno ručně, což často vyžaduje neustálý dohled obsluhy. To může být také provedeno automaticky, což nevyžaduje dohled. [2]

Během soustružení se obrobek, tj. kus poměrně tuhého materiálu, jako je dřevo nebo kov, otáčí, zatímco řezný nástroj se kříží podél jedné, dvou nebo tří os pohybu, aby se vytvořily přesné velikosti, jako jsou průměry a dutiny. [2]

Teplota je klíčovým parametrem a příčinou problémů na rozhraní nástrojového dílu při soustružení kovů a slitin. Proto má řízení a vyrovnávání tepla vznikajícího během soustružnických procesů a jeho odvádění značný význam. Když je produkované teplo vyšší než teplo odebrané, dojde v rozhraní k nežádoucímu stavu, který vede k předčasnému opotřebení a selhání soustružnického nástroje. [2]

1.1.2 Frézovací technologie

Frézování je vysoce výkonná metoda, která umožňuje efektivní obrábění plochých i složitě tvarovaných ploch. Během procesu frézování jsou řezný nástroj (frézy), jeho řezné hrany neustále vystaveny opotřebení nástroje, což ovlivňuje přesnost a drsnost zpracování. Je důležité znát aktuální stav řezných hran a rozhodnout se včas. [3]

Frézovací operace zahrnuje použití vícebodových rotačních fréz za účelem odstraňování materiálu z obrobku. Používají se dva hlavní druhy frézovacích operací, které zahrnují čelní frézování a obvodové frézování. Čelní frézování řeže do obrobku rovné povrchy a dutiny s plochým dnem. Lze použít horizontální i vertikální posuvy. Hluboké drážky, zuby ozubených kol a závity jsou řezány obvodovým frézováním. [2]

Obrobek lze přivést do řezného nástroje každou ze dvou metod. Běžné frézování zahrnuje posuv obrobku proti otáčení frézy. U ručních frézek se tento způsob doporučuje. Naproti tomu při stoupacím frézování je obrobek přiváděn v podobném směru jako rotace frézy. Tento způsob je oblíbenou technikou v CNC frézování. [2]

Frézování se často používá jako sekundární proces pro dříve obrobený obrobek. Pomáhá pozvednout vlastnosti a používá se jako závěrečná akce. Ve skutečnosti lze v této fázi přidat prvky jako otvory, kapsy, šterbiny a obrysy. [2]

1.1.3 Techniky vrtání a vyvrtávání

Při vrtání vznikají v obrobci kulaté otvory. Vývoj vrtaček nebo závitořezných strojů se provádí pro vrtání, ale tento proces mohou provádět i frézky. Třísky, které vznikají jako kousky odpadního materiálu, odpadávají z obrobku díky tvaru vrtáku. Tím se obrobek zachrání před zbytky kovů. [2]

Driftování a náběh jsou sníženy umístěním vrtáku kolmo k obrobku. Kromě toho lze před vrtáním přidat středový vrták pro zvýšení přesnosti. Některé vrtací práce vyžadují úhlové vrtání, při kterém jsou zapotřebí specifické nástroje pro upínání obrobku. Další položka spočívá v otáčení hlavy na ručním stroji. [2]

Vrtání za účelem výroby vysoce kvalitních otvorů s přiměřeným opotřebením nástrojů má zásadní význam pro snížení nákladů a optimální dobu cyklu. Účinnost řezných kapalin je jedním z nejdůležitějších parametrů ovlivňujících výsledek procesu vrtání. [2]

Vrtání je běžnou a životně důležitou činností ve zpracovatelském průmyslu. Otvory lze vytvořit různými stroji a postupy. Druh materiálu, velikost otvoru a kvalita otvorů vyrobených v daném období, to vše ovlivňuje parametry řezného nástroje a vrtání. [4]

Vrtání je prominentní a široce používanou metodou výroby děr mezi mnoha technikami výroby děr. Vrtání je první fází různých operací, jako je "vystružování, řezání závitů a vyvrtávání". Vrták a obrobek se během vrtání pohybují kolem sebe. U masivních obrobků se vrták obvykle otáčí a zasune do obrobku. Velikost děr generovaných vrtáky je obvykle o něco větší než průměr vrtáku. [4]

1.1.4 Povrchové úpravy broušením

Broušení demonstruje proces odstraňování materiálu a povrchové výroby, který se používá k tvarování a dokončování předmětů z různých materiálů. Přesnost dosažená broušením může být mnohem lepší než přesnost dosažená soustružením a frézováním. [2]

Broušení využívá abrazivní produkt, kterým je často rotační kotouč přivedený do řízeného kontaktu s povrchem obrobku. Příslušný kotouč obsahuje brusná zrna držená pohromadě v pojivu. Tato brusná zrna fungují jako řezné nástroje a odstraňují malé kousky z obrobku. Když se brusná zrna opotřebují a otupí, může další odpor způsobit selhání zrn a mít tendenci oslabit odpovídající vazbu. [2]

1.2 Inovativní metody obrábění

1.2.1 Obrábění vysokorychlostním vodním paprskem

Obrábění abrazivním vodním paprskem (AWJM) je metoda zpracování za studena, která je jednou z nejnovějších, pokročilých, netradičních hybridních metod., co využívá vysokorychlostní vodní paprsky k pohonu abrazivních částic k obrábění obrobků. Ve srovnání s konvenčními metodami obrábění se AWJM vyznačuje vysokou přesností, vynikající kvalitou, flexibilním přenosem a relativně malou tepelně ovlivněnou zónou, díky čemuž je vhodný pro pokročilé materiály. [5]

Při zpracování tvrdých materiálů je teplo nižší a lze řezat jakoukoli formu materiálu, jako je keramika, kompozity, kov a nekovy. Proces AWJM snadno řeže měkké materiály, deskový materiál, zmrzlé prostředky a extrémně tvrdé materiály podobné hornině. Proces AWJM zahrnuje vysokorychlostní dopad abrazivních částic na obrobek. Tento intenzivní erozní proces účinně odstraňuje materiál a zvyšuje kvalitu povrchu obrobku. [6]

Proces se skládá sloučením obrábění vodním paprskem (WJM) a obrábění abrazivním paprskem (AJM). Abrazivní částice, jako je karbid křemíku, oxid hlinitý, granát, písek atd., se používají v procesu obrábění z povrchu materiálu, aby způsobily erozi materiálů vysokou rychlostí. Metoda obrábění za studena se vyznačuje absencí oblasti vyvolané teplem, nízkým obráběcím výkonem, vysokou flexibilitou obrábění, vynikající životností a nulovou tepelnou deformací. V oblasti řezu stroj AWJ nevytváří teplo, které je hlavním důvodem procesu výběru AWJM. Skládá se z kompresoru, obrobku, vzduchového filtru a sušičky, trysky, hodnoty odlehčení, držáku trysky, manometru, směšovací komory a hodnoty otevření. [6]

1.2.2 Elektroerozivní technologie

Elektroerozivní obrábění (EDM) je termofyzikální proces odstraňování materiálu, který má vynikající schopnost pro bezkontaktní obrábění křehkých a tvrdých materiálů s přesnými 3D složitými tvary. V procesu EDM jiskra způsobuje, že se materiál dvou elektrod (nástroj a obrobek) během několika mikrosekund odpaří a roztaví v úzkém prostoru naplněném dielektrickou kapalinou. Materiály ve vypařovací zóně jsou odstraněny přímo odpařením a většina materiálů v tavicí zóně je oddělena od materiálů matrice pod vysokým tlakem výtlačného kanálu. [7]

1.2.3 Metody s elektrojiskrovým efektem

Elektrojiskrové obrábění (WEDM) je jednou z moderních metod používaných pro proces odstraňování materiálu, které se používají v mnoha inženýrských aplikacích pro výrobu různých složitých tvarů, jako jsou lopatky turbín, trysky pro vstřikovače paliva atd., Tato pokročilá metoda procesu odstraňování materiálu slouží pro obrábění tvrdých materiálů, korozivních a odolných proti opotřebení, zejména elektricky vodivé. [8]

Elektrojiskrové obrábění bylo založeno na elektroerozivním obrábění (EDM) a primárně slouží pro vytváření komplikovaných tvarů na pracovních materiálech. V procesu WEDM dochází k odstraňování materiálu na základě erozního efektu elektrického výboje elektrických jisker, které se vyskytují mezi elektrodovým drátem a pracovním materiálem, které jsou odděleny pomocí dielektrické kapaliny. [8]

Napětí je přiváděno do středu elektrodového drátu a vybraného pracovního materiálu s existencí dielektrické kapaliny pro tavení povrchu pracovního materiálu výbojem jisker na povrchu. Vzhledem k tomu, že elektrodový drát vede z jednoho konce na druhý, dochází nepřetržitě k odebírání materiálu. [8]

1.2.4 Technologie ultrazvukového opracování

Ultrazvukové obrábění (USM) je netradiční mechanická technika odstraňování materiálu, která většinou souvisí s nízkou rychlostí úběru materiálu. Jeho použitelnost však není omezena mechanickými, chemickými nebo elektrickými vlastnostmi obrobku. Uplatňuje se jak při obrábění kovových (vodivých), tak i nekovových materiálů. Většinou preferuje materiály, které jsou méně tažné s tvrdostí vyšší než 40 HRC. [9]

Používá se na různé křehké materiály, včetně keramiky, křemíku a tvárných materiálů, jako je nerezová ocel a slitina titanu. Kromě toho se USM používá hlavně pro komerční a průmyslové obrábění křehkých a tvrdých konstrukcí. Má obrovský rozsah použití pro tvárné a houževnaté materiály, jako jsou kompozity, titan a slitiny niklu. [9]

1.2.5 Elektrochemické obrábění povrchu

Elektrochemické obrábění (ECM) představuje nekonvenční technologii třískového obrábění, při které nedochází k mechanickému kontaktu mezi nástrojem a obrobkem. V tomto procesu hraje obrobek roli anody, zatímco nástroj tvoří katodu. Mezi tyto dvě elektrody je přiváděno stejnosměrné nebo pulzní elektrické napětí v rozsahu 10 až 40 V. Katoda se při obrábění pohybuje směrem k obrobku, přičemž vzdálenost mezi elektrodami se udržuje velmi malá – obvykle mezi 0,05 a 0,6 mm. Materiál je odstraňován na principu anodického rozpouštění, které se řídí Faradayovými zákony elektrolyzy. Typická proudová hustota se pohybuje v rozmezí 20 až 200 A/cm². [10]

Do pracovní mezery je pod vysokým tlakem a rychlostí (10–60 m/s) vhnán elektrolyt, nejčastěji na bázi vodného roztoku NaCl nebo NaNO₃. Ten zajišťuje odvádění vznikajících reakčních produktů, plynových bublin, tepla a pomáhá stabilizovat chemickou reakci. Výsledkem je přesné vytvarování obrobku do negativní kopie nástroje. [10]

Tato bezkontaktní metoda je vhodná zejména pro obrábění materiálů s vysokou tvrdostí a pevností, které jsou obtížně obrobitelné konvenčními způsoby. Další výhodou je, že katoda se během procesu prakticky neopotřebovává, neboť na jejím povrchu probíhá pouze vývoj vodíku. ECM umožňuje dosažení vysokých rychlostí úběru, kvalitního povrchu a přesnosti bez výskytu tepelného poškození, jako jsou mikrotrhliny, zbytková napětí či přetavené vrstvy. Vzhledem k vysokým nákladům na návrh a výrobu nástrojů a specifická obráběcí zařízení je tato technologie ekonomicky výhodná především při sériové výrobě velkoobjemových dílů. [10]

1.2.6 Plazmové zpracování materiálů

Tento mechanismus odstraňování materiálu je v podstatě chemická reakce umožněná plazmou, kde je plazma generována dodáváním vysokofrekvenční energie inertním plynům, což vede k disociaci reaktivních molekul a tvorbě reaktivních částic. Disociované atomy v plazmě reagují s obrobkem za vzniku těkavých sloučenin. Odstranění na chemické bázi zajišťuje, že nedojde k poškození povrchu. Odstraňovací funkci lze získat statickým plazmovým leptáním.[11]

Jako slibná bezkontaktní a vysoce přesná metoda tváření byla navržena řada technologií atmosférického plazmového obrábění pro tváření různých materiálů:

- reaktivní atomové plazma (RAP)
- plazmové obrábění (PJM)
- leštění plazmou za atmosférického tlaku (APPP)
- obloukově zesílené plazmové obrábění (AEPM)

1.2.7 Laserové obráběcí procesy

Laserové obrábění (LBM) díky schopnosti obrábění široké škály materiálů s vysokou přesností se řadí mezi specializované technologie obrábění a vždy přitahovala pozornost. Mezi vlastnosti LBM patří přesné řezy, vysoká řezná rychlost, malá tepelně ovlivněná zóna a úzká šířka zářezu. Řezání, drážkování, soustružení, frézování a vrtání jsou hlavními konfiguracemi LBM. Laser lze také použít jako pomocný nástroj pro konvenční obrábění, jako je soustružení, aby se dosáhlo lepší obrobiteľnosti, a to změnou mikrostruktury a změkčením povrchu obrobku. Laserové paprsky zahřívají obrobek před hlavním procesem a tím snižují obráběcí sílu a zlepšují řezné vlastnosti. [12]

Při laserovém zpracování materiálu obecně existují dva hlavní mechanismy: studený a tepelný. Ve studeném mechanismu dochází k rozbití a vytvoření chemických vazeb prostřednictvím rezonančního přenosu energie bez změny teploty. Zatímco tepelný mechanismus je obecně považován za tepelný proces pro odstraňování materiálu s vysokou hustotou energie v ohnisku laserového paprsku, který způsobuje zahřívání, tavení a odpařování materiálu. LBM se spoléhá na absorbovanou energii, která zvyšuje teplotu substrátu na bod tání. Obecně se to týká tvorby plazmatu a optických absorpčních mechanismů, které často vedou k mikrotrhlinám, tepelné depozici a menšímu okolnímu poškození. [12]

Odstraňování materiálu pomocí laserů s dlouhými pulzy se získává hlavně tavením a odpařováním materiálu. Odstraněný materiál se však často znovu ukládá v blízkosti roztavené oblasti a vytváří přelitou vrstvu. [12]

Existují různé typy laserů se speciálními vlastnostmi, které jsou určeny pro různé aplikace. Lasery můžeme rozdělit na základě jejich laserového média:

- lasery s neutrálními atomy
- iontové lasery
- lasery s kovovými páry
- lasery s molekulárním plynem

Pak dále je můžeme dělit podle kapalných (barvivo) a pevnolátkových laserů:

- rubínové
- neodymové
- polovodičové lasery

1.2.8 Technologie s elektronovým paprskem

Jednou z novějších, ale stále populárnějších metod při výrobě dílů je metoda tavení elektronovým paprskem (EBM). V procesu aditivní výroby se vlákno nebo kovový prášek roztaví a poté použije pomocí koncentrovaného paprsku elektronů ve vakuové komoře. Elektromagnetické cívky poskytují přesné a rychlé ovládání paprsku. Toto řízení paprsku dává možnost udržovat několik tavných bazénů současně, které řídí elektronový paprsek. Výrobní proces ve vakuové komoře zajišťuje, že oxidace neohrozí vysoce reaktivní materiály, jako je titan, tudíž aby se zabránilo jakékoli kolizi s molekulami plynu, je nutné vyrábět ve vakuové komoře. Výroba za takové situace vede k vytvoření robustních, pevných a vysoce kvalitních kovových konstrukcí. [13]

Vyrobené díly tak mají vlastnosti, které jsou lepší než u tvářených nebo odlévaných výrobků. Prostřednictvím EBM je možné vyrábět struktury bez zbytkového pnutí a martenzitů. Díly vyrobené pomocí EBM jsou vhodné pro použití v různých průmyslových odvětvích jako je letecký průmysl jako lopatky turbín a oběžné kolo čerpadla, automobilový průmysl jako kolo turbodmychadla, lékařská technika jako implantáty. [13]

1.3 Komparativní analýza obráběcích metod

1.3.1 Výhody a omezení tradičních technik

Konvenční obrábění představuje skupinu výrobních procesů, které odstraňují materiál z obrobku prostřednictvím mechanického kontaktu mezi nástrojem a materiálem. Typickými představiteli konvenčního obrábění jsou soustružení, frézování, vrtání a broušení. Základními mechanismy jsou řezání, tření a abraze. Tyto procesy jsou charakteristické využíváním relativně jednoduchých strojních zařízení a nástrojů, kde hlavním prvkem je lidská obsluha či automatizace pomocí CNC technologií. [14]

Mezi hlavní výhody konvenčních metod patří ekonomická dostupnost strojního vybavení, schopnost efektivně obrábět široké spektrum kovových materiálů a vysoká produktivita při sériové výrobě. Dalším pozitivním prvkem je rozsáhlá znalost operátorů a snadná údržba zařízení. Nevýhodou je omezená schopnost obrábět extrémně tvrdé nebo křehké materiály (např. keramiku, kompozity) a vyšší pravděpodobnost vzniku mechanického poškození povrchu v důsledku vysokých řezných sil. Dochází také k výraznému opotřebení nástrojů, což zvyšuje provozní náklady při obrábění obtížně obrobitelných materiálů. [14]

1.3.2 Potencionál inovativních technologií

Nekonvenční obrábění zahrnuje procesy, které odstraňují materiál bez přímého mechanického kontaktu nebo využívají alternativní fyzikální principy, jako je elektrická energie, tepelná energie, chemická reakce nebo působení ultrazvukových vibrací. [15]

Tyto technologie umožňují obrábět materiály s vysokou tvrdostí, křehkostí nebo vysokou odolností vůči tradičnímu obrábění, jako jsou super slitiny, keramika a kompozity. Výhodami nekonvenčního obrábění jsou minimální mechanické zatížení obrobku, vysoká přesnost a možnost výroby složitých geometrií, které by byly jinak neproveditelné konvenčními metodami. Nevýhodami jsou vyšší investiční a provozní náklady, delší doby obrábění v některých případech a vyšší technické nároky na obsluhu a kontrolu procesu. [15]

1.3.3 Srovnání a aplikace

Volba mezi konvenčními a nekonvenčními metodami je podmíněna několika faktory, zejména požadovanou kvalitou povrchu, typem a vlastnostmi materiálu, ekonomickou efektivitou procesu a složitostí vyráběného dílu. V praxi je běžné využívat kombinaci obou přístupů, například konvenční obrábění pro základní tvarování a následné jemné dokončování nekonvenčními metodami, čímž lze dosáhnout vysoké přesnosti a minimálního poškození povrchu. [16]

Hybridní obráběcí procesy, které kombinují prvky tradičních a moderních metod, představují perspektivní trend pro budoucí výrobní systémy. Tyto systémy umožňují optimalizaci produktivity, kvality a nákladovosti obrábění. [16]

2 STANDARDY PRO HODNOCENÍ POVRCHOVÝCH VLASTNOSTÍ

2.1 Oblasti použití a technické požadavky (ČSN EN ISO 21920-1)

Norma byla vytvořena s cílem poskytnout jednoznačný, funkčně orientovaný a měřitelný způsob, jak specifikovat, měřit a kontrolovat drsnost povrchů strojních součástí. V technické praxi tak slouží jako most mezi návrhářem, technologem a metrologem. Její aplikace má přímý vliv na kvalitu, funkčnost a hospodárnost výroby. [17]

2.1.1 Předmět normy a oblast použití

Norma specifikuje obecné principy pro kvantitativní popis drsnosti povrchu pomocí profilové metody. Obsahuje:

- definice základních pojmů souvisejících s povrchovou strukturou,
- parametry popisující výškové charakteristiky povrchu (např. R_a – aritmetická střední úchylka profilu, R_z – maximální výška profilu, R_q , R_{sk} , R_{ku} aj.),
- délkové a smíšené parametry, které popisují rozložení nerovností na povrchu a jejich vzájemný vztah. [17,18]

2.1.2 Volba výrobní technologie

Norma umožňuje správné nastavení technologického procesu tím, že definuje očekávaný konečný stav povrchu. Díky tomu může technolog vybrat:

- vhodný nástroj a řezné podmínky,
- potřebnou kombinaci operací – např. hrubování, jemné soustružení, lapování nebo broušení. [18,19]

2.2 Doporučení pro výběr technologie (ČSN EN ISO 21920-2)

Norma navazuje na část 1 a rozšiřuje pravidla pro to, jak správně definovat a zapsat požadavky na strukturu povrchu do výkresové dokumentace. Je určena zejména pro konstruktéry a návrháře, kteří definují funkční požadavky na povrchy strojních dílů. [18]

2.2.1 Cíl normy – přesná a funkční specifikace

Základním cílem této části normy je zajistit, aby specifikace povrchové struktury byla:

- Jednoznačná – bez nutnosti výkladu nebo dohadu při výrobě nebo kontrole,
- Měřitelná a ověřitelná – aby bylo možné daný požadavek validovat pomocí profilometrických metod,
- Funkčně odůvodněná – aby odpovídala potřebám součásti (např. mazání, těsnění, tření). [18,19]

2.2.2 Pravidla výběru parametrů

Norma zavádí pravidla, která pomáhají návrháři rozhodnout, jaké parametry použít a v jaké kombinaci. Základní pravidla zahrnují:

- Nežadávat jen R_a : Tento tradiční parametr není vždy dostatečný. V mnoha případech je nutné přidat i R_z (výškový rozsah), R_{sk} (symetrie výšek) nebo R_{Sm} (střední rozteč).
- Volit parametry podle funkce:
 - Těsnící plochy – R_z , R_{mr} (materiálový poměr),
 - Kluzné plochy – R_q , R_{sk} (kluznost a symetrie),
 - Spoje s lepidlem – R_a , R_z (vyšší drsnost pro adhezi),
 - Optické prvky – nízké R_a i R_z (vysoká kvalita povrchu). [18,19]

2.3 Normy pro plošné hodnocení textury (ČSN EN ISO 25178)

Zatímco normy ISO 21920 se zaměřují na profilové (2D) hodnocení povrchu, norma ČSN EN ISO 25178 zavádí koncept plošného (3D) hodnocení. Cílem je lépe vystihnout reálnou topografii povrchu, která může být pro funkčnost součásti rozhodující. Měření nejsou prováděna pouze podél jedné čáry, ale nad celou plochou, což umožňuje komplexnější a přesnější analýzu. [20]

Norma ČSN EN ISO 25178 představuje významný krok směrem k moderní plošné metrologii, která umožňuje komplexnější popis technického povrchu než tradiční profilová metoda. Její uplatnění v průmyslové praxi vede ke zvýšení funkčnosti, kvality a životnosti výrobků. Umožňuje detailní charakterizaci povrchů zejména tam, kde jsou klíčové jejich interakce s okolním prostředím nebo jinými díly. [20,21]

2.3.1 Charakteristika normy

ČSN EN ISO 25178 je rozsáhlá soustava norem, která pokrývá různé aspekty:

- Terminologie (ISO 25178-1),
- Parametry plošné struktury povrchu (ISO 25178-2),
- Kalibrace a validace měřicích systémů.

Norma je určena zejména pro použití v oblastech s vysokými nároky na funkční kvalitu povrchu, jako jsou medicína, optika, automobilový a letecký průmysl. [20,21]

2.3.2 Základní parametry plošné struktury

Podobně jako u profilové metody i zde existuje sada výškových, prostorových, hybridních a funkčních parametrů, avšak vztahují se k ploše, nikoli profilu. Mezi nejčastěji používané 3D parametry patří:

- Sa – střední aritmetická odchylka výšky (ekvivalent Ra, ale pro plochu),
- Sz – maximální výškový rozsah povrchu,
- Sq – střední kvadratická výška (ekvivalent Rq),
- Ssk – asymetrie výšek (skewness),
- Sdr – vývoj povrchové plochy (rozšíření skutečné plochy oproti projekci),
- Spk, Sk, Svk – parametry materiálové křivky, důležité např. pro tribologii. [21]

Ve srovnání s profilovou metodou poskytuje 3D analýza bohatší a robustnější informaci o reálné struktuře povrchu. [21]

3 METODIKY HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU

Jakost povrchu je důležitým ukazatelem kvality výrobků ve strojírenství, automobilovém průmyslu, letectví, elektrotechnice i medicíně. Ovlivňuje nejen funkčnost výrobků, ale také jejich životnost, odolnost proti opotřebení a korozivním vlivům, třecí vlastnosti a v některých případech i estetický dojem. Přesné hodnocení jakosti povrchu je tedy klíčové pro zajištění správné funkce a spolehlivosti technických součástí. [22]

V moderním průmyslu, kde se stále více uplatňují precizní technologie, se klade důraz na promyšlené a všestranné metody měření povrchových struktur. Nejde jen o měření jednoduché drsnosti, ale o detailní analýzu celkové textury povrchu a jeho funkčních vlastností. [22]

3.1 Parametry pro posouzení drsnosti

Parametry používané pro hodnocení drsnosti a struktury povrchu:

- R_a (průměrná aritmetická odchylka profilu) — průměrná velikost absolutních hodnot odchylek od střední linie,
- R_z (výškový rozdíl nerovností) — součet výšky nejvyššího vrcholu a hloubky nejnižšího údolí v daném úseku,
- R_t (celková výška profilu) — rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším bodem profilu,
- R_q (kvadratický průměr odchylek) — střední kvadratická hodnota odchylek od střední linie,
- S_a (průměrná aritmetická výška plochy) — 3D parametr pro plošné hodnocení. [23]

Novější přístupy dávají přednost plošným parametrům, protože poskytují přesnější a komplexnější charakteristiku povrchu. Parametry jako S_q (root mean square roughness 3D) nebo S_{sk} (povrchová šikmost) se ukazují jako klíčové při hodnocení funkčních vlastností povrchu, například ve vztahu k mazání či opotřebení. [23]

3.2 Kritéria pro volbu měřící techniky

Volba vhodné metody měření jakosti povrchu je závislá na řadě faktorů, mezi které patří požadovaná přesnost, fyzikální vlastnosti měřeného materiálu, rozměry a charakteristiky povrchu, časové požadavky na měření a finanční možnosti. U citlivých nebo opticky citlivých materiálů je obvykle vhodnější využít bezkontaktní optické metody, zatímco pro robustní technické povrchy jsou často preferovány klasické kontaktní profilometrie. [24, 25]

3.3 Metody měření a analýza povrchu

V současné praxi existuje řada metod sloužících k hodnocení jakosti povrchu, které se liší principem měření, přesností, náročností a vhodností pro různé typy materiálů. [24]

3.3.1 Dotyková profilometrie

Kontaktní profilometrie využívá mechanický dotykový hrot, který sleduje nerovnosti povrchu a generuje profilovou křivku. Výhodou této metody je vysoká přesnost a možnost měření různých materiálů. Nevýhodou je riziko poškození měkkých nebo citlivých povrchů a relativně pomalejší rychlost měření. [24]

3.3.2 Bezkontaktní optické měření

Optická profilometrie využívá interferenci světla, čímž umožňuje bezkontaktní snímání povrchu. Nejčastěji se používají konfokální mikroskopy nebo zařízení na bázi bílé světelné interferometrie. Hlavními výhodami jsou vysoké rozlišení a absence fyzického kontaktu se vzorkem, což minimalizuje riziko poškození. Nevýhodou je závislost výsledků na optických vlastnostech měřeného materiálu a vyšší pořizovací náklady. [25]

3.3.3 Laserová skenovací technika

Laserová skenovací mikroskopie využívá přesného zaměřování laserového paprsku k vytvoření detailní trojrozměrné rekonstrukce povrchu. Tato metoda dosahuje velmi vysokého rozlišení a je vhodná zejména pro analýzu mikrostruktury povrchu. Hlavní nevýhodou jsou vyšší náklady a vyšší nároky na kvalifikaci obsluhy. [25]

3.3.4 Atomová silová mikroskopie (AFM)

Atomární silová mikroskopie využívá interakce mezi velmi jemným hrotem a atomárními silami působícími na povrch vzorku. Tato metoda umožňuje měření s extrémně vysokým rozlišením, často až na úrovni jednotlivých atomů. Mezi nevýhody patří omezený měřicí rozsah, vyšší časová náročnost a vysoké pořizovací náklady zařízení. [25]

3.3.5 Stylusová profilometrie

Stylusová profilometrie představuje tradiční metodu měření jakosti povrchu, kdy mechanický hrot přejíždí po povrchu a zaznamenává jeho profil. Výhodou této metody je jednoduchost a široká dostupnost měřicích zařízení, stejně jako relativně nízké pořizovací náklady. Nevýhodou je riziko poškození povrchu a omezená schopnost zachytit jemnější struktury povrchu. [24]

3.3.6 3D skenovací metody

Tato metoda využívá různých optických technologií k vytvoření trojrozměrného obrazu povrchu. Je vhodná pro rychlou analýzu větších ploch, nicméně rozlišení nemusí dosahovat úrovně detailu jako v případě laserové skenovací mikroskopie či atomární silové mikroskopie. Tato metoda bylo zvolena pro využití k této práci. [25]

4 STATISTICKÁ ANALÝZA MĚŘENÝCH DAT

Statistické hodnocení dat je klíčovým nástrojem pro zpracování surových dat na smysluplné informace. Správná aplikace statistických metod zajišťuje srozumitelnost a spolehlivost závěrů, což je nezbytné pro rozhodování v různých oblastech výzkumu a praxe. [26]

4.1 Průzkumná datová analýza (EDA)

Exploratory Data Analysis (EDA), česky průzkumná analýza dat, je proces, který slouží k lepšímu pochopení struktury, vztahů a vlastností dat před samotným modelováním. EDA se zaměřuje na odhalování vzorů, odlehklých hodnot, anomálií a základních souvislostí v datech. [27]

4.2 Základní statistické metody

4.2.1 Popisná statistika

Popisná (deskriptivní) statistika se zaměřuje na charakteristiku a souhrnné zhodnocení datových souborů. Využívá především ukazatele centrální tendence, jako jsou aritmetický průměr, medián či modus, a dále měřítka variability – například rozptyl, směrodatná odchylka nebo variační koeficient. K názornému zobrazení dat slouží grafické nástroje, mezi něž patří histogramy, krabicové (boxplot) a bodové grafy. Tyto vizualizační techniky napomáhají odhalit trendy, výjimečné (odlehlé) hodnoty či případnou nesymetrii v rozložení dat. Díky těmto metodám lze rychle a efektivně získat přehled o struktuře dat, což je zásadní pro jejich další analýzu. [26]

4.2.2 Inferenční analýza

Inferenční statistika umožňuje formulovat závěry o celé populaci na základě informací získaných z jejího výběrového podsouboru. Základem tohoto přístupu je testování statistických hypotéz, které zjišťuje, zda mezi zkoumanými proměnnými existuje významný vztah nebo rozdíl. Nedílnou součástí je rovněž stanovení intervalů spolehlivosti, jež slouží k určení rozmezí, v němž se s určitou pravděpodobností nachází skutečná hodnota parametru celé populace. [28]

4.2.3 Regresní modely

Regresní analýza se využívá k modelování vztahu mezi jednou proměnnou, kterou chceme vysvětlit (závislá proměnná), a jednou či více proměnnými, které tento vztah ovlivňují

(nezávislé proměnné). Nejzákladnějším typem je lineární regrese, která předpokládá přímočarý vztah mezi proměnnými. V současnosti se k provádění regresní analýzy běžně využívá specializovaný statistický software, například R nebo Python, které umožňují nejen výpočty, ale i efektivní vizualizaci výsledků. [26]

4.3 Vizualizace a grafická reprezentace dat

V oblasti statistické analýzy dat je vizualizace nezbytným nástrojem pro efektivní znázornění výsledků a usnadnění porozumění komplexním datovým strukturám. Grafické metody poskytují přehledný způsob, jak prezentovat souhrnné charakteristiky dat a vizuálně odhalovat vzory, odchylky a vztahy mezi proměnnými. [27]

4.3.1 Histogramové zobrazení

Histogram je základním nástrojem pro analýzu rozdělení četností spojitých dat. Je tvořen sloupci, jejichž výška reprezentuje počet hodnot v určitém intervalu. Klíčovým aspektem tvorby histogramu je volba počtu a šířky tříd – příliš mnoho tříd může graf učinit nepřehledným, příliš málo tříd zase skryje důležité charakteristiky dat. [29]

4.3.2 Krabicové grafy (boxplot)

Boxplot, neboli krabicový diagram, slouží k souhrnnému zobrazení rozdělení dat pomocí pěti základních statistik: minima, dolního kvartilu (Q1), mediánu (Q2), horního kvartilu (Q3) a maxima. Boxploty umožňují rychlé porovnání rozdělení mezi skupinami a detekci odlehklých hodnot. Moderní přístupy upozorňují na potřebu správné interpretace boxplotů, zejména v případech, kdy data nejsou symetricky rozložena nebo obsahují extrémní hodnoty. Existují také rozšířené verze boxplotů, například violin plot, který zároveň zobrazuje hustotu pravděpodobnosti. [30]

4.3.3 Časové řady a bodové graf

Bodový graf, je klíčovou technikou pro vizualizaci vztahu mezi dvěma kvantitativními proměnnými. Každý bod v grafu reprezentuje jednu pozorovanou dvojici hodnot. Tento typ grafu umožňuje vizuální odhad lineární či nelineární korelace, identifikaci shluků nebo odhalení odlehklých hodnot. V praxi se bodové grafy často doplňují regresními přímkami, které usnadňují kvantifikaci vztahu mezi proměnnými. Bodový graf je velmi užitečný při úvodní průzkumové analýze dat a přípravě dat pro regresní modely nebo shlukovou analýzu. [27]

5 DEFINOVÁNÍ CÍLŮ A VÝZKUMNÝCH OTÁZEK

Cílem této bakalářské práce je provést zhodnocení metod měření a analýzy měřených povrchů se zaměřením na statistické porovnání výsledků získaných podle norem ISO 21920-1, ISO 21920-2 a ISO 25178.

Součástí práce je zpracování literární rešerše, která poskytne teoretické základy k problematice hodnocení povrchové drsnosti a seznámí s aktuálně používanými normami a principy měření. V praktické části budou vybrané povrchy analyzovány pomocí bezkontaktního profilometru. Na základě získaných dat bude následně provedeno statistické vyhodnocení s cílem identifikovat rozdíly mezi jednotlivými normami a přístupy k měření.

II PRAKTICKÁ ČÁST

6 EXPERIMENTÁLNÍ VYBAVENÍ A MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE

K měření vzorků byl použit bezkontaktní 3D profilometr Talysurf CLI 500, který je vybaven konfokální měřicí hlavou CLA. Zařízení s osovým rozlišením $0,5\ \mu\text{m}$ umožňuje práci ve měřicím prostoru o rozměrech $50 \times 50 \times 50\ \text{mm}$. Maximální nosnost měřicího stolu činí 10 kg. Přístroj disponuje jedním snímačem a je vhodný zejména pro přesná laboratorní měření menších vzorků. K analýze a zpracování naměřených dat se využívá software Talymap GOLD, který umožňuje zobrazení výsledků ve 2D i 3D formátu.



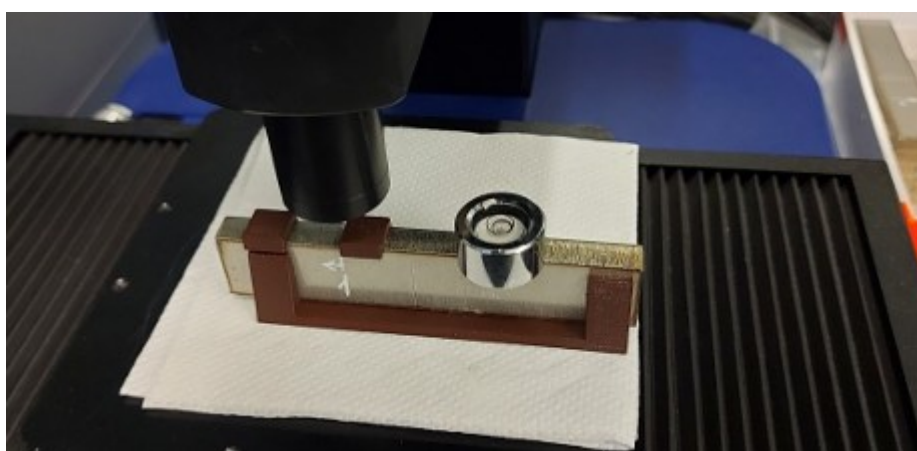
Obrázek 1 Talysurf CLI 500

7 POPIS VZORKŮ A METODIKY MĚŘENÍ

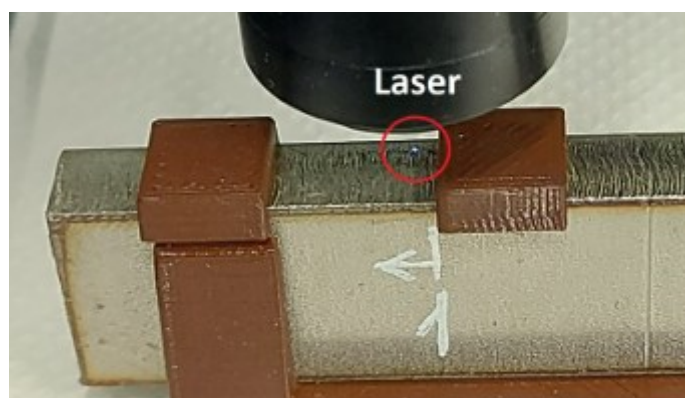
Použilo se deset vzorků ve formě ocelových kvádrů pro měření povrchové drsnosti. Vzorky byly předem upraveny pomocí laserového obrábění.

7.1 Postup při měření

Před zahájením měření je nezbytné vzorek přesně ustavit tak, aby měřená plocha byla v rovině. Tento krok je klíčový pro získání přesných dat. Potom zvolíme vhodné počáteční místo měření, to bývá bod v rohu zkoumané plochy.

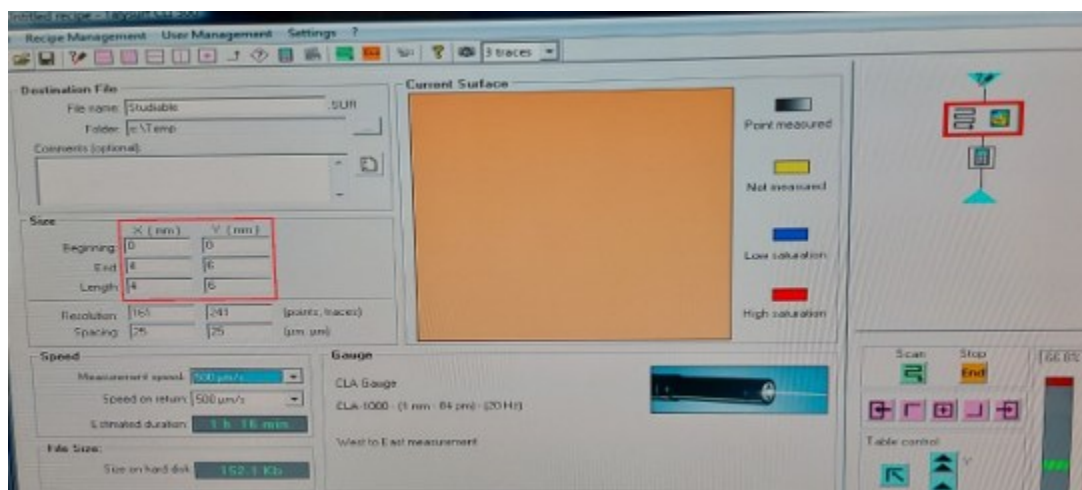


Obrázek 2 Pohled na připravený vzorek



Obrázek 3 Pohled na připravený laser

Jak je dobře ustaven vzorek, potom se může v softwaru Talymap GOLD nastavit potřebné parametry měření. Při nastavení je prvním krokem nastavení intenzity odrazivosti, která má přímý vliv na kvalitu a přesnost výsledků, proto by odrazivost by neměla klesnout pod hodnotu 40 %, protože by mohlo dojít k chybnému vyhodnocení údajů. V tomto konkrétním případě byla naměřená intenzita odrazu 66,4 %, což je dostačující hodnota pro správné vyhodnocení drsnosti povrchu.



Obrázek 4 Nastavení softwaru

8 ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Z deseti vzorků byly získány údaje o dvou základních parametrech drsnosti povrchu, konkrétně R_a a R_z . Tyto hodnoty byly následně zapsány do tabulek, které slouží jako podklad pro další grafické zpracování výsledků. S daty se provedla explorativní datová analýza pro shrnutí a lepší přehlednost dat.

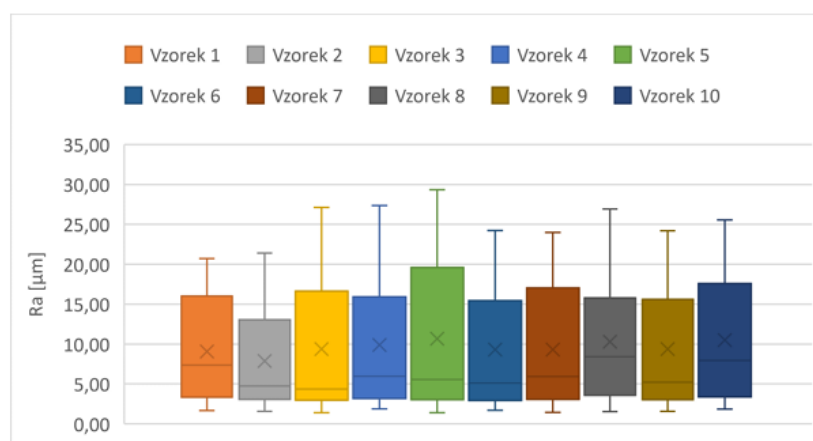
8.1 Vyhodnocení parametru drsnosti (R_a)

Do tabulky byly zpracovány jednotlivé naměřené hodnoty parametru R_a , které se uspořádaly a zapsaly v mikrometrech.

Tabulka 1 Hodnoty parametru R_a

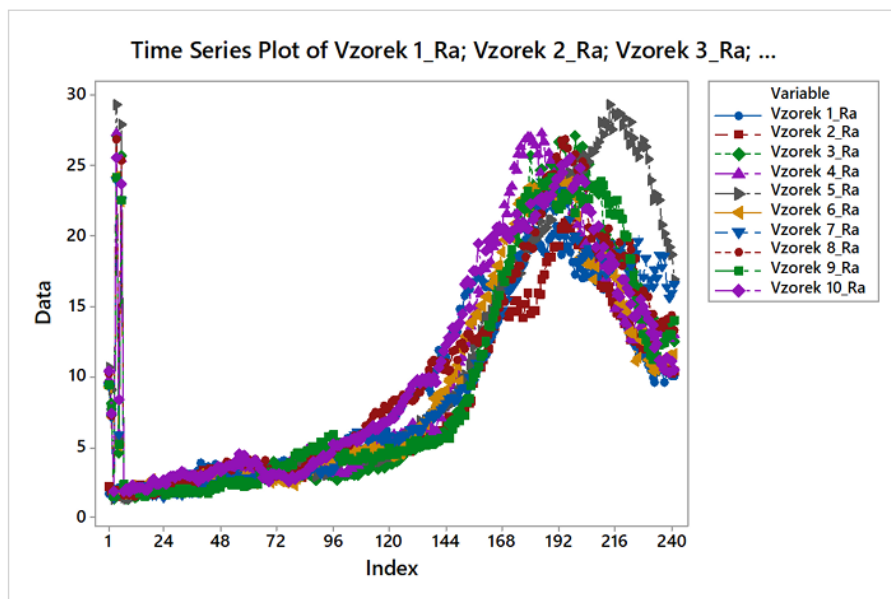
R_a [μm]	Průměr	Směrodatná odchylka	Min	Max	1. kvartil	3. kvartil	Medián
1	9,058	6,223	1,688	20,735	3,382	15,976	7,358
2	7,879	5,873	1,589	21,386	3,087	12,944	4,75
3	9,374	8,279	1,399	27,125	2,997	16,485	4,376
4	9,876	8,081	1,892	27,346	3,197	15,872	5,974
5	10,655	9,298	1,389	29,345	3,063	19,558	5,576
6	9,319	7,353	1,715	24,211	2,927	15,295	5,115
7	9,316	7,234	1,423	23,999	3,087	17,007	5,925
8	10,279	7,465	1,54	26,907	3,603	15,77	8,412
9	9,377	7,93	1,581	24,199	3,033	15,426	5,225
10	10,49	7,595	1,863	25,557	3,429	17,566	7,94

Potom byl vypracován Box-plot, ve kterém lze jednoduše porovnat jednotlivé vzorky hodnot parametru R_a mezi sebou.



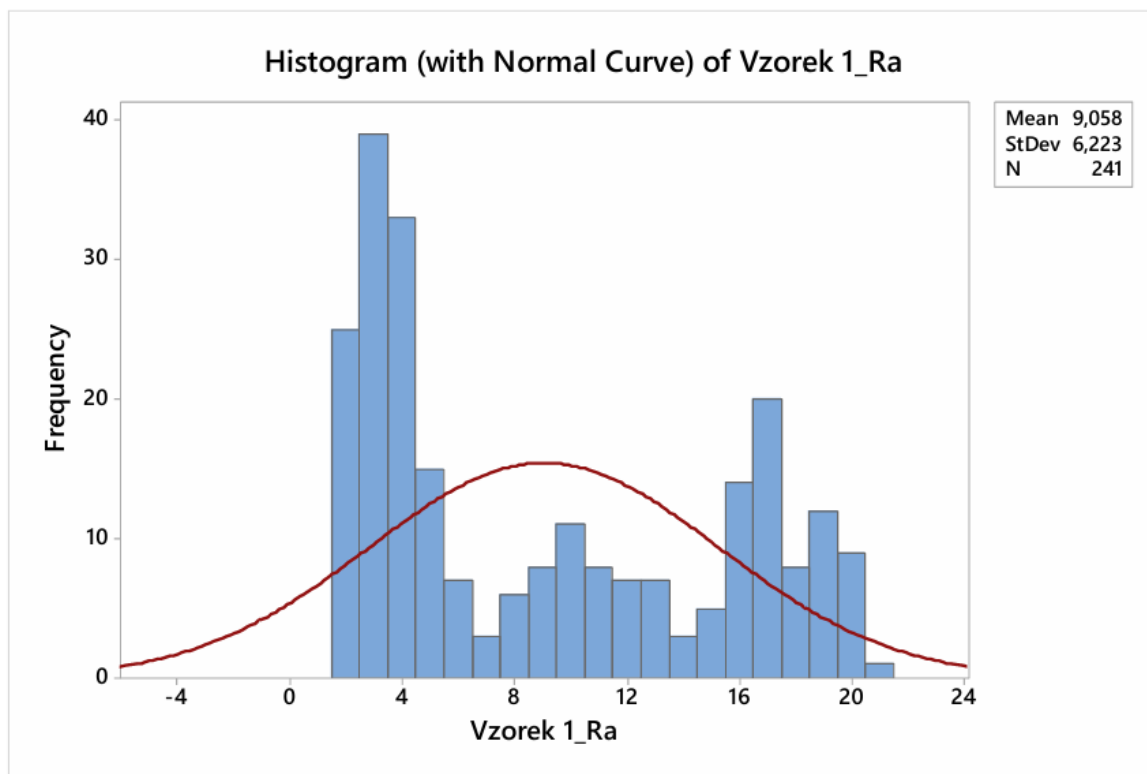
Obrázek 5 Box-plot parametru hodnot R_a

Časová řada pro parametr Ra, kde na vodorovné ose jsou znázorněny data naměřená při posunu laseru a na svislé ose jsou hodnoty parametru Ra.

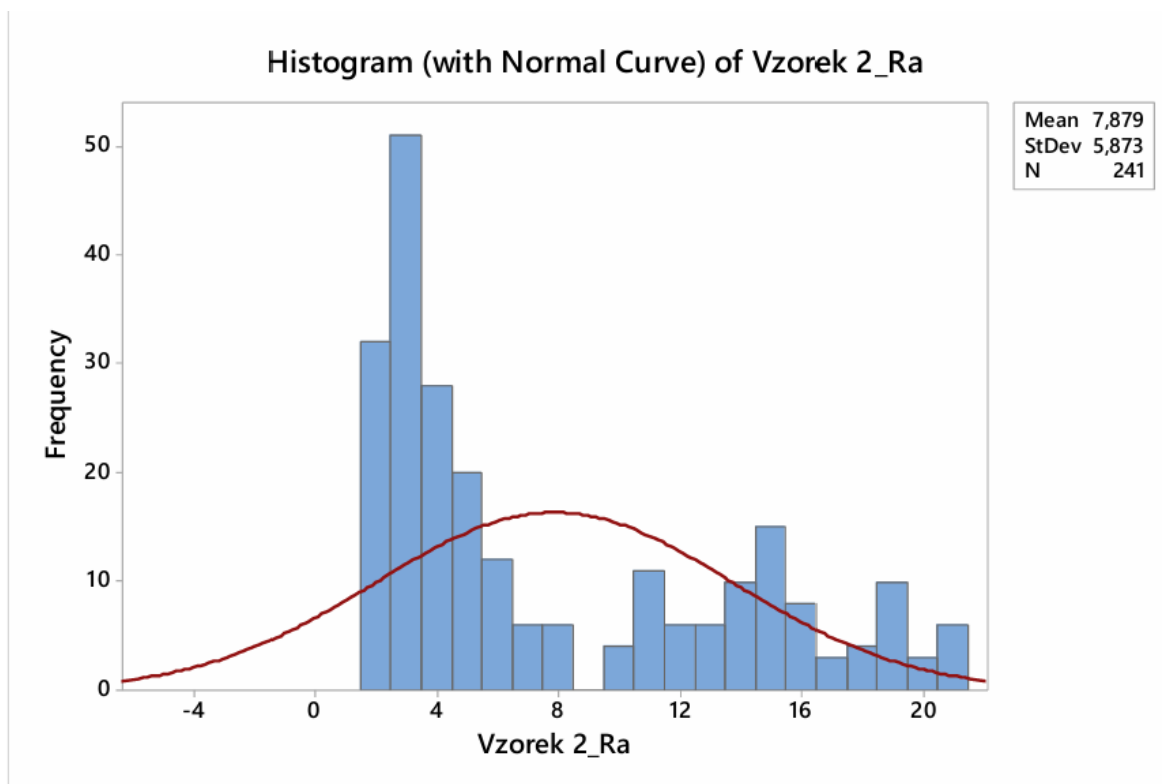


Obrázek 6 Časová řada parametru hodnot Ra

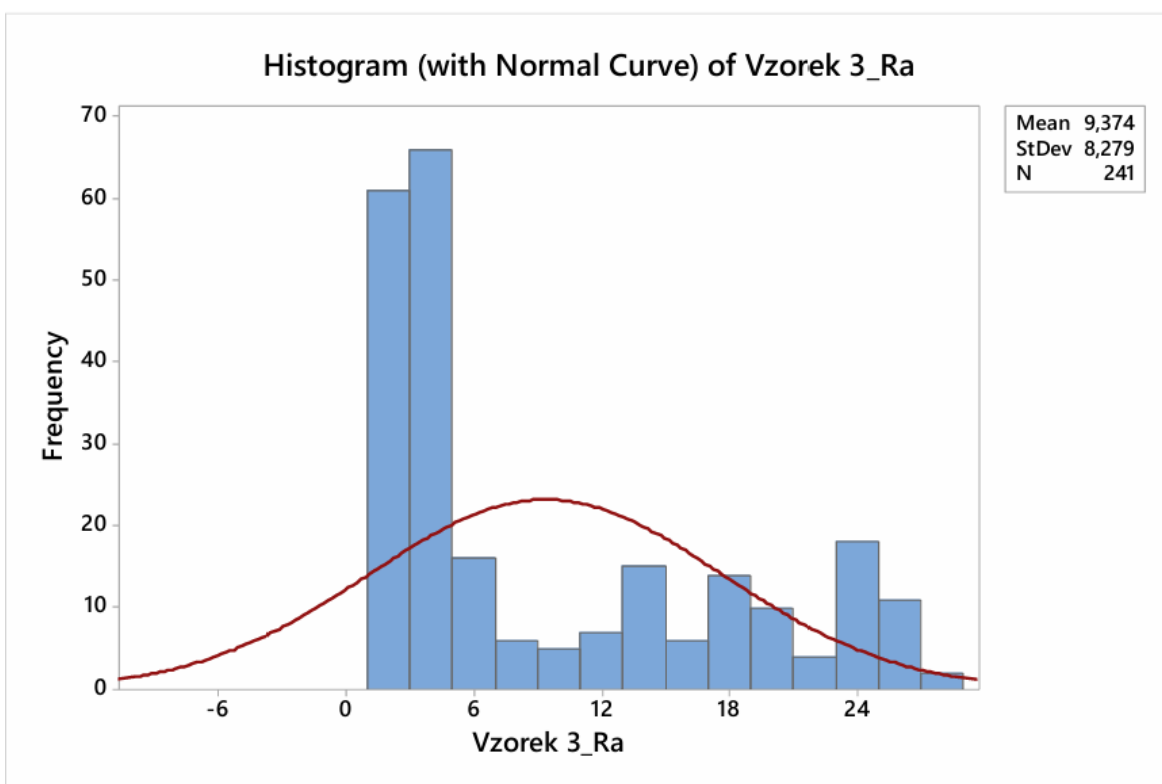
Potom se pro jednotlivé vzorky vypracovaly histogramy a tím došlo k utřídění a lepší přehlednosti dat.



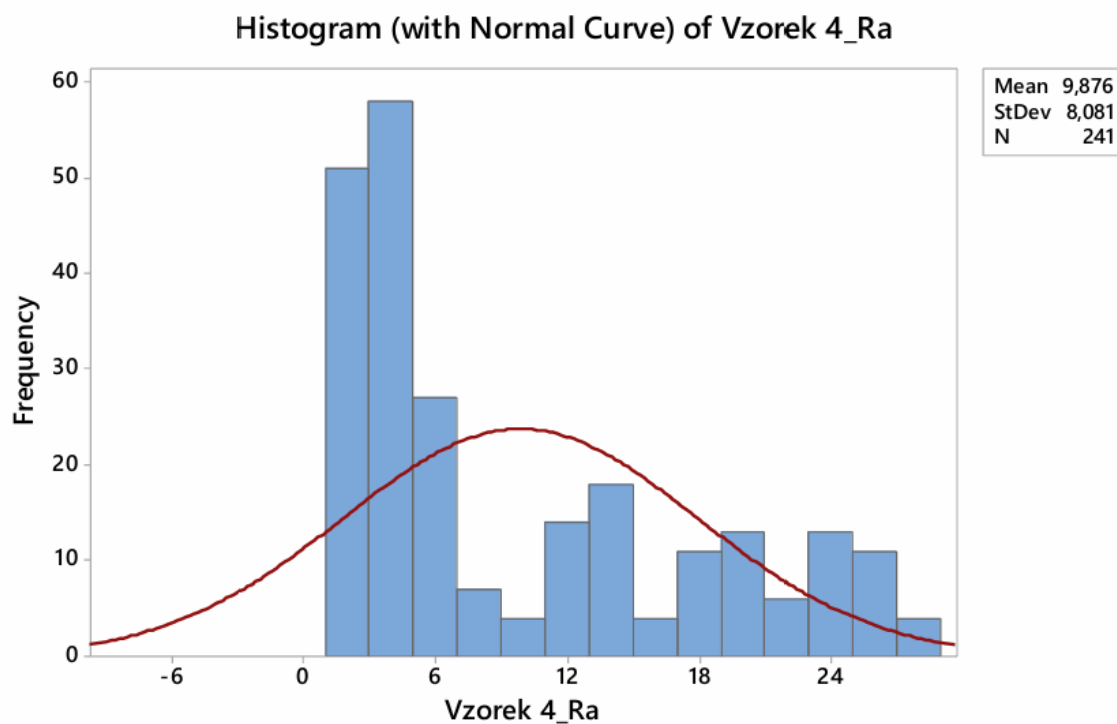
Obrázek 7 Histogram hodnot Ra 1. vzorku



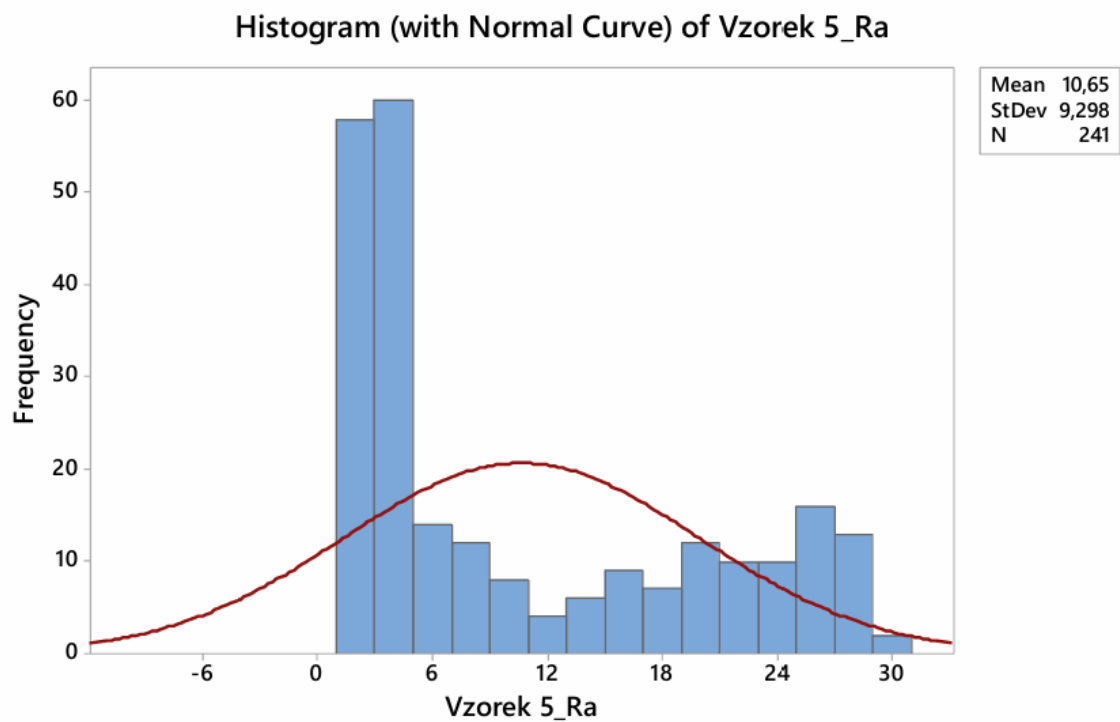
Obrázek 8 Histogram hodnot Ra 2. vzorku



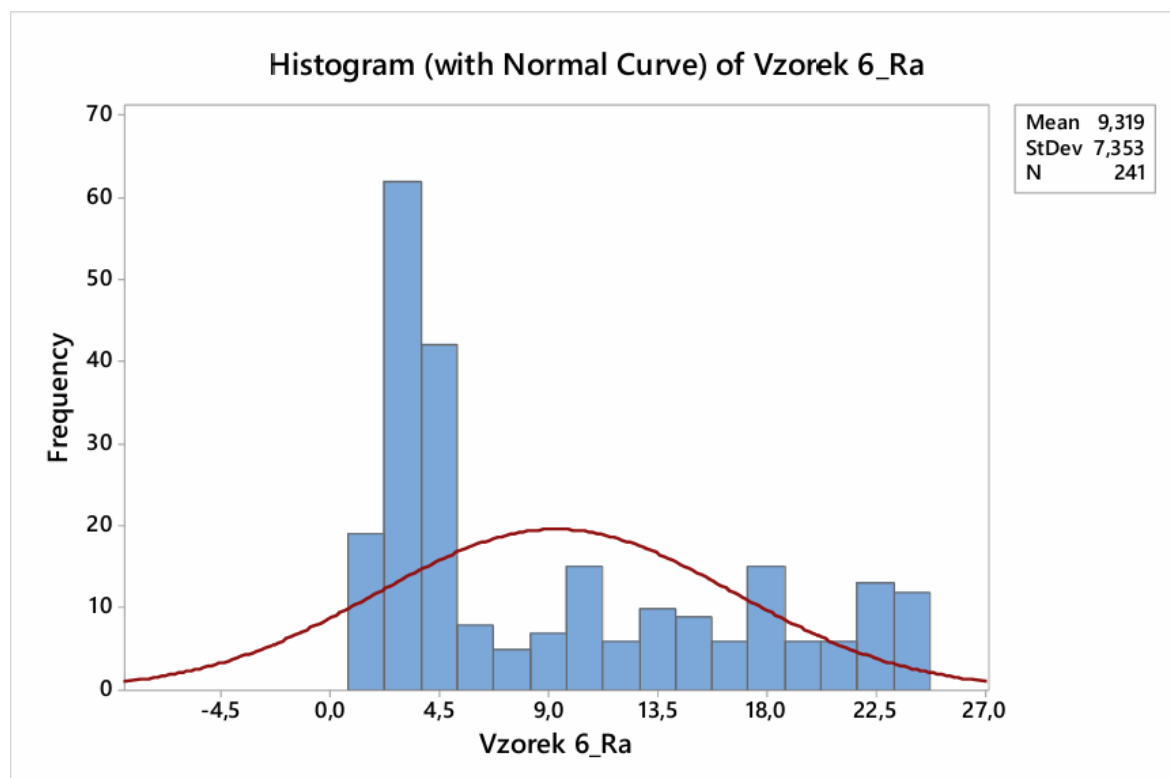
Obrázek 9 Histogram hodnot Ra 3. vzorku



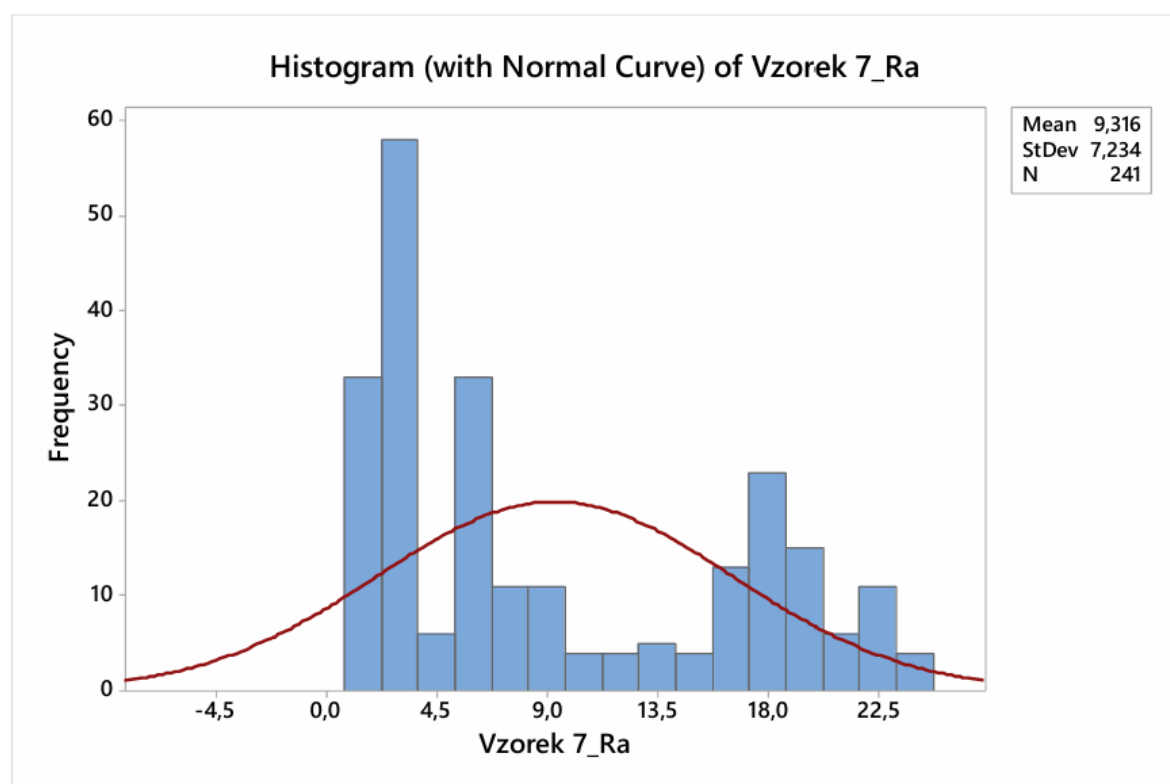
Obrázek 10 Histogram hodnot Ra 4. vzorku



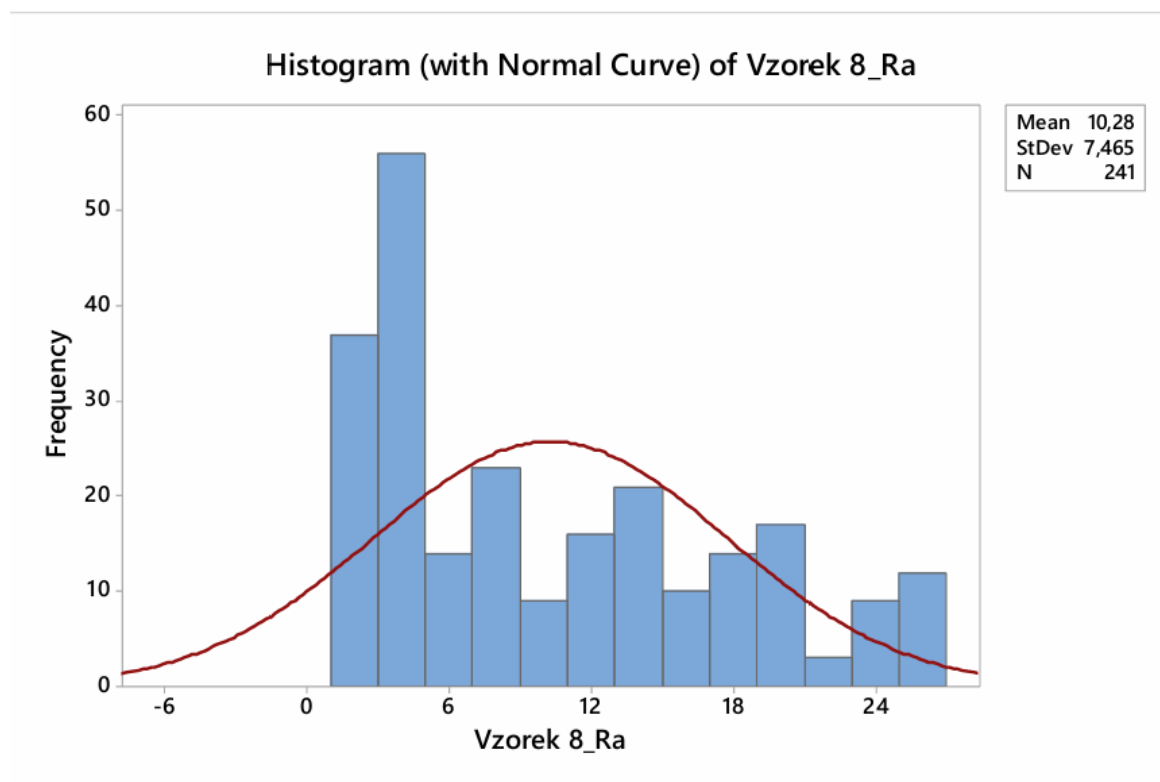
Obrázek 11 Histogram hodnot Ra 5. vzorku



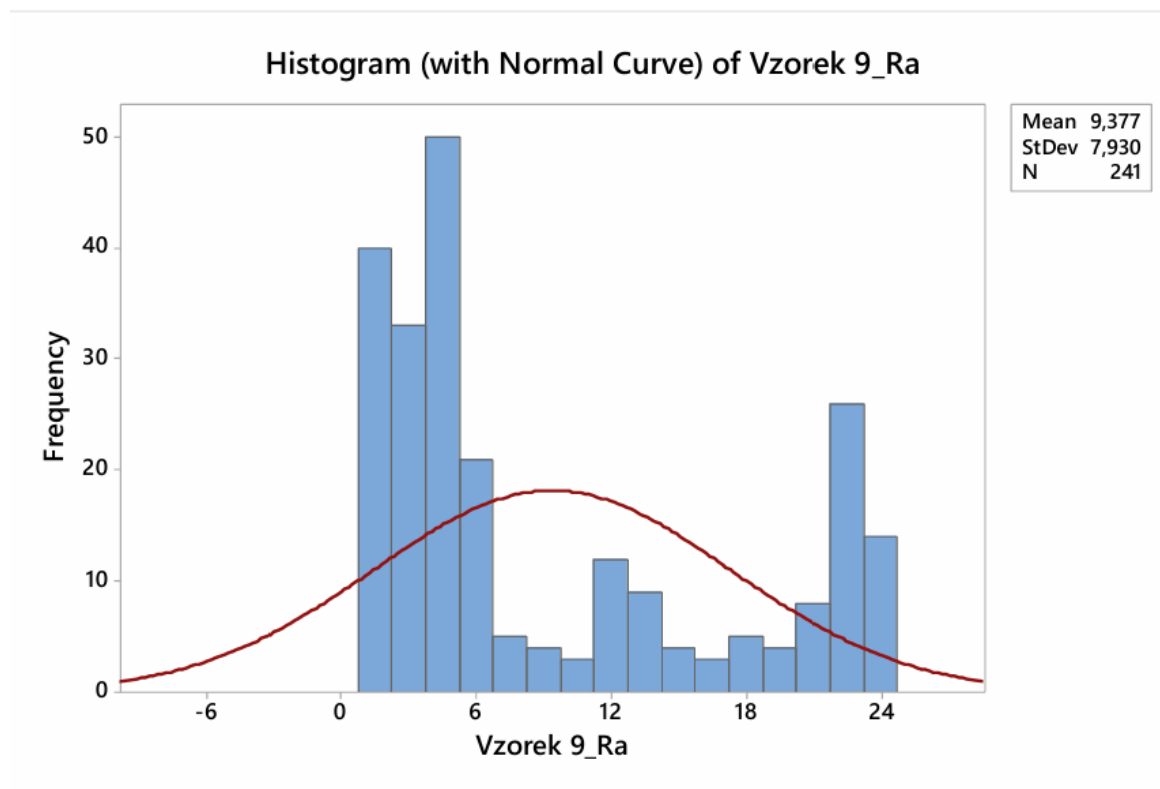
Obrázek 12 Histogram hodnot Ra 6. vzorku



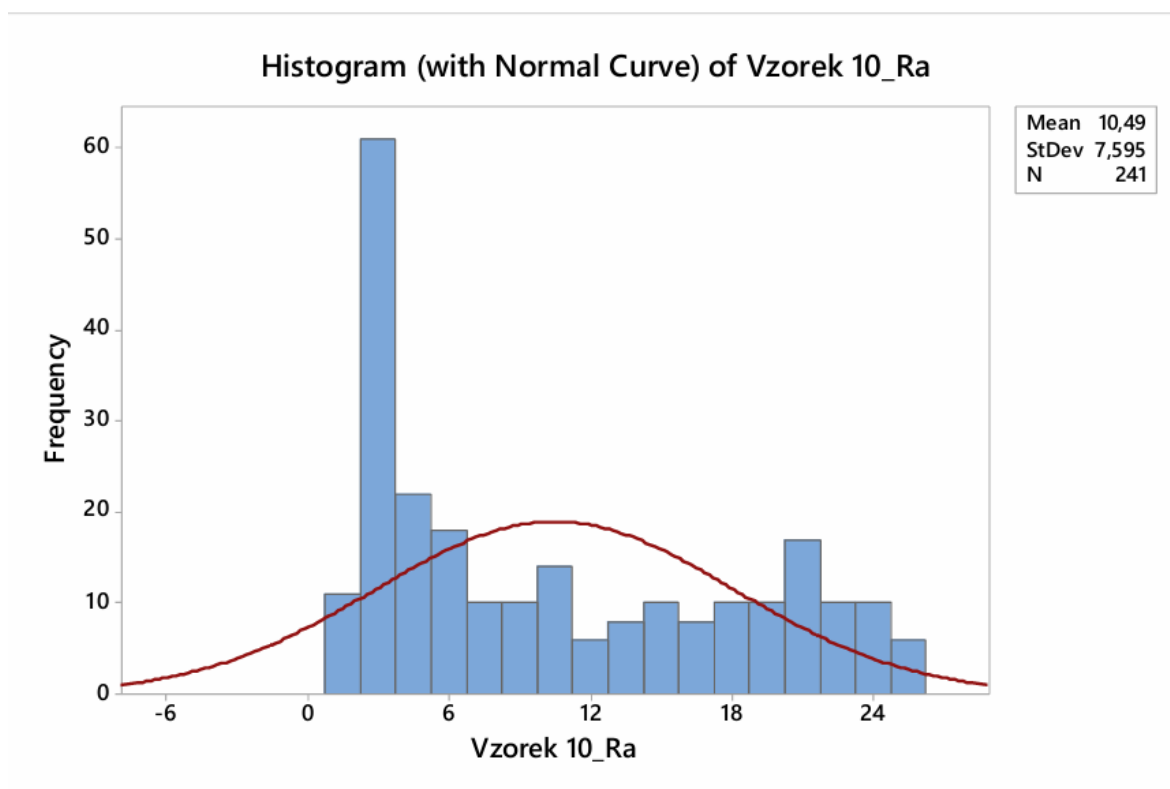
Obrázek 13 Histogram hodnot Ra 7. vzorku



Obrázek 14 Histogram hodnot Ra 8. vzorku



Obrázek 15 Histogram hodnot Ra 9. vzorku



Obrázek 16 Histogram hodnot Ra 10. vzorku

Při pohledu na tvary histogramu, vidíme jako by měly dva vrcholy a to je způsobeno odchylkou od normálního (gaussovo) rozdělení dat, tudíž histogramy naznačují určitý stupeň dvouvrcholového rozdělení.

Diskuze k parametrům Ra

Parametr Ra (průměrná aritmetická odchylka profilu) je základním ukazatelem drsnosti povrchu a vyjadřuje průměr absolutních hodnot odchylek profilu od střední linie. V této práci byly naměřené hodnoty parametru Ra uspořádány do tabulek a následně zpracovány pomocí box-plotů, časových řad a histogramů.

Box-plot grafy ukázaly rozložení hodnot Ra pro jednotlivé vzorky a umožnily přímé srovnání mezi nimi. Je patrné, že většina vzorků vykazuje podobnou variabilitu hodnot s několika odlehlými datovými body, což může naznačovat heterogenitu povrchu způsobenou nerovnoměrnou obrobiteľností materiálu nebo nestabilitou výrobního procesu. Přítomnost odlehlých hodnot může být také způsobena nepravidelností v průběhu měření, například vlivem náhodného výkyvu při laserovém obrábění.

Časové grafy parametrů Ra ukázaly, že hodnoty mají tendenci kolísat v závislosti na čase měření. Toto kolísání může být způsobeno fluktuacemi v pracovním prostředí (např.

teplota nebo vibrace) nebo mírnými změnami v nastavení laserového obrábění. Přesto lze identifikovat určité vzory a stabilní období, což naznačuje, že část povrchu je homogenní, zatímco jiné části vykazují větší variabilitu.

Histogramy jednotlivých vzorků ukázaly na přítomnost dvouvrcholového rozdělení, což může naznačovat, že vzorky obsahují dvě různé oblasti drsnosti - např. místa s vyšším a nižším úběrem materiálu. Tento jev může být přičítán variabilitě v laserovém procesu nebo přítomnosti různorodých fází v obráběném materiálu.

Výsledky naznačují, že povrchy vzorků vykazují znaky nehomogenity, přičemž variabilita hodnot R_a je způsobena jednak výrobním procesem, jednak fyzikálními vlastnostmi materiálu. Dvouvrcholové rozdělení histogramů podporuje hypotézu, že povrchy obsahují dvě odlišné struktury. Pro lepší pochopení by bylo vhodné provést další analýzu materiálového složení nebo provést měření na jiných vzorcích pro potvrzení trendu.

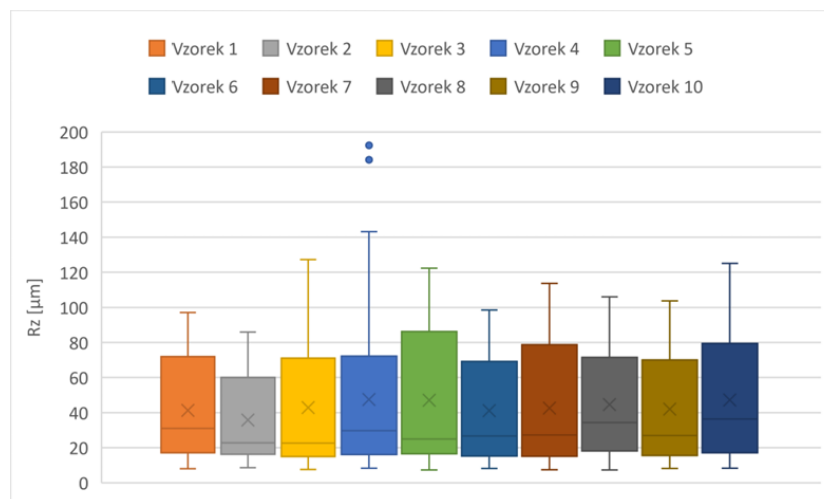
8.2 Analýza hodnot struktury (R_z)

Nyní podobně jako u hodnot R_a se pro přehlednost dosadily do tabulky hodnoty R_z .

Tabulka 2 Hodnoty parametru R_z

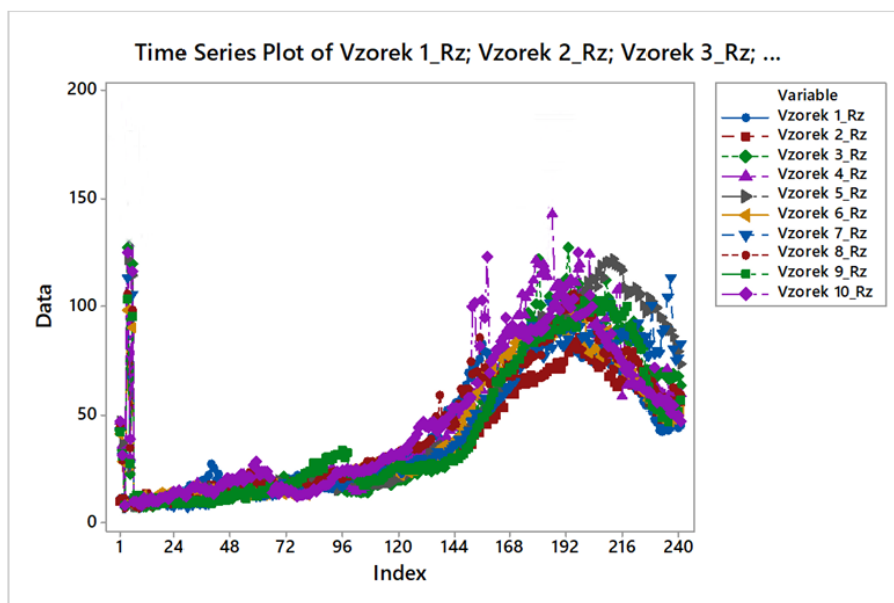
<u>R_z [μm]</u>	Průměr	Směrodatná odchylka	Min	Max	1. kvartil	3. kvartil	Medián
1	41,236	27,853	7,956	97,106	17,175	71,573	31,005
2	35,791	23,449	8,55	85,936	16,296	59,849	22,767
3	42,913	34,676	7,533	127,199	14,971	70,903	22,623
4	47,529	38,299	8,243	192,339	16,049	71,351	29,667
5	46,982	37,617	7,328	122,285	16,591	86,198	24,967
6	41,181	28,962	8,145	98,503	15,23	69,085	26,676
7	42,626	32,05	7,461	113,734	15,097	78,599	27,204
8	44,58	29,705	7,29	105,983	18,177	71,138	34,397
9	42	31,616	8,155	103,659	15,703	69,849	26,932
10	47,151	32,498	8,368	125,066	17,213	79,029	36,389

Nyní se podobně jako předešlé tabulky hodnot vypracoval Box-plot, ve kterém lze stejně jednoduše porovnat jednotlivé vzorky mezi sebou.



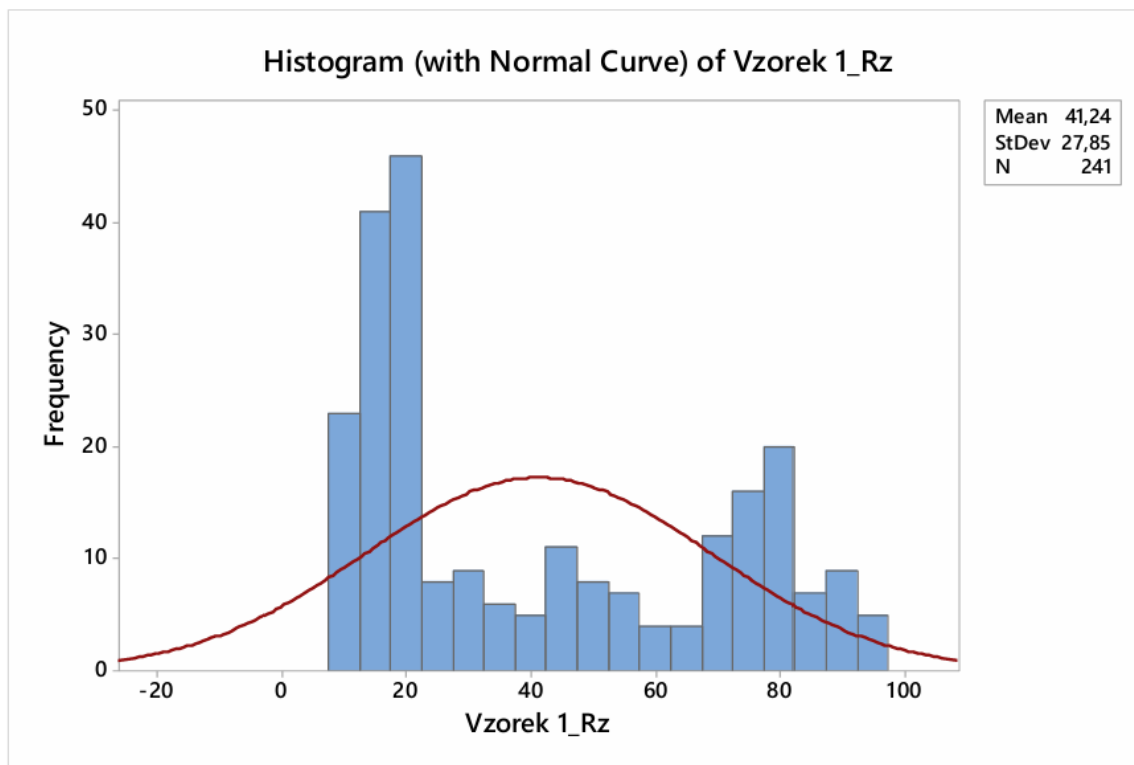
Obrázek 17 Box-plot pro parametr hodnot Rz

Při pohledu na časovou řadu pro parametr Rz, je viditelná podoba s grafem časové řady parametru Ra.

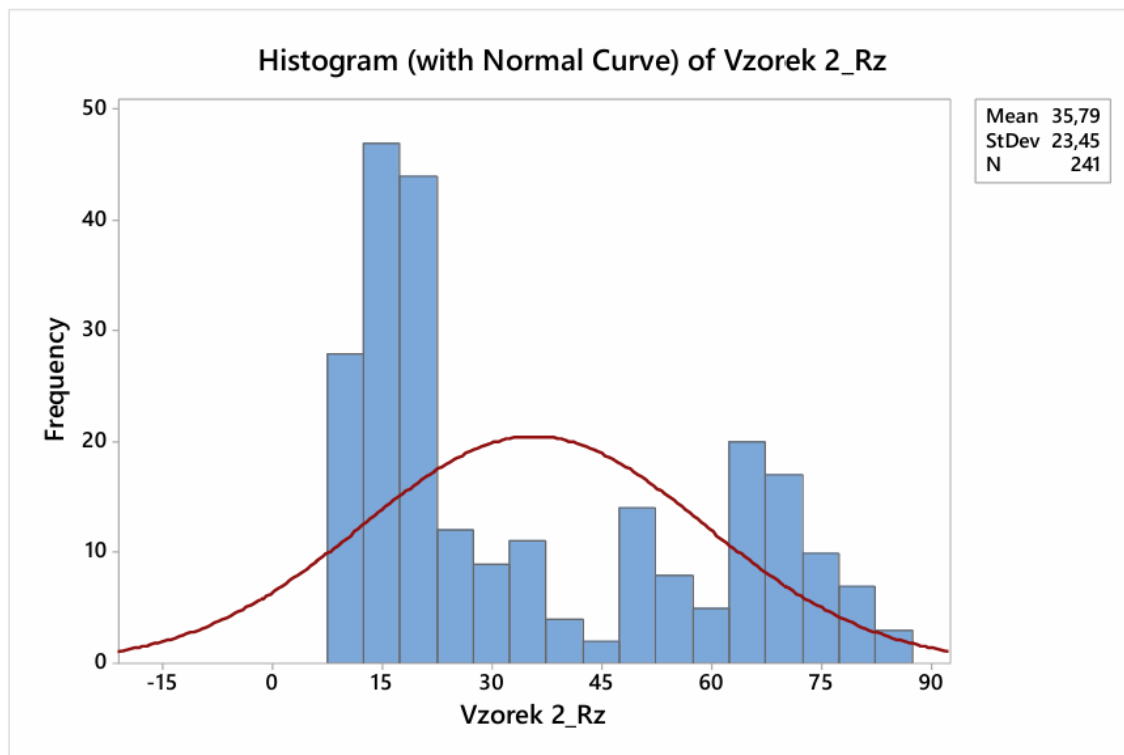


Obrázek 18 Časová řada parametru hodnot Rz

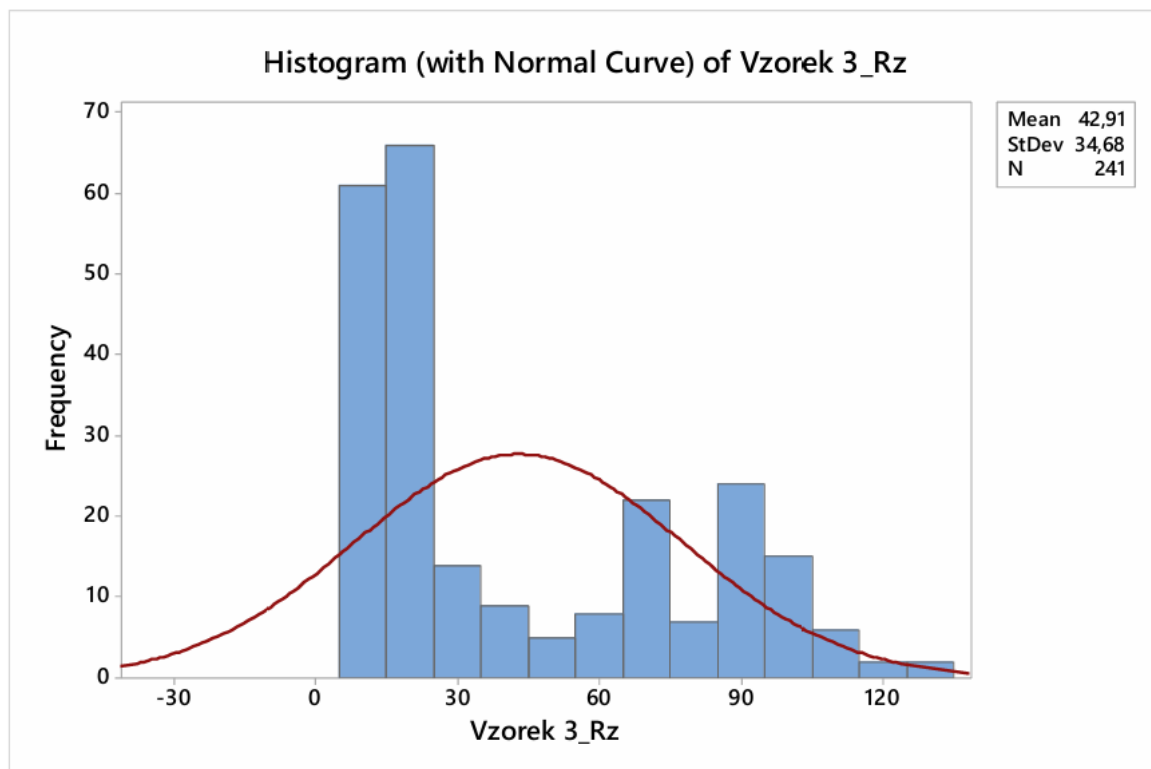
A potom se znovu pro jednotlivé vzorky vypracovaly histogramy.



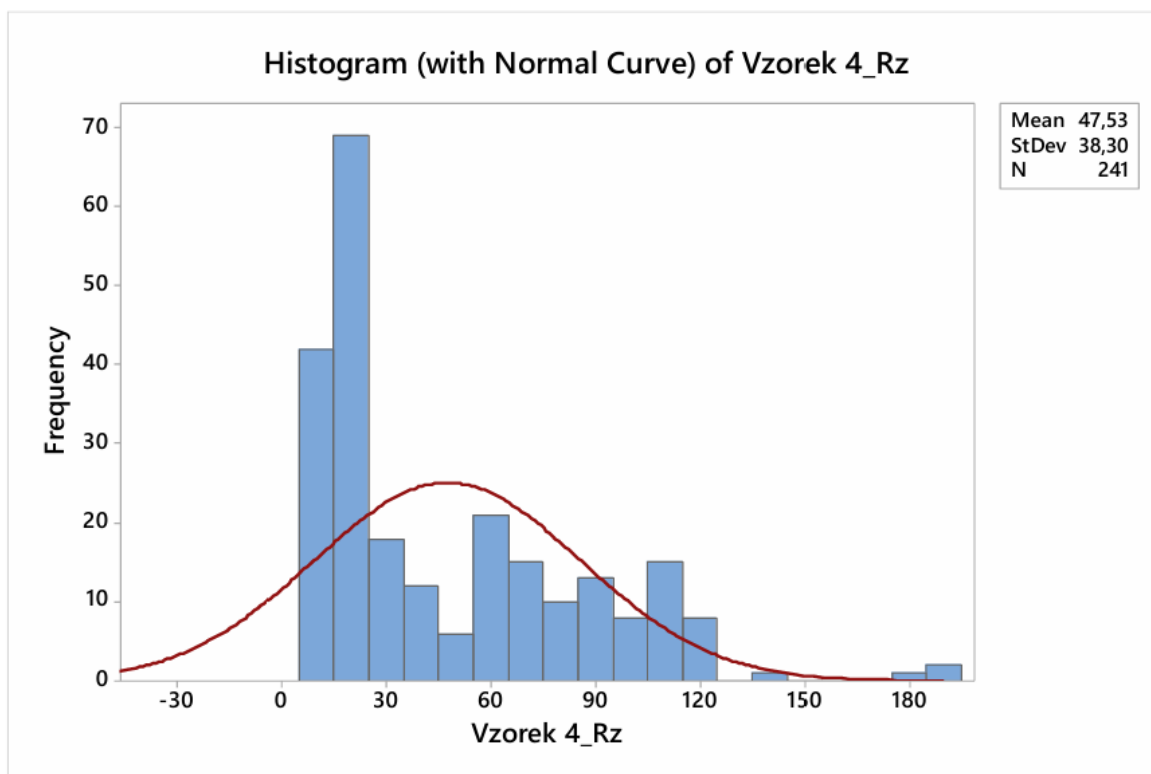
Obrázek 19 Histogram hodnot Rz 1. vzorku



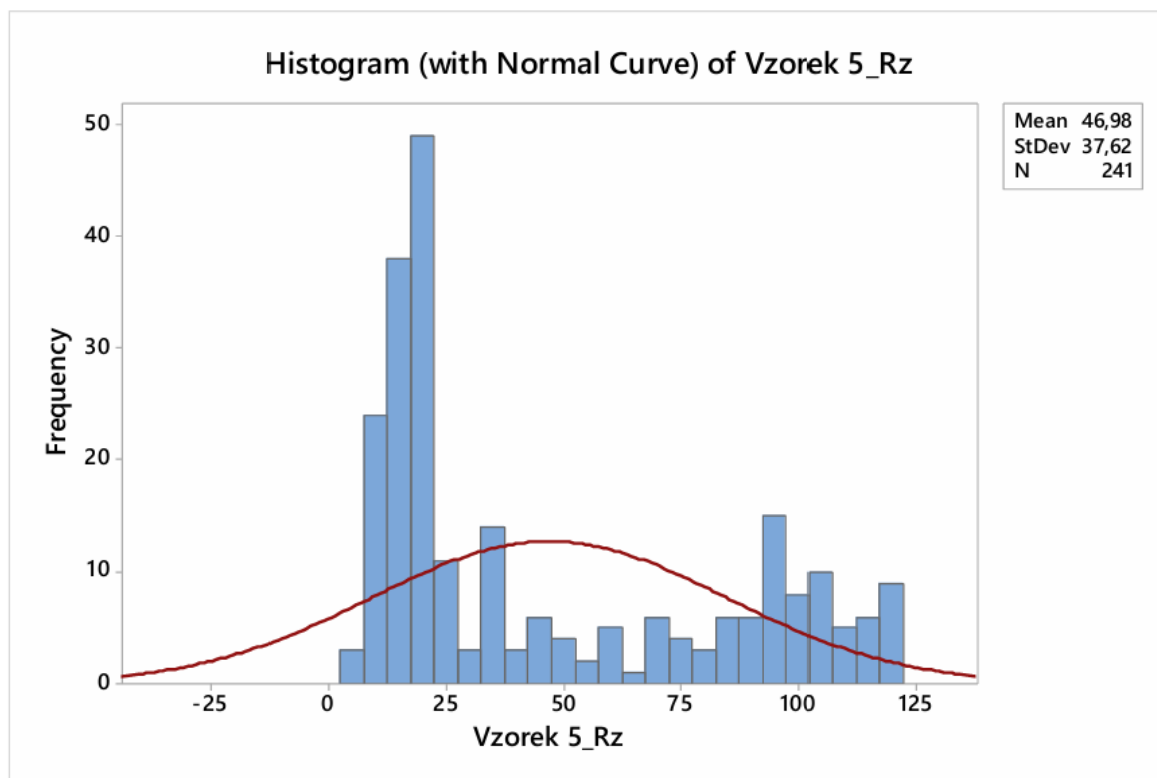
Obrázek 20 Histogram hodnot Rz 2. vzorku



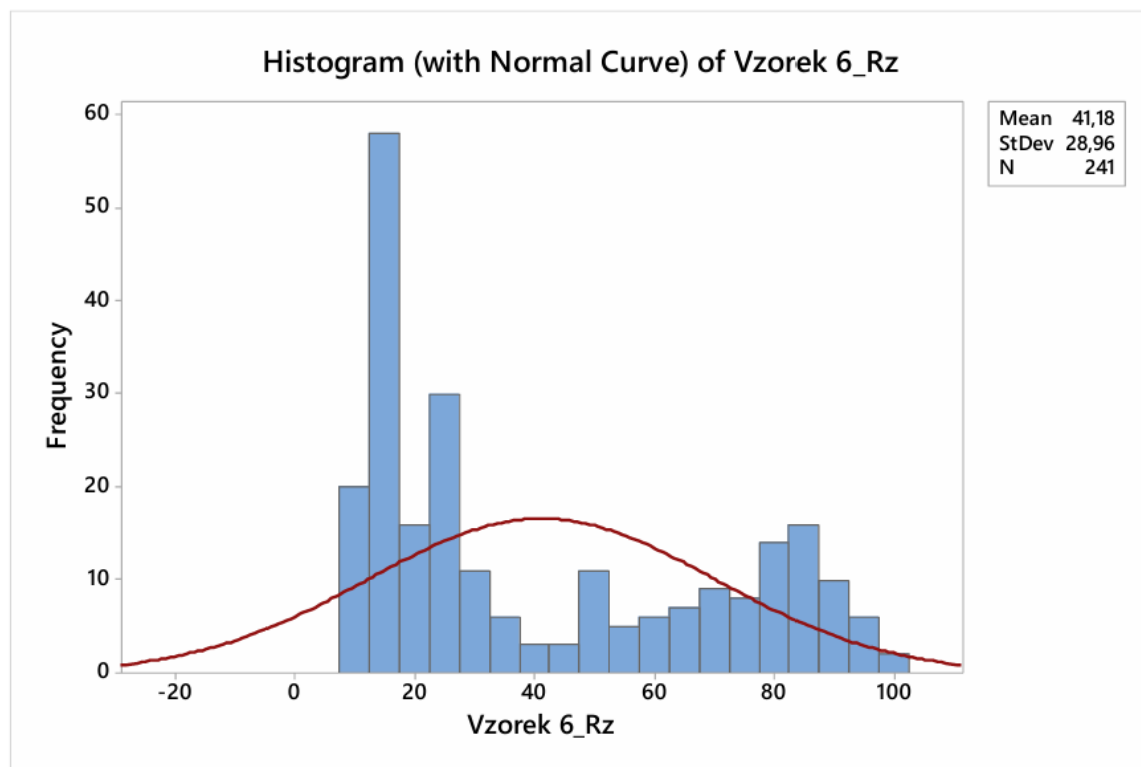
Obrázek 21 Histogram hodnot Rz 3. vzorku



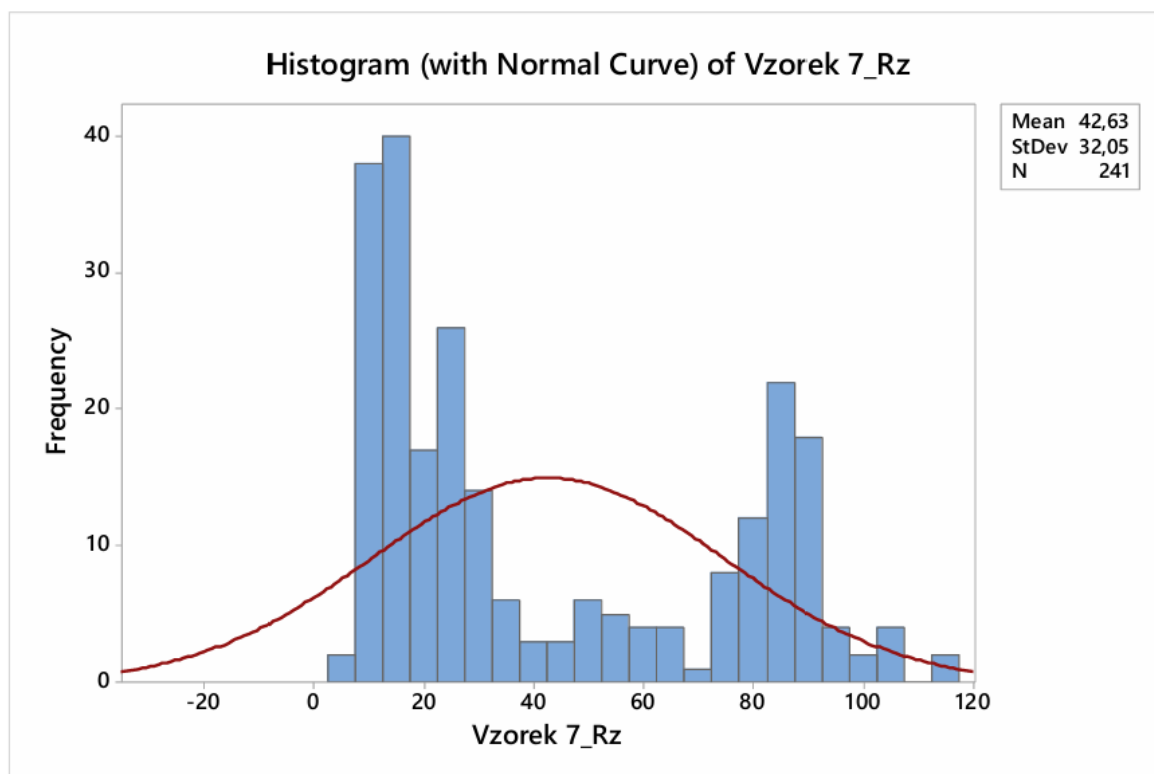
Obrázek 22 Histogram hodnot Rz 4. vzorku



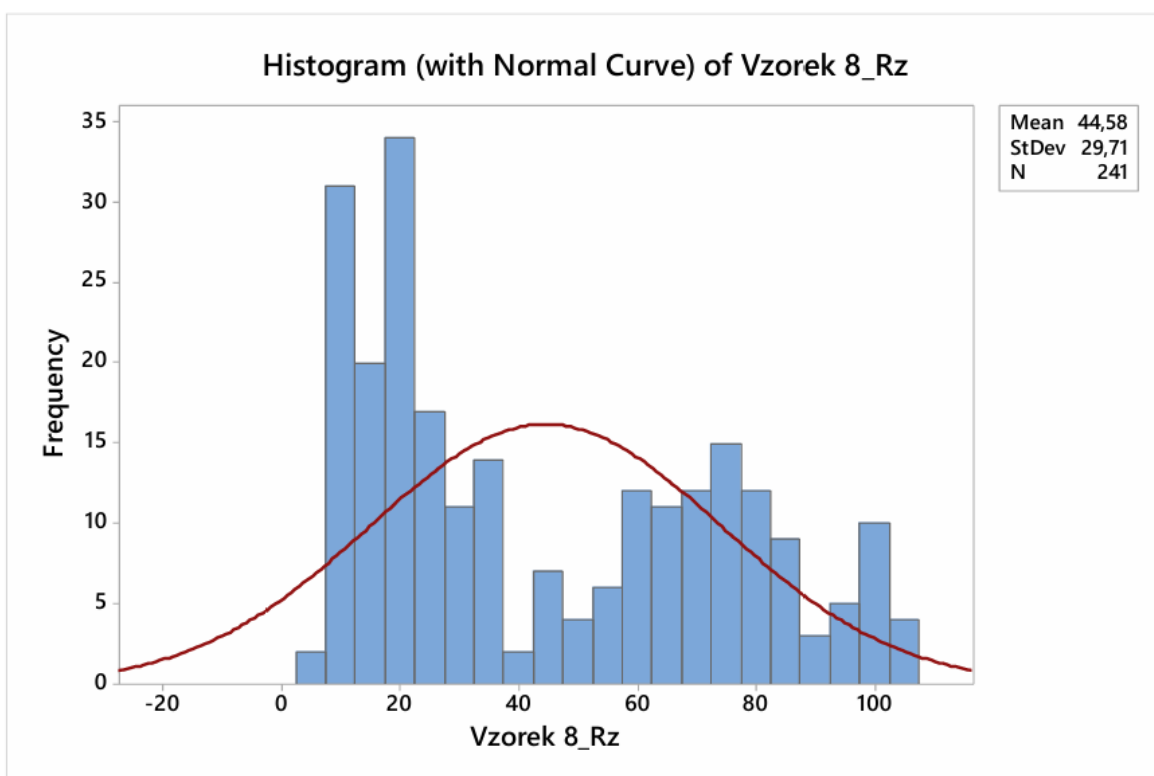
Obrázek 23 Histogram hodnot Rz 5. vzorku



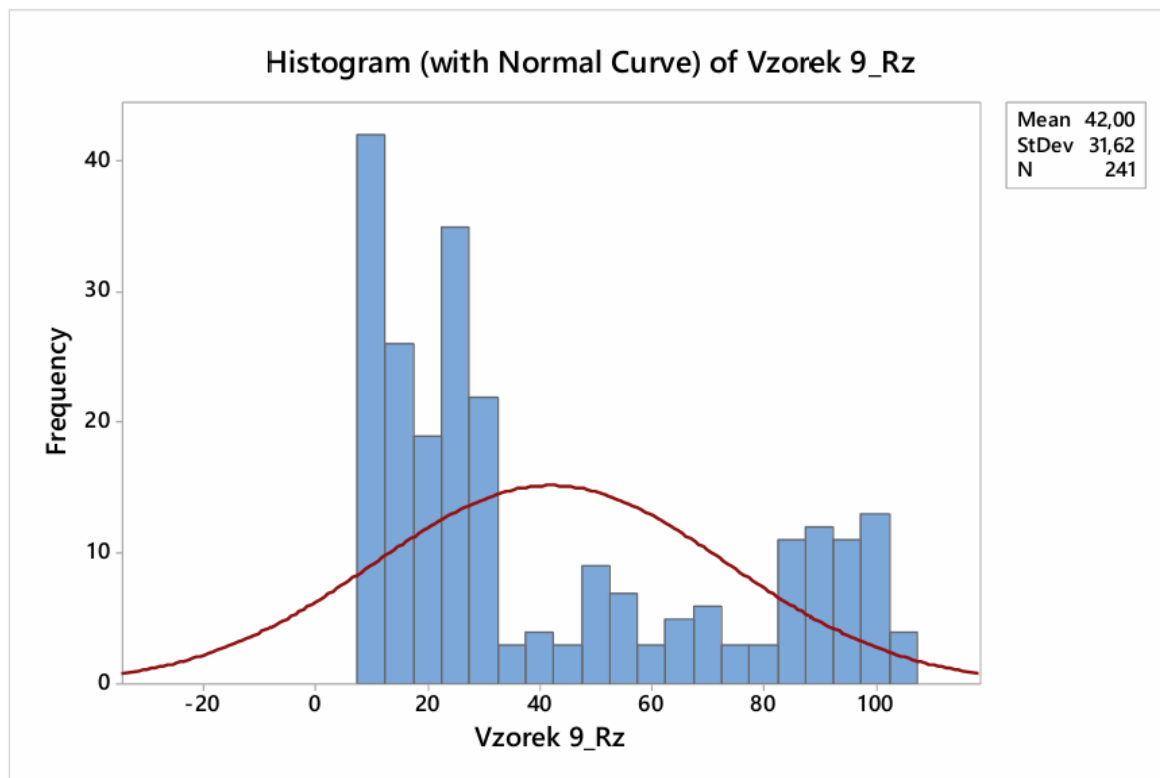
Obrázek 24 Histogram hodnot Rz 6. vzorku



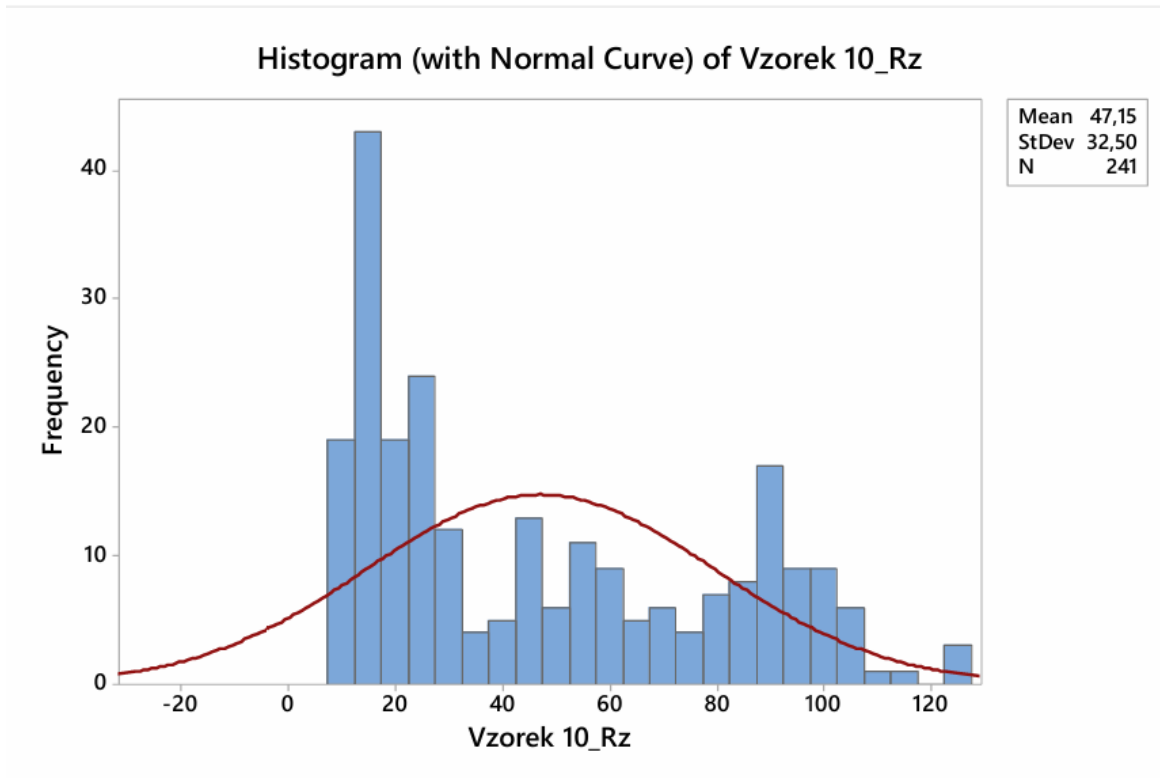
Obrázek 25 Histogram hodnot Rz 7. vzorku



Obrázek 26 Histogram hodnot Rz 8. vzorku



Obrázek 27 Histogram hodnot Rz 9. vzorku



Obrázek 28 Histogram hodnot Rz 10. vzorku

Při pohledu na histogramy je viditelné, že parametr hodnoty R_z je zde zase odchylen od normálního (gaussovo) rozdělení a způsobuje dvouvrcholové rozdělení.

Diskuze k parametrům R_z

Parametr R_z (maximální výškový rozdíl nerovností) poskytuje informace o maximální drsnosti povrchu a je důležitý zejména v aplikacích, kde povrchová nerovnost ovlivňuje funkčnost dílu (např. těsnost nebo tření).

Box-ploty pro parametr R_z ukazují vyšší variabilitu hodnot v porovnání s parametrem R_a . U několika vzorků se vyskytují výrazně vyšší hodnoty, což může poukazovat na přítomnost výraznějších nerovností, jako jsou vrcholy nebo prohlubně způsobené laserovým obráběním. Toto zvýšení R_z může mít negativní vliv na funkční vlastnosti povrchu, zejména v aplikacích, kde je požadována nízká drsnost.

Podobně jako u R_a i zde časové grafy ukázaly kolísání hodnot R_z . Nicméně, kolísání je výraznější, což může indikovat, že povrch je náchylnější k lokálním změnám drsnosti. Tento jev může být způsoben přechodovými zónami v laserovém procesu nebo variabilitou v obrobitelnosti materiálu.

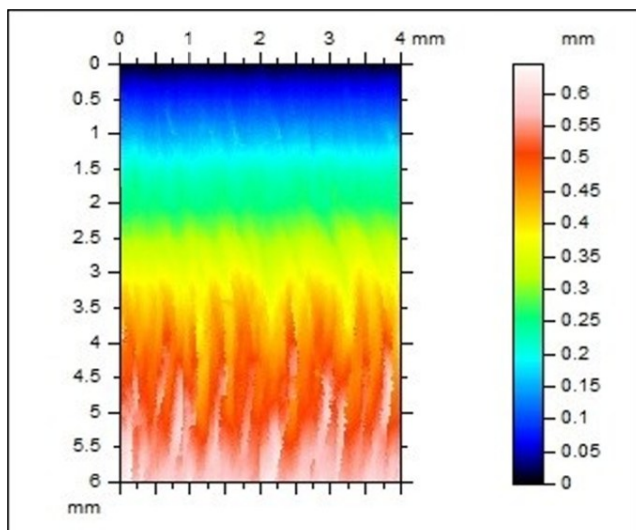
Histogramy parametrů R_z ukázaly podobný jev jako u R_a - dvouvrcholové rozdělení. Tento fenomén může být způsoben nehomogenitou obráběného povrchu nebo nekonzistencí v procesu laserového obrábění. Je možné, že různé oblasti vzorku vykazují odlišnou strukturu drsnosti v důsledku rozdílných vlastností obráběného materiálu.

Interpretace výsledků R_z :

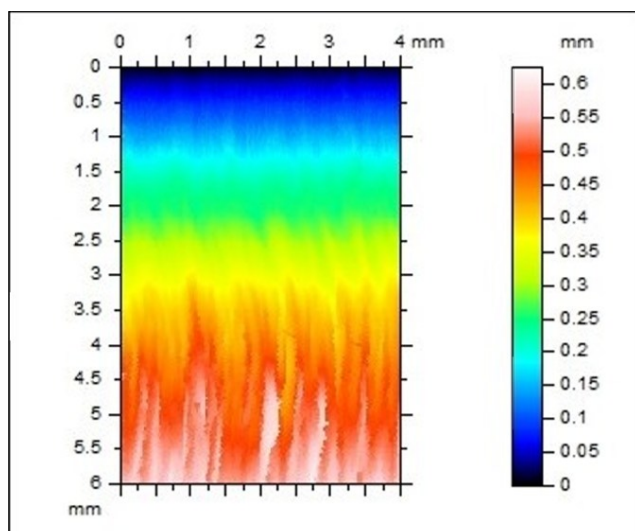
Vyšší variabilita hodnot R_z v porovnání s R_a poukazuje na přítomnost výraznějších nerovností na povrchu vzorků. Dvouvrcholové rozdělení potvrzuje, že povrch není homogenní, a přítomnost lokálně vyšších hodnot může indikovat přítomnost defektů nebo hrubších částí způsobených laserovým procesem. Vzhledem k rozdílným hodnotám R_z mezi vzorky lze usuzovat, že jednotlivé části vzorku byly ovlivněny různými podmínkami obrábění.

8.3 Vizualizace výsledků a interpretace

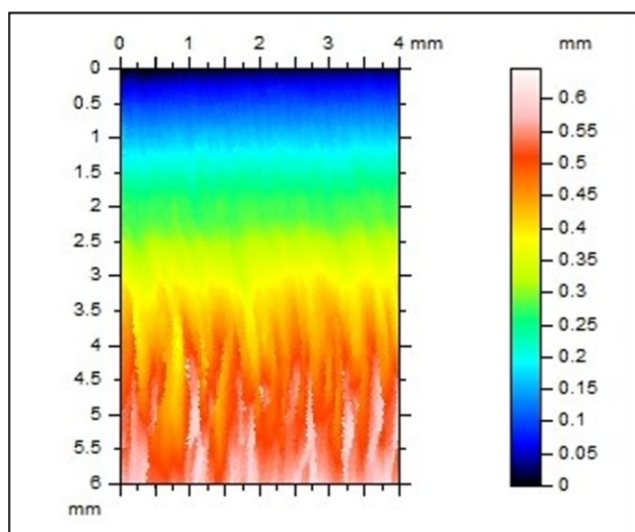
Pro detailní analýzu profilové struktury povrchu byla nasnímaná data povrchů všech vzorků, která byla také získána z profilometru.



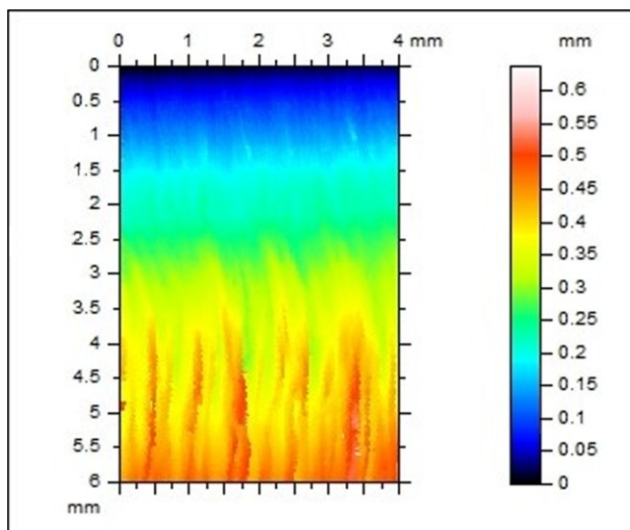
Obrázek 29 Detail povrchu 1. vzorku



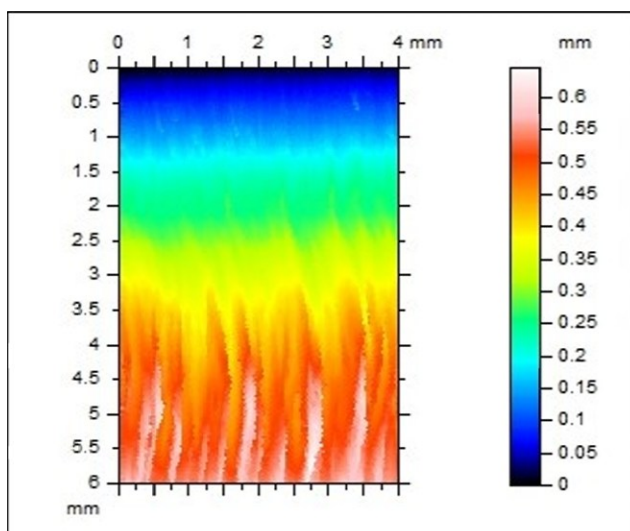
Obrázek 30 Detail povrchu 2. vzorku



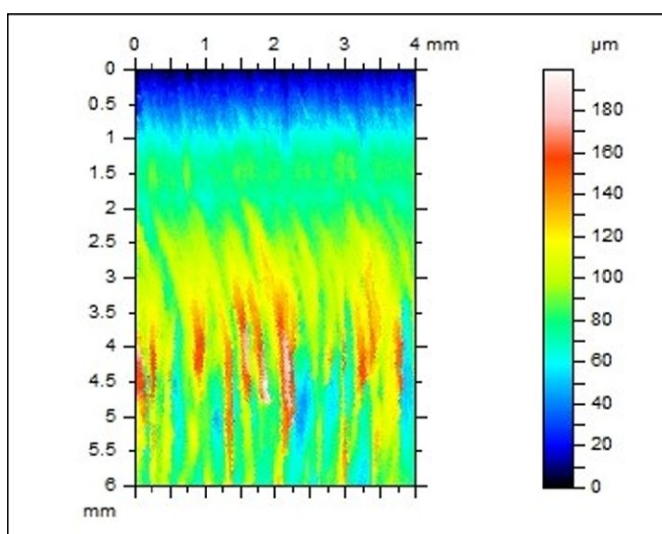
Obrázek 31 Detail povrchu 3. vzorku



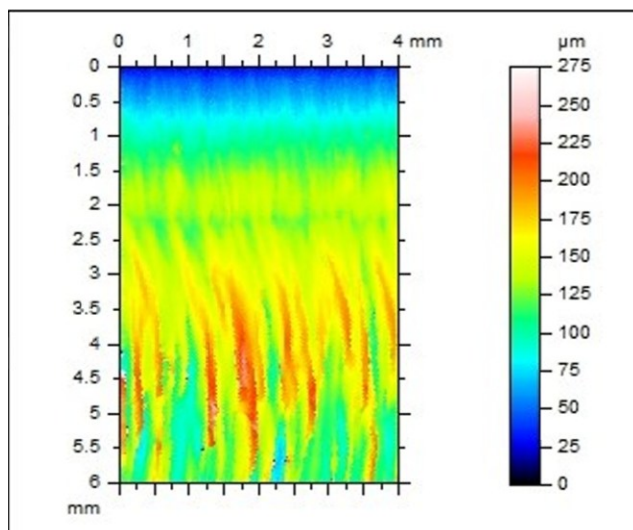
Obrázek 32 Detail povrchu 4. vzorku



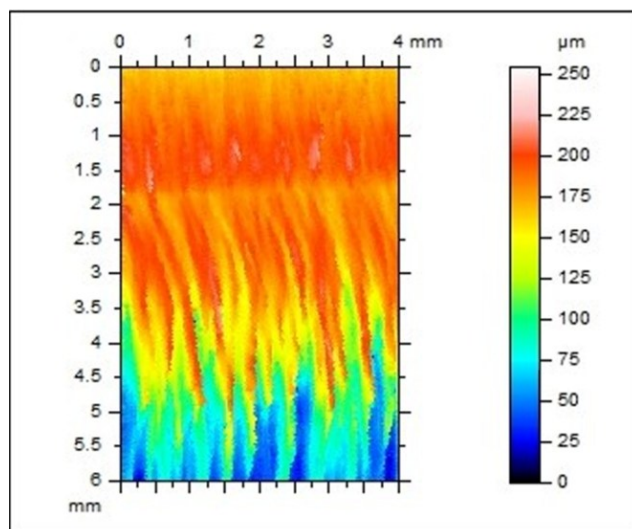
Obrázek 33 Detail povrchu 5. vzorku



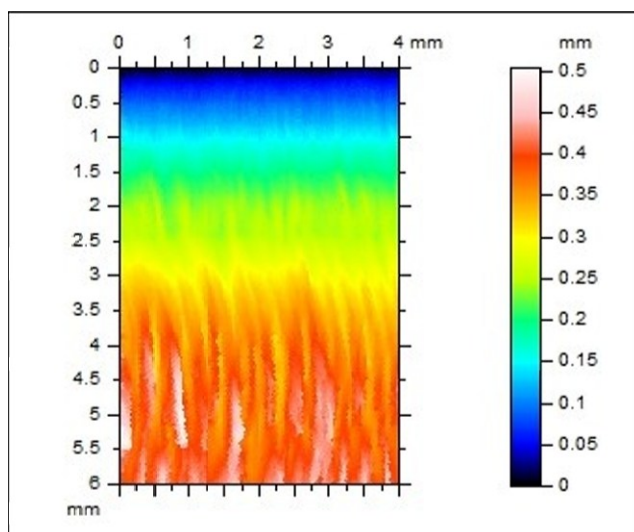
Obrázek 34 Detail povrchu 6. vzorku



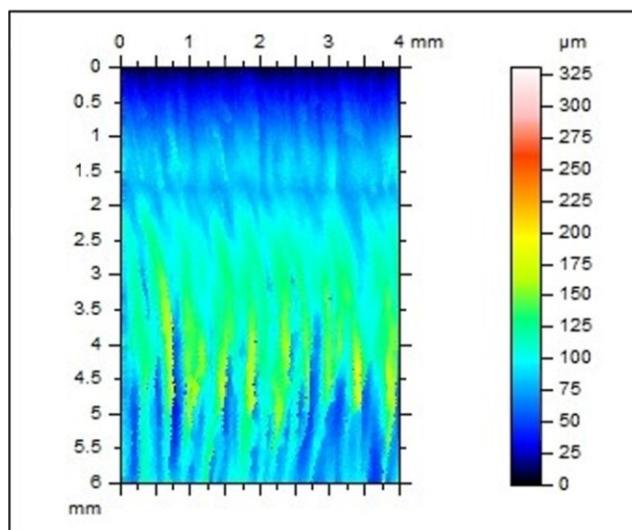
Obrázek 35 Detail povrchu 7. vzorku



Obrázek 36 Detail povrchu 8. vzorku



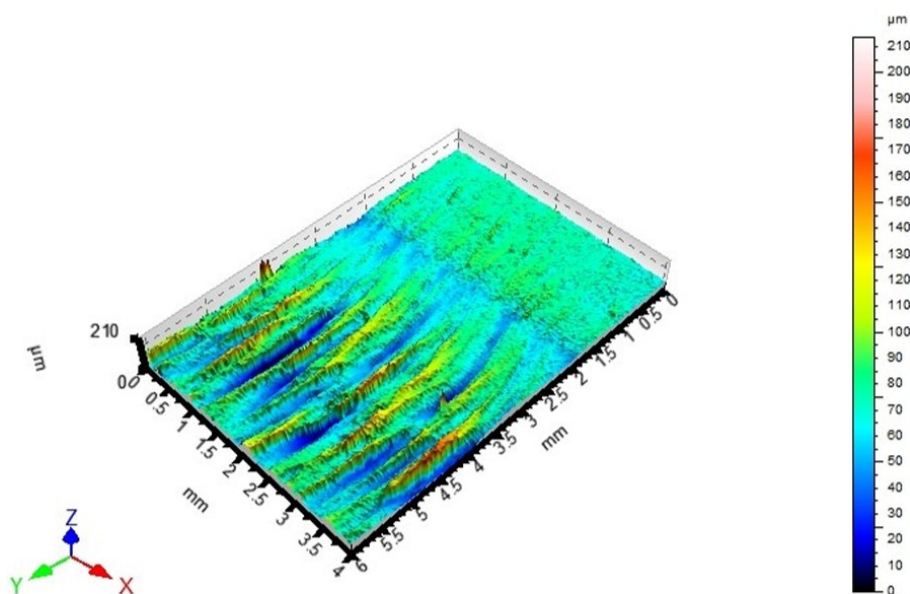
Obrázek 37 Detail povrchu 9. vzorku



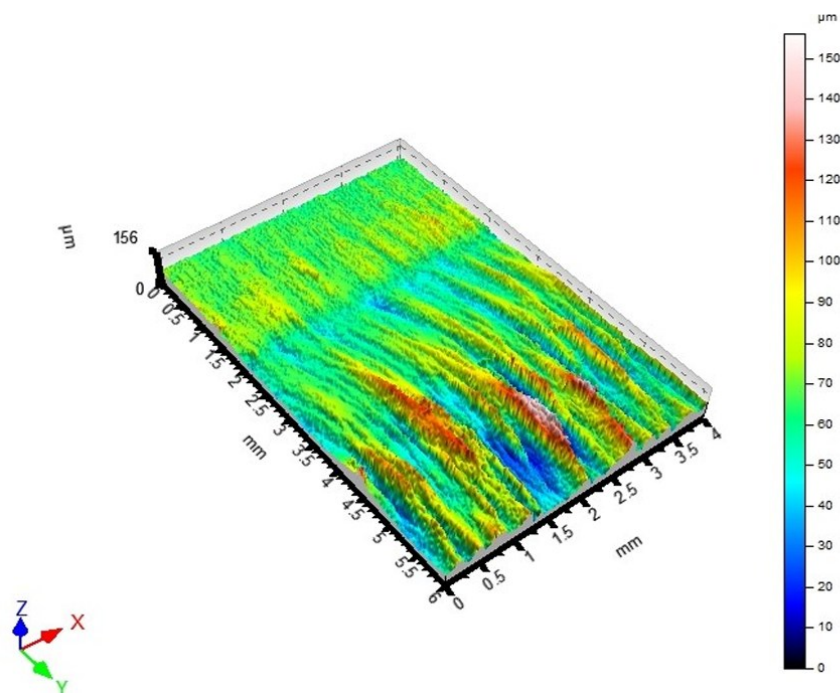
Obrázek 38 Detail povrchu 10. vzorku

8.3.1 Vyobrazení 3D struktury vzorků

Pro přehled jsou vyobrazeny struktury ve 3D, vyplývající z dat vzorků 1 a 2 o rozměrech 4x6 mm.



Obrázek 39 3D struktura pro povrch 1. vzorku



Obrázek 40 3D struktura pro povrch 2. vzorku

8.3.2 Homogenita vs. heterogenita povrchu

Z výsledků analýzy vzorků lze konstatovat, že povrchy obráběné laserem jsou jednoznačně heterogenní. Tato nekonzistence je přirozeným důsledkem laserového obrábění, které často vede k variabilitě povrchu v důsledku nerovnoměrného energetického vstupu a nestabilních procesních podmínek. Laserové technologie, přestože umožňují velmi přesné opracování, vykazují značnou variabilitu povrchové struktury právě kvůli komplexní interakci mezi laserovým paprskem a materiálem.

Tuto skutečnost ilustruje přiložený obrázek, který vizuálně demonstuje povrchovou strukturu vzorku po laserovém obrábění. Na levé straně je zachycena 3D vizualizace povrchu, která názorně ukazuje rozdílné výšky jednotlivých nerovností. Barevné odstíny reflektují variabilitu výškových profilů, přičemž výrazné změny v barvě indikují přechody mezi hladšími a hrubšími částmi povrchu. Tato vizualizace jasně potvrzuje výskyt heterogenních oblastí, které vznikly v důsledku dynamiky laserového procesu.

Uprostřed obrázku je zobrazen graf s hodnotami R_a (průměrná aritmetická odchylka profilu) pro jednotlivé vzorky. Graf je rozdělen na tři oblasti (1., 2. a 3.), přičemž každá oblast reprezentuje jiný úsek měřeného vzorku. První oblast vykazuje relativně nízké a stabilní hodnoty R_a , zatímco ve druhé oblasti dochází k prudkému nárůstu drsnosti. Tato změna je přechodem do heterogennější části povrchu, což naznačuje zvýšenou variabilitu při vzájemném působení laserového paprsku s materiálem. Třetí oblast pak ukazuje opět pokles hodnot, což může odpovídat stabilizaci obráběcího procesu nebo snížení intenzity paprsku.

Na pravé straně obrázku jsou umístěny mikroskopické snímky povrchu vzorku po laserovém obrábění. Zde jsou jasně viditelné výrazné drážky a struktury, které odpovídají vyšším hodnotám R_a z grafu. Podrobné mikroskopické zobrazení potvrzuje, že laserové obrábění vytváří výrazné lokální odchylky v textuře povrchu, což vede k celkové heterogenitě. Tato výrazná struktura povrchu může ovlivňovat funkční vlastnosti materiálu, zejména v aplikacích vyžadujících hladké nebo konzistentní povrchy.

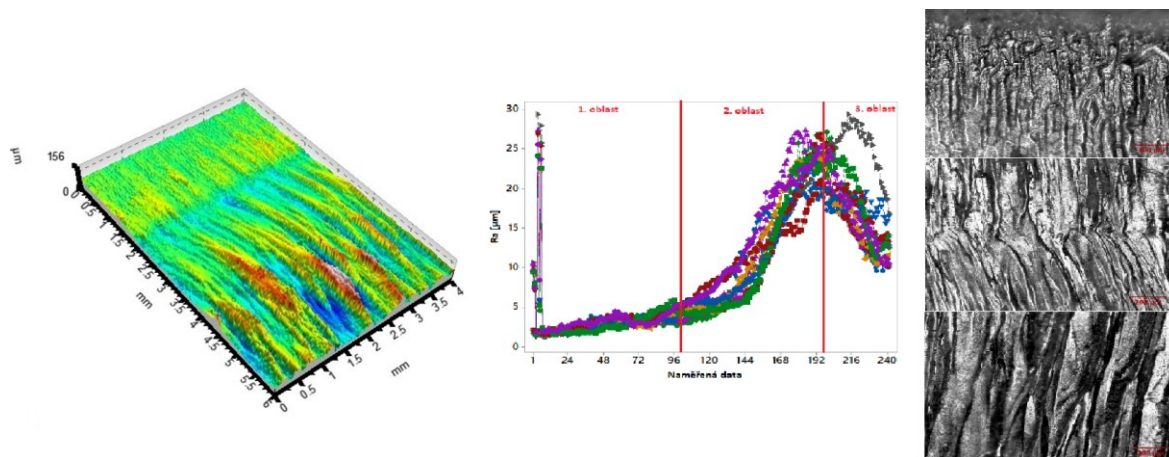
Aby bylo možné tuto heterogenitu lépe pochopit a následně optimalizovat výrobní proces, je třeba zaměřit se na několik klíčových aspektů. V první řadě je nutné analyzovat vliv různých parametrů laserového obrábění, jako je intenzita paprsku, rychlost posuvu a počet průchodů. Tyto proměnné mohou zásadně ovlivnit konečnou drsnost povrchu, a proto je doporučeno provést experimenty s jejich odlišným nastavením.

Vzhledem k tomu, že laserové obrábění přirozeně generuje heterogenní struktury, je vhodné při analýze povrchu vzorky rozdělit na menší segmenty a vyhodnocovat drsnost v jednotlivých částech zvlášť. Tím lze získat přesnější obraz o rozložení povrchové struktury a lépe identifikovat oblasti s vyšší variabilitou.

Dále se doporučuje použít i jiné bezkontaktní metody měření povrchové drsnosti, jako je konfokální mikroskopie nebo 3D optické skenování. Tyto metody mohou doplnit laserovou profilometrii a poskytnout komplexnější informace o topografii povrchu.

S ohledem na rozdílné výsledky jednotlivých vzorků je rovněž žádoucí provést opakované měření za standardizovaných podmínek. Opakovaná měření umožní získat robustnější data a lépe pochopit variabilitu povrchu. V neposlední řadě je důležité soustředit se na stabilizaci samotného procesu laserového obrábění, například pomocí technik eliminujících výkyvy v energii vstupu či odchylky při vedení paprsku, což může výrazně přispět ke snížení variability a dosažení konzistentnější struktury povrchu.

Tímto způsobem lze dosáhnout optimalizace laserového obrábění a snížení heterogenity povrchů, což je zásadní pro zvýšení kvality finálních výrobků a jejich funkčních vlastností.. [32,33]



Obrázek 41 Grafické znázornění heterogenity

ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo statisticky porovnat rozdíly v hodnocení povrchové drsnosti podle tří norem – ISO 21920-1, ISO 21920-2 a ISO 25178, zároveň provést analýzu povrchů opracovaných laserem pomocí bezkontaktních metod měření. V rámci práce byla provedena literární rešerše zaměřená na principy měření a vyhodnocování povrchových struktur, poté následovalo praktické měření vzorků a vyhodnocení získaných dat.

Výsledky ukázaly, že laserové obrábění vede k heterogenní struktuře povrchu. Tato nerovnoměrnost je způsobena kolísáním vstupních parametrů během procesu, jako je proměnlivá intenzita paprsku nebo rychlost posuvu. Ze statistické analýzy hodnot parametru R_a vyplynulo, že povrchová drsnost se v jednotlivých oblastech vzorku výrazně liší. Největší odchylky byly pozorovány v přechodových částech, tam kde docházelo ke změnám ve vzájemném působení mezi laserovým paprskem a materiálem.

Z hlediska metodiky měření se ukázalo, že výběr normy může mít zásadní vliv na interpretaci výsledků, přičemž rozdíly mezi jednotlivými normami nejsou zanedbatelné. Dále bylo potvrzeno, že komplexní posouzení povrchu vyžaduje kombinaci více měřících metod a úsekové hodnocení jednotlivých částí vzorku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PANWAR, Vishwanath et al. Experimental investigations and optimization of surface roughness in turning of en 36 alloy steel using response surface methodology and genetic algorithm. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, vol. 46, s. 6474–6481. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.642>
- [2] HEMMAT ESFE, Mohammad, Mehdi BAHIRAEI a Ashkan MIR. Application of conventional and hybrid nanofluids in different machining processes: A critical review. *Advances in Colloid and Interface Science* [online]. 2020, vol. 282, s. 102199. ISSN 0001-8686. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102199>
- [3] PIMENOV, Danil Yu et al. Application of measurement systems in tool condition monitoring of Milling: A review of measurement science approach. *Measurement* [online]. 2022, vol. 199, s. 111503. ISSN 0263-2241. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111503>
- [4] SHILPA, M. K. a Vamsidhar YENDAPALLI. Surface roughness estimation techniques for drilled Surfaces: A review. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, vol. 52, s. 1082–1091. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.496>
- [5] CHANG, Shuaikang et al. Thermal effects and deformation mechanisms in abrasive waterjet machining: insights from Ti-6Al-4V alloy for broader applications. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2024, vol. 334, s. 118643. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118643>
- [6] Anu Kuttan, A., Rajesh, R. & Dev Anand, M. Abrasive water jet machining techniques and parameters: a state of the art, open issue challenges and research directions. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 43, 220 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02898-6>
- [7] MING, Wuyi et al. Progress in modeling of electrical discharge machining process. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2022, vol. 187, s. 122563. ISSN 0017-9310. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122563>

- [8] MANIKANDAN, N. et al. Multi aspects optimization on spark erosion machining of Incoloy 800 by Taguchi Grey approach. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, vol. 39, s. 148–154. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.403>
- [9] Asmael, M., Safaei, B., Zeeshan, Q. et al. Ultrasonic machining of carbon fiber-reinforced plastic composites: a review. *Int J Adv Manuf Technol* 113, 3079–3120 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06722-2>
- [10] XU, Zhengyang a Yudi WANG. Electrochemical machining of complex components of aero-engines: Developments, trends, and technological advances. *Chinese Journal of Aeronautics* [online]. 2021, vol. 34, no. 2, s. 28–53. ISSN 1000-9361. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.09.016>
- [11] ZHANG, Junqi et al. A double ignition strategy for enhanced efficiency in atmospheric plasma machining. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2025, vol. 337, s. 118746. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2025.118746>
- [12] BAKHTIYARI, Ali Naderi et al. A review on applications of artificial intelligence in modeling and optimization of laser beam machining. *Optics & Laser Technology* [online]. 2021, vol. 135, s. 106721. ISSN 0030-3992. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106721>
- [13] Kolamroudi, M.K., Asmael, M., Ilkan, M. et al. Developments on Electron Beam Melting (EBM) of Ti–6Al–4V: A Review. *Trans Indian Inst Met* 74, 783–790 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02230-9>
- [14] ZADAFIYA, Kishan et al. Recent trends in non-traditional machining of shape memory alloys (SMAs): A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 2021, vol. 32, s. 217–227. ISSN 1755-5817. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.01.003>
- [15] SARAVANAN, S. et al. A review on recent progresses in machining methods based on abrasive water jet machining. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020, vol. 21, s. 116–122. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.373>
- [16] KANAKE, Vikas a B. B. AHUJA. Hybrid machining processes: An overview. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2023, vol. 72, s. 1379–1385. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.335>

- [17] ČSN EN ISO 21920-1. *Geometrické specifikace výrobků (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Část 1: Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2022.
- [18] ČSN EN ISO 21920-2. *Geometrické specifikace výrobků (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Část 2: Pravidla pro určení specifikací*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2023.
- [19] ČSN EN ISO 21920-3. *Geometrické specifikace výrobků (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Část 3: Operace a vyhodnocování dat*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2023.
- [20] ČSN EN ISO 25178-2. *Geometrické specifikace výrobků (GPS) – Struktura povrchu: Plošná metoda – Část 2: Termíny, definice a parametry*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [21] SCHWARTZ, H. and DECKER, J. *Understanding ISO 25178: The New Areal Surface Texture Parameters*. 1. vyd. USA: Digital Surf, 2021.
- [22] MÜLLER, Alexander, EIFLER, Matthias, JAWAID, Arsalan, a SEEWIG, Jörg. *Feature Characterization for Profile Surface Texture* [online]. arXiv, 2024-06-10 [cit. 2025-05-10]. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/2406.06381>
- [23] MEASURING surface roughness: A comprehensive guide [online]. [s.l.]: Wevolver, 2021 [cit. 2025-05-10]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/measuring-surface-roughness-a-comprehensive-guide>
- [24] KEMAL MANUFACTURING. *A Comprehensive Guide to Surface Roughness, its Measurement, Standards, and Charts* [online]. 2024 [cit. 2025-04-28]. Dostupné z: <https://www.kemalmfg.com/cnc-machining/surface-roughness/>
- [25] DIGITAL SURF. *Surface Metrology Guide* [online]. Besançon: Digital Surf, 2024 [cit. 2025-04-28]. Dostupné z: <https://guide.digitalsurf.com/en/guide-surface-texture.html>
- [26] HEUMANN, Christian; SCHOMAKER, Michael; SHALABH. *Introduction to Statistics and Data Analysis: With Exercises, Solutions and Applications in R*. 2. vydání. Cham: Springer, 2022. ISBN 978-3-031-11833-3. Dostupné z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-11833-3>
- [27] Balan, S. (2024). A Systematic Review of Data Visualization. *Journal of Strategic Innovation and Sustainability*, 19(3). <https://doi.org/10.33423/jsis.v19i3.7375>

- [28] AGRESTI, Alan. *Statistical Methods for the Social Sciences*. 5. vydání. Hoboken: Pearson, 2021. ISBN 978-0-13-754606-0. Dostupné z: <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/statistical-methods-for-the-social-sciences/P2000000006062/9780137546060>
- [29] MONTGOMERY, Douglas C., and RUNGER, George C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 7th ed. Hoboken: Wiley, 2020. ISBN 978-1-119-49749-1.
- [30] Jafari, A.A., Shaabani, J. Comparing scale parameters in several gamma distributions with known shapes. *Comput Stat* **35**, 1927–1950 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00180-020-00983-3>
- [31] ZHAO, Hang et al. Surface roughness evolution and heterogeneous plastic deformation of austenitic stainless steel during micro deep drawing: Modeling and experiment. *International Journal of Plasticity* [online]. 2024, vol. 176, s. 103964. ISSN 0749-6419. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2024.103964>
- [32] NAHIRNYJ, Taras, Michał SAŚIADEK a Kostiantyn TCHERVINKA. Modeling the effect of surface roughness on mechanical fields in an elastic solid bounded by nominally flat surfaces. *International Journal of Solids and Structures* [online]. 2024, vol. 302, s. 112979. ISSN 0020-7683. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2024.112979>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Talysurf CLI 500	32
Obrázek 2 Pohled na připravený vzorek	33
Obrázek 3 Pohled na připravený laser	33
Obrázek 4 Nastavení softwaru	34
Obrázek 5 Box-plot parametru hodnot Ra	35
Obrázek 6 Časová řada parametru hodnot Ra	36
Obrázek 7 Histogram hodnot Ra 1. vzorku	36
Obrázek 8 Histogram hodnot Ra 2. vzorku	37
Obrázek 9 Histogram hodnot Ra 3. vzorku	37
Obrázek 10 Histogram hodnot Ra 4. vzorku	38
Obrázek 11 Histogram hodnot Ra 5. vzorku	38
Obrázek 12 Histogram hodnot Ra 6. vzorku	39
Obrázek 13 Histogram hodnot Ra 7. vzorku	39
Obrázek 14 Histogram hodnot Ra 8. vzorku	40
Obrázek 15 Histogram hodnot Ra 9. vzorku	40
Obrázek 16 Histogram hodnot Ra 10. vzorku	41
Obrázek 17 Box-plot pro parametr hodnot Rz	43
Obrázek 18 Časová řada parametru hodnot Rz	43
Obrázek 19 Histogram hodnot Rz 1. vzorku	44
Obrázek 20 Histogram hodnot Rz 2. vzorku	44
Obrázek 21 Histogram hodnot Rz 3. vzorku	45
Obrázek 22 Histogram hodnot Rz 4. vzorku	45
Obrázek 23 Histogram hodnot Rz 5. vzorku	46
Obrázek 24 Histogram hodnot Rz 6. vzorku	46
Obrázek 25 Histogram hodnot Rz 7. vzorku	47
Obrázek 26 Histogram hodnot Rz 8. vzorku	47
Obrázek 27 Histogram hodnot Rz 9. vzorku	48
Obrázek 28 Histogram hodnot Rz 10. vzorku	48
Obrázek 29 Detail povrchu 1. vzorku	50
Obrázek 30 Detail povrchu 2. vzorku	50
Obrázek 31 Detail povrchu 3. vzorku	50
Obrázek 32 Detail povrchu 4. vzorku	51
Obrázek 33 Detail povrchu 5. vzorku	51
Obrázek 34 Detail povrchu 6. vzorku	51

Obrázek 35 Detail povrchu 7. vzorku	52
Obrázek 36 Detail povrchu 8. vzorku	52
Obrázek 37 Detail povrchu 9. vzorku	52
Obrázek 38 Detail povrchu 10. vzorku	53
Obrázek 39 3D struktura pro povrch 1. vzorku	54
Obrázek 40 3D struktura pro povrch 2. vzorku	54
Obrázek 41 Grafické znázornění heterogenity.....	56

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Hodnoty parametru R_a	35
Tabulka 2 Hodnoty parametru R_z	42

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Ra	Průměrná aritmetická odchylka profilu
Rz	Maximální výškový rozdíl nerovností
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
CLA	Chromatic Length Abberation
2D	Dvourozměrný prostor
3D	Trojrozměrný prostor
EDA	Exploratory Data Analysis
%	Procento
α	úhel zkosení laseru
mm	milimetr
μm	mikrometr
kg	kilogram
Min	Minimální hodnota výběru
Max	Maximální hodnota výběru
Mean	Průměr
Stdev	Směrodatná odchylka
N	Počet naměřených hodnot
P	Profile
W	Waviness
R	Roughness
QR	Kvartilové rozpětí
SW	Software