

Komparace charakteristik drsnosti povrchů vzniklých pomocí nekonvenčních technologií

Michaela Kotková

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

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:	Michaela Kotková
Osobní číslo:	T22294
Studijní program:	B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Komparace charakteristik drsnosti povrchů vzniklých pomocí nekonvenčních technologií

Zásady pro vypracování

- Literární rešerše k problematice hodnocení povrchů.
- Statistické nalezení a stanovení diferencí mezi vyhodnocováním povrchů v souladu s ISO 21920-1, ISO 21920-2 či ISO 25178.
- Provedení průzkumové analýzy obrobků s využitím bezkontaktního profiloměru.
- Statistické vyhodnocení povrchových komparací naměřených dat dle odpovídajících softwarů.

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

Seznam doporučené literatury:

1. ČSN EN ISO 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. MELOUN, Milan, Jiří MILITKY 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 se zabývá komparací charakteristik drsnosti povrchů vzniklých pomocí nekonvenčních technologií, přičemž klade důraz na komplexní analýzu těchto charakteristik z hlediska jejich měřitelnosti, interpretace a praktického využití v technické praxi. V teoretické části práce jsou podrobně rozebrány základní principy snímání povrchů, které zahrnují jak tradiční, tak moderní přístupy k hodnocení drsnosti. Důraz je kladen na způsoby měření povrchových parametrů dle platných norem a na aplikaci statistických metod při analýze výsledků. Tato část rovněž přináší přehled nejčastěji používaných parametrů drsnosti a jejich význam při hodnocení kvality povrchových struktur. Samostatná kapitola je věnována terminologii související s povrchy, včetně podrobného vysvětlení jednotlivých pojmů a jejich vzájemných vztahů. Zvláštní pozornost je věnována metodám měření drsnosti, jejich přesnosti a spolehlivosti, přičemž jsou diskutovány výhody a nevýhody jednotlivých postupů. Následující praktická část práce se zaměřuje na popis vybraných nekonvenčních technologií, jako jsou elektroerozivní obrábění, laserové opracování, vodní paprsek a další pokročilé metody. Součástí této části je detailní analýza vlivu těchto technologií na výslednou strukturu povrchu, přičemž jsou prezentovány výsledky experimentálního měření a jejich interpretace s ohledem na výše zmíněné teoretické poznatky. Výsledky této práce přispívají k lepšímu pochopení vztahu mezi použitou výrobní technologií a výslednou drsností povrchu, což může sloužit jako podklad pro optimalizaci výrobních procesů v praxi.

Klíčová slova: nekonvenční technologie, měření povrchů, statistické hodnocení, drsnost povrchu

ABSTRACT

This bachelor's thesis addresses the comparison of surface roughness characteristics produced using unconventional technologies, emphasizing a comprehensive analysis of these characteristics in terms of their measurability, interpretation, and practical application in technical practice. The theoretical part of the thesis thoroughly discusses the fundamental principles of surface scanning, encompassing both traditional and modern approaches to roughness assessment. Emphasis is placed on surface parameter measurement methods according to current standards, as well as on the application of statistical methods for result

analysis. This section also provides an overview of the most commonly used roughness parameters and their significance in evaluating surface quality. A dedicated chapter focuses on the terminology associated with surfaces, offering a detailed explanation of individual terms and their interrelationships. Special attention is given to roughness measurement methods, including their accuracy, reliability, and a comparison of the advantages and disadvantages of specific approaches. The practical part of the thesis examines selected unconventional technologies, such as electroerosion machining, laser machining, water jet cutting, and other advanced methods. This section features a detailed analysis of the impact of these technologies on the resulting surface structure, presenting experimental measurement results and their interpretation in light of the theoretical concepts discussed earlier. The findings of this thesis enhance the understanding of the relationship between the selected manufacturing technologies and the resulting surface roughness, providing valuable insights for optimizing production processes in practice.

Keywords: unconventional technologies, surface measurement, statistical evaluation, surface roughness

Chtěla bych poděkovat vedoucí mé bakalářské práce Ing. Mileně Kubišové, Ph.D. za odborné vedení, ochotu, užitečné rady, a hlavně vstřícnost během psaní této práce. Také bych ráda poděkovala mým rodičům za jejich potřebnou podporu a trpělivost a mým dětem za motivaci a pochopení během studia.

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 METODY PRO MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHŮ	15
1.1 JAKOST POVRCHU	15
1.1.1 Normy pro hodnocení povrchů	15
1.2 METODY SNÍMÁNÍ POVRCHU	15
1.2.1 Kontaktní měřicí přístroje	16
1.2.2 Bezkontaktní měřicí přístroje	17
1.2.3 Metoda povrchové replikace	23
2 ZPŮSOBY VYHODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHŮ.....	24
2.1 ZÁKLADNÍ POJMY A POPIS POVRCHŮ	24
2.1.1 Obecné termíny	24
2.1.2 Povrchová textura povrchu	26
2.1.3 Parametry popisující povrchovou texturu	26
2.2 METODY STATISTICKÉHO ZPRACOVÁNÍ DAT.....	31
2.2.1 Aritmetický průměr	32
2.2.2 Rozptyl	32
2.2.3 Směrodatná odchylka	33
2.2.4 Medián.....	33
2.2.5 Kvantily	33
2.2.6 Grafické metody	34
3 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	36
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	37
4 PŘÍPRAVA VZORKŮ A MĚŘENÍ	38
4.1 POPIS VZORKŮ.....	38
4.2 MATERIÁLY POUŽITÝCH VZORKŮ	40
4.3 OCEL 12 024	40
4.4 OCEL 19 820	40
4.5 ZAŘÍZENÍ PRO PRAKTICKOU ČÁST.....	41
4.5.1 Vláknový laser Sauer – Lasertec 80 Shape	41
4.5.2 Měřicí přístroj Zygo NewView™ 8000	42
5 VYHODNOCENÍ MĚŘENÝCH POVRCHŮ	43
5.1 POSTUP VYHODNOCENÍ POMOCÍ EDA	43
5.1.1 Ocel 10 024	44
5.1.2 Ocel 19 820	48
ZÁVĚR	54
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	55

SEZNAM OBRÁZKŮ	59
SEZNAM TABULEK.....	60
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	61

ÚVOD

Technologický pokrok v oblasti zpracování materiálů neustále posouvá hranice toho, co je možné a také jaké vlastnosti mohou mít moderní materiály. S rostoucími nároky na pevnost, odolnost a přesnost výrobků se objevuje i potřeba efektivně obrábět materiály, které jsou často tvrdší nebo houževnatější než samotné obráběcí nástroje.

Z tohoto důvodu se v průmyslu stále více prosazují nekonvenční metody dělení a obrábění, které využívají energii v podobě tepla, elektrických výbojů nebo chemických reakcí, namísto klasického mechanického třískového obrábění.

Jedním z nejvýraznějších trendů posledních let je rozmach technologií, jako je řezání laserem a plazmou. Tyto metody umožňují přesné a rychlé dělení i velmi tvrdých či silných kovových materiálů, které by byly pro tradiční nástroje obtížné nebo vůbec neobrobitelné. Laserové řezání je ceněno zejména pro svou vysokou přesnost, minimální šířku řezu a schopnost vytvářet složité tvary bez nutnosti dodatečného opracování. Naopak plazmové řezání vyniká při dělení silnějších materiálů a je často preferováno tam, kde je klíčová rychlost a efektivita ve výrobě, i za cenu hrubšího povrchu řezu.

Moderní výrobní procesy proto stojí před volbou optimální technologie podle konkrétních požadavků – zda je prioritou rychlost, přesnost, kvalita povrchu nebo schopnost zpracovat silné či specifické materiály. Laserové řezání nabízí bezkonkurenční přesnost a čisté hrany, což je ideální pro detailní práci a výrobu dílů s vysokými nároky na výslednou kvalitu povrchu, v mnoha případech bez nutnosti dalšího opracování, plazmové řezání naopak umožňuje rychlé dělení silných kovových desek, což je klíčové například ve stavebnictví nebo při výrobě těžkých strojních součástí.

Nezanedbatelnou výzvou zůstává i samotné hodnocení kvality výsledného povrchu a přesnosti řezu. Složitost geometrie, rozměry výrobků či omezené možnosti měření mohou komplikovat objektivní porovnání různých metod. Proto je v praxi nezbytné využívat nejen vizuální kontrolu, ale i statistické metody a analýzy, které umožní posoudit, zda rozdíly v kvalitě řezu vznikly náhodně, nebo jsou skutečně významné a je nutné analyzovat jejich příčinu.

Vývoj v oblasti nekonvenčních technologií obrábění tak není jen otázkou volby správného stroje, ale i komplexního přístupu k hodnocení výsledků a optimalizaci celého procesu. Právě porovnání těchto metod, jejich výhod, omezení a vlivu na kvalitu výsledného produktu je klíčovým tématem současného výzkumu i průmyslové praxe.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 METODY PRO MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHŮ

Metody měření drsnosti povrchu jsou klíčové pro zajištění kvality výrobků a správné funkce mechanických dílů. Obecně lze jejich využití chápat v širším kontextu od návrhu přes výrobu až po kontrolu hotových součástí. Cílem měření drsnosti je přesně charakterizovat mikro geometrii povrchu, která ovlivňuje vlastnosti jako tření, opotřebení, únavovou pevnost, hlučnost, těsnost.

1.1 Jakost povrchu

Jakost povrchu je souhrnná charakteristika kvality povrchové vrstvy součásti, která zahrnuje mikro geometrické odchylky povrchu (drsnost, vlnitost, tvarové odchylky) a fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti povrchové vrstvy vzniklé během výroby. Povrchové vlastnosti jsou klíčové pro životnost a spolehlivost výrobků a jejich správné navržení a kontrola jsou nezbytné pro optimalizaci výrobních procesů a kvality finálních dílů.

1.1.1 Normy pro hodnocení povrchů

Normy ČSN EN ISO v oblasti měření drsnosti povrchu slouží jako jednotný rámec a soubor pravidel, které zajišťují přesnost, opakovatelnost a srovnatelnost výsledků měření drsnosti povrchu v průmyslu a metrologii.

Mezi hlavní normy patří ČSN EN ISO 21920-1 – Tato norma specifikuje pravidla pro grafické znázornění textury povrchu pomocí profilových metod v technické dokumentaci výrobků, tedy jak správně na výkresech a v dokumentech uvádět požadavky na povrchovou strukturu. [1]

Další důležitou normou je ČSN EN ISO 21920-2 – Tato norma definuje základní termíny, definice a parametry povrchové textury měřené profilovou metodou. Zahrnuje technické parametry jako Ra, Rz a další, které popisují mikro geometrii povrchu. [2]

ČSN ISO 25178 je norma, která se zabývá hodnocením textury povrchu pomocí plošných (3D) metod. [3]

1.2 Metody snímání povrchu

Kvalitativní a kvantitativní metody snímání povrchu se liší přístupem k hodnocení drsnosti a charakteristik povrchu.

Kvalitativní metody snímání povrchu:

- Princip – Hodnocení povrchu je založeno na porovnání s etalonovými vzorky nebo vizuálním a hmatovým posouzením.
- Využití – Slouží k rychlému, orientačnímu posouzení drsnosti povrchu bez přesných číselných hodnot.
- Výhody – Jednoduchost, nízké náklady, možnost rychlé kontroly.
- Nevýhody – Subjektivita, závislost na zkušenostech a schopnostech hodnotitele, omezená přesnost.
- Použití – Dodnes se využívá jako doplňková metoda, zejména při rychlé kontrole nebo tam, kde není potřeba přesné měření.

Kvantitativní metody snímání povrchu:

- Princip – Měření povrchů, které zaznamenávají profil nebo 3D charakter povrchu a vyhodnocují jej pomocí matematických parametrů (např. Ra, Rz).
- Typy přístrojů:
 - Profilometry – Jemný hrot se pohybuje po povrchu a snímá výškové změny, které jsou elektronicky zaznamenány a vyhodnoceny.
 - Optické metody – Bezdotykové měření pomocí světelných paprsků, triangulace nebo dalších optických principů.
- Výhody – Objektivita, vysoká přesnost, možnost získat detailní 2D nebo 3D charakteristiku povrchu, automatizace měření.
- Použití – Standardní metoda v průmyslové kontrole kvality, vývoji a výzkumu, kde je potřeba přesné a reprodukovatelné hodnoty drsnosti. [4]

1.2.1 Kontaktní měřicí přístroje

Kontaktní měřicí přístroje pro měření drsnosti povrchu jsou zařízení, která pomocí dotyku měří profil povrchu a zaznamenávají jeho mikro geometrii.

Nejčastěji se jedná o dotykové profilometry (drsnoměry), které používají velmi jemný hrot (stylus), jenž se mechanicky pohybuje po povrchu a snímá jeho výškové nerovnosti.

Princip kontaktních měřicích přístrojů:

Hrot (často diamantový) s malým poloměrem špičky je přitlačován na povrch s definovanou měřicí silou. Hrot se pohybuje horizontálně po povrchu a vertikálně sleduje výškové změny povrchu. Vertikální pohyb hrotu je snímán senzory a převáděn na elektrický signál. Ten je digitalizován a zpracován softwarem, který vypočítá parametry drsnosti (např. R_a , R_z) podle příslušných norem. [5]

1.2.2 Bezkontaktní měřicí přístroje

Bezkontaktní (optické) metody jsou založené na tom, že během měření nedochází k přímému dotyku měřicího zařízení s povrchem. Místo toho se využívá světelný paprsek, který je zaostřen na konkrétní bod sledovaného povrchu. Tímto způsobem se minimalizuje riziko poškození nebo ovlivnění měřeného povrchu, což je výhodné zejména u měkkých nebo citlivých materiálů, které by se při kontaktu mohly deformovat nebo poškodit.

Princip fungování:

- Optické metody pracují na bázi odrazu světelného záření od povrchu. Světlo různých vlnových délek dopadá na povrch, odráží se v různých úhlech a tyto odražené paprsky jsou násobně analyzovány detektorem.
- Výsledkem je získání informací o topografii povrchu bez nutnosti fyzického kontaktu.
- Metody zahrnují například profilovací techniky, které sledují specifikované linie na povrchu a topografické techniky, které mapují celou plochu povrchu.

Výhody bezkontaktních metod:

- Není nutná korekce dat kvůli deformaci povrchu měřicím hrotem, což je běžné u kontaktních metod.
- Umožňují měřit i měkké nebo pružné materiály, které by se jinak mohly kontaktu vyhnout nebo být poškozeny.
- Vhodné pro rychlé a opakované měření, protože nedochází k opotřebení měřicího zařízení kontaktem s povrchem.
- Eliminují vliv nečistot, které by u kontaktních metod mohly být zatlačeny měřicím hrotem a zkreslit výsledky.

Nevýhody bezkontaktních metod a omezení:

- Metody jsou citlivé na změny tvaru, ostré hrany nebo výrazné změny povrchové topografie – v těchto místech může dojít ke špatnému odrazu nebo rozostření paprsku, což vede k nepřesným nebo zkresleným datům.
- Výsledky mohou ovlivnit vlastnosti povrchu, jako je vysoká nebo nízká odrazivost, případně přítomnost nečistot, které světlo odrážejí jinak než samotný povrch. [6]
- U některých optických metod je potřeba složitější kalibrace a vyhodnocení, zejména při měření složitějších tvarů nebo hlubších struktur.

Chromatická aberace

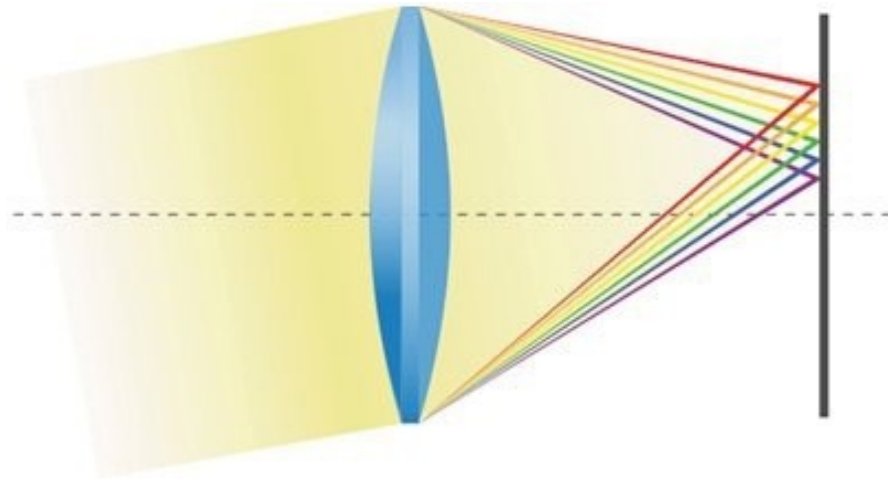
Je to optický jev, při kterém optická soustava (např. čočka) nedokáže zaostřit všechny vlnové délky světla do jednoho bodu. Tento jev vzniká díky tomu, že index lomu materiálu čočky se mění v závislosti na vlnové délce světla.

Výsledkem je, že světlo různých barev je zaostřeno v různých vzdálenostech od čočky – například modré světlo je zaostřeno blíže čočce než červené světlo.

V praxi se chromatická aberace projevuje jako barevné lemy (tzv. fringing) na hranách mezi světlými a tmavými částmi obrazu.

Existují dva hlavní typy chromatické aberace:

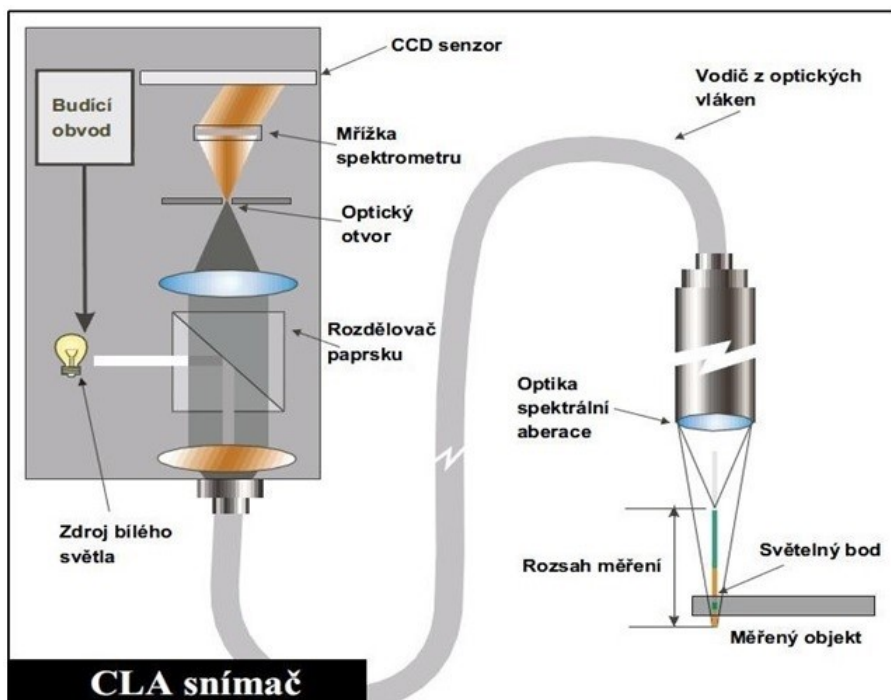
- Podélná (longitudinální) chromatická aberace – různé barvy světla jsou zaostřeny v různých bodech podél optické osy. Typicky se vyskytuje u čoček s delší ohniskovou vzdáleností.
- Příčná (laterální) chromatická aberace – různé barvy jsou zaostřeny v různých bodech kolmo na optickou osu, což způsobuje změnu velikosti obrazu v závislosti na barvě. Typicky se vyskytuje u širokoúhlých objektivů nebo čoček s krátkou ohniskovou vzdáleností.



Obrázek 1 Ohnisková vzdálenost objektivu se mění v závislosti na barvě světla [7]

Princip Chromatic Lenght Abberation (CLA) senzoru:

CLA senzor využívá tohoto jevu k bezkontaktnímu měření vzdálenosti nebo povrchové topografie. Svazek bílého světla je rozdělen optickým systémem na různé vlnové délky, které jsou zaostřeny v různých vzdálenostech. Povrch měřeného objektu odráží pouze tu vlnovou délku, která je v daném bodě zaostřena. Senzor pak detekuje tuto vlnovou délku a přiřadí jí konkrétní vzdálenost od objektivu. Výsledkem je velmi přesné 3D měření povrchu bez nutnosti fyzického kontaktu s měřeným objektem. [8]



Obrázek 2 Schéma CLA snímače [9]

Laserový snímač

Je to zařízení, které využívá úzký a přesně zaměřený laserový paprsek k detekci přítomnosti, vzdálenosti, polohy nebo pohybu objektu. Tyto snímače jsou známé svou vysokou přesností, rychlou odezvou a možností bezkontaktního měření, což je činí velmi užitečnými v průmyslu, automatizaci, robotice, medicíně nebo dopravě.

Jak laserový snímač funguje – pracuje na principu vysílání laserového paprsku na měřený objekt a následné analýzy odraženého světla.

- Vyslání paprsku: Laserová dioda vyšle úzký paprsek světla na povrch objektu.
- Interakce s objektem: Paprsek se odrazí (nebo rozptýlí) od povrchu objektu.
- Detekce: Senzor zachytí odražené světlo pomocí fotodetektoru.
- Zpracování signálu: Elektronika snímače vyhodnotí dobu letu paprsku (time-of-flight), změnu úhlu (triangulace) nebo jiné parametry a určí vzdálenost, přítomnost či polohu objektu.

Typy laserových snímačů:

Tabulka 1 Typy laserových snímačů

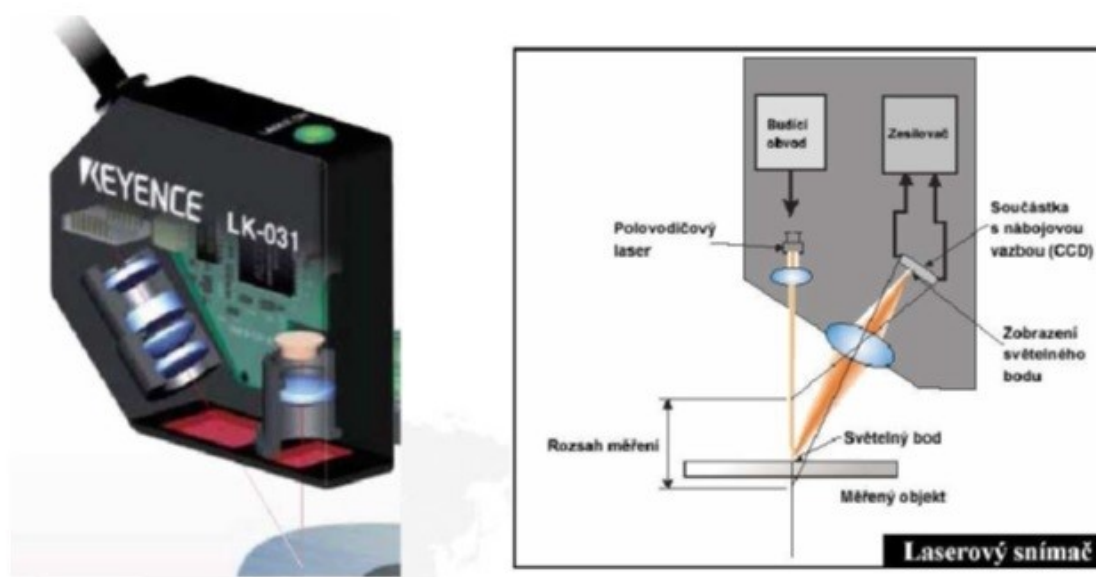
Typ snímače	Princip měření	Typické využití
Laserové dálkoměry [10]	Time-of-flight (doba letu)	Přesné měření vzdálenosti, průmysl, robotika
Laserové proximity snímače [11]	Detekce přerušení/odrazu paprsku	Detekce přítomnosti objektu, počítání kusů
Laserové snímače posunu [12]	Triangulace, fázový posun	Kontrola kvality, měření profilu povrchu
Lidar [13]	Time-of-flight, fázový posun	3D mapování, autonomní vozidla, geodézie
Laserové skenery [14]	Skenování a rekonstrukce 3D objektů	Průmyslové měření, archeologie, stavebnictví

Výhody:

- Vysoká přesnost a rozlišení
- Rychlá odezva měření
- Bezkontaktní princip
- Možnost měřit i na velké vzdálenosti

Nevýhody:

- Citlivost na prach, kouř nebo průhledné/lesklé povrchy
- Vyšší cena oproti běžným optickým snímačům
- Omezená funkčnost v extrémních podmínkách (mlha, silné světlo) [15]



Obrázek 3 Laserový snímač - schéma laserového snímače [9]

Coherence Scanning Interferometry (CSI)

Koherenční skenovací interferometrie je moderní optická metoda pro bezkontaktní měření povrchu, která umožňuje velmi přesně mapovat topografii povrchů v mikroskopickém měřítku. Tato technologie je široce využívána v průmyslu i vědeckém výzkumu pro měření drsnosti, tloušťky vrstev nebo detailní charakterizaci materiálů.

Princip fungování:

- CSI využívá světelný paprsek, který je rozdělen na dvě větve – jedna směřuje na referenční zrcadlo, druhá na měřený povrch.
- Oba paprsky se po odrazu opět setkají a na detektoru (například na kameře) vytvoří interferenční obrazec – střídání světlých a tmavých proužků.
- Zásadní je, že metoda používá světlo s krátkou koherenční délkou (často bílé světlo nebo jiné širokospektrální zdroje), což umožňuje přesně lokalizovat místo, kde se optické dráhy obou paprsků shodují – tedy místo, které odpovídá skutečné výšce měřeného bodu povrchu.
- Systém skenuje vzorek v ose Z (nahoru a dolů), a pro každý pixel kamery zaznamenává změnu intenzity interferenčního signálu v závislosti na poloze. Maximum této intenzity odpovídá přesné výšce daného bodu povrchu.

Výhody a aplikace:

- Metoda je bezkontaktní, nedestruktivní a velmi přesná – umožňuje měřit výškové rozdíly v řádu nanometrů.
- CSI je vhodné pro měření jak hladkých, tak i drsných nebo složitě strukturovaných povrchů, včetně transparentních vrstev nebo biologických vzorků.
- Využívá se například v polovodičovém průmyslu, při kontrole optických komponent, v biologii (např. optická termografie tkání) nebo při výzkumu nových materiálů. [16] [17]

1.2.3 Metoda povrchové replikace

Měření drsnosti povrchu u rozměrných, obtížně přístupných nebo citlivých součástí často nelze provést přímo běžnými metodami. V takových případech se využívá metoda povrchové replikace, kdy se na povrch aplikuje speciální otiskovací hmota, která po vytvrzení přesně kopíruje mikro geometrii povrchu.

Takto vzniklý otisk je možné analyzovat v laboratoři pomocí standardních metod měření drsnosti. Přesnost replikace závisí na použitém materiálu, přičemž moderní silikonové hmoty umožňují dosahovat průměrné chyby měření R_a kolem 7 %. Replikační metoda je vhodná zejména tam, kde je přímé měření nemožné a umožňuje také archivaci a opakované porovnání povrchů v různých časových okamžicích. [18]

2 ZPŮSOBY VYHODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHŮ

V této kapitole se zaměřím na různé metody, které se používají k měření a hodnocení drsnosti povrchů.

2.1 Základní pojmy a popis povrchů

Tato podkapitola se věnuje základním pojmům, které se používají při popisu a hodnocení povrchové struktury. Terminologie zahrnuje definice hlavních složek povrchu, jako jsou drsnost, vlnitost a tvar a vysvětluje, jak se tyto složky vzájemně liší. Správné pochopení těchto pojmů je nezbytné pro správnou interpretaci výsledů měření a volbou vhodných parametrů pro hodnocení povrchu.

2.1.1 Obecné termíny

Obecné termíny popisují základní části měřeného profilu.

Filtry profilu

Filtry profilu hrají zásadní roli v analýze struktury povrchu. Umožňují oddělit jednotlivé složky povrchu podle jejich vlnové délky nebo frekvence. Filtry rozdělují profil na části podle toho, jaké vlnové délky obsahují, což umožňuje samostatně vyhodnotit drsnost, vlnitost a tvar povrchu. Na základě krátkovlnných a dlouhovlnných složek filtry oddělují drsnost od vlnitosti. Nejčastěji používaným filtrem je Gaussův profilový filtr, který je standardizován v normě ISO 16610 a umožňuje přesné oddělení jednotlivých složek povrchu bez fázového zkreslení.

Filtry se dělí na:

- λ_s filtr profilu – definuje rozhraní mezi kratšími složkami vln na povrchu a drsností.
- λ_c filtr - definuje rozhraní mezi vlnitostí a drsností.
- λ_f filtr - definuje rozhraní mezi vlnitostí a dalšími složkami vyskytujícími se na povrchu.

Použití těchto filtrů umožňuje odstranit z profilu ty složky, které nejsou pro dané měření relevantní, a tím zpřesnit výsledky hodnocení povrchové struktury. [1]

Profil povrchu

Profil povrchu je získán jako průsečík skutečného povrchu s rovinou řezu, nejčastěji kolmou ke směru obrábění. Celkové hodnocení povrchu je poměrně složité, proto se profil povrchu využívá pro jednodušší a přesnější analýzu nerovností v daném řezu.

Základní profil

Základní profil je úplný profil, který vzniká po odstranění nejkratších vlnových délek pomocí krátkovlnného filtru (filtr λ_s). Tento profil zachycuje všechny relevantní nerovnosti povrchu kromě těch nejmenších, které nejsou pro hodnocení významné.

Profil drsnosti

Profil drsnosti se získává ze základního profilu aplikací dlouhovlnného filtru (filtr λ_c), který odstraní vlnitost a tvarové složky. Výsledkem je profil, který obsahuje pouze informace o samotné drsnosti povrchu, tedy o krátkovlnných nerovnostech.

Profil vlnitosti

Profil vlnitosti se určuje postupnou aplikací filtrů – nejprve se pomocí filtru λ_f odstraní dlouhovlnné složky (například tvarové chyby) a následně se krátkovlnné složky odstraní filtrem λ_c . Výsledný profil obsahuje pouze středně vlnné složky, které odpovídají vlnitosti povrchu.

Skutečný povrch

Skutečný povrch představuje hranici mezi materiálem a jeho okolím. Jeho vzhled je ovlivněn všemi procesy, které mění nebo upravují materiál, například obráběním, broušením či leštěním. Skutečný povrch je tedy výsledkem všech technologických zásahů a představuje reálnou hranici materiálu.

Základní délka (l_r , l_p , l_w)

Základní délka představuje délku profilu ve směru osy x , která je využívána pro charakterizaci a vyhodnocení nerovností povrchu. Pro různé typy profilů (vlnitosti, drsnosti) se základní délka může lišit a často odpovídá hodnotám použitých filtrů.

Vyhodnocovaná délka (l_n)

Vyhodnocovaná délka je ta část profilu, na které se provádí samotné hodnocení drsnosti nebo vlnitosti. Tato délka je měřena ve směru osy x a musí být dostatečně dlouhá, aby reprezentovala charakteristiku celého povrchu. [1] [19]

2.1.2 Povrchová textura povrchu

Při zkoumání povrchu materiálů se často využívají grafická znázornění, která ukazují profil povrchu v podobě různých křivek. Tyto profily vznikají v důsledku interakce nástroje a materiálu při obrábění a jsou ovlivněny faktory jako je přesnost pohybu nástroje, vibrace stroje nebo tepelné deformace. Povrchová textura je tedy výsledkem kombinace mnoha vlivů, které určují konečný vzhled a funkčnost povrchu.

Makroskopický tvar

Makroskopický tvar představuje celkový průběh povrchu, který je očištěn od menších nerovností. Tento základní tvar vzniká během výrobního procesu a může být ovlivněn například nedostatečnou tuhostí stroje, špatným vedením nebo tepelnými změnami. Z hlediska analýzy povrchu je důležité tento tvar oddělit, aby bylo možné přesněji vyhodnotit jemnější složky textury.

Drsnost

Drsnost je nejjemnější složkou povrchové textury a je určena drobnými nepravidelnostmi vzniklými při samotném ubírání materiálu. Tyto nerovnosti jsou typicky výsledkem pohybu nástroje a jsou měřitelné v mikrometrech nebo dokonce nanometrech. Drsnost je klíčovým parametrem pro funkčnost povrchu, zejména v aplikacích, kde je důležitý kontakt, tření nebo opotřebení.

Vlnitost

Vlnitost je charakteristická středně dlouhými periodickými změnami profilu, které jsou často způsobeny nízkoeenergetickými procesy, například vibracemi stroje nebo deformacemi obrobku. Na rozdíl od drsnosti, která je dána přímo stopou nástroje, vlnitost vzniká v důsledku přímo stopou nástroje, vlnitost vzniká v důsledku nedokonalostí v pohybu stroje nebo jeho součástí. Pro oddělení vlnitosti od drsnosti se používají speciální filtry (viz. podkapitola 2.1.1), které umožňují analyzovat jednotlivé složky profilu na základě jejich vlnové délky.

2.1.3 Parametry popisující povrchovou texturu

Kromě vizuálního popisu je povrch charakterizován také řadou kvantitativních parametrů, které umožňují objektivní srovnání různých povrchů. [20] [21] [22]

Podle normy ČSN EN ISO 21920 existují tři série parametrů:

P-parametry pro nefiltrovaný profil povrchu,

R-parametry pro drsnost profilu,

W-parametry pro vlnitost profilu. [1]

Střední aritmetická úchylka profilu R_a

R_a je výškovou charakteristikou drsnosti povrchu. Je to střední aritmetická hodnota absolutních úchylek profilu v rozsahu základní délky.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (1)$$

kde x – úsečka profilu odečítaná na střední čáře,

$y(x)$ - funkce popisující profil,

l – základní délka,

n – počet bodů profilu povrchu na základní délce.

Číselné hodnoty R_a se volí podle tabulky:

Tabulka 2 Střední aritmetická úchylka R_a (μm) [4]

	100	10,0	1,00	0,100
	80	8,0	0,80	0,080
	63	6,3	0,63	0,063
	50	5,0	0,50	0,050
400	40	4,0	0,40	0,040
320	32	3,2	0,32	0,032
250	25	2,5	0,25	0,025
200	20	2,0	0,20	0,020
160	16	1,6	0,16	0,016
125	12,5	1,25	0,125	0,012
				0,010
				0,008

Výšková charakteristika R_a v podstatě udává pouze průměrnou hodnotu vzdáleností jednotlivých bodů povrchu od střední čáry profilu. Je to čistě statistická hodnota a neříká nic o konkrétním tvaru nebo rozložení nerovností na povrchu. Proto nemusí být R_a vždy efektivní při posuzování drsnosti povrchu a může vést k chybným závěrům, pokud není použitý správně. [4]

R_p – nejvyšší výška výstupku profilu:

Tento údaj označuje maximální vzdálenost, kterou dosahuje vrchol povrchového profilu ve směru osy z v rámci určené délky měření.

R_v – největší hloubka prohlubně profilu:

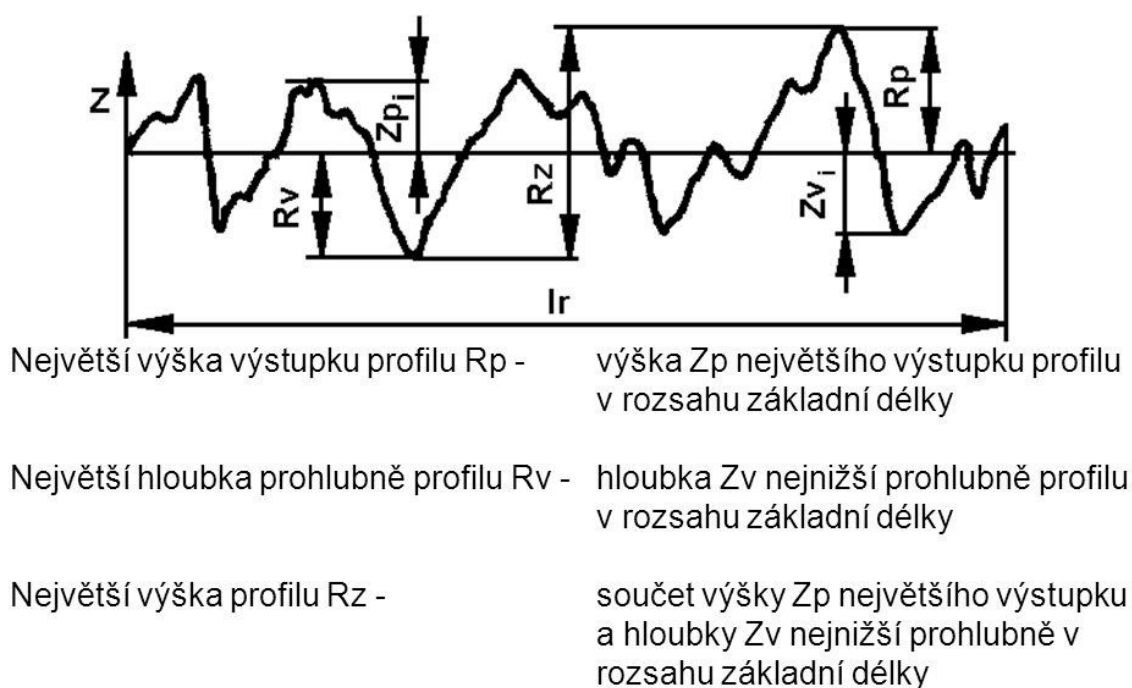
Jde o hodnotu, která vyjadřuje, jak hluboko sahá nejnižší bod profilu podél osy z v daném úseku.

 R_z – výška nerovnosti:

Tento parametr představuje součet hodnoty nejvyššího bodu a nejhlubšího místa profilu v základní délce, tedy celkový rozsah výškových rozdílů povrchu.

Všechny tyto parametry slouží k popisu tvaru a členitosti povrchu v určitém měřeném úseku.

[1]

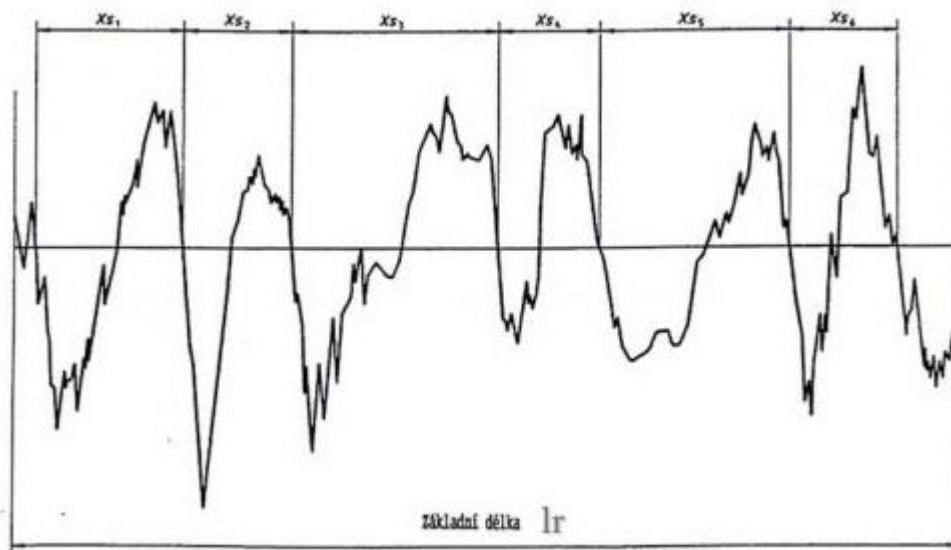


Obrázek 4 Výškové parametry [23]

 R_{Sm} – průměrná šíře jednotlivých částí povrchu

Tento údaj získáme tak, že sečteme šířky všech těchto částí (měřených ve směru osy x v rámci základní délky) a vydělíme to jejich počtem. Jde tedy o aritmetický průměr šířek těchto prvků. [1]

$$RS_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{Si} \quad (2)$$



Obrázek 5 Délkové parametry profilu povrchu [24]

Rmr

Tento parametr udává, jaké procento z měřené délky v daném řezu je skutečně vyplněno materiálem. Říká nám tedy, kolik z celkové délky je tvořeno materiálem na určité hloubce řezu.

$$Rmr = \frac{MI(c)}{ln} \quad (3)$$

kde MI – celková délka úseků, kde je přítomen materiál na dané úrovni c,

ln – celková hodnocená délka profilu.

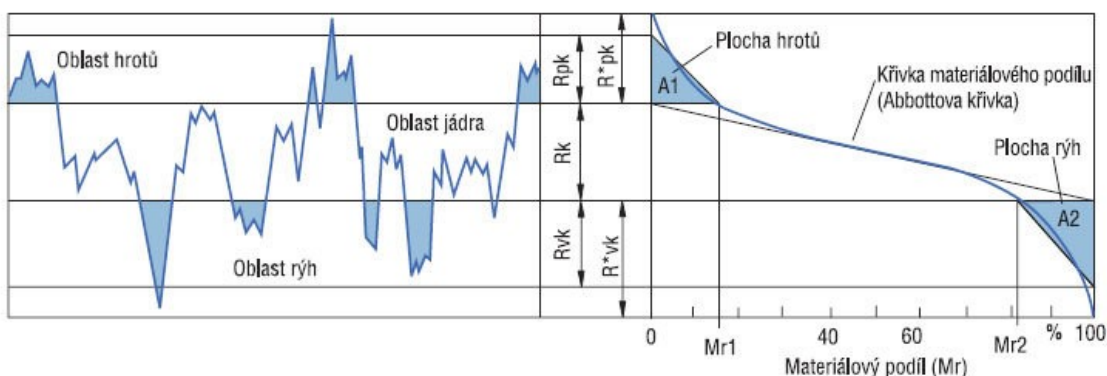
Tento poměr ukazuje, jaká část profilu je skutečně zaplněná materiálem oproti celé měřené délce. [1]

Abbott – Firestoneova křivka

Abbott – Firestoneova křivka, nazývaná také křivka nosné plochy (BAC), je grafické znázornění, které popisuje texturu povrchu objektu. Vytváří se tak, že se vynáší kumulativní rozdělení výšek profilu povrchu jako procento materiálu. Křivka tedy ukazuje, kolik povrchu v dané hloubce zabírá materiál oproti dutinám.

Tato křivka je zvláště užitečná, protože parametry drsnosti, jako R_a nebo R_z , nedostatečně vystihují funkční vlastnosti povrchu. Abbott – Firestoneova křivka umožňuje realističtější pohled na rozložení výstupní a prohlubní v profilu povrchu. To je velmi důležité při analýze povrchů, kde jsou klíčové vlastnosti jako odolnost proti opotřebení, nosnost. [25]

R_k , R_{pk} , R_{vk} , Mr_1 , Mr_2 - Veličiny nosného podílu



Obrázek 6 Abbottova křivka [26]

2.2 Metody statistického zpracování dat

Statistické metody vyhodnocení dat jsou v oblasti jakosti a metrologie klíčovým nástrojem pro zajištění přesnosti měření, řízení kvality a optimalizaci výrobních procesů. V metrologii se statistické metody používají k analýze naměřených dat, posouzení nejistoty měření a k rozhodování o řízení procesů a zajištění kvality výsledků měření. V oblasti jakosti pak umožňují sledovat a zlepšovat kvalitu produktů nebo služeb na základě objektivních dat.

V metrologii:

- Statistické metody se využívají k analýze výsledků měření, odhadu a vyjádření nejistoty měření.

- Pomáhají identifikovat zdroje chyb a kvantifikovat jejich vliv na celkovou nejistotou výsledku.
- Používají se také při návrhu experimentů k optimalizaci měřicích procesů a identifikaci klíčových faktorů ovlivňujících přesnost měření.
- Statistická regulace procesu a kontrolní diagramy umožňují včasné odhalení odchylek v měřicím procesu a tím předcházet vzniku neshodných výrobků.

V oblasti jakosti:

- Statistické metody (např. SPC – statistická regulace procesu, analýza rozptylu ANOVA, regresní analýza) slouží k monitorování a zlepšování kvality výrobků a procesů.
- Pomocí kontrolních diagramů lze sledovat stabilitu výrobního procesu a včas identifikovat trendy nebo náhlé změny, které by mohly vést ke zhoršení kvality.
- Testování hypotéz a analýza variability umožňují ověřit účinnost změn ve výrobě nebo při zavádění nových technologií.
- Metody jako Kaizen využívají statistickou analýzu pro systematické zlepšování kvality počtu vadných výrobků. [27]

2.2.1 Aritmetický průměr

Aritmetický průměr v metrologii a kvalitě je statistický ukazatel, který se používá k odhadu limitního průměru založeného na souboru měření. Je definován jako součet všech datových bodů dělený počtem vzorků. Je klíčový pro posuzování přesnosti a spolehlivosti měření.

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (4)$$

kde X_n - jednotlivé hodnoty

n - počet datových bodů (prvků). [28]

2.2.2 Rozptyl

Rozptyl, nebo také variace, je statistická míra, která popisuje rozptýlení dat kolem jejich průměru. Je definován jako průměrná hodnota čtverců odchylek od průměru. Je měřítkem

variability dat a jeho odmocnina se nazývá standardní odchylka, která je také měřítkem variability, ale v původních jednotkách dat.

Vzorkový rozptyl (s^2):

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5)$$

kde x_i - jsou jednotlivé hodnoty,

$\bar{x}$ - je vzorkový průměr,

n – je počet hodnot ve vzorku [29]

2.2.3 Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka nebo také standardní odchylka, je statistická míra, která popisuje rozptýlení dat kolem jejich průměru. Je definována jako odmocnina variační hodnoty. [30]

2.2.4 Medián

Medián je statistická míra, která popisuje středovou hodnotu datového souboru. Je definován jako hodnota, která rozděluje data na dvě stejné poloviny, přičemž polovina dat je menší nebo rovna mediánu a druhá polovina je větší nebo rovna mediánu.

Vzorec pro medián:

- Pro lichý počet pozorování:

Medián je prostřední hodnota, když jsou data seřazena od nejmenšího po největší.

- Pro sudý počet pozorování:

Medián je průměr dvou prostředních hodnot.

Medián je preferován před průměrem, když jsou přítomny extrémní hodnoty nebo když jsou hodnoty neurčené. [29]

2.2.5 Kvantily

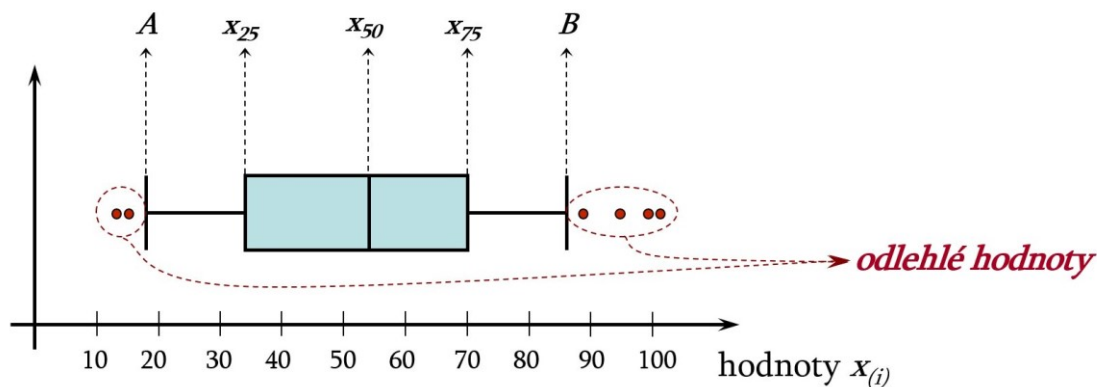
Jsou to statistické hodnoty, které rozdělují datový soubor do podskupin se stejným nebo téměř stejným počtem pozorování. Nejčastěji se používají kvantily, které rozdělují data do čtyř skupin, decily pro deset skupin a percentily pro sto skupin.

Definice kvantilu:

Kvantil je hodnota, která rozděljuje datový soubor tak, že určitý procentuální podíl dat leží pod touto hodnotou. [29]

Kvartily – dělení:

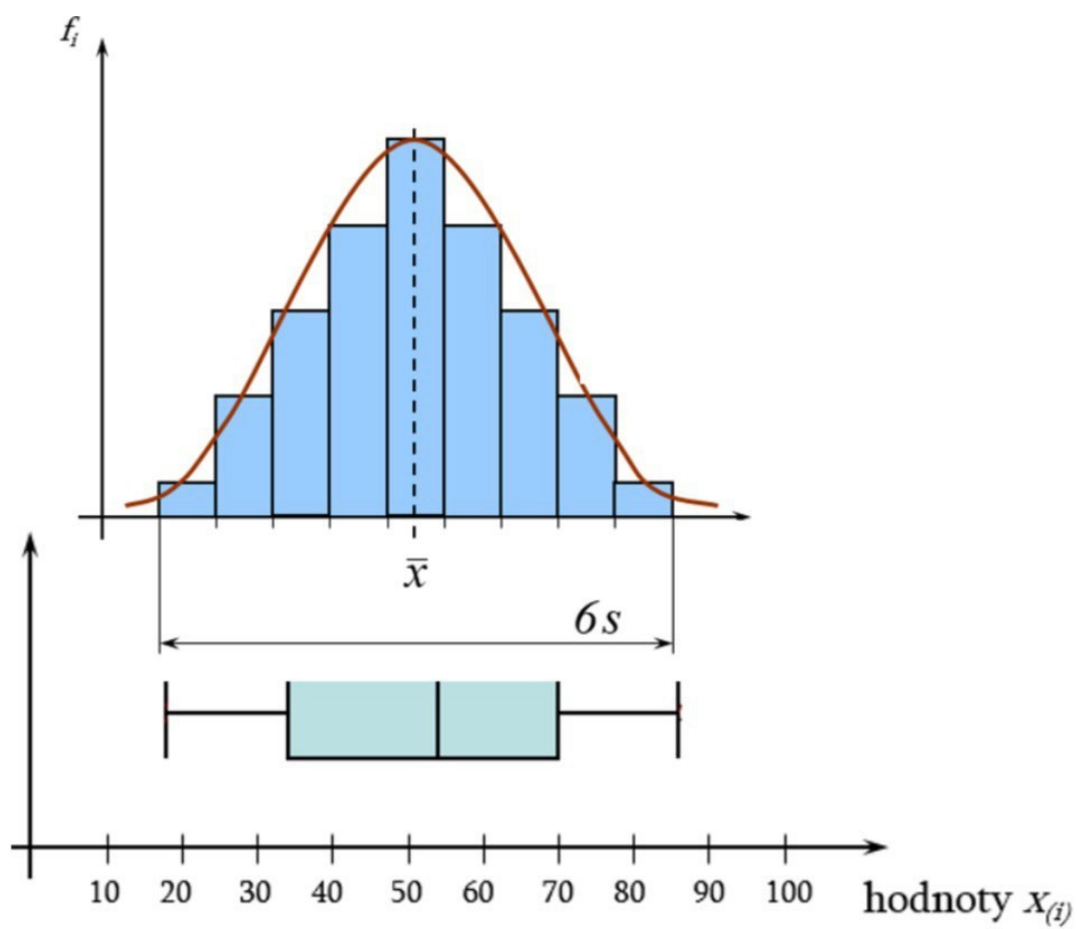
- Dolní kvartil (Q_1) – je 25. percentil, který rozděljuje data tak, že 25 % hodnot leží pod touto hodnotou. Nízko položený Q_1 naznačuje, že data mají tendenci klesat k nižším hodnotám.
- Medián (Q_2) – je 50. percentil, který rozděljuje data na dvě poloviny. Pokud je medián nízko položený ve srovnání s horním kvartilem, může to znamenat, že data jsou silně zkreslena směrem k nižším hodnotám.
- Horní kvartil (Q_3) – je 75. percentil, který rozděljuje data tak, že 75 % hodnot leží pod touto hodnotou. Pokud je Q_3 relativně daleko od Q_1 a Q_2 , může to naznačovat silnou asymetrii v rozložení dat. [30]



Obrázek 7 Krabicový diagram (box-plot) [36]

2.2.6 Grafické metody

- Statistické grafy – používají se pro vizuální zobrazení dat, jako jsou histogramy, box-plot diagramy, které pomáhají pochopit rozložení dat a vztah mezi proměnnými. [31]
- Kontrolní grafy – používají se pro sledování stability procesů a detekci odchylek, jako jsou kontrolní grafy pro průměry a standardní odchylky. [32]
- Laser profilometre – generuje 3D modely povrchů, které umožňují detailní analýzu drsnosti. [33]



Obrázek 8 Histogram s Gaussovou křivkou [36]

3 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Hlavním cílem bakalářské práce je statistické nalezení a stanovení diferencí mezi vyhodnocováním povrchů ve shodě s ISO 21920-1 (2) a 25 178, provedení průzkumové analýzy obrobených povrchů s využitím bezkontaktního profilometru a statistické vyhodnocení povrchových komparací naměřených dat za použití softwaru MINITAB.

II PRAKTICKÁ ČÁST

4 PŘÍPRAVA VZORKŮ A MĚŘENÍ

V rámci experimentálního zkoumání vlivu parametrů vláknového laseru na povrchovou úpravu byly připraveny vzorky ze dvou materiálů: ocel (ozn. 12 024) a oceli (ozn. 19 820). Pro každý z těchto materiálů bylo vytvořeno 25 samostatných ploch. Každá plocha byla opracována při jiném nastavení rychlosti posuvu a výkonu laseru, aby bylo možné sledovat, jak tyto parametry ovlivňují výslednou kvalitu povrchu.

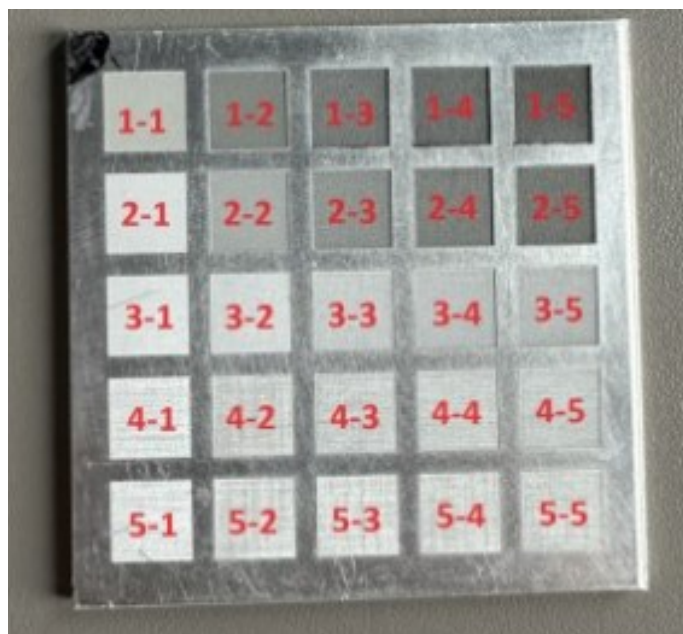
Laserové opracování bylo provedeno pomocí vláknového laseru, který umožňuje přesné a opakovatelné zpracování povrchu. Po dokončení opracování byly všechny plochy detailně analyzovány pomocí bezkontaktního profilometru. Tímto způsobem bylo možné získat přesné informace o charakteristikách povrchu. Tento postup zajistil objektivitu a opakovatelnost měření v celém průběhu experimentu.

4.1 Popis vzorků

Pro praktickou část práce byly připraveny vzorky ze dvou materiálů – oceli 12 024 a oceli 19 820. Oba tyto materiály jsou běžně využívány v průmyslové praxi, zejména při výrobě forem. Každý vzorek měl rozměry 65 x 65 mm a na jeho povrchu bylo vytvořeno 25 polí o velikosti 5 x 5 mm, která sloužila k testování různých parametrů laserového opracování.

Při nastavování parametrů vláknového laseru byla pro každý materiál použita stejná matice hodnot. Výkon laseru byl zvyšován po jednotlivých krocích (například 10 W, 20 W až 50 W) a současně byla měněna rychlost posuvu v rozmezí od 500 do 2250 mm/s. Každá kombinace těchto parametrů byla aplikována na samostatné pole vzorku.

Po laserovém opracování byly všechny povrchy analyzovány výhradně pomocí bezkontaktního profilometru, což umožnilo přesné a objektivní vyhodnocení výsledků bez nutnosti dalšího zásahu do vzorku. Takto získaná data byla následně využita k posouzení vlivu jednotlivých parametrů na kvalitu povrchu u obou zkoumaných materiálů.



Obrázek 9 Popis nastavení laseru pro jednotlivá pole

Tabulka 3 Charakteristické parametry nastavení laseru

Označení	f [KHz]	V [mm/s]	I [W]	d paprsku
1-1	50	500	10	10
1-2	50	500	20	10
1-3	50	500	30	10
1-4	50	500	40	10
1-5	50	500	50	10
2-1	50	750	10	15
2-2	50	750	20	15
2-3	50	750	30	15
2-4	50	750	40	15
2-5	50	750	50	15
3-1	50	1500	10	30
3-2	50	1500	20	30
3-3	50	1500	30	30
3-4	50	1500	40	30
3-5	50	1500	50	30
4-1	50	2000	10	40
4-2	50	2000	20	40
4-3	50	2000	30	40
4-4	50	2000	40	40
4-5	50	2000	50	40
5-1	50	2250	10	45
5-2	50	2250	20	45
5-3	50	2250	30	45
5-4	50	2250	40	45
5-5	50	2250	50	45

4.2 Materiály použitých vzorků

4.3 Ocel 12 024

Ocel označená jako 12 024 je v české i mezinárodní normě známá jako konstrukční uhlíková ocel třídy C22. Tato ocel je charakterizována jako nízkouhlíková ocel vhodná pro méně namáhané strojní součásti, součásti silničních vozidel a obecně pro konstrukční účely.

Tato ocel má dobrou tažnost a svařitelnost, není náchylná k tvorbě trhlin při svařování a je vhodná pro výrobu součástí, které nejsou vystaveny extrémním mechanickým nebo tepelným namáháním.

Mechanické vlastnosti:

- Pevnost v tahu přibližně 340–490 MPa (dle zpracování)
- Mez kluzu asi 180–280 MPa
- Tažnost kolem 20–25 %
- Dobrá odolnost proti únavě a nárazům [34]

Tabulka 4 Chemické složení konstrukční oceli 12 024

Chemické složení oceli 12 024 [hm %]							
Uhlík (C)	Křemík (Si)	Mangan (Mn)	Fosfor (P)	Síra (S)	Chrom (Cr)	Níkl (Ni)	Měď (Cu)
0,16 až 0,23	0,15 až 0,40	0,35 až 0,65	max 0,040	max 0,040	max 0,25	max 0,30	max 0,30

4.4 Ocel 19 820

Ocel 19 820 je druh nástrojové oceli. Jedná se o vysoce legovanou ocel vhodnou pro výrobu nástrojů, která má velmi dobré vlastnosti z hlediska tvrdosti, odolnosti proti opotřebení a tepelné odolnosti.

Používá se pro nástroje vyžadující vysokou tvrdost, odolnost proti opotřebení a tepelnou stabilitu. Je vhodná pro náročné průmyslové aplikace, kde je kladen důraz na kvalitu a životnost nástrojů.

Ocel obsahuje molybden (Mo), který zlepšuje tvrdost a odolnost proti opotřebení a další legující prvky pro vyšší pevnost a houževnatost. Typicky dosahuje vysoké tvrdosti po kalení. [35]

Tabulka 5 Chemické složení oceli 19 820

Chemické složení oceli 19 820 [hm %]								
Uhlík (C)	Křemík (Si)	Mangan (Mn)	Fosfor (P)	Síra (S)	Chrom (Cr)	(Mo)	Vanad (V)	(W)
0,05 až 1,05	max 0,45	max 0,45	max 0,035	max 0,035	3,80 až 4,60	2,20 až 3,20	2,00 až 2,70	2,40 až 3,40

Mo – Molybden

W – Wolfram

4.5 Zařízení pro praktickou část

4.5.1 Vlákenný laser Sauer – Lasertec 80 Shape

Tento systém představuje moderní technologii určenou k preciznímu a efektivnímu zpracování různých materiálů. Tento stroj pracuje na bázi vláknového laseru, což zajišťuje vysokou přesnost a opakovatelnost při operacích, jako je řezání, gravírování nebo další aplikace.

Hlavní technické specifikace:

- Typ laseru: vláknový
- Výkon: obvykle v rozmezí 500 W až 2 kW, konkrétní hodnota závisí na zvoleném modelu
- Rozměry pracovní plochy: maximální pohyb v ose X je 500 mm, v ose Y 460 mm a v ose Z 700 mm
- Osvětlení pracovní zóny: pracovní prostor je vybaven integrovaným LED osvětlením pro lepší přehled během práce



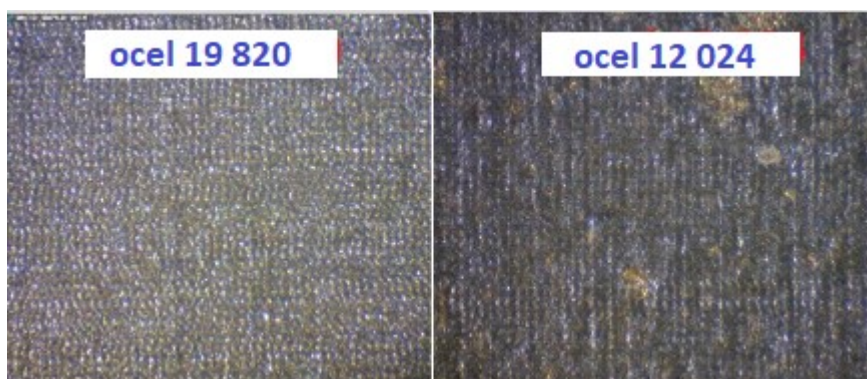
Obrázek 10 Vlákenný laser Sauer - Lasertec 80 Shape

4.5.2 Měřicí přístroj Zygo NewView™ 8000

Je to pokročilý bezkontaktní 3D optický profilometr určený pro přesné kvantitativní měření topografie, objemové charakteristiky a textury povrchů.

Základní vlastnosti:

- Technologie měření: 3D koherenční skenovací interferometrie (CSI) s technologií SureScan™ pro stabilní měření i v prostředí s vibracemi.
- Konfigurace: Dvě hlavní verze – NewView 8200 (jednozoomová) a NewView 8300 (trojzoomová s motorickým 3 pozicovým zoomem).
- Software: Zygo MetroPro – zpracovává a analyzuje data.



Obrázek 11 Vzorky po obrobení - nastavení laseru 5-5, viz. Tabulka 3

5 VYHODNOCENÍ MĚŘENÝCH POVRCHŮ

Skenování povrchu bylo provedeno bezkontaktním profilometrem Zygo NewView 8000, který umožňuje detailní 3D zobrazení povrchu. Vzorky byly před měřením zkontrolovány pod mikroskopem Leica, aby se vyloučila poškozená místa, následně očištěny a odmaštěny. Profilometr využívá odraz laserového paprsku a optický systém CCD snímačem pro přesné měření bez poškození vzorku.

Z naměřených dat byly získány profily povrchu, ze kterých byly určeny parametry R_z (maximální výška profilu) a R_a (průměrná aritmetická odchylka profilu).

5.1 Postup vyhodnocení pomocí EDA

Metodika EDA (Exploratory Data Analysis, česky průzkumová analýza dat) je statistický přístup zaměřený na podrobné zkoumání dat s cílem odhalit jejich základní vlastnosti, zvláštnosti a případné odchylky od předpokladů, které jsou nezbytné pro další statistické zpracování.

Hlavním cílem EDA je odhalit zvláštnosti v datech, jako jsou nesymetrie, špičatost, odlehlé hodnoty, a ověřit základní předpoklady pro použití klasických statistických metod.

1. Diagnostická grafická analýza

Použití grafů jako jsou histogramy, krabicové grafy (boxploty), kvantil-kvantilové grafy (Q-Q ploty), grafy rozptýlení, kruhové grafy pro posouzení normality a další vizualizace, které odhadují strukturu dat, symetrii, lokální koncentrace a extrémy.

2. Testování základních předpokladů

Statistické testy normality a testy nezávislosti dat ověřují, zda data splňují předpoklady pro klasické statistické metody.

3. Identifikace a řešení odlehlých hodnot

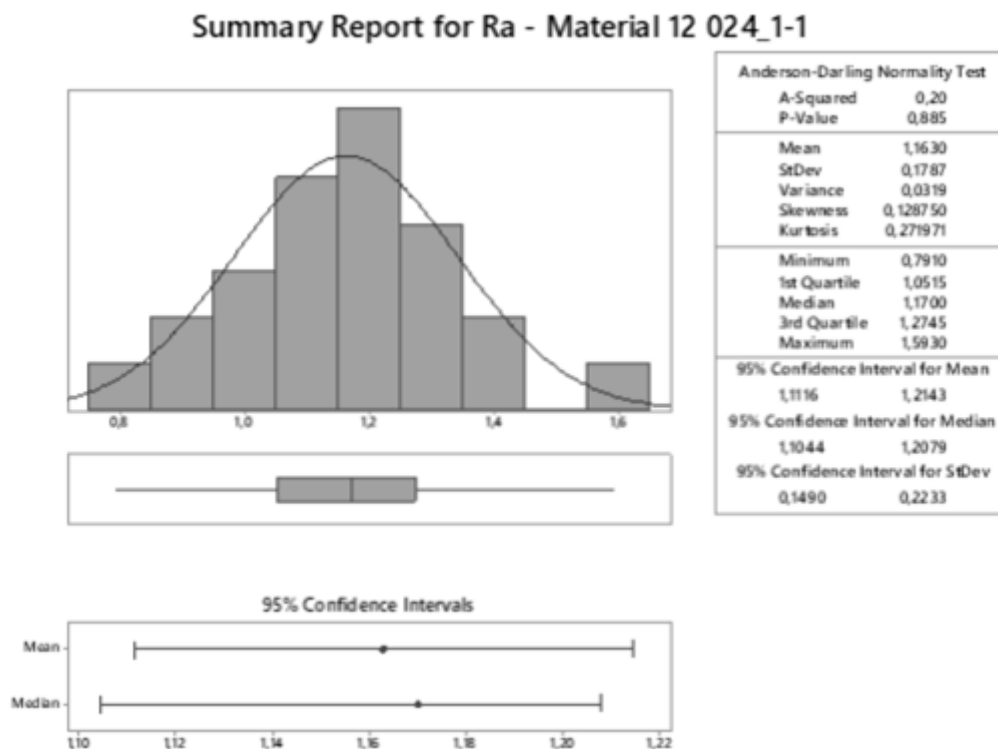
EDA zahrnuje detekci extrémních hodnot, které mohou zkreslit výsledky analýzy.

4. Výpočet odhadů parametrů

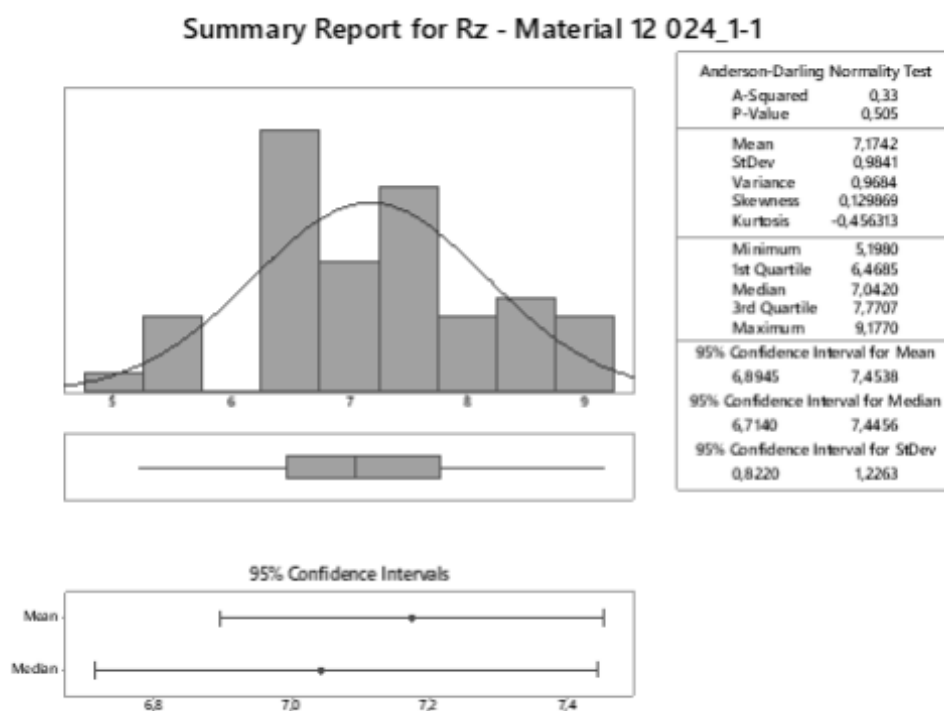
Pokud jsou splněny předpoklady, použijí se klasické momentové odhady (průměr, rozptyl). Pokud ne, použijí se odhady (medián, mediánová odchylka)

5. Interpretace výsledků a příprava dat pro další statistické testy nebo modelování.

5.1.1 Ocel 10 024



Obrázek 12 Souhrn dat parametru Ra a nastavení laseru 1-1 pro ocel 10 024



Obrázek 13 Souhrn dat parametru Rz a nastavení laseru 1-1 pro ocel 12 024

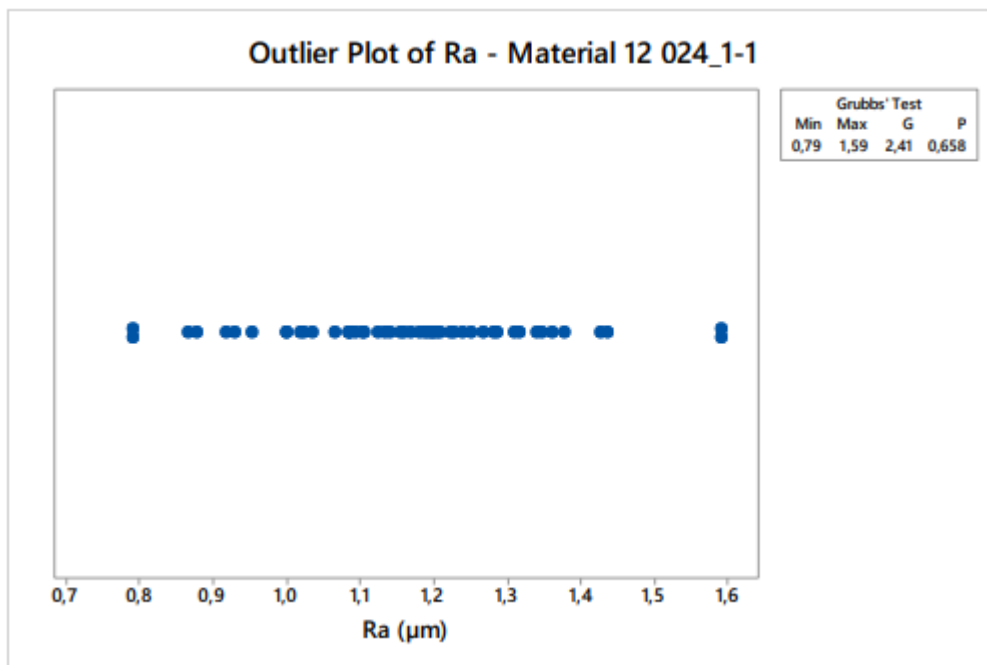
Naměřená data drsnosti povrchu Ra pro vzorek oceli 12 024 byla analyzována a ukázala, že při nastavení laseru 1-1 odpovídají normálnímu rozdělení a nebyly zjištěny žádné hrubé chyby. Pro ověření normalit byl použit Anderson-Darlingův test – pokud byla p-hodnota vyšší než 0,05, data byla považována za normální. Ve všech případech byla tato podmínka splněna, což je v tabulkách označeno jako „OK“. To znamená, že žádný ze zkoumaných vzorků nevykazoval odchylky od předpokladu normality.

Tabulka 6 Hodnoty Ra a Rz pro ocel 12 024

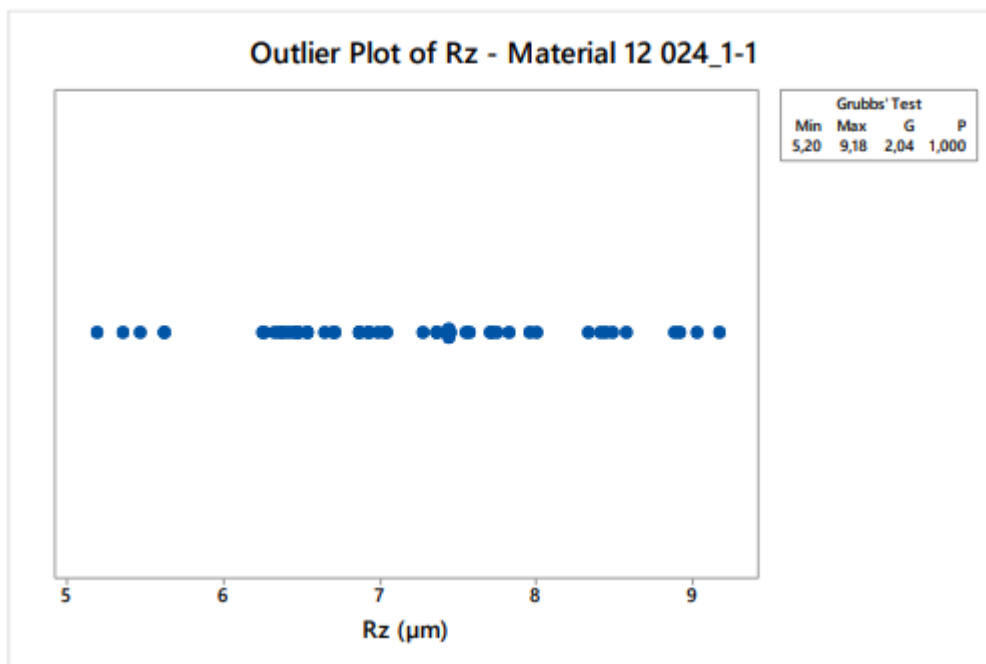
Vzorek 1-1	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,5293	1,537	0,2434	1,131	2,108
Rz[μm]	7,1742	7,042	0,9841	5,198	9,177
Vzorek 1-2	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	2,4287	2,454	0,1967	2,032	2,942
Rz[μm]	12,621	12,537	1,066	10,208	14,874
Vzorek 1-3	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	12,613	12,777	2,033	8,606	17,755
Rz[μm]	60,784	60,608	8,153	44,692	76,769
Vzorek 1-4	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	18,506	17,855	2,675	14,059	24,739
Rz[μm]	89,409	87,894	10,064	71,523	113,159
Vzorek 1-5	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	18,363	18,48	3,31	13,213	28,913
Rz[μm]	87,021	87,233	10,832	61,411	112,698
Vzorek 2-1	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,6015	1,5895	0,1819	1,225	2,055
Rz[μm]	7,263	7,2875	0,7382	5,769	9,14
Vzorek 2-2	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,5441	1,5105	0,1775	1,93	2,138
Rz[μm]	7,8261	7,939	0,7875	5,977	9,464
Vzorek 2-3	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	2,0978	2,058	0,169	1,785	2,445
Rz[μm]	10,883	11,037	0,808	9,244	12,198
Vzorek 2-4	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max

Ra[μm]	2,1278	2,158	0,169	1,785	2,445
Rz[μm]	10,962	10,756	0,862	9,744	12,298
Vzorek 2-5	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	2,5429	2,547	0,2329	1,897	3,095
Rz[μm]	12,914	12,681	1,125	10,817	15,956
Vzorek 3-1	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,5948	1,6255	0,1922	1,255	2,037
Rz[μm]	7,2309	7,2995	0,6539	5,42	8,758
Vzorek 3-2	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,6184	1,6685	0,164	1,228	1,879
Rz[μm]	7,4528	7,402	0,5905	6,311	8,904
Vzorek 3-3	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,481	1,4975	0,179	1,113	1,962
Rz[μm]	7,1584	7,048	0,7742	5,509	9,386
Vzorek 3-4	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,5774	1,5715	0,1607	1,255	1,889
Rz[μm]	7,7016	7,724	0,6822	6,252	9,437
Vzorek 3-5	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,6472	1,6115	0,224	1,262	2,123
Rz[μm]	7,8875	7,723	0,7333	6,467	9,542
Vzorek 4-1	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,7935	1,7555	0,2509	0,971	2,368
Rz[μm]	8,2223	8,2575	0,9753	5,004	10,073
Vzorek 4-2	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,5403	1,54	0,2269	1,04	2,004
Rz[μm]	7,2564	7,2485	0,9683	5,029	9,279
Vzorek 4-3	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,5728	1,5815	0,2092	1,114	1,988
Rz[μm]	7,498	7,4975	0,8181	5,74	9,395
Vzorek 4-4	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,4946	1,4775	0,154	1,15	1,796
Rz[μm]	7,0202	6,881	0,6387	5,784	8,643
Vzorek 4-5	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,3306	1,3315	1,422	1,097	1,76
Rz[μm]	6,5899	6,618	0,6275	5,071	8,112
	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,8296	1,8175	0,2156	1,43	2,46
Rz[μm]	8,5494	8,598	0,7607	6,429	10,11
Vzorek 5-2	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,6396	1,6405	0,2319	1,229	2,209
Rz[μm]	7,6005	5,901	0,9866	5,901	10,171
Vzorek 5-3	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,6159	1,6045	0,2162	1,162	2,145
Rz[μm]	7,367	7,2005	0,7981	5,98	9,237
Vzorek 5-4	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,4847	1,4745	0,1973	1,062	1,959
Rz[μm]	6,9767	6,9155	0,7642	5,31	8,517
Vzorek 5-5	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,3844	1,371	0,1759	0,979	1,855
Rz[μm]	6,8306	6,68	0,8449	5,472	9,156

V tabulce 6 vidíme hodnoty parametrů Ra a Rz, které jsme získali pro všechny kombinace nastavení výkonu a rychlosti laseru.



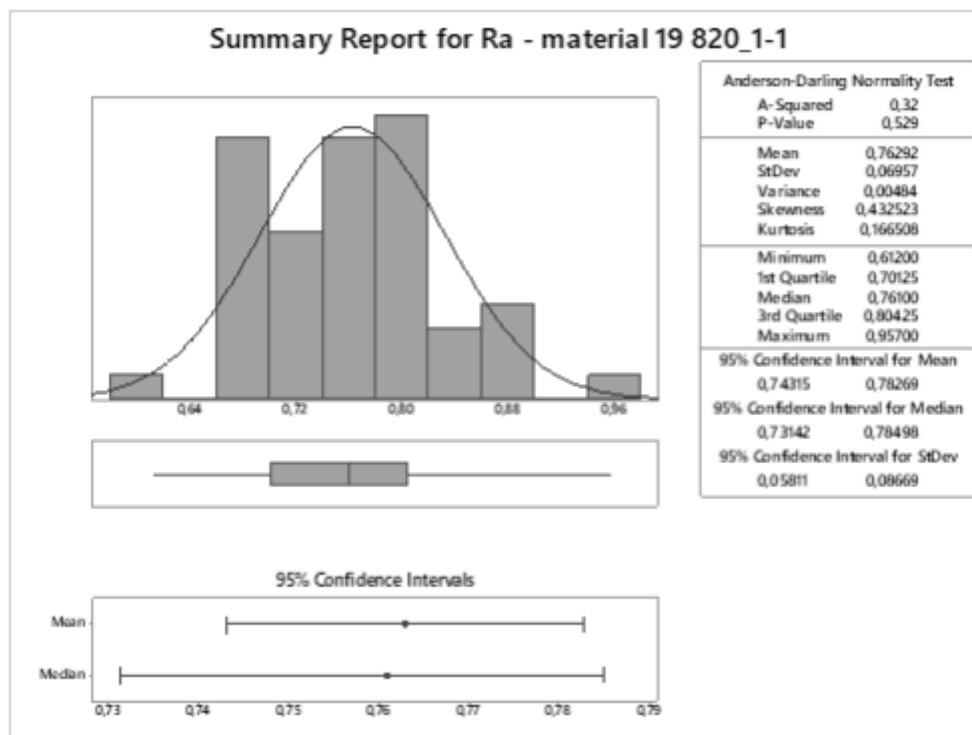
Obrázek 14 Grubbsův test odlehklých hodnot pro parametr Ra oceli 12 024 - nastavení laseru 1-1



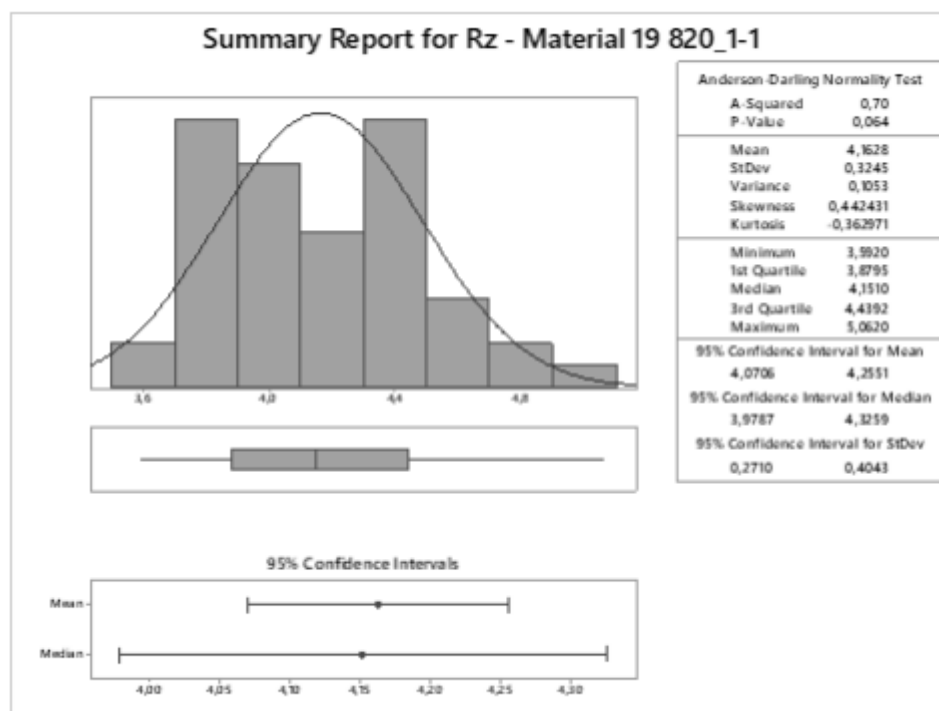
Obrázek 15 Grubbsův test odlehklých hodnot pro parametr Rz oceli 12 024 - nastavení laseru 1-1

Podle výsledků Grubbsova testu nezamítáme nulovou hypotézu H_0 o absenci hrubých chyb v souborech dat.

5.1.2 Ocel 19 820



Obrázek 16 Souhrn dat parametru Ra - nastavení laseru 1-1 pro ocel 19 820



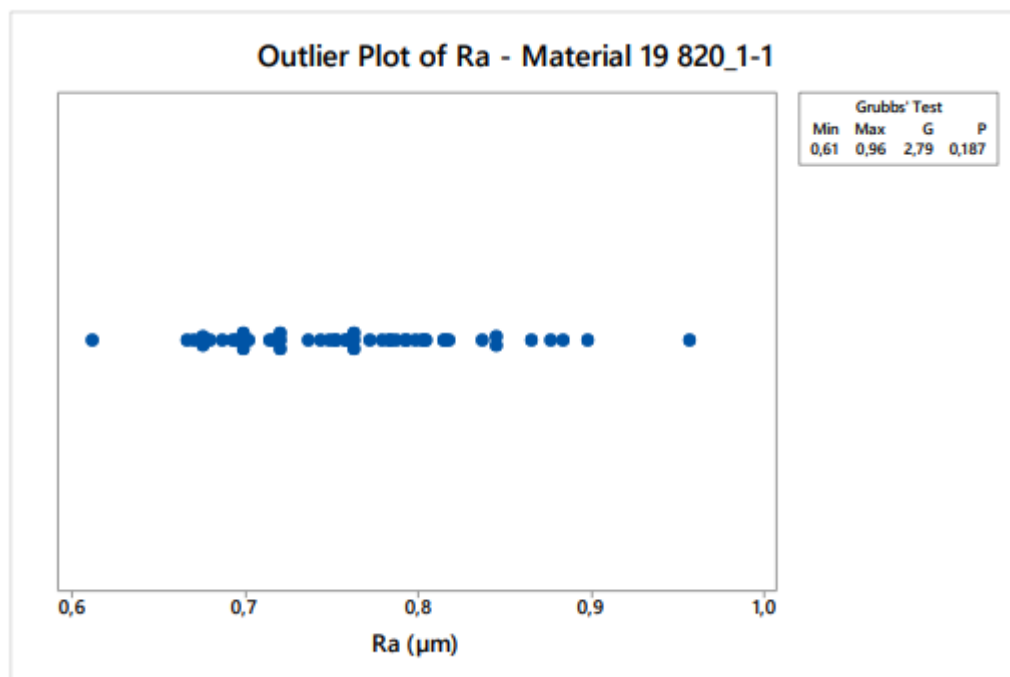
Obrázek 17 Souhrn dat parametru Rz - nastavení laseru 1-1 pro ocel 19 820

Byla provedena kontrola charakteristik Ra a Rz s nastavením laseru 1-1. Data neprokázala žádné hrubé chyby.

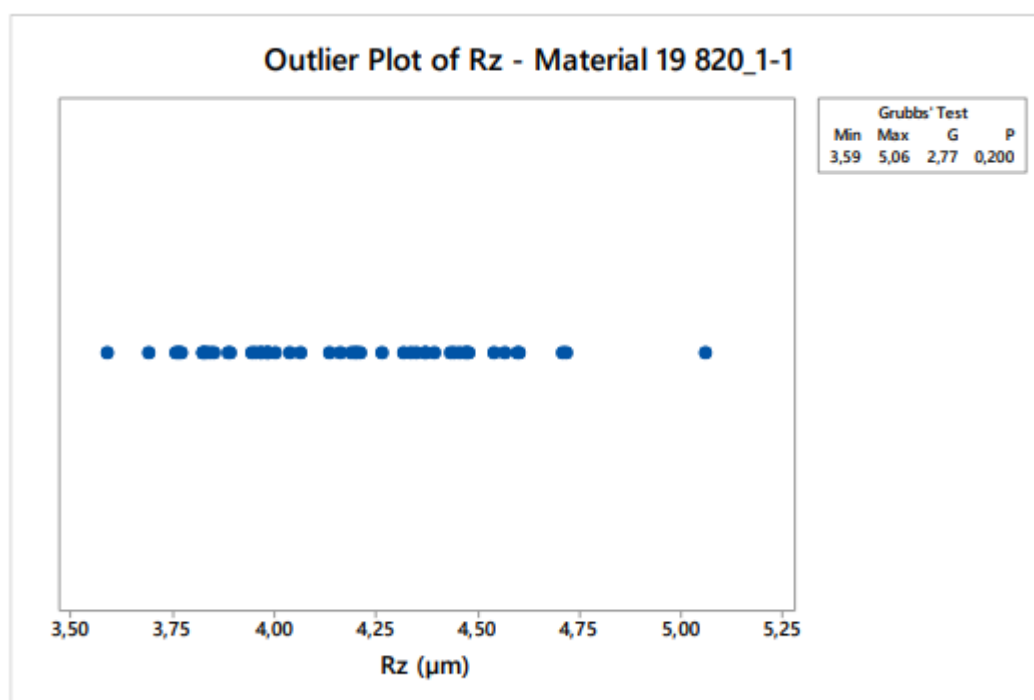
Tabulka 7 Ra a Rz pro ocel 19 820

Vzorek 1-1	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	0,763	0,761	0,0695	0,612	0,957
Rz[μm]	4,163	4,151	0,3245	3,592	5,062
Vzorek 1-2	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	3,023	3,0025	0,2584	2,596	3,844
Rz[μm]	15,499	15,587	1,281	15,587	18,057
Vzorek 1-3	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	13,705	13,612	1,245	10,697	16,381
Rz[μm]	63,3	62,965	5,576	52,781	76,457
Vzorek 1-4	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	29,448	30,01	3,502	23,103	36,569
Rz[μm]	113,23	113,53	9,65	94,01	131,04
Vzorek 1-5	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	36,403	36,038	5,006	26,103	47,536
Rz[μm]	135,17	135,82	15,5	100,9	175
Vzorek 2-1	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	0,5644	0,562	0,0501	0,439	0,67
Rz[μm]	3,1515	3,149	0,2354	2,562	3,583
Vzorek 2-2	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,0385	1,043	0,0819	0,865	1,225
Rz[μm]	5,7158	5,7895	0,4121	4,67	6,607
Vzorek 2-3	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max

Ra[μm]	1,8079	1,803	0,1276	1,519	2,132
Rz[μm]	9,7269	9,817	0,6309	8,18	11,221
Vzorek 2-4	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	3,0239	2,9985	0,2399	2,39	3,593
Rz[μm]	15,384	15,389	0,932	12,71	17,313
Vzorek 2-5	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	4,6378	4,6275	0,4467	3,63	5,846
Rz[μm]	23,241	23,234	1,934	18,327	27,65
Vzorek 3-1	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	0,54118	0,5385	0,03379	0,46	0,647
Rz[μm]	3,042	3,0425	0,2023	2,63	3,4
Vzorek 3-2	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,0034	0,991	0,1254	0,788	1,356
Rz[μm]	5,1635	5,1495	0,5655	4,207	6,691
Vzorek 3-3	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	0,93484	0,91	0,7937	0,798	1,093
Rz[μm]	5,2966	5,245	0,4289	4,591	6,324
Vzorek 3-4	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,0297	1,0205	0,0858	0,85	1,263
Rz[μm]	5,6316	5,6555	0,3549	4,682	6,388
Vzorek 3-5	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,256	1,253	0,1248	1,021	1,597
Rz[μm]	6,726	6,765	0,4464	5,814	7,796
Vzorek 4-1	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	0,80769	0,799	0,09136	0,625	1,002
Rz[μm]	4,3936	4,42	0,4505	3,594	5,347
Vzorek 4-2	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	0,6966	0,6935	0,0545	0,588	0,811
Rz[μm]	3,964	3,926	0,2453	3,484	4,536
Vzorek 4-3	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,038	1,034	0,0909	0,86	1,235
Rz[μm]	5,5332	5,446	0,4525	4,599	6,768
Vzorek 4-4	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,3625	1,3415	0,1542	1,115	1,782
Rz[μm]	6,4943	6,3685	0,6411	5,264	7,613
Vzorek 4-5	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,5545	1,576	0,1415	1,289	1,864
Rz[μm]	7,356	7,3415	0,6511	6,243	8,751
Vzorek 5-1	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,3111	1,293	0,2476	0,888	1,898
Rz[μm]	6,3779	6,426	1,0222	3,942	8,334
Vzorek 5-2	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	0,858	0,8535	0,1022	0,629	1,24
Rz[μm]	4,6168	4,615	0,4094	3,564	5,732
Vzorek 5-3	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	0,7299	0,7315	0,05456	0,617	0,857
Rz[μm]	4,0548	4,0365	0,2821	3,561	4,607
Vzorek 5-4	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	0,8565	0,8535	0,09676	0,683	1,095
Rz[μm]	4,7186	4,6925	0,4342	3,756	5,67
Vzorek 5-5	Mean	Median	StDev	Interkvartilové rozpětí	
				Min.	Max
Ra[μm]	1,1551	1,1575	0,1419	0,859	1,515
Rz[μm]	5,873	5,798	0,4761	4,854	6,954



Obrázek 18 Grubbsův test odlehlých hodnot pro parametr Ra pro ocel 19 820 - nastavení laseru 1-1



Obrázek 19 Grubbsův test odlehlých hodnot po parametr Rz pro ocel 19 820 - nastavení laseru 1-1

Hodnoty parametrů byly posuzovány Grubbsovým testem odlehlých hodnot. Tabulka 7 ukazuje hodnoty parametrů Ra a Rz, které jsme získali pro všechny kombinace nastavení

výkonu a rychlosti vláknového laseru. Pro žádné z nastavení laseru nebyla nalezena přítomnost hrubých chyb.

Nejdříve je nutné zaměřit se na interpretaci výsledků měření drsnosti povrchů ocelí 12 024 a 19 820, které byly vytvořeny pomocí vláknového laseru Sauer – Lasertec 80 Shape. Experimentální data byla získána na základě měření bezkontaktním profilometrem Zygo NewViewTM 8000 a jsou prezentována v grafech a tabulkách v rozmezí stran 44 až 51.

Porovnání drsnosti povrchů

Na základě analýzy obrázků a dat z experimentální části je patrné, že nastavení parametrů vláknového laseru významně ovlivňuje drsnost povrchů. Pro ocel 12 024 byla drsnost (R_a a R_z) nižší při použití nižšího výkonu laseru (10–20 W) a vyšší rychlosti posuvu (1500–2250 mm/s). Naopak při nastavení vyššího výkonu (40–50 W) a nižší rychlosti posuvu (500–750 mm/s) docházelo ke vzniku výraznějších nerovností povrchu. V případě oceli 19 820, která je charakteristická vyšší tvrdostí, bylo zjištěno, že drsnost povrchu se při změně parametrů laseru mění v menší míře. Při vyšších hodnotách výkonu nedocházelo k tak výraznému nárůstu hodnot R_a a R_z jako u oceli 12 024, což potvrzuje vyšší odolnost tohoto materiálu vůči změnám procesních parametrů.

Statistická analýza a normalita dat

Výsledky byly podrobeny průzkumné analýze dat (EDA), která zahrnovala testování normality pomocí Anderson-Darlingova testu. Výsledky tohoto testu potvrdily normalitu rozdělení hodnot drsnosti pro většinu měření, což naznačuje správnou volbu metod měření i stabilitu procesu laserového obrábění. Grubbsův test pro detekci odlehlých hodnot neprokázal statisticky významné odchylky, což znamená, že experimentální data jsou spolehlivá a konzistentní.

Praktické využití výsledků

Výsledky výzkumu ukazují, že u měkčích materiálů (ocel 12 024) je nutné při optimalizaci parametrů vláknového laseru volit nižší výkon a vyšší rychlost posuvu. U tvrdších materiálů, jako je ocel 19 820, je proces obrábění stabilnější i při vyšších výkonech. Tento rozdíl je dán

zejména fyzikálními vlastnostmi materiálů, kdy vyšší tvrdost oceli 19 820 zajišťuje lepší odolnost proti tepelnému namáhání a tvorbě nerovností.

Na základě těchto poznatků je možné přizpůsobit procesní parametry tak, aby byla dosažena požadovaná kvalita povrchu při minimalizaci energetických nákladů a času obrábění.

ZÁVĚR

Na základě provedených testů bylo zjištěno, že kvalita povrchu po obrábění vláknovým laserem závisí na nastavení laseru i typu materiálu. Výsledky ukázaly, že oba testované materiály, ocel 12 024 a ocel 19 820 reagují na změny nastavení laseru podobně, což umožňuje flexibilnější volbu parametrů mezi nimi.

Tato bakalářská práce se zabývala komparací charakteristik drsnosti povrchů vzniklých pomocí nekonvenčních technologií, konkrétně za použití vláknového laseru Sauer – Lasertec 80 Shape. Cílem práce bylo analyzovat vliv různých nastavení výkonu laseru a rychlosti posuvu na výslednou kvalitu povrchů ocelí 12 024 a 19 820. Výsledky experimentu byly vyhodnoceny pomocí bezkontaktního profilometru Zygo NewView™ 8000.

Na základě provedených měření a následné statistické analýzy lze konstatovat, že kvalita povrchu po opracování laserem je výrazně ovlivněna nastavením výkonu a rychlostí posuvu, přičemž vliv těchto parametrů se liší v závislosti na materiálu.

Ocel 12 024: Tento materiál vykazoval vyšší citlivost na změny nastavení laseru. Nejlepších výsledků z hlediska snížení drsnosti bylo dosaženo při nižším výkonu (10–20 W) a vyšší rychlosti posuvu (1500–2250 mm/s). Při vyšším výkonu (40–50 W) docházelo ke zvýšení hodnot R_a a R_z , což svědčí o hrubší povrchové struktuře.

Ocel 19 820: Tento materiál, známý svou tvrdostí a odolností proti opotřebení, vykazoval stabilnější výsledky napříč různými nastaveními laseru. I při vyšším výkonu a nižší rychlosti posuvu nebyly pozorovány významné nárůsty drsnosti, což z této oceli činí vhodný materiál pro aplikace s proměnlivými výrobními podmínkami.

U měkčích ocelí, jako je 12 024, je vhodné preferovat nižší výkon a vyšší rychlost posuvu pro dosažení hladšího povrchu. U tvrdších ocelí, jako je 19 820, lze použít širší škálu parametrů bez významného zhoršení kvality povrchu. Vzhledem k rozdílům mezi materiály je důležité provádět předběžné testy, aby bylo možné optimalizovat parametry pro konkrétní aplikaci.

Doporučuje se pokračovat v experimentálním zkoumání dalších nekonvenčních technologií obrábění, jako je vodní paprsek či elektroerozivní obrábění, a porovnat jejich vliv na povrchovou strukturu s výsledky dosaženými při laserovém opracování. Rovněž by bylo přínosné rozšířit výzkum na další typy ocelí a kovových slitin, aby bylo možné vyvodit obecnější závěry o vztahu mezi materiálem a technologií opracování.

SEZNAM POUŽITÉ 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 požadavky na výrobky (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [4] BUMBÁLEK, Bohumil; ODVODY, Vladimír; OŠŤÁDAL, Bohuslav. Drsnost povrchu. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. 338 s.
- [5] PERNIKÁŘ, Jiří, Josef VAČKÁŘ a Miroslav TYKAL. Jakost a metrologie. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1997-0.
- [6] AULBACH, Laura; SALAZAR BLOISE, Félix; LU, Min a KOCH, Alexander. Non-Contact Surface Roughness Measurement by Implementation of a Spatial Light Modulator. Online. *Sensors*. 2017, roč. 17, č. 3. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s17030596>.
- [7] *Aberace čočky*. Online. In: PHOTO TOOLS. B.r. Dostupné z: <https://www.phototools.cz/slovník/aberace-cocky/>. (Obrázek 1)
- [8] KAPŁONEK, Wojciech; SUTOWSKA, Marzena; UNGUREANU, Miorița a ÇETINKAYA, Kerim. Optical profilometer with confocal chromatic sensor for high-accuracy 3D measurements of the uncirculated and circulated coins. Online. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*. 2018, roč. 2, č. 3, s. 181-192. ISSN 25441671. Dostupné z: <https://doi.org/10.30464/jmee.2018.2.3.181>.
- [9] *Schéma CLA snímače*. Online. In: Elektronická učebnice. B.r. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/lekce/mereni-drsnosti-povrchu> (Obrázky 2, 3)
- [10] MUZAL, Michał; ZYGMUNT, Marek; KNYSIAK, Piotr; DROZD, Tadeusz a JAKUBASZEK, Marcin. Methods of Precise Distance Measurements for Laser Rangefinders with Digital Acquisition of Signals. Online. *Sensors*. 2021, roč. 21, č. 19. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s21196426>. (Tabulka 1)

- [11] WU, Bingwei; JIANG, Ting; YU, Zhongxiang; ZHOU, Qihui; JIAO, Jian et al. Proximity Sensing Electronic Skin: Principles, Characteristics, and Applications. Online. *Advanced Science*. 2024, roč. 11, č. 13. ISSN 2198-3844. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/advs.202308560>. (Tabulka 1)
- [12] LI, Jiaqi; TAO, Wei a ZHAO, Hui. A Laser Triangulation Displacement Sensor Based on a Cylindrical Annular Reflector. Online. *Photonics*. 2023, roč. 10, č. 10. ISSN 2304-6732. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/photonics10101139> (Tabulka 1)
- [13] ALTUNTAS, C. POINT CLOUD ACQUISITION TECHNIQUES BY USING SCANNING LIDAR FOR 3D MODELLING AND MOBILE MEASUREMENT. Online. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2022, roč. XLIII-B2-2022, s. 967-972. ISSN 2194-9034. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-967-2022>. (Tabulka 1)
- [14] BORU, Baris a ERIN, Kenan. Novel technique for control of industrial robots with wearable and contactless technologies. Online. *Measurement*. 2022, roč. 192. ISSN 02632241. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.11085>. (Tabulka 1)
- [15] SUH, Young Soo. Laser Sensors for Displacement, Distance and Position. Online. *Sensors*. 2019, roč. 19, č. 8. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s19081924>.
- [16] CLAVEAU, Rémy; MONTGOMERY, Paul a FLURY, Manuel. Coherence scanning interferometry allows accurate characterization of micrometric spherical particles contained in complex media. Online. *Ultramicroscopy*. 2020, roč. 208. ISSN 03043991. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2019.112859>.
- [17] FAY, Martin F. a DRESEL, Thomas. Applications of model-based transparent surface films analysis using coherence-scanning interferometry. Online. *Optical Engineering*. 2017, roč. 56, č. 11. ISSN 0091-3286. Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.11.111709>.
- [18] NATION, B. L.; FAUBEL, J. L.; VICE, G.T.; OHLHAUSEN, J. A.; DURBIN, S. et al. Characterization of spent nuclear fuel canister surface roughness using surface replicating molds. Online. *Scientific Reports*. 2024, roč. 14, č. 1. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71992-1>.
- [19] HE, Baofeng; ZHENG, Haibo; DING, Siyuan; YANG, Ruizhao a SHI, Zhaoyao. A review of digital filtering in evaluation of surface roughness. Online. *Metrology and*

Measurement Systems. S. 217-253. ISSN 2300-1941. Dostupné z: <https://doi.org/10.24425/mms.2021.136606>

[20] Bachchhav B, Bagchi H. Effect of surface roughness on friction and lubrication regimes. Materials Today: Proceedings. 2021 Jan 1;38:169-73 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.252>.

[21] Rosales-Leal JI, Rodríguez-Valverde MA, Mazzaglia G, Ramón-Torregrosa PJ, Díaz-Rodríguez L, García-Martínez O, Vallecillo-Capilla M, Ruiz C, Cabrerizo-Vílchez MA. Effect of roughness, wettability and morphology of engineered titanium surfaces on osteoblast-like cell adhesion. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2010 Aug 5;365(1-3):222-9 <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2009.12.017>.

[22] Schmidt J, Thorenz B, Schreiner F, Döpper F. Comparison of areal and profile surface measurement methods for evaluating surface properties of machined components. Procedia CIRP. 2021 Jan 1;102:459-64 <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.09.078>.

[23] *Výškové parametry*. Online. In: SlidePlayer. B.r. Dostupné také z: <https://player.slideplayer.cz/12/3721093/data/images/img5.png>. (Obrázek 4)

[24] *Výškové parametry profilu povrchu*. Online. In: SlideServe. B.r. Dostupné také z: <https://image3.slideserve.com/5710685/d-lkov-parametry-profilu-povrchu-n.jpg>.

(Obrázek 5)

[25] KUBATOVA, Dana a MELICHAR, Martin. Roughness Evaluation Using Abbott-Firestone Curve Parameters. Online. In: KATALINIC, Branko (ed.). *Proceedings of the 30th International DAAAM Symposium 2019*. DAAAM Proceedings. DAAAM International Vienna, 2019, s. 0467-0475. ISBN 9783902734228. Dostupné z: <https://doi.org/10.2507/30th.daaam.proceedings.063>.

[26] *Abbottova křivka*. Online. In: JENOPTIK. B.r. Dostupné také z: <https://www.jenoptik.cz/images/gallery/do-stranky/2020/technicke-informace/nejdulezitejsi-parametry-f.jpg?v=1570536168>. (Obrázek 6)

[27] ADENIYI KEHINDE ADELEKE; DANNY JOSE PORTILLO MONTERO; KEHINDE ANDREW OLU-LAWAL a OLADIRAN KAYODE OLAJIGA. STATISTICAL TECHNIQUES IN PRECISION METROLOGY, APPLICATIONS AND BEST PRACTICES. Online. Engineering Science & Technology Journal. 2024, roč. 5, č. 3, s. 888-900. ISSN 2708-8952. Dostupné z: <https://doi.org/10.51594/estj.v5i3.944>.

- [28] BELOUAFIA, Soumia; HABTI, Fatima; BENHAR, Saïd; BELAFKIH, Bouchaïb; TAYANE, Souad et al. Statistical tools and approaches to validate analytical methods: methodology and practical examples★. Online. International Journal of Metrology and Quality Engineering. 2017, roč. 8. ISSN 2107-6847. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2016030>.
- [29] WALTER, Stephen D.; RYCHTÁŘ, Jan; TAYLOR, Dewey a BALAKRISHNAN, Narayanaswamy. Estimation of standard deviations and inverse-variance weights from an observed range. Online. Statistics in Medicine. 2022, roč. 41, č. 2, s. 242-257. ISSN 0277-6715. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/sim.9233>.
- [30] RYAN, Thomas P. Statistical methods for quality improvement. 3rd ed. Wiley series in probability and statistics. Hoboken, N.J.: Wiley, c2011. ISBN 978-0-470-59074-4.
- [31] RUŽBARSKÝ, Juraj. Roughness Control of Surfaces Using a Laser Profilometer with the Selected Material Cutting Technology. Online. *Materials*. 2023, roč. 16, č. 11. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma16114109>.
- [32] WEI, Ying; ZHAO, Zhibiao a LIN, Dennis K. J. Profile control charts based on nonparametric L-1 regression methods. Online. The Annals of Applied Statistics. 2012, roč. 6, č. 1. ISSN 1932-6157. Dostupné z: <https://doi.org/10.1214/11-AOAS501>
- [33] RUŽBARSKÝ, Juraj. Roughness Control of Surfaces Using a Laser Profilometer with the Selected Material Cutting Technology. Online. *Materials*. 2023, roč. 16, č. 11. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma16114109>
- [34] NGAMSRI, Prakeaw; POKWITIDKUL, Suwijak; TREEWIRIYAKITJA, Paweena; THONGYONG, Penpisuth; NILPRAPA, Ratchapon et al. The high temperature degradation of ferritic stainless steel in solid carbon atmospheres. Online. Journal of Metals, Materials and Minerals. 2023, roč. 33, č. 1, s. 8-13. ISSN 2630-0508. Dostupné z: <https://doi.org/10.55713/jmmm.v33i1.1574>
- [35] RUDSKOI, Andrei I. a PARSHIN, Sergey G. Advanced Trends in Metallurgy and Weldability of High-Strength Cold-Resistant and Cryogenic Steels. Online. *Metals*. 2021, roč. 11, č. 12. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met11121891>.
- [36] PATA, Vladimír a Milena KUBIŠOVÁ. Statistické metody hodnocení jakosti strojírenských povrchů. Vydání: první. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická, 2018. ISBN 978-80-7454-740-9. (Obrázky 7, 8)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Ohnisková vzdálenost objektivu se mění v závislosti na barvě světla [7]	19
Obrázek 2 Schéma CLA snímače [9]	20
Obrázek 3 Laserový snímač - schéma laserového snímače [9]	22
Obrázek 4 Výškové prametry [23].....	29
Obrázek 5 Délkové parametry profilu povrchu [24]	30
Obrázek 6 Abbottova křivka [26]	31
Obrázek 7 Krabicový diagram (box-plot) [36]	34
Obrázek 8 Histogram s Gaussovou křivkou [36].....	35
Obrázek 9 Popis nastavení laseru pro jednotlivá pole	39
Obrázek 10 Vláknový laser Sauer - Lasertec 80 Shape.....	42
Obrázek 11 Vzorky po obrobení - nastavení laseru 5-5, viz. Tabulka 3	42
Obrázek 12 Souhrn dat parametru Ra a nastavení laseru 1-1 pro ocel 10 024	44
Obrázek 13 Souhrn dat parametru Rz a nastavení laseru 1-1 pro ocel 12 024	44
Obrázek 14 Grubbsův test odlehlých hodnot pro parametr Ra oceli 12 024 - nastavení laseru 1-1	47
Obrázek 15 Grubbsův test odlehlých hodnot pro parametr Rz oceli 12 024 - nastavení laseru 1-1	47
Obrázek 16 Souhrn dat parametru Ra - nastavení laseru 1-1 pro ocel 19 820	48
Obrázek 17 Souhrn dat parametru Rz - nastavení laseru 1-1 pro ocel 19 820	49
Obrázek 18 Grubbsův test odlehlých hodnot pro parametr Ra pro ocel 19 820 - nastavení laseru 1-1.....	51
Obrázek 19 Grubbsův test odlehlých hodnot po parametr Rz pro ocel 19 820 - nastavení laseru 1-1.....	51

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Typy laserových snímačů	21
Tabulka 2 Střední aritmetická úchylka Ra (μm) [4]	28
Tabulka 3 Charakteristické parametry nastavení laseru	39
Tabulka 4 Chemické složení konstrukční oceli 12 024	40
Tabulka 5 Chemické složení oceli 19 820	41
Tabulka 6 Hodnoty Ra a Rz pro ocel 12 024	45
Tabulka 7 Ra a Rz pro ocel 19 820	49

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

2D	Dvourozměrný prostor
3D	Trojrozměrný prostor
μm	mikrometr
mm	milimetr
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
CLA	Chromatic Lenght Abberation
MPa	megapascal
Ra	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
Rz	Největší výška profilu
Rp	Největší výška výstupku profilu
Rv	Největší hloubka prohlubně profilu
RSm	průměrná šíře jednotlivých částí povrchu
Rmr	procentuální část délky
%	procento
MI	celková délka úseků
λ_s	Vlnová délka vymežující povrch a drsnost
λ_c	Vlnová délka vymežující drsnost a vlnitost
λ_f	Vlnová délka vymežující povrch a vlnitost
lr	Základní délka
ln	Vyhodnocovaná délka
$\bar{X}$	Aritmetický průměr
n	Počet datových prvků
EDA	Explorační datová analýza

