

Matematické metody hodnocení drsnosti tvarově obrobené plochy v blízkosti inflexních bodů

Ing. Hana Vrbová, Ph.D.

Teze disertační práce



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Teze disertační práce

Matematické metody hodnocení drsnosti tvarově obrobené plochy v blízkosti inflexních bodů

Mathematical Methods of Roughness Evaluation of Machined Surface Close to the Inflection Points

Autor: **Ing. Hana Vrbová, Ph.D**

Studijní program: P0711D130003 / Procesní inženýrství

Školitel: prof. Dr. Ing. Vladimír Pata; doc. Ing. Roderik Plavec,
PhD.

Oponenti: prof. Ing. Ildikó Maňková, CSc.
doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.

Zlín, prosinec 2024

© Hana Vrbová

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně v edici **Doctoral Thesis Summary**.

Publikace byla vydána v roce 2024.

Klíčová slova: drsnost, heterogenní povrchy, nekonvenční obrábění, metodika hodnocení drsnosti, funkční závislost

Key words: roughness, heterogeneous surface, non-conventional machining, roughness evaluation methodology, functional dependence

Plná verze disertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7678-316-4

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na oblast hodnocení drsnosti heterogenních povrchů s hlavním cílem nalezení metodiky pro hodnocení zmíněných povrchů.

Ve vědecké praxi panuje neucelenost metod zkoumání heterogenních povrchů vzniklých obráběním nekonvenčními technologiemi, což může brzdit výzkum a vývoj těchto technologií. Po iniciačním zkoumání dat o drsnosti získaných z heterogenních povrchů byly pozorovány zákonitosti, na základě kterých lze předpokládat příležitost pro vývoj ucelené metodiky.

Součástí této metodiky bude také nalezení kritérií pro rozhodnutí, zdali je zkoumaný povrch ze statistického hlediska považován za heterogenní a tím i vhodný pro aplikaci nově nalezené metodiky, či nikoliv.

ABSTRACT

The work is focused on the area of quality assessment of heterogeneous surfaces with the main objective of finding a methodology for the assessment of these surfaces.

In scientific practice, there is a lack of consistency in the methods of investigating heterogeneous surfaces produced by machining with nonconventional technologies, which may hinder the research and development of these technologies. After an initial investigation of the roughness data obtained from heterogeneous surfaces, patterns were observed that suggest an opportunity for the development of a coherent methodology.

This methodology will include finding criteria for deciding whether or not the surface under investigation is considered statistically heterogeneous and thus suitable for the application of the newly found methodology.

ÚVOD

Rozvoj vědy a techniky spolu s vývojem nových materiálů a jejich náročných aplikací v různých odvětvích zapříčinil tlak na tu část průmyslu, která se zabývá jejich obráběním. Požadavky na rychlost, ekonomičnost a efektivitu obrábění hnaly toto odvětví k vývoji nových technologií, jako je například obrábění laserem, vodním paprskem, plasmou a mnoho dalších.

Tyto technologie i nadále procházejí procesy zlepšování. Jedním z nástrojů pro zlepšování výše zmíněných technologií je srovnávání různých parametrů a jevů vznikajících na povrchu obrobene součásti při změnách vstupních podmínek obrábění. Parametrem pro srovnávání efektivity je například drsnost vzniklého povrchu.

Jelikož se princip obrábění těchto technologií značně liší od těch konvenčních, vzniká prakticky nový charakter povrchu, pro které se dnešní metody jeho hodnocení jeví jako nedostačující.

Nově vzniklý charakter povrchu je označován jako heterogenní povrch. Tento povrch je specifický změnami hodnot parametrů drsnosti v závislosti na lokaci měření v řezu. Zpravidla dochází ke zvyšování drsnosti povrchu ve směru hloubky řezu vlivem slábnutí řezného paprsku.

Na základě předchozí rešerše článků zabývajících se vývojem zmíněných technologií (vybrané články jsou zmíněny v kapitole současného stavu řešené problematiky níže) lze konstatovat, že v praxi neexistuje konsensus ve způsobu hodnocení a srovnávání heterogenních povrchů. Nevhodně volené metody či parametry mohou způsobit takové zkreslení dat, že po jejich následném zpracování budou výsledky nepřesné či zavádějící a tím pádem je zde i riziko vzniku chyb při statistickém vyhodnocení. Jinými slovy je zde riziko vzniku chybného závěru.

Tato disertační práce se proto zaměřuje na tvorbu metodiky hodnocení drsnosti heterogenních povrchů tak, aby bylo možné metrologicky a statisticky správně vyhodnotit kontrolované povrchy bez rizika vzniku chyb při následné aplikaci statistických metod pro jejich hodnocení.

Dále se také zaměřuje na tvorbu metodiky pro rozhodnutí, zdali je zkoumaný povrch heterogenní či homogenní, aby pak na základě tohoto rozhodnutí bylo možné povrch statisticky ošetřit vhodnou metodou.

OBSAH

ÚVOD.....	4
1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	6
2. CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE.....	10
3. ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	11
3.1 Způsob měření heterogenního povrchu a získání dat pro další práci	11
3.2 Dílčí závěry a možná vědecká poznání.....	12
3.3 Exploratorní datová analýza získaných dat	13
3.3.1 Deskriptivní statistika	13
3.4 Způsoby popisu závislosti drsnosti povrchu na hloubce řezu.....	15
3.4.1 Popis průběhu pomocí parciální lineární a nelineární regrese.....	16
3.4.2 Popis průběhu pomocí parciální nelineární regrese pro primární oblast	17
3.4.3 Souhrnný popis průběhu pomocí nelineární regrese	19
3.4.4 Transformace dat	21
3.4.5 Parciální transformace dat Johnsonovou transformací.....	21
3.5 Neuronová síť	22
4. SHRNUTÍ, VYHODNOCENÍ A POPIS METODIK PRO HODNOCENÍ HETEROGENNÍCH POVRCHŮ	25
4.1 Primární rozhodnutí o heterogenitě povrchu	26
4.2 Metodika navržená pro vědu a výzkum	28
4.2.1 Parciální popis dat	28
4.2.2 Parciálně klasický popis dat	29
4.2.3 Popis dat zcela	29
4.3 Metodika navržená pro praxi	29
4.3.1 Zjednodušená metodika navržená pro praxi.....	30
5. ZÁVĚR	33
6. PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI.....	34
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	35
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	43
SEZNAM OBRÁZKŮ	44
SEZNAM TABULEK	45
PUBLIKAČNÍ AKTIVITY	46
ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA	48

1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Následující zmíněné publikace jsou zaměřeny na problematiku měření drsnosti heterogenního povrchu vzniklého po obrábění plasmou, nebo laserovým či vodním paprskem.

Pod každým odstavcem se nachází komentář způsobu, jakým byla získána data pro vyhodnocení drsnosti heterogenního povrchu – psán kurzívou. Publikace jsou seřazeny chronologicky.

Američtí vědci v roce 2003 zkoumali vliv výkonu laseru a rychlosti posuvu na šířku prořezu, drsnost, četnost vzniklých drážek a velikost teplotně ovlivněné zóny. Pro vytvoření modelů byla použita regresní analýza. Řezané vzorky byly vyrobeny z oceli 4130. Kvalita řezu laserem byla hodnocena na základě hodnot drsnosti a rozměrů teplotně ovlivněné zóny. [1]

Přístrojem použitým pro měření drsnosti byl kontaktní drsnoměr. Měřeným parametrem byl pouze parametr Ra. Hodnota základní délky pro měření byla 12,7 mm. Naměřeno bylo celkem sedm hodnot „zhruba“ uprostřed tloušťky řezu. Hodnoty byly dále zprůměrovány ve výslednou hodnotu Ra.

V roce 2004 zkoumal tým tureckých vědců vliv rychlosti posuvu, tloušťky řezu a složení materiálu na drsnost povrchu obrobenou vodním paprskem. Řezané vzorky byly vyrobeny z hliníku a jeho směsí, mosazi a oceli. Hodnocení rozdílů v drsnosti při změnách jednotlivých vstupních parametrů je vyjádřeno jako procentuální rozdíl. [2]

Popisují zde charakter heterogenního povrchu jako postupně zhoršující se drsnosti ve směru vodního paprsku – toto zhoršení je připisováno ztrátě energie paprsku. Naměřenými parametry drsnosti byly Ra, Rz a Rmax. Drsnost byla snímána vždy po 1 mm po celé hloubce řezu.

V roce 2007 vyvinul tým tureckých vědců neuronovou síť predikující drsnost povrchu při obrábění vodním paprskem. Uváženými vstupními parametry byla rychlost posuvu, tlak vody na výstupu z trysky, vzdálenost od obrobku, velikost abrazivních zrn a jejich tok. Obráběným tělesem byla hliníková slitina AA7075. Pro statistickou analýzu naměřených dat byla využita Taguchiho metoda. Neuronová síť byla založena na algoritmu zpětného šíření chyb. Pro ověření správnosti regresního modelu byla použita metoda ANOVA a F-test. Výsledkem analýzy bylo zjištění, že na drsnost povrchu má největší vliv tlak vody na výstupu z trysky. [3]

Heterogenní povrch byl zkoumán pod skenovacím elektronovým mikroskopem, kde byly odhaleny – pro tento povrch typické – tři zóny s lišící se drsností. Samotná drsnost povrchu byla snímána přenosným přístrojem pro

měření drsnosti SJ-201 a to ve vzdálenosti 5 mm od povrchu řezaného materiálu. Snímaným a vyhodnocovaným parametrem byl pouze parametr Ra.

Tým malajských vědců v roce 2010 zkoumal vliv vstupních parametrů na kvalitu povrchu součástí řezaných laserem. Řezané součástky byly vyrobeny z polymerů, a to konkrétně z polypropylenu, polykarbonátu a polymethylmetakrylátu. Cílem bylo vytvoření rovnice, na základě které je možné ze zadaných vstupních parametrů získat údaj o předpokládané drsnosti obrobeneho povrchu. [4]

Zkoumaným parametrem byl pouze Ra. Byl měřen pomocí kontaktního drsnoměru Mahr Perthometer. Celkem byla provedena tři měření na nespecifikovaných místech a ta byla dále zprůměrována na výslednou hodnotu Ra. Ověření proběhlo pouze u materiálu PMMA z důvodu příliš vysoké drsnosti – pravděpodobně mimo rozsah použitého drsnoměru.

V roce 2011 Jurkovic a jeho tým experimentálně zkoumal vliv vstupních parametrů na drsnost při obrábění vodním paprskem. Vzorky byly vyrobeny z hliníku a oceli. [5]

Drsnost povrchu byla snímána přenosným kontaktním drsnoměrem Hommeltech T1000 vždy na třech pozicích pro každý vzorek – na vstupu řezného paprsku, uprostřed a na výstupu paprsku. Hodnoty ze všech třech pozic byly vždy zprůměrovány v jednu hodnotu, jako údaj o drsnosti právě snímaného vzorku. Měřenými parametry byly Ra a Rz.

V roce 2018 se tým vědců z Indie zabýval vlivem vstupních parametrů na výslednou drsnost povrchu na řezu po obrábění plasmou. K popisu vlivu byla hledána funkční závislost jednotlivých vstupních parametrů na parametru drsnosti Ra. Pro odhad výsledné drsnosti byly použity i další metody. [6]

Pro sběr dat byl použit dílenský kontaktní drsnoměr Surtronic S128 od firmy Taylor-Hobson. Jediným zkoumaným parametrem byl pouze parametr Ra. Lokace měření drsnosti nespecifikována.

V roce 2020 optimalizoval tým vědců z Jihoafrické republiky drsnost povrchu po obrábění CO2 laserem. Byla provedena analýza vlivu vstupních parametrů na drsnost povrchu malých ozubených kol vyrobených z oceli. Celkem bylo provedeno devět experimentů, při kterých bylo zjištěno, že nejvíce je kvalita povrchu ovlivněna polohou ohniska laserového paprsku. [7]

Zkoumaným parametrem byl pouze parametr Ra. Drsnost povrchu byla měřena kontaktním drsnoměrem Jenoptik Hommel Etamic na třech náhodně vybraných zubech ozubeného kola. Každé měření bylo opakováno třikrát na nespecifikované pozici a zprůměrováno ve výslednou hodnotu Ra.

Tým vědců z Řecka zkoumal v roce 2021 kvalitu řezů vzorků z akrylonitrilbutadienstyrenu vytvořených technologií 3D tisku. Řezy byly provedeny technologií obrábění laserem. Konkrétněji byl zkoumán vliv vstupních parametrů na výsledný povrch výtisku. [8]

Drsnost byla měřena přenosným kontaktním drsnoměrem SurfTest SJ-210. Byly zkoumány dva amplitudové parametry: Ra a Rt. Přesná poloha a ani počet měření specifikován nebyl.

Řečtí vědci v roce 2022 zkoumali možnosti predikce charakteristik ploch řezaných laserem pomocí neuronových sítí s různými architekturami. Neuronová síť má za úkol odhadnout drsnost v různých hloubkách řezu. Řezaným materiálem byl polymethylmetakrylát. [9]

Zkoumanými parametry drsnosti byly parametry Ra a Rz. Snímány byly kontaktním drsnoměrem Diavite DH8. Jednotlivé hodnoty byly snímány ve hloubkách 1, 2 a 3 mm. Tloušťka vzorku byla 4 mm.

V roce 2023 se vědci z Polska zabývali zkoumáním účinků vybraných vstupních parametrů na kvalitu povrchu obrobku vyrobeného technologií řezání abrazivním vodním paprskem. Dále se snažili prozkoumat, jak úhel vychýlení trysky ovlivní výslednou drsnost povrchu v řezu. [10]

Měřenými parametry drsnosti byly 2D parametry Ra, Rz, Rku, Rsk a 3D parametry Sku a Ssk. Měření bylo provedeno vždy ve dvou oblastech, a to uprostřed hloubky řezu a pak na místě vstupu vodního paprsku do obrobku. Měřicí přístroj byl kontaktní profilometr Hommel T1000 a bezkontaktní Hommel T8000 RC120-400.

V roce 2024 se tým vědců z Indie zabýval matematickými možnostmi optimalizace vstupních parametrů procesu řezání plasmovým obloukem. Ukazateli kvality povrchu jim v jejich výzkumu byla drsnost povrchu, výška otřepu a rychlost úběru materiálu. [11]

Zkoumané parametry nebyly specifikovány. V článku byla zmíněna pouze „drsnost povrchu“. Použitá metoda byla nazvána jako „ten-point method“ a vysvětlením bylo sejmutí hodnot pěti největších vrcholů a pěti nejnižších údolí na zkoumaném povrchu. Měřicím přístrojem byl profilový projektor Make-Banbros.



Obr. 1.1 Časová osa vyjadřující nekonzistentnost metodiky

2. CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Doposud je problematika drsnosti povrchu založena na řešení popsáném v již neplatné normě ČSN EN ISO 4288 publikované v roce 1996, které je opřeno o stanovenou hodnotu horní meze v okolí inflexního bodu. Tato norma byla sice nahrazena normou novou, ČSN EN ISO 21920-2, ovšem zmíněné řešení z ní bylo převzato beze změny.

Ačkoliv došlo k velmi významnému posunu v užívání nástrojů pro statistické analýzy, drsnost povrchu je stále řešena tradičními nástroji. Statistické hodnocení drsnosti povrchů je stále založeno na hodnotě aritmetického průměru, ovšem čím dál častěji používané nekonvenční technologie obrábění charakterem obrobeneho povrchu znemožňují aplikovatelnost takové hodnoty pro jeho hodnocení.

Jinými slovy shrnuto, nekonvenční technologie jsou používány čím dál častěji, statistické nástroje se v čase vyvinuly až k neuronovým sítím, ovšem postupy hodnocení drsnosti povrchů zůstaly stejné, a to vede k potřebě rozvinutí nových postupů a metodiky.

Proto je cílem disertační práce nalezení metodologie hodnocení drsnosti heterogenních povrchů a dále nalezení způsobu automatizace zpracování naměřených dat s využitím vhodného typu neuronové sítě perceptronového charakteru.

Nedílnou součástí metodiky bude také nalezení kritérií, na základě kterých proběhne rozhodnutí o charakteru povrchu – heterogenní / homogenní. Od tohoto rozhodnutí se následně bude odvíjet další postup v hodnocení zkoumaného povrchu.

Úkony k dosažení výše zmíněného cíle jsou následující:

- Vypracování literární rešerše.
- Naměření vzorků s heterogenním povrchem.
- Statistické hodnocení získaných parametrů drsnosti.
- Hledání funkčních závislostí a vhodných funkcí.
- Tvorba neuronové sítě.
- Porovnání navržených nástrojů pro hodnocení dat.
- Nalezení a popsání nejvhodnější metodiky evaluace dat drsnosti heterogenních povrchů.

3. ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

V následujících kapitolách je zpracováno řešení disertační práce. Nejdříve byly z heterogenního povrchu sejmuty hodnoty parametrů drsnosti. Tyto soubory dat byly následně vhodně statisticky zpracovány. Data byla vyšetřena a byly popsány zákonitosti heterogenních povrchů.

Dále byla data zpracována různými statistickými nástroji, které by mohly sloužit pro popis heterogenních povrchů. Nástroje jsou následně zhodnoceny ve smyslu jejich vhodnosti.

Vybrané vhodné nástroje byly zapracovány do navržené metodiky, která bude sloužit pro hodnocení a popis dat drsnosti heterogenních povrchů.

3.1 Způsob měření heterogenního povrchu a získání dat pro další práci

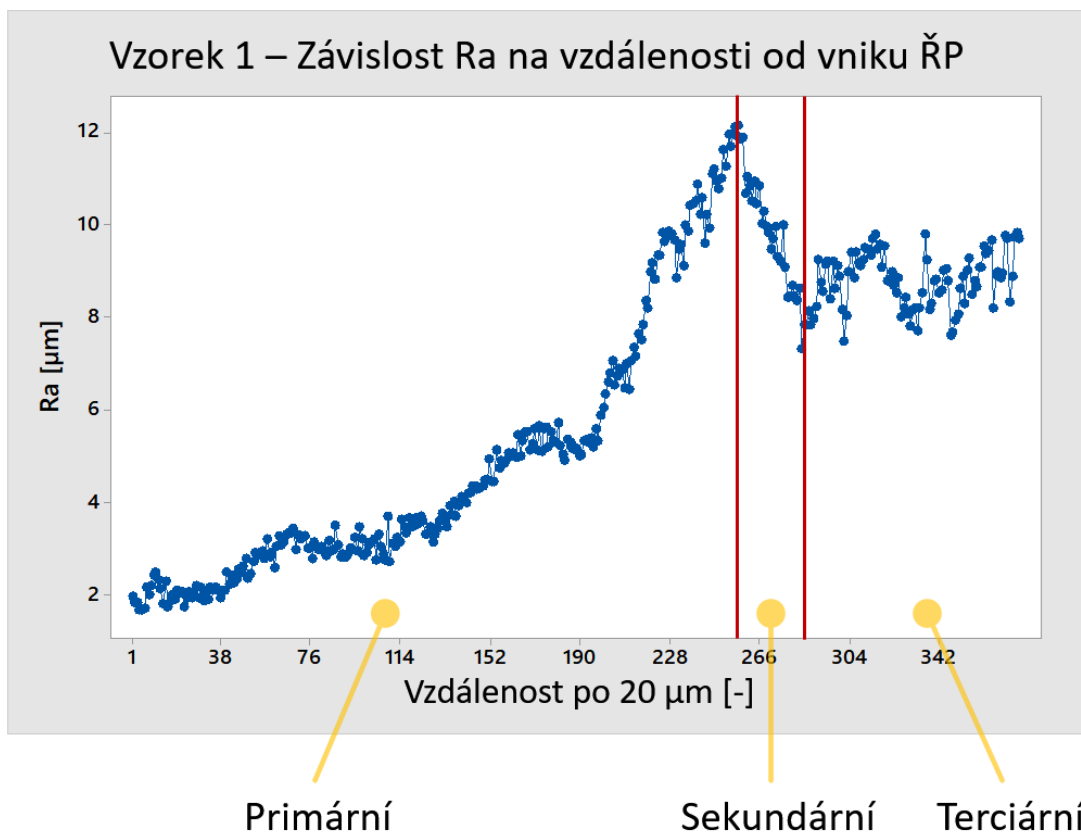
Bylo vybráno deset vzorků ocelových destiček řezaných laserem s typickým heterogenním povrchem. Konkrétně se jedná o nerezovou ocel DIN 1.4301 (ČSN 17 240), která je velmi hojně používaná a odolná vůči vlivům vnějšího prostředí.



Obr. 3.1 Vzorek připravený k měření

Vzorky byly měřeny na optickém 3D profilometru Zygo NewView 8000. Před každým měřením byl povrch kontrolován na možné nečistoty a nehomogenity, které mohly vzniknout při výrobě a mohly by negativně ovlivnit měření.

Bylo provedeno celkem 376 měření řezů na ploše 4 x 7,5 mm, tzn. vzdálenost mezi jednotlivými řezy byla 20 μm . Výstupem byl soubor dat o 376 hodnotách, který byl dále ošetřen pomocí metodiky EDA. Po filtraci a vyjmutí parametrů drsnosti proběhla zběžná ověření správnosti teorie funkční závislosti parametrů drsnosti na vzdálenosti od vniku řezného paprsku. Níže je zobrazen graf závislosti parametru R_a na vzdálenosti od vniku řezného paprsku pro vzorek č. 1.



Obr. 3.2 Graf závislosti Ra na vzdálenosti od vniku řezného paprsku a oblasti

Na grafu závislosti vybraného parametru drsnosti a vzdálenosti od vniku řezného paprsku lze v jeho první části pozorovat vzestupnost, která může připomínat exponenciální závislost. Na tento prvek je navázán globální extrém, po němž následuje krátký úsek klesajícího trendu a v poslední části grafu lze pozorovat zdánlivý šum, který by mohl poukazovat na náhodné rozdělení hodnot zkoumaného parametru drsnosti. Takto může být povrch rozdělen do tří oblastí: **primární, sekundární a terciární.**

3.2 Dílčí závěry a možná vědecká poznání

Po vizuálním zhodnocení všech zbývajících grafů zkoumané závislosti lze konstatovat, že výše zmíněné prvky se s mírnými výchyly objevují u všech zkoumaných závislostí. Proto lze s určitou mírou pravděpodobnosti potvrdit správnost hypotézy o možnosti použití regresních funkcí pro vyhodnocování heterogenních povrchů.

Následně bude probíhat hledání vhodných regresních funkcí a statistické potvrzení jejich významnosti při užití pro vyjádření funkční závislosti.

Po nalezení vhodné funkce proběhne návrh metodiky, která by mohla sloužit pro hodnocení heterogenních povrchů. Nedílnou součástí metodiky budou také kritéria sloužící pro rozhodnutí o charakteru povrchu a tím i pro rozhodnutí při

výběru vhodné metody zkoumání. Navržená metodika bude ověřena statistickými metodami a bude porovnána s výsledky získanými pomocí neuronové sítě.

Po úspěšném nalezení metodiky by další výzkum v oblasti heterogenních povrchů mohl probíhat jednotně, uceleně a zároveň efektivně. Jednotlivé výsledky výzkumů by mezi sebou byly porovnatelné bez rizika vzniku chyb při interpretaci charakteru porovnávaného povrchu a zároveň bez rizika vzniku chyb při srovnávání dvou heterogenních povrchů za změněných vstupních podmínek v rámci jednoho výzkumu, jež jsou hojně využívány pro optimalizaci nekonvenčních technologií.

To vše by vedlo ke zrychlení a větší efektivitě zkoumání a dalšího vývoje nekonvenčních technologií produkujících heterogenní povrchy.

3.3 Exploratorní datová analýza získaných dat

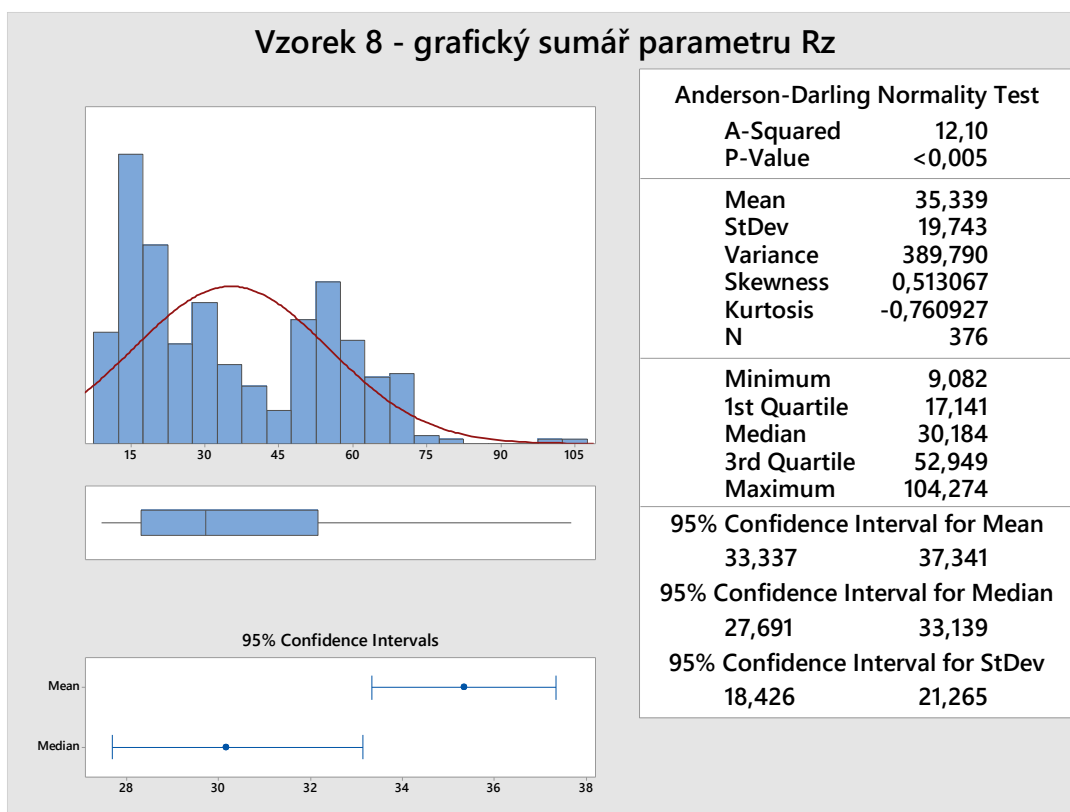
Exploratorní datová analýza (EDA) slouží k objektivnímu zkoumání dat tak, aby bylo zjištěno vše, co ve zkoumaných datech může být potenciálně obsaženo. Tato analýza se zpravidla provádí v několika krocích: určení typu dat, celkové zhodnocení (např. hledání trendů, šikmosti nebo špičatosti), nalezení chyb či outlierů (a případné odstranění dotčených hodnot) a testování normality dat.

Tato analýza byla provedena u všech dat. Jejím výsledkem bylo, že žádný ze zkoumaných souborů dat nevykazoval známky normálního rozdělení.

Při počtu sta datových souborů je tento fakt nezanedbatelný, ze statistického hlediska významný a bude hrát velkou roli při posuzování heterogenity povrchů v nastavované metodice hodnocení jejich jakosti.

3.3.1 Deskriptivní statistika

Nyní je třeba v rámci aplikované metodiky EDA celkově zhodnotit zkoumané datové soubory. K tomu velmi dobře slouží nástroj pro sumarizaci dat v programu Minitab. Níže je vyobrazení výstupu z tohoto nástroje pro vybraný vzorek a jeho parametr.



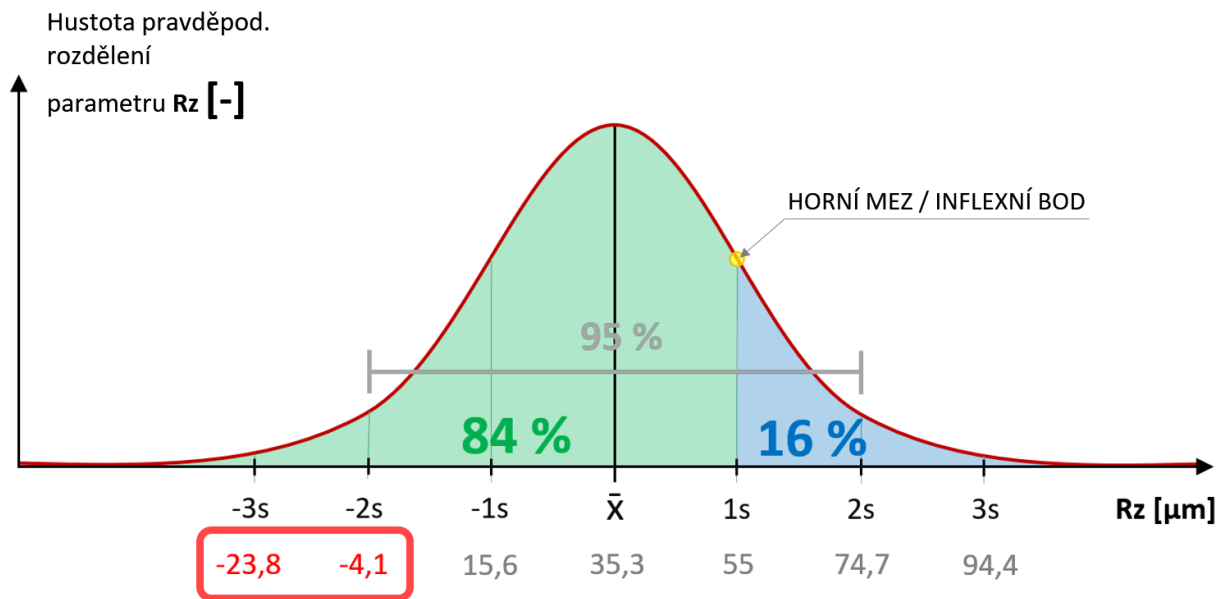
Obr. 3.3 Grafický sumář pro vzorek 8, parametr Rz z programu Minitab

V grafickém sumáři je vyobrazeno proložení dat Gaussovou křivkou. Zkoumaná data této křivce neodpovídají a místo jednoho vrcholu mají vrcholy dva. Data jsou také negativně zešikmená a konfidenční intervaly aritmetického průměru a mediánu jsou disjunktní – nemají žádný společný prvek.

Tato data mají také hodnotu směrodatné odchylky aritmetického průměru relativně velmi vysokou.

Pravidlo 16 % z normy ČSN EN ISO 21920 říká, že maximálně 16 % všech naměřených hodnot se může nacházet nad stanovenou horní mezí.

Horní mez je definována jako součet aritmetického průměru a směrodatné odchylky. V grafickém zobrazení níže je vyobrazena praktická aplikace pravidla 16 % s daty z grafického sumáře (obrázek níže). Data jsou pro lepší přehled zaokrouhlena na jedno desetinné místo.



Obr. 3.4 Pravidlo 16 % aplikováno na data ze vzorku 8, parametru Rz

Pod osou x a pod symboly směrodatných odchylek a aritmetického průměru jsou uvedeny jejich hodnoty, v tomto konkrétním případě pro vzorek 8, parametr Rz. Hodnota horní meze je stanovena na $Rz = 55 \mu\text{m}$ a aby byl povrch považován za přijatelný, může se maximálně 16 % hodnot nacházet nad ní.

V grafu je také úsečkou vyznačen interval pravděpodobnosti dat. Úsečka graficky značí, že je 95 % pravděpodobnost, že na zkoumaném povrchu se budou hodnoty parametru Rz pohybovat od -4,1 až do 74,7. Kromě relativně velkého rozptylu je zde fakt, že hodnoty drsnosti povrchu nikdy nemohou nabývat záporných hodnot.

Vysvětlením buď to, že předpokladem pro aplikovatelnost pravidla 16 % a dalších nástrojů pro hodnocení jakosti povrchu je normalita zkoumaných dat. To je důvodem, proč klasický přístup při hodnocení jakosti heterogenních povrchů selhává a je nutné rozvinout metodiku, která bude aplikovatelná na povrchy nevykazující známky normality.

3.4 Způsoby popisu závislosti drsnosti povrchu na hloubce řezu

V předchozích kapitolách bylo dokázáno, že klasický přístup a metody, používané k popisu drsnosti homogenních povrchů u těch heterogenních selhávají. Heterogenní povrch je specifický tím, že nenesie znaky normálního rozdělení, které je předpokladem pro správné fungování nástrojů klasického přístupu, a naopak se vyznačuje závislostí drsnosti povrchu na vzdálenosti od vniku řezného paprsku.

V následujících kapitolách jsou popsány možnosti pro hodnocení drsnosti heterogenního povrchu a jejich následné zhodnocení.

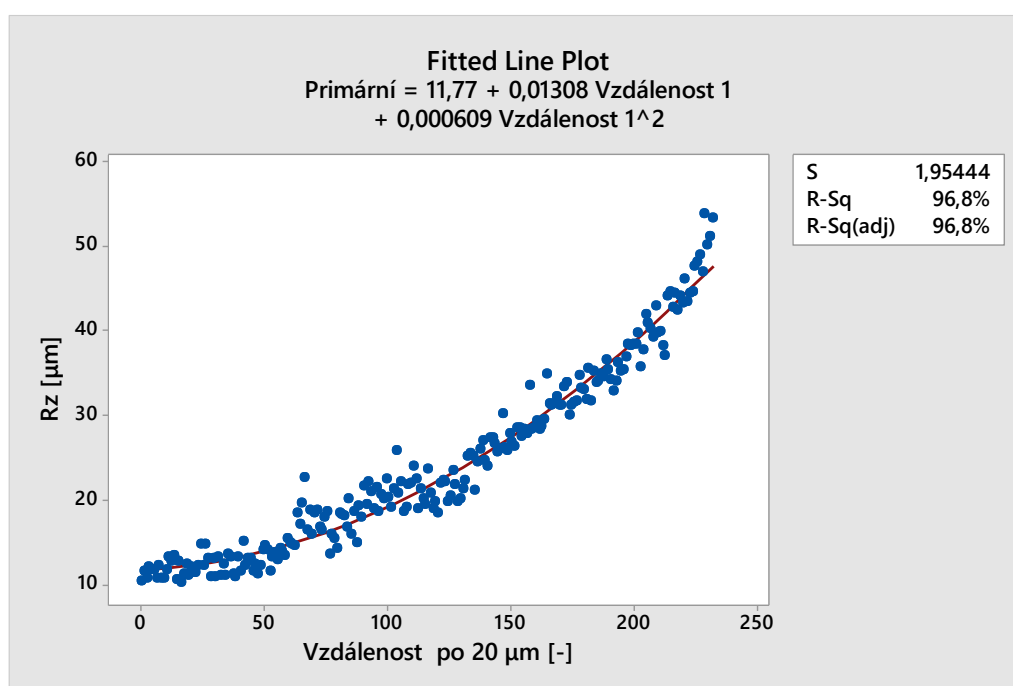
3.4.1 Popis průběhu pomocí parciální lineární a nelineární regrese

Nejjednodušším nástrojem pro popis průběhu dat je lineární regrese. Povrch bude rozdělen do tří, již dříve zmíněných oblastí – *primární, sekundární a terciární* – a každá tato oblast bude hodnocena odděleně. Takto budou hodnoceny pouze parametry Ra, Rp, Rv, Rz, a Rdc, jelikož parametr RSm neobsahuje tři zmíněné oblasti.

Míru dosažené těsnosti proložení dat regresní křivkou lze posoudit podle hodnot regresního rabatu R-Sq(adj) nalezené regresní křivky. Čím blíže je tato hodnota 100 %, tím lepší proložení bylo získáno.

- **Primární oblast**

Pro primární oblast byl jako nejvhodnější vyhodnocen polynom II. stupně.

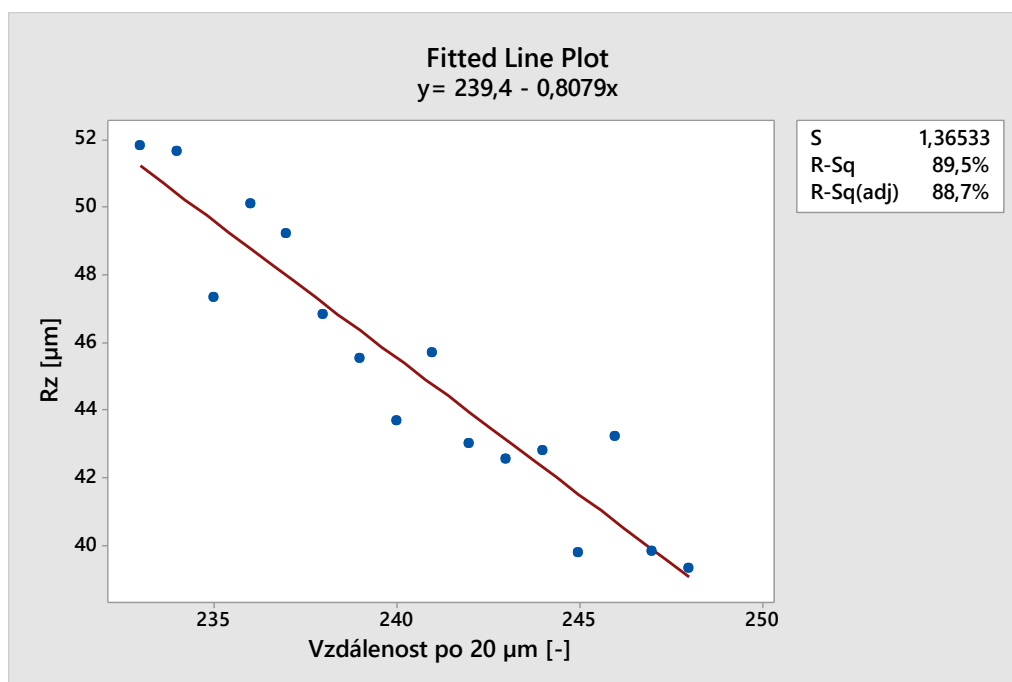


Obr. 3.5 Vzorek 4, Rz, proložení primární oblasti polynomem II. stupně

Z výsledné hodnoty regresního rabatu lze konstatovat, že polynom druhého stupně průběh dat v primární oblasti popisuje akurátně.

- **Sekundární oblast**

Níže na grafu je proložení dat sekundární oblasti polynomem I. stupně.



Obr. 3.6 Vzorek 4, Rz, proložení sekundární oblasti polynomem I. stupně

Hodnota regresního rabatu 88,7 % v poměru omezeného počtu dat se při proložení dat polynomem I. stupně jeví jako dostačující.

- **Terciární oblast**

Terciární oblast se jeví být rozdělena Gaussovsky – normálně, což bylo také potvrzeno Anderson-Darlingovým testem normality. Pro tuto oblast je tedy možné použít klasických statistických metod.

Pro parciální popis průběhu drsnosti heterogenního povrchu je tedy nutné jej rozdělit do tří oblastí, které budou popisovány odděleně. Pro primární oblast, kdy dochází k nárůstu drsnosti až do globálního maxima, se jeví jako nejvhodnější použít polynom II. stupně. Pro sekundární oblast, která má od globálního maxima klesající tendenci a končí se zdánlivou normalizací dat, se jeví nejvhodnějším modelem polynom I. stupně. Terciární oblast vykazuje známky normality, a proto je možné zde využít tradičního přístupu hodnocení drsnosti povrchů, jako jsou například srovnávací t-testy a F-testy.

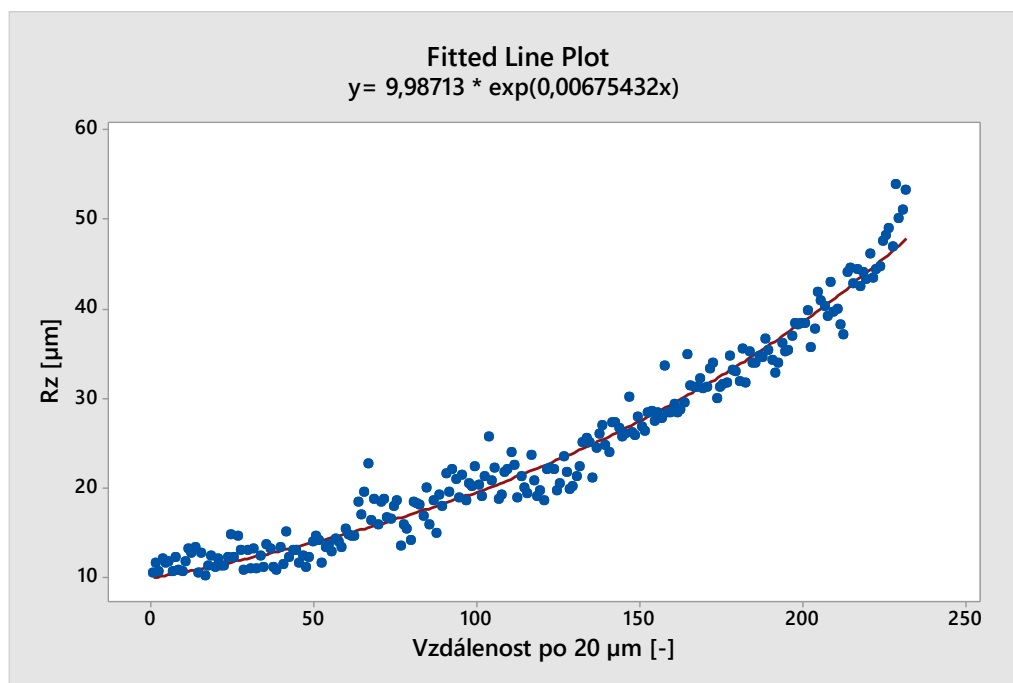
3.4.2 Popis průběhu pomocí parciální nelineární regrese pro primární oblast

Primární oblast připomíná exponenciální funkci, a proto bylo přistoupeno k otestování významnosti zmíněného modelu.

Pro možnost porovnání vhodnosti předchozího modelu budou použita stejná data, a to data parametru Rz vzorku 4. Pro proložení dat byla zvolena Levenberg-

Marquardtova metoda. Maximální počet iterací byl nastaven na 200 a počáteční hodnoty byly nastaveny na:

- Theta1 = 50
- Theta2 = -0,5
- Tolerance konvergence = 0,00001

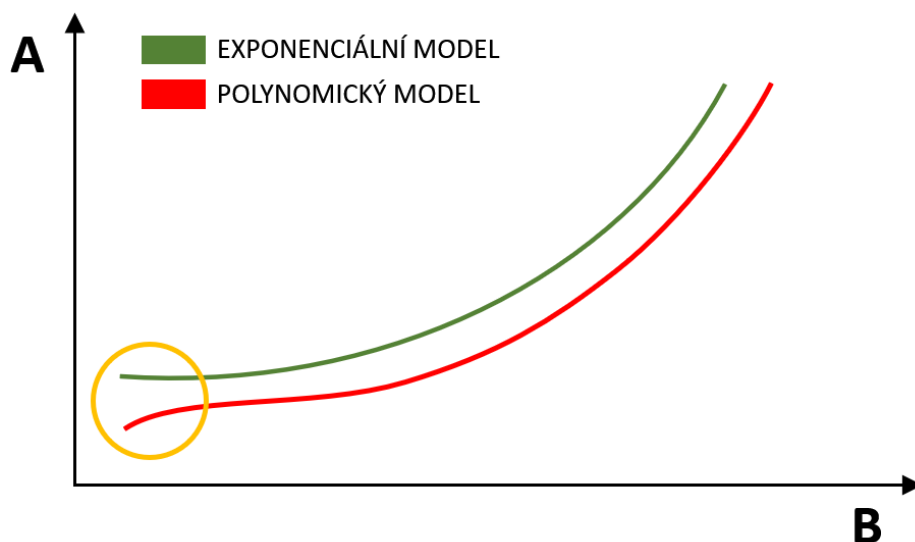


Obr. 3.7 Vzorek 4, Rz, proložení primární oblasti exponenciální funkcí

Z grafu je patrné, že by exponenciální funkce mohla přijatelně popisovat data. V programu Minitab byla také potvrzena významnost modelu z výsledných hodnot pro nelineární regresi. Model datům odpovídá a je významný.

V předchozí kapitole byl na data aplikován polynom druhého a třetího stupně. Z výsledků je patrné, že model data popisuje solidně, už jen z pozorování proložení dat křivkou. Hodnota regresního rabatu se blížila téměř ke 100 %, což je velice dobrý výsledek a polynomy lze tudíž data popsat dostatečně.

Každopádně, pokud by byl pohled zaměřen na celkový tvar modelu, v počátku polynomické křivky se nachází oblast růstu. Grafické vyobrazení polynomického a exponenciálního modelu je vyobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 3.8 Srovnání tvaru křivky exponenciálního a polynomického modelu

Při analýze dat bylo zjištěno, že se ve zkoumaných datech zmíněný růst v jejich počátku nevyskytuje, a proto polynomický model, ačkoliv byl vyhodnocen jako významný, nebude datům odpovídat tak, jako jim odpovídá exponenciální model popsáný v této kapitole.

Software QC Expert, který byl použit pro kontrolu, potvrdil významnost exponenciálního modelu. To znamená, že model je statisticky významný a zkoumaným datům odpovídá.

Důležitým faktorem při rozhodování o modelu, který bude použit, je ale nahlížení na něj jako celek a je třeba posuzovat jeho vhodnost s ohledem na charakter a tvar dat. Každý model má své předpoklady a omezení, a proto je nutné, aby bylo porozuměno způsobu, jakým model odpovídá skutečným datům.

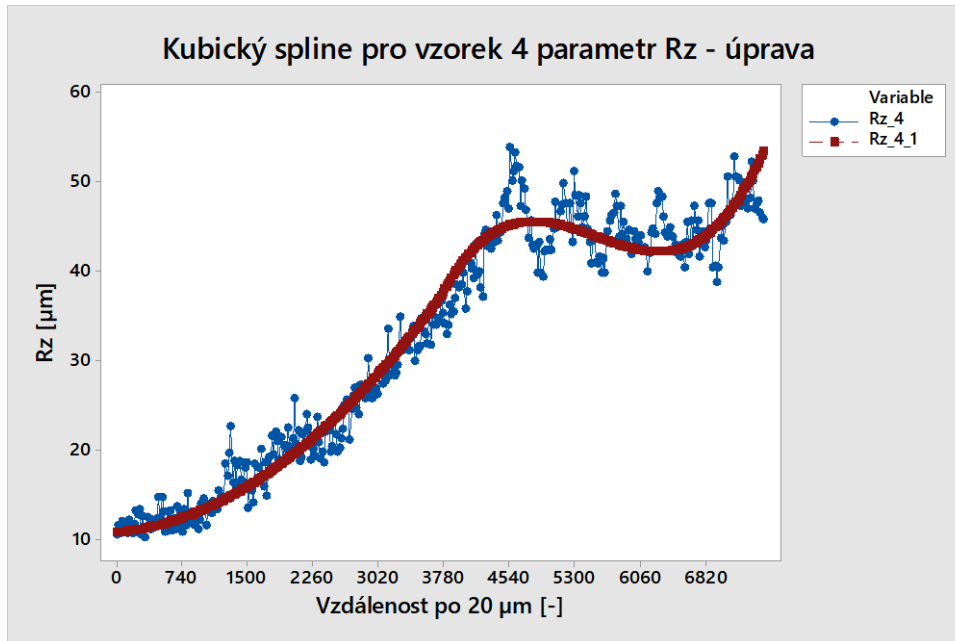
Závěrem je ale také třeba říct, že při výběru vhodného modelu je důležité zvážit nejen výsledné hodnoty regrese, ale také praktičnost a aplikovatelnost na reálný problém. Dobře zvolený model by měl být nejen přesný, ale také srozumitelný, a ne příliš složitý. Proto je vzhledem k ověřené přesnosti v poměru ku náročnosti doporučeno použít polynomický model. Užití modelu, ač jednoduššího, ale plně dostačujícího a odpovídajícího zkoumaným datům, zaručí nižší riziko vzniku chyb při datové analýze.

3.4.3 Souhrnný popis průběhu pomocí nelineární regrese

Nejvhodnějším nástrojem pro souhrnný popis dat byl vyhodnocen kubický spline.

Tento nástroj rozdělí data do zvoleného počtu úseků, které jsou spojeny uzly. Tyto uzly jsou poté proloženy kubickými polynomy a jsou v každém bodě spojitě, dokonce i mezi jednotlivými úseky.

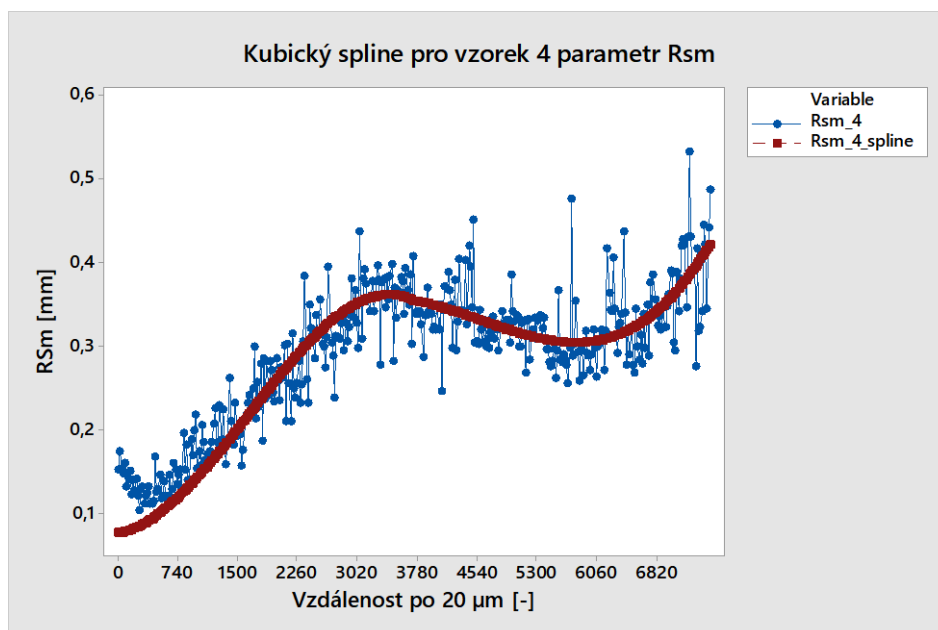
V následujícím obrázku je nástroj kubický spline aplikován na vzorek 4 parametr Rz. Hladina významnosti byla stanovena na $\alpha = 0,05$ a počet uzlů byl zvolen s hodnotou 2.



Obr. 3.9 Proložení vzorku 4 parametru Rz kubickým splinem (úprava)

Volba počtu uzlů je velmi důležitá, jelikož u tohoto nástroje významně ovlivňuje konečnou interpolaci.

Vzhledem k odlišnému průběhu parametru RSm bud nástroj kubický spline aplikován i na něj. Výsledek je uveden v následujícím obrázku.



Obr. 3.10 Proložení vzorku 4 parametru RSm kubickým splinem

Nástrojem kubického splinu byl průběh parametru RSm popsán velmi dobře. Ovšem v počátku průběhu je patrná výraznější odchylka, kterou se nepodařilo odstranit ani po změnách počtu úseků.

3.4.4 Transformace dat

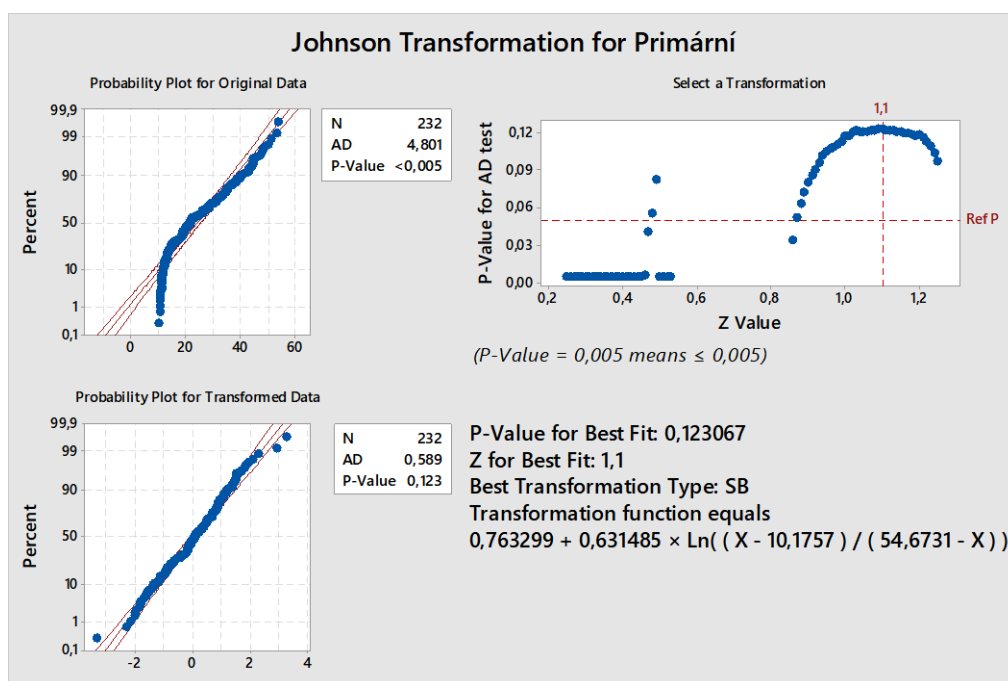
Data nebylo možné transformovat jako celek. Důvodem, proč byla transformace dat neúspěšná může být hned několik. V případě těchto dat se ale jako nejpravděpodobnější důvod jeví přílišný rozptyl a variabilita dat, které je zkreslují.

Vzhledem k tomu, že je u dat jako celku příliš velký rozptyl, bylo navrženo jiné řešení. Toto řešení spočívá v tom, že bude transformována vždy pouze jedna oblast z dat z parametrů drsnosti tyto oblasti obsahujících, a to Johnsonovou transformací. Navržené řešení je ověřováno v následující kapitole.

3.4.5 Parciální transformace dat Johnsonovou transformací

- **Primární oblast**

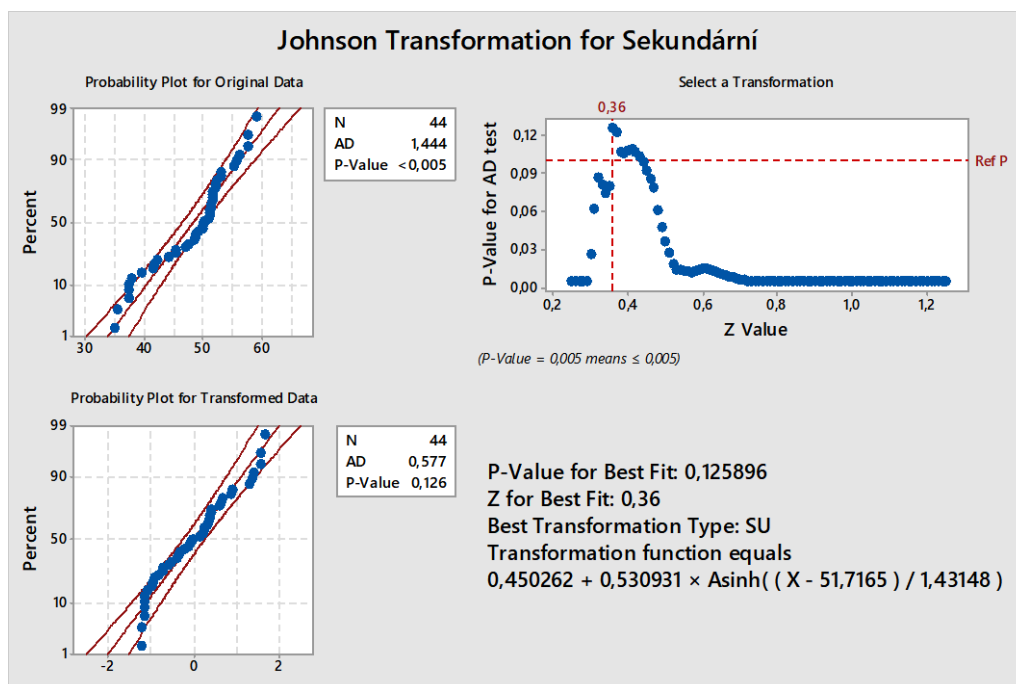
Níže v grafu je uveden výstup z transformace dat Johnsonovou transformací pro primární oblast.



Obr. 3.11 Výstup Johnsonovy transformace dat pro primární oblast parametru Rz vzorku 4

Na základě výstupu z programu Minitab lze konstatovat, že pomocí Johnsonovy transformace byla data primární oblasti úspěšně transformována do podoby dat s normálním rozdělením.

- **Sekundární oblast**



Obr. 3.12 Výstup Johnsonovy transformace dat pro sekundární oblast parametru Rz vzorku 4

Na základě výstupu z programu Minitab lze konstatovat, že pomocí Johnsonovy transformace byla data sekundární oblasti úspěšně transformována do podoby dat s normálním rozdělením.

- **Terciární oblast**

Co se týče terciární oblasti, zde mají data normální rozdělení, a tudíž není třeba je nijak transformovat.

Na základě výstupů z programu Minitab lze konstatovat, že navržené řešení transformovat jednotlivé oblasti odděleně přináší kýžené výsledky. Primární i sekundární oblasti byly úspěšně transformovány do souborů s normálním rozdělením a nyní je možné je dále analyzovat za pomoci statistických nástrojů, které předpokládají normalitu dat.

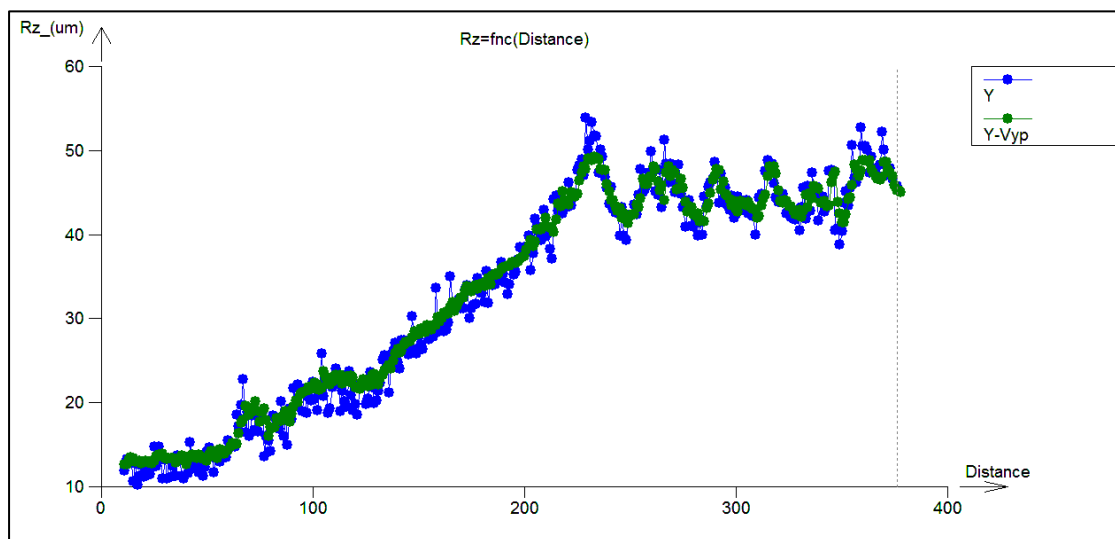
3.5 Neuronová síť

V případě dat získaných z heterogenního povrchu je nejvhodnější volbou neuronová síť perceptronového typu řešící regresní úlohu.

Dále je třeba nalézt vhodný počet skrytých vrstev a počet neuronů v nich obsažených. Tento krok se nazývá „*konfigurace neuronové sítě*“.

K ověření vhodnosti konfigurace sítě slouží výpočet střední chyby pro učící data. Čím je tato chyba menší, tím vytvořená síť lépe odpovídá průběhu zkoumaných dat. V případě navržené neuronové sítě byla tato chyba téměř nulová.

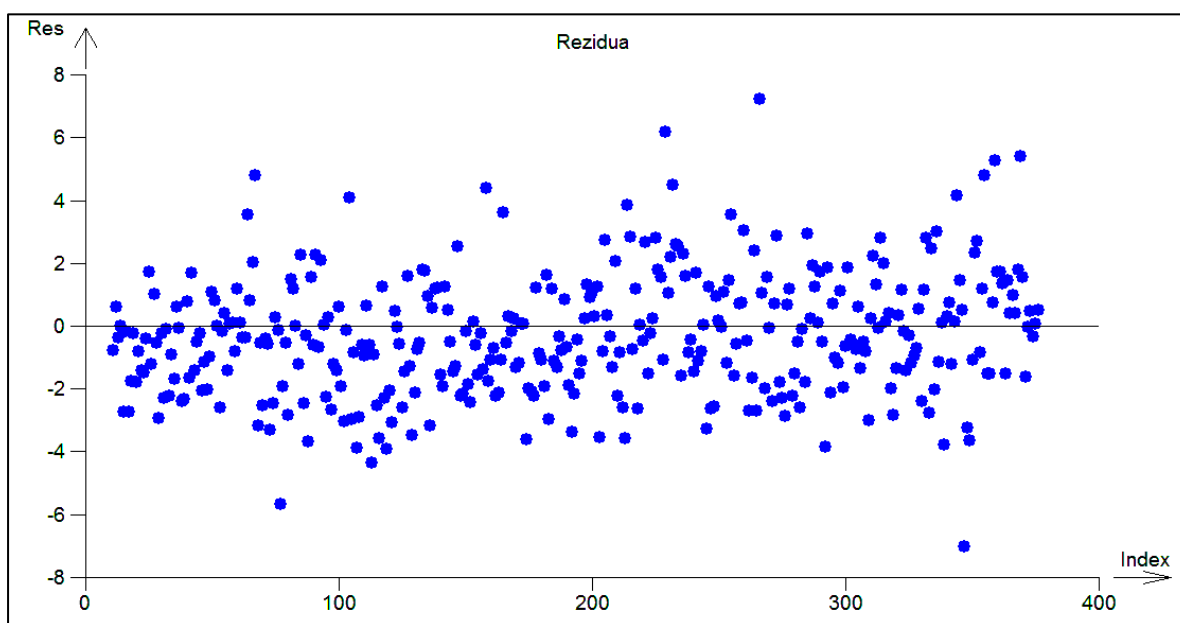
Po ověření konfigurace byla zobrazena regresní křivka ze zkoumaných dat. V tomto případě je vyobrazena regresní křivka dat získaných ze vzorku 4, parametru Rz.



Obr. 3.13 Regresní křivka neuronové sítě pro parametr Rz vzorku 4

Z obrázku výše je patrné, že nalezená regresní křivka odpovídá průběhu zkoumaných dat.

Pro další důkaz, že nalezená neuronová síť je v pořádku, proběhla kontrola reziduálních rozptylů. Níže na obrázku je graf s reziduálními rozptyly.



Obr. 3.14 Graf reziduálních rozptylů pro navrženou neuronovou síť

Je patrné, že reziduální rozptyly zobrazené na obrázku výše jsou vyvážené po celé délce v ose vyjadřující vzdálenost od vstupu řezného paprsku. To je dalším důkazem, že je neuronová síť navržena správně.

Níže v tabulce jsou uvedeny parametry navržené neuronové sítě.

Tabulka 3.1 Zvolené parametry navržené neuronové sítě

Parametry neuronové sítě	
Počet skrytých vrstev	3
Počet neuronů ve vrstvách	7, 5, 3
Strmost sigmoidy	0,95
Moment	0,9
Rychlost učení	0,1
Ukončit při chybě menší než	0,05
Procent dat pro učení	100

4. SHRnutí, VYHODNOCENí A POPIS METODIK PRO HODNOCENí HETEROGENNíCH POVRCHŮ

Vzhledem k různé složitosti a přesnosti nástrojů vyhodnocovaných v této práci bude přistoupeno k jejich rozdělení do dvou kategorií metodik. Těmito kategoriemi budou:

- **Metodika navržená pro vědu a výzkum.**
- **Metodika navržená pro praxi.**

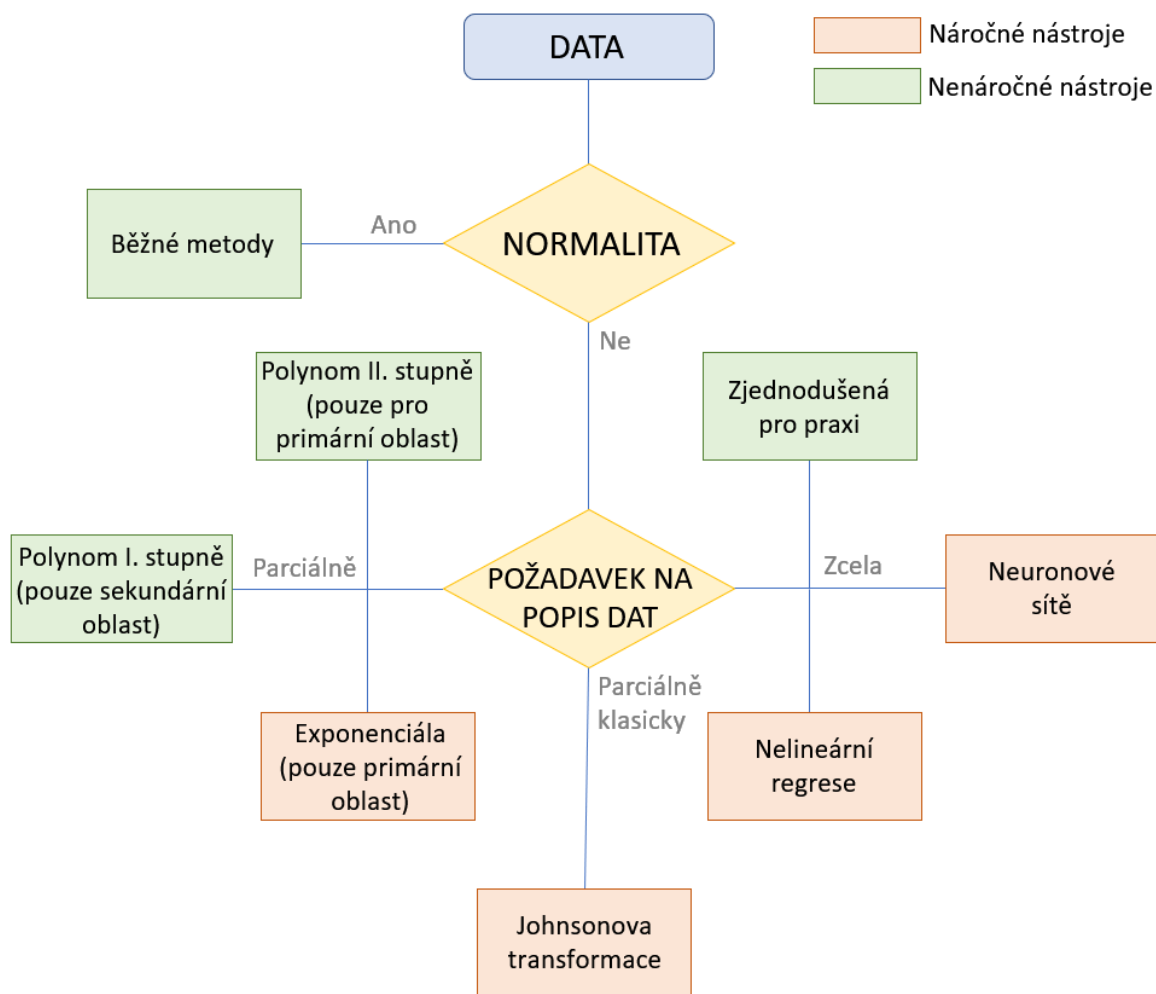
Ne vždy platí, že čím je určitý nástroj přesnější, tím je ve všech ohledech lepší. Rozumí se tím konkrétně například použitelnost různých složitých nástrojů pro praxi. Některé nástroje popisované v této práci jsou, vzhledem k přínosu, který při konkrétním použití přinášejí koncovému uživateli, předimenzované. Jinými slovy je tím myšlena přílišná složitost a tím vyšší riziko vzniku chyb ku přínosu informací o zkoumaném povrchu.

Pro praxi běžně stačí méně přesné nástroje, jelikož zde hlavní motivací není optimalizace procesů obráběcích operací, ale přijatelnost povrchu v praktickém slova smyslu čili například naplnění požadavku zákazníka nebo možnost interpretovat, nebo nastavit normu v konkrétním závodě s možností zpětné kontroly povrchu.

Tudíž ačkoliv je metodika navrhovaná pro praxi méně přesná, neznamená to její degradaci na poli použitelnosti statistických postupů pro hodnocení drsnosti povrchu. Záleží totiž na druhu aplikace konkrétních postupů a na požadovaných výstupech.

Jak již bylo zmíněno, záleží na druhu aplikace a požadovaných výstupech. Některé nástroje nám mohou dát povědomí o drsnosti povrchu, jako celku a jiné zase poskytnou podrobnější informace o jejím průběhu a pomohou získat lepší povědomí o jevech vyskytujících se na obráběném povrchu. Například o zpětném tuhnutí materiálu v hlubokých rýhách, nebo náhlých změnách drsnosti například vlivem rozpadu abrazivních částic. Takže není striktně řečeno, že pokud je nástroj uveden v kategorii „Metodika navržená pro praxi“ znamená to, že jej nelze použít pro vědu a výzkum. Nástroje je možné požívat volně a kategorie jsou pouze doporučeními pro ucelenost.

Z tohoto důvodu byl vytvořen rozhodovací diagram pro použití nástrojů.



Obr. 4.1 Rozhodovací diagram pro hodnocení drsnosti heterogenních povrchů

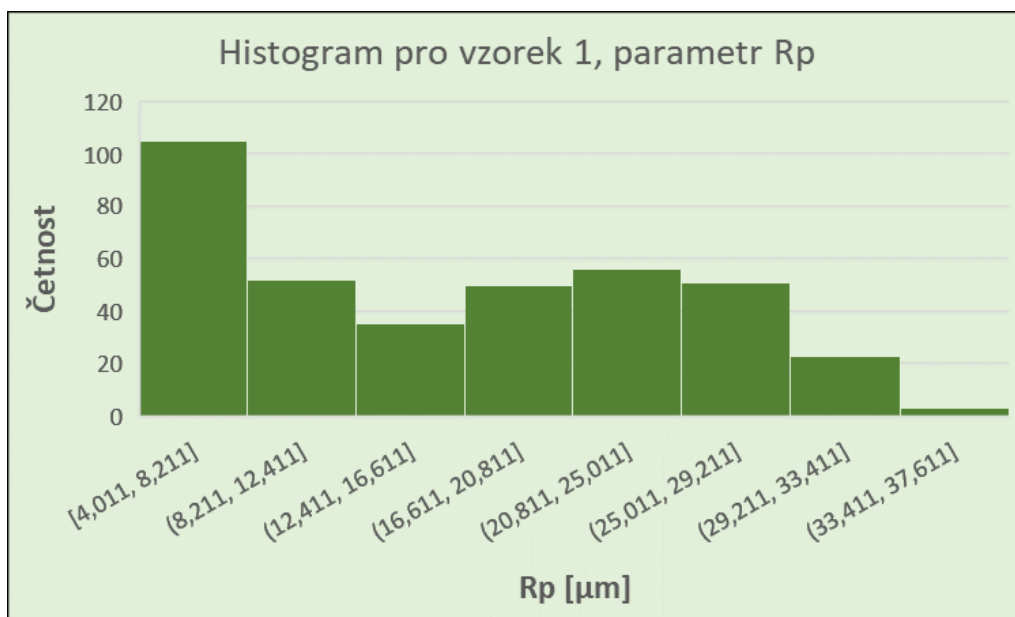
Prvním bod metodik bude ale vždy společný. Je nutné ověřit heterogenitu povrchu. Bez potvrzené heterogenity povrchu není možné přistupovat ke zkoumaným povrchům prezentovanou metodou, jelikož tato metoda předpokládá, že data nemají normální rozdělení.

4.1 Primární rozhodnutí o heterogenitě povrchu

Pro vědu a výzkum je doporučeno použít Anderson-Darlingův test s nastavenou hladinou významnosti $\alpha = 0,05$.

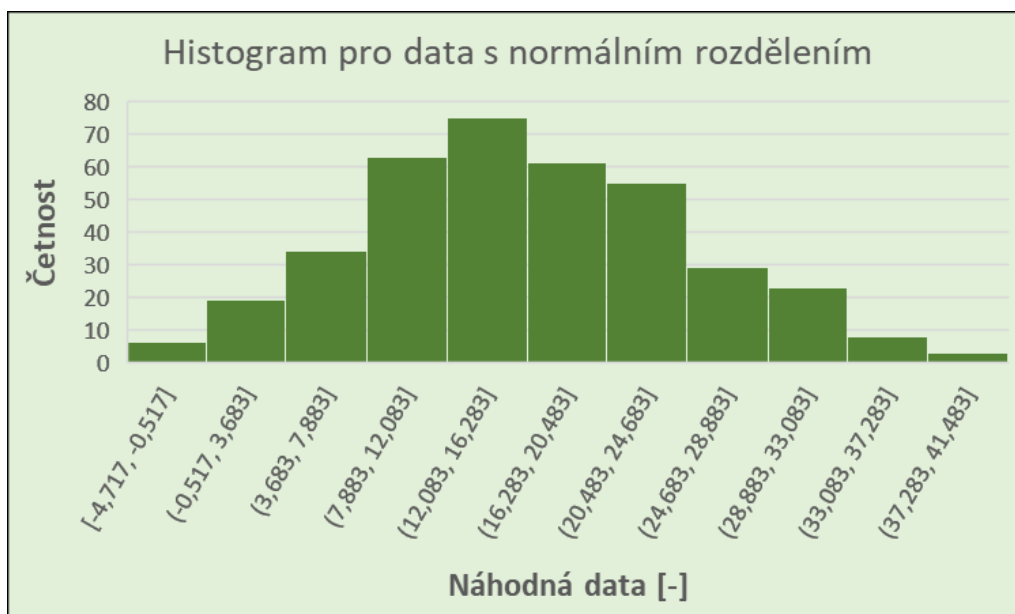
Tento test lze provést například vyvoláním grafického sumáře v programu Minitab. Grafický sumář lze nalézt v kapitole 3.3.1.

Pro zjednodušení pro praxi je možné vygenerovat histogram v běžně dostupném programu Excel. Níže na obrázku je ukázka histogramu z naměřených dat pro vzorek 1, parametr R_p .



Obr. 4.2 Histogram pro vzorek 1 parametr Rp vygenerovaný v programu Excel

Pro porovnání je níže, ze stejného programu, histogram pro ukázková data vygenerovaná v programu Minitab s požadovaným normálním rozdělením a aritmetickým průměrem a směrodatnou odchylkou shodnou s daty vzorku 1, parametru Rp.



Obr. 4.3 Histogram pro náhodná data vygenerovaný v programu Excel

Ze srovnání těchto dvou histogramů je patrné, že histogram vytvořený z náhodných dat opisuje Gaussovskou křivku. Graf z dat heterogenního povrchu nejeví známky gaussovského rozdělení. Takto je možné odhadnout nenormalitu dat za pomoci běžně dostupných nástrojů.

4.2 Metodika navržená pro vědu a výzkum

Po provedeném testu normality je poté třeba v rámci exploratorní datové analýzy provést test odlehlých hodnot a vyřadit případné hrubé chyby.

Následně je pak dle rozhodovacího diagramu v obrázku v kapitole 4 volen další postup.

Nyní již záleží na požadavku pro výstup. Existují tak tři možnosti pro popis dat a těmi jsou parciální, parciálně klasický a popis dat zcela. V následujících odřázkách jsou rozepsány jejich mechanismy, způsoby aplikace, výhody a vhodnost užití, popřípadě limitace jednotlivých metodik.

4.2.1 Parciální popis dat

Principem popisu dat parciálně je rozdělení dat do tří oblastí. Těmito oblastmi jsou *primární*, *sekundární* a *terciární* oblast.

Pro popis průběhu drsnosti dat v *primární* oblasti je nejvhodnější data proložit exponenciální funkcí.

V rámci zkoumání *sekundární* oblasti pak její proložení polynomem I. stupně.

Terciární oblast je rozdělena normálně, a proto je možné zde využít standardních statistických nástrojů pro hodnocení drsnosti povrchu.

Výhodou tohoto postupu je jeho relativní jednoduchost a rychlost. Data se rozdělí do tří oblastí a první dvě oblasti jsou proloženy funkcemi a třetí je hodnocena klasickým statistickým přístupem.

Další výhodou je, že je možné se zaměřit pouze na určité jevy probíhající ve zmíněných oblastech. Zároveň pokud je výkon paprsku dostatečný a tloušťka řezaného materiálu dostatečně malá, je pravděpodobné, že dojde k vytvoření pouze první anebo prvních dvou oblastí. Je proto nutné data před zahájením analýzy graficky zobrazit pro vhodnou volbu nástrojů.

Limitací této metody je samotné dělení dat do tří oblastí. Na základě dostupných informací zatím nelze stanovit přesnou a matematicky vyjádřitelnou proceduru pro jasné rozdělení dat. Nyní je tedy doporučeno data dělit dle následovně popsaných kritérií:

- **Primární oblast** – počátek až maximální hodnota.
- **Sekundární oblast** – maximální hodnota až konec poklesu.
- **Terciární oblast** – konec poklesu až konec dat.

Tento způsob hodnocení je vhodný pouze pro parametry R_a , R_p , R_v , R_z , a R_{dc} . Průběh parametru R_{Sm} nelze hodnotit parciálně, jelikož ve svém průběhu neobsahuje žádné oblasti.

4.2.2 Parciálně klasický popis dat

Na popis dat rozdělených na tři oblasti poté navazuje možnost jejich transformace. Princip transformace spočívá v přeměně rozdělení dat z jiného rozdělení než normálního, na rozdělení normální bez toho, aniž by byly ztraceny informace o jakosti povrchu.

Doporučenou transformací je v případě dat heterogenního povrchu Johnsonova transformace, která je dostupná v programu Minitab.

Po transformaci pak mohou být data analyzována klasickými statistickými nástroji. Například je možné srovnávat dva různé heterogenní povrchy pomocí F-testů a t-testů.

Limitací tohoto nástroje je možnost, že data budou mít příliš velký rozptyl a nebude je možné transformovat.

4.2.3 Popis dat zcela

Pro celkový popis je možné využít metody nelineární regrese anebo neuronovou síť.

Pro popis pomocí nelineární regrese se jeví být nejvhodnějším nástrojem kubický spline, který přijatelně popisuje průběh drsnosti parametru RSm. Pro ostatní zkoumané parametry je posuzován jako ne příliš vhodný, jelikož z výsledných grafů je patrné, že jsou ztraceny informace v okolí globálního maxima.

Nejvhodnější nástrojem pro celkový popis je pak neuronová síť, která dokáže odhalit a popsat i složité nelineární vztahy v datech, které jsou běžnými statistickými metodami neodhalitelné.

Limitací v případě neuronové sítě je pak náročnost na její tvorbu, kde hrozí riziko vzniku chyb v případě, že se na její tvorbě podílí statistik s nedostatečnou odbornou zkušeností v této oblasti. Proto je popis dat heterogenního povrchu pomocí neuronové sítě doporučována osobám, jež mají zkušenosti s tvorbou neuronových sítí.

4.3 Metodika navržená pro praxi

Vzhledem ke složitosti heterogenních povrchů není mnoho nástrojů, pro jejich analýzu, které by byly dostatečně jednoduché pro užití v praxi.

Je možné použít polynomu I. stupně, ale pouze pro primární oblast.

Dále je možné použít polynomu II. stupně, ale ten je vhodný pouze pro popis sekundární oblasti povrchu.

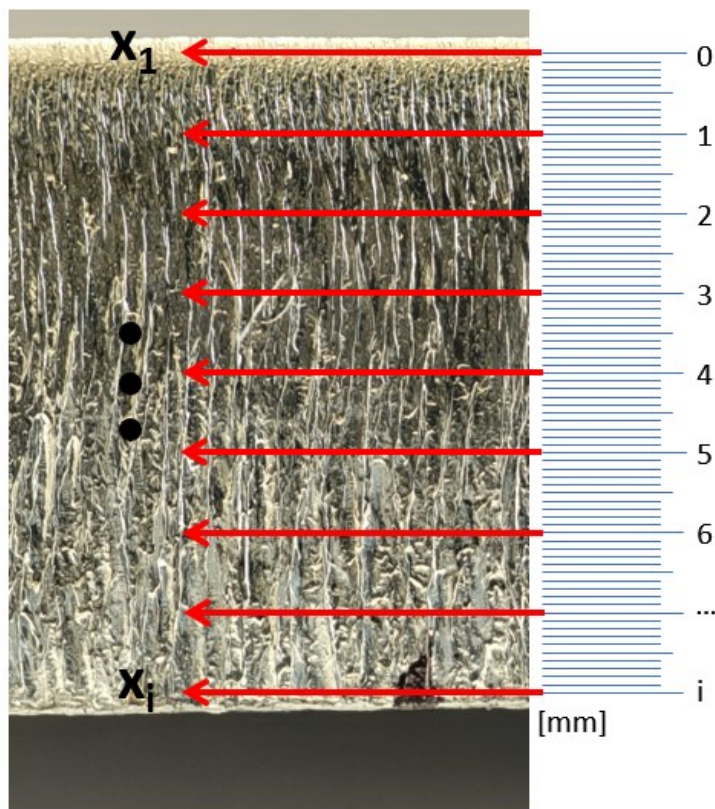
Z důvodu nedostatku jednoduchých a přesných nástrojů pro analýzu heterogenního povrchu bylo přistoupeno ke tvorbě zjednodušené metodiky pro celkový popis. Tato metodika je popsána v následující kapitole. Ačkoliv je tato metoda limitována omezenou přesností je, vzhledem k požadavkům v praxi, více než dostačující.

4.3.1 Zjednodušená metodika navržená pro praxi

V případě, že je k dispozici pouze klasický kontaktní drsnoměr, je navrženo jednoduché řešení, jak heterogenní povrch popsat, či hodnotit.

Snímání hodnot drsnosti proběhne v souřadnicích, které jsou rovnoměrně rozmístěny po povrchu se vzdáleností 1 mm mezi sebou, dle obrázku níže.

V případě, že je tloušťka řezaného materiálu malá, je možné vzdálenost mezi jednotlivými řezy snížit. Je totiž nutné získat alespoň 5 a více hodnot. Čím více hodnot bude získáno, tím bude hodnocení přesnější.

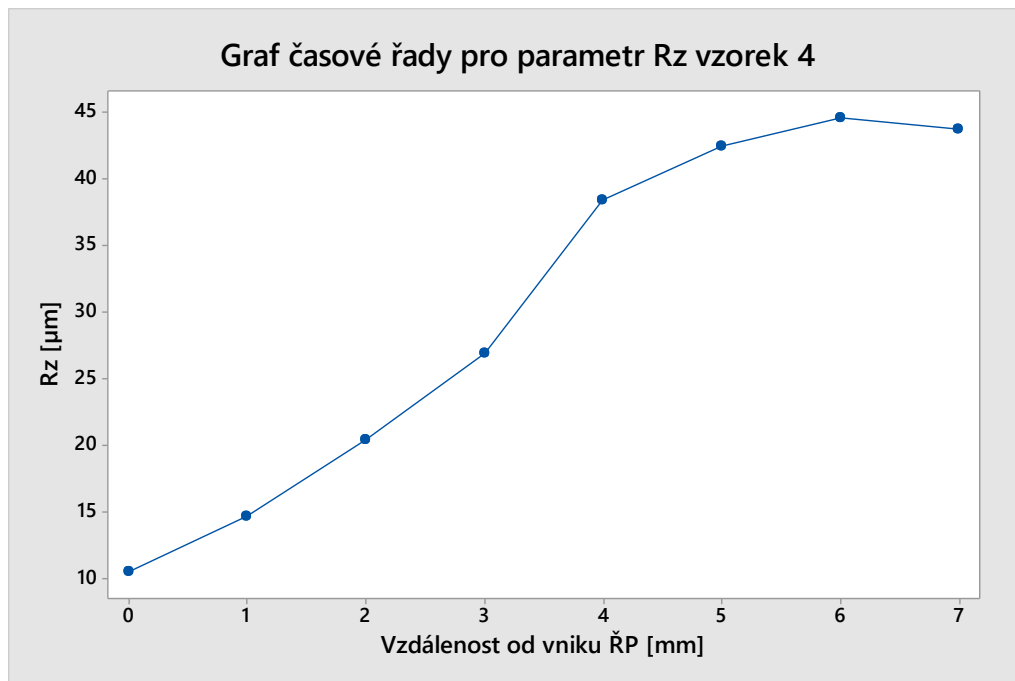


Obr. 4.4 Schéma měření heterogenního povrchu kontaktním drsnoměrem

Povrch musí být nasnímán kompletně po celé tloušťce řezu, je tedy nutné, aby byla nasnímána data z celé dráhy řezného paprsku.

Data posléze není nutné a ani žádoucí testovat na normalitu. Vzhledem k nízkému počtu hodnot je velmi pravděpodobné, že budou data vyhodnocena jako normálně rozdělená. Je to způsobeno nízkou silou testu při nízkém počtu dat.

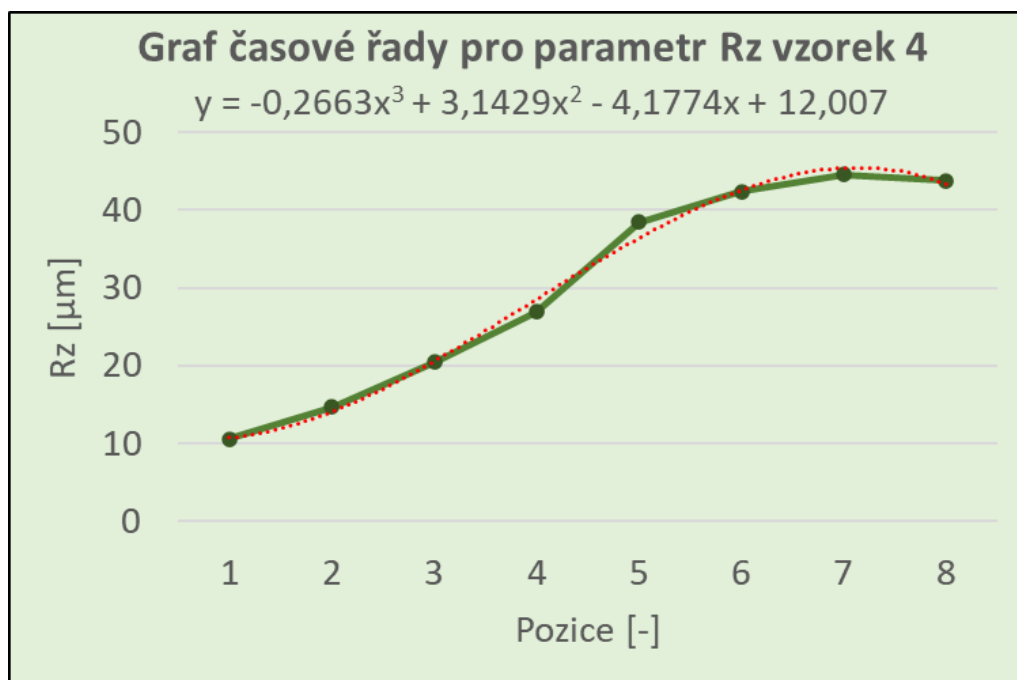
Dále je pak v dostupném programu vygenerován graf časové řady, obrázek níže.



Obr. 4.5 Graf časové řady pro parametr Rz vzorek 4

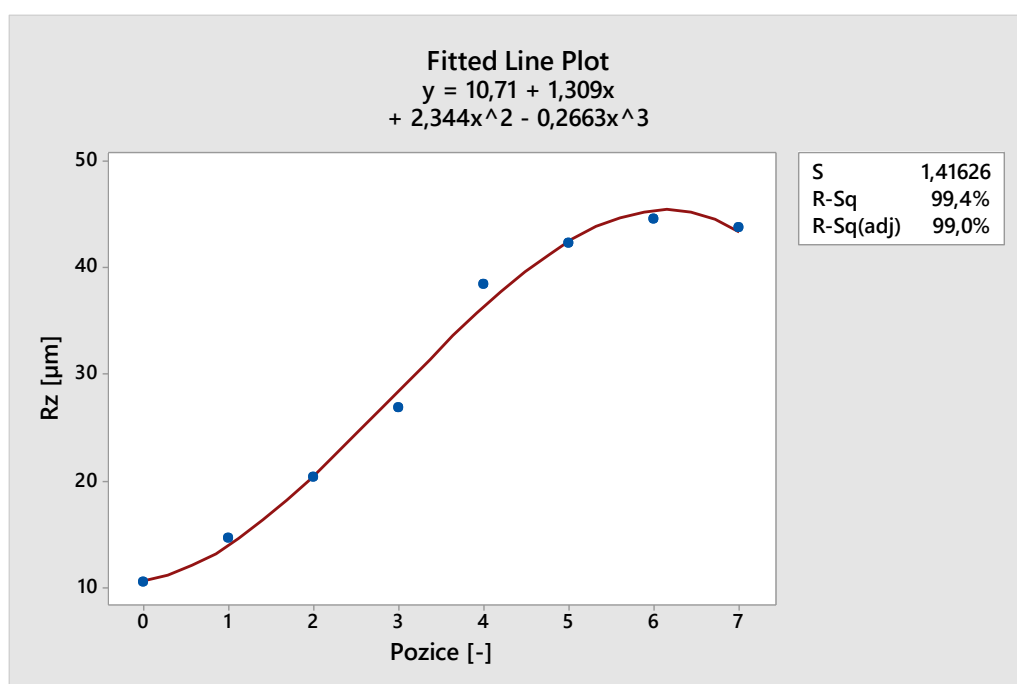
K tomuto účelu je možné použít, kromě softwaru Minitab i program Excel, či obyčejný milimetrový papír.

Následně data proložíme polynomem III. stupně, lze tak učinit i v běžně dostupném programu Excel.



Obr. 4.6 Graf časové řady pro parametr Rz vzorek 4 v programu Excel

Níže je v programu Minitab ověření regresního rabatu polynomu třetího stupně.



Obr. 4.7 Vzorek 4, parametr Rz, proložení polynomem III. Stupně

Hodnota regresního rabatu se blíží hodnotě 100 %, což by byla její maximální hodnota. Data odpovídají křivce, kterou jsou proloženy a s rovnicí křivky lze dále pracovat.

5. ZÁVĚR

Tato disertační práce se zaměřuje na hodnocení drsnosti heterogenních povrchů, zejména těch vzniklých při obrábění nekonvenčními technologiemi, jako je laser, vodní paprsek či plasma. Cílem práce bylo vyvinout metodiku, která umožní přesně a spolehlivě hodnotit tyto povrchy.

V průběhu práce bylo zjištěno, že dosavadní metody hodnocení drsnosti, založené na tradičních normách, nejsou dostatečně přesné pro potřeby moderních nekonvenčních technologií. Tyto technologie vytvářejí povrchy s heterogenním charakterem, kde dochází ke změnám hodnot parametrů drsnosti v závislosti na hloubce řezu. Tradiční metody, které jsou založeny na předpokladu normality, se v těchto případech ukazují jako nedostatečné, což může vést ke zkresleným a nepřesným výsledkům.

Z těchto důvodů jsou v práci shrnuty různé přístupy vhodné k hodnocení drsnosti heterogenních povrchů. Byly rozděleny do dvou hlavních kategorií: **metodika pro vědu a výzkum** a **metodika pro praxi**. Toto rozdělení bylo nutné, jelikož různé nástroje mají různou míru složitosti a přesnosti, což ovlivňuje jejich použitelnost v konkrétních situacích.

Bylo zjištěno, že vyšší přesnost nástrojů není vždy zárukou jejich vhodnosti pro praktické využití. Některé nástroje mohou být pro praktické účely příliš složité a nemusí přinést významný přínos ve srovnání s jednoduššími metodami, ba mohou zvýšit riziko vzniku chyb. Pro praxi často stačí méně přesné nástroje, které jsou snadno použitelné a dokáží splnit požadavky, jako je například naplnění zákaznických standardů nebo provedení zpětné kontroly.

Na základě těchto zjištění byl vytvořen rozhodovací diagram, který usnadňuje volbu vhodné metodiky podle povahy zkoumaného povrchu, který je uveden v *kapitole 4*. Prvním krokem je vždy ověření, zda je povrch heterogenní, což je klíčový předpoklad pro další analýzu. Poté se podle druhu aplikace a požadovaných výstupů volí vhodná metodika, ať už pro vědu a výzkum, nebo pro praktické použití.

Závěrem lze konstatovat, že vyvinutá metodika představuje významný přínos pro oblast hodnocení drsnosti heterogenních povrchů. Umožňuje nejen přesnější a spolehlivější analýzu těchto povrchů, ale také podporuje další rozvoj nekonvenčních technologií obrábění tím, že poskytuje nástroje pro lepší kontrolu a optimalizaci procesů. Nově navržené postupy tak mohou významně přispět k pokroku v oblasti výroby a zpracování materiálů, kde se tyto technologie stále častěji uplatňují.

6. PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI

Tato disertační práce je přínosem nejen pro vědu, ale i pro praxi v oblasti hodnocení drsnosti heterogenních povrchů vzniklých obráběním nekonvenčními technologiemi. Přínos této práce spočívá ve vytvoření nové metodiky, která zohledňuje specifické vlastnosti povrchů vzniklých při nekonvenčních technologiích obrábění, jako je laser, vodní paprsek či plasma. Dosavadní metody hodnocení drsnosti povrchů, které byly vyvinuty pro konvenční obráběcí technologie a jsou založeny na předpokladu normality, se pro hodnocení těchto stále se častěji vyskytujících povrchů ukázaly jako nedostatečné. Práce proto reaguje na aktuální trendy v oblasti obrábění a přináší nové přístupy, které umožní přesnější a spolehlivější analýzu těchto povrchů a tím i následný možný rozvoj zmíněných technologií.

Významným přínosem je také navržení způsobu, jakým lze rozlišovat mezi homogenními a heterogenními povrchy, což je velmi důležité pro správnou volbu metod hodnocení pro zkoumaný povrch. Tento přístup umožní lépe pochopit charakteristiku povrchu a provést následnou analýzu s využitím statistických nástrojů bez rizika zkreslení dat či nesprávné interpretace výsledků. Díky tomu může práce přispět k rozvoji nových poznatků v oblasti hodnocení drsnosti povrchů a takto rozvinuté poznatky následně aplikovat ve v rozvoji technologií obrábění či v různých průmyslových odvětvích při hodnocení drsnosti.

V oblasti praktického využití tato práce poskytuje užitečné nástroje pro kontrolu či optimalizaci procesů. Navržená metodika, která je praxi přizpůsobena, umožňuje snadnější a rychlejší rozhodování o kvalitě obráběných povrchů. Metodika je navržena tak, aby bylo dosaženo rovnováhy mezi přesností a efektivitou procesů. V práci je zdůrazněno, že pro mnoho praktických aplikací není vždy nezbytné používat nejsložitější nástroje, ale často postačí jednoduché, avšak dostatečně účinné metody, které mohou naplnit požadované standardy a zároveň zachovat snížené riziko vzniku chyb při užití jednodušších nástrojů.

Díky navrženému přístupu k hodnocení heterogenních povrchů může tato práce přinést zlepšení nejen v oblasti výzkumu a vývoje nekonvenčních technologií, ale také v praktickém uplatnění, kde se nové technologie stále častěji uplatňují. Výsledky práce mohou vést k lepší kvalitě výrobků, snadné a přístupné kontrole drsnosti povrchů a obecně k efektivnějšímu využití zdrojů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] RAJARAM, N.; SHEIKH-AHMAD, J.; CHERAGHI, S. H. CO2 laser cut quality of 4130 steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43.4: 351-358.
- [2] AKKURT, Adnan, et al. Effect of feed rate on surface roughness in abrasive waterjet cutting applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 147.3: 389-396.
- [3] ÇAYDAŞ, Ulaş; HASÇALIK, Ahmet. A study on surface roughness in abrasive waterjet machining process using artificial neural networks and regression analysis method. *Journal of materials processing technology*, 2008, 202.1-3: 574-582.
- [4] CHOUDHURY, Imtiaz Ahmed; SHIRLEY, S. Laser cutting of polymeric materials: an experimental investigation. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42.3: 503-508.
- [5] MUTAVGJIC, Veselko, et al. Experimental investigation of surface roughness obtained by abrasive water jet machining. In: 15th International Research/Expert Conference, "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology", Prague, Czech Republic. 2011.
- [6] PATEL, Parthkumar, Bhavdeep NAKUM, Kumar ABHISHEK a V. RAKESH KUMAR. Machining performance optimization during plasma arc cutting of AISI D2 steel: application of FIS, nonlinear regression and JAYA optimization algorithm. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online]. 2018, 40(4) [cit. 2023-08-06]. ISSN 1678-5878. Dostupné z: doi:10.1007/s40430-018-1087-7
- [7] ANGHEL, Cristina, Kapil GUPTA a T.C. JEN. Analysis and optimization of surface quality of stainless steel miniature gears manufactured by CO2 laser cutting. *Optik* [online]. 2020, 203 [cit. 2023-08-14]. ISSN 00304026. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijleo.2019.164049
- [8] KECHAGIAS, John D., et al. Laser cutting of 3D printed acrylonitrile butadiene styrene plates for dimensional and surface roughness optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 1-15.

- [9] KECHAGIAS, John D., Aristeidis TSIOLIKAS, Markos PETOUSIS, Konstantinos NINIKAS, Nectarios VIDAKIS a Lazaros TZOUNIS. A robust methodology for optimizing the topology and the learning parameters of an ANN for accurate predictions of laser-cut edges surface roughness. *Simulation Modelling Practice and Theory* [online]. 2021, 114 [cit. 2023-08-14]. ISSN 1569190X. Dostupné z: doi:10.1016/j.simpat.2021.102414
- [10] BIRUK-URBAN, Katarzyna, et al. Analysis of Vibration, Deflection Angle and Surface Roughness in Water-Jet Cutting of AZ91D Magnesium Alloy and Simulation of Selected Surface Roughness Parameters Using ANN. *Materials*, 2023, 16.9: 3384.
- [11] CHOUDHURY, Mridusmita Roy, et al. Optimization of process parameters in plasma arc cutting of commercial-grade aluminium plate. *High Temperature Materials and Processes*, 2024, 43.1: 20220329.
- [12] PATA, Vladimír. Moderní způsoby hodnocení drsnosti strojírenských povrchů na bázi matematické statistiky: Modern ways of assessing the roughness of engineering surfaces based on mathematical statistics: teze přednášek ke jmenování profesorem. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2019. ISBN 978-80-7454-829-1.
- [13] ANTON, Howard; BIVENS, Irl C.; DAVIS, Stephen. *Calculus*. John Wiley & Sons, 2021.
- [14] GROSSMAN, Stanley I. *Calculus*. Academic Press, 2014.
- [15] BHATTACHARYYA, Bijoy a Biswanath DOLOI. Classification of advanced machining technology. In: *Modern Machining Technology* [online]. Elsevier, 2020, s. 9-19 [cit. 2023-08-03]. ISBN 9780128128947. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-812894-7.00002-5
- [16] NAGIMOVA, Aigul a Asma PERVEEN. A review on Laser Machining of hard to cut materials. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2019, 18, 2440-2447 [cit. 2023-08-04]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2019.07.092
- [17] JEYAPRAKASH, Natarajan, Che-Hua YANG a Manickam BHUVANESH KUMAR. Laser Machining. In: YANG, Dongfang, ed. *Practical Applications of Laser Ablation* [online]. IntechOpen, 2021, 2021-7-14 [cit.

2023-08-04]. ISBN 978-1-83968-303-9. Dostupné z:
doi:10.5772/intechopen.93779

- [18] MALÍČKOVÁ, Iveta, et al. Laser effect in the optical luminescence of oxides containing Cr. *Acta Geologica Slovaca*, 2018, 10.1.
- [19] UMROH, B, A GINTING a M N A RAHMAN. CO₂ laser machining on alumina ceramic: a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2020, 2020-12-01, 1003(1) [cit. 2023-08-04]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/1003/1/012131
- [20] DAVIM, J. Paulo. *Nontraditional machining processes: research advances*. London: Springer, [2013]. ISBN 978-1-4471-5179-1.
- [21] RAHAMAN, Md. Ekhlalur a Kazuyuki UNO. Crown Glass Drilling by Short-Pulse CO₂ Laser with Tunable Pulse Tail. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing* [online]. 2022, 9(1), 72-80 [cit. 2023-08-04]. ISSN 2196-7229. Dostupné z: doi:10.1007/s40516-022-00165-7
- [22] GAUTAM, Girish Dutt a Arun Kumar PANDEY. Pulsed Nd: YAG laser beam drilling. *Optics & Laser Technology* [online]. 2018, 100, 183-215 [cit. 2023-08-04]. ISSN 00303992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2017.09.054
- [23] SAMPATH, S. S. REVIEW OF TOPICAL ENLARGEMENT IN LASER BEAM MACHINING Sahith Reddy Madara*, Dr. M. Chithirai Pon Selvan** &. [online]. 2017, 2, 6-14 [cit. 2023-08-06]. ISSN 24554200. Dostupné z: doi:10.5281/zenodo.837875
- [24] MUTHURAMALINGAM, T., Ravi AKASH, Shravan KRISHNAN, Nguyen Huu PHAN, Vu Ngoc PI a Ammar H. ELSHEIKH. Surface quality measures analysis and optimization on machining titanium alloy using CO₂ based laser beam drilling process. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2021, 62, 1-6 [cit. 2023-08-06]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2020.12.008
- [25] NATARAJAN, Yuvaraj, Pradeep Kumar MURUGESAN, Mugilvalavan MOHAN a Shakeel Ahmed LIYAKATH ALI KHAN. Abrasive Water Jet Machining process: A state of art of review. *Journal of Manufacturing*

- Processes [online]. 2020, 49, 271-322 [cit. 2023-08-06]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2019.11.030
- [26] UMREDKAR, Swapnil; BHOYAR, Vallabh. Advance Manufacturing Processes Review Part II: Water Jet Machining (WJM). 2019. [cit. 2023-08-06]. e-ISSN: 2395-0056.
- [27] PUTZ, M., M. DIX, F. MORCZINEK a M. DITTRICH. Suspension Technology for Abrasive Waterjet (AWJ) Cutting of Ceramics. Procedia CIRP [online]. 2018, 77, 367-370 [cit. 2023-08-06]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2018.09.037
- [28] SARAVANAN, S., V. VIJAYAN, S.T. Jaya SUTHAHAR, A.V. BALAN, S. SANKAR a M. RAVICHANDRAN. A review on recent progresses in machining methods based on abrasive water jet machining. Materials Today: Proceedings [online]. 2020, 21, 116-122 [cit. 2023-08-06]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2019.05.373
- [29] GOSTIMIROVIĆ, Marin, Dragan RODIĆ, Milenko SEKULIĆ a Andjelko ALEKSIĆ. An Experimental Analysis of Cutting Quality in Plasma Arc Machining. Advanced Technologies & Materials [online]. 2020, 2020-10-15, 45(1), 1-8 [cit. 2023-08-06]. ISSN 2620147X. Dostupné z: doi:10.24867/ATM-2020-1-001
- [30] MANGARAJ, Soumya Ranjan, Dilip Kumar BAGAL, Nirmalya PARHI, Surya Narayan PANDA, Abhishek BARUA a Siddharth JEET. Experimental study of a portable plasma arc cutting system using hybrid RSM-nature inspired optimization technique. Materials Today: Proceedings [online]. 2022, 50, 867-878 [cit. 2023-08-06]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.06.138
- [31] MANKOVÁ, Ildikó. Progresívne technologic. Košice: Technická univerzita Košice, Strojnícka fakulta-edícia vedeckej a odbornej literatúry, Slovak Rep, 2000, 275.
- [32] GENNA, Silvio, et al. Experimental investigation of industrial laser cutting: The effect of the material selection and the process parameters on the kerf quality. Applied Sciences, 2020, 10.14: 4956.

- [33] SUN, Shoujin; BRANDT, Milan. Laser beam machining. In: Nontraditional Machining Processes: Research Advances. London: Springer London, 2013. p. 35-96.
- [34] NARESH BABU, M.; MUTHUKRISHNAN, N. Investigation on surface roughness in abrasive water-jet machining by the response surface method. *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, 29.11-12: 1422-1428.
- [35] SKOCZYLAS, Agnieszka; ZALESKI, Kazimierz. Effect of centrifugal shot peening on the surface properties of laser-cut C45 steel parts. *Materials*, 2019, 12.21: 3635.
- [36] AULBACH, Laura, et al. Non-contact surface roughness measurement by implementation of a spatial light modulator. *Sensors*, 2017, 17.3: 596.
- [37] BHUSHAN, Bharat. Surface roughness analysis and measurement techniques. In: *Modern tribology handbook, two volume set*. CRC press, 2000. p. 79-150.
- [38] JEYAPOOVAN, Thangasamy; MURUGAN, M. Surface roughness classification using image processing. *Measurement*, 2013, 46.7: 2065-2072.
- [39] Měření drsnosti povrchu. ELUC [online]. [cit. 2023-8-16] Dostupné také z: <https://eluc.krolomoucky.cz/verejne/lekce/1103>
- [40] PATEL, Dhiren R.; KIRAN, M. B. A non-contact approach for surface roughness prediction in CNC turning using a linear regression model. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 26: 350-355.
- [41] WHITEHOUSE, D. J. *Handbook of surface and nanometrology*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2011. ISBN 9781420082012.
- [42] ZENG, Quanren, et al. Correlating and evaluating the functionality-related properties with surface texture parameters and specific characteristics of machined components. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 149: 62-72.
- [43] ČSN, EN ISO. 21920-2. Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Profil – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. Český normalizační institut, červenec, 2023.

- [44] URZICĂ, Ionuț, et al. Considerations Regarding Some Surface State Parameters Characterized by a more Restricted Use. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 809: 93-98.
- [45] MARTINEZ, Wendy L., Angel R. MARTINEZ, and Jeffrey SOLKA. *Exploratory Data Analysis with MATLAB*. Taylor & Francis Group, 2017. ISBN 9781498776066.
- [46] COX, Victoria. *Translating Statistics to Make Decisions* [online]. Berkeley, CA: Apress, 2017 [cit. 2023-08-20]. ISBN 978-1-4842-2255-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4842-2256-0
- [47] RANI DAS, Keya. A Brief Review of Tests for Normality. *American Journal of Theoretical and Applied Statistics* [online]. 2016, 5(1) [cit. 2023-10-22]. ISSN 2326-8999. Dostupné z: doi:10.11648/j.ajtas.20160501.12
- [48] HERNANDEZ, Hugo. Testing for normality: what is the best method. *ForsChem Research Reports*, 2021, 6: 2021-05.
- [49] SINGH, Karanjit; UPADHYAYA, Shuchita. Outlier detection: applications and techniques. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 2012, 9.1: 307.
- [50] BOUKERCHE, Azzedine; ZHENG, Lining; ALFANDI, Omar. Outlier detection: Methods, models, and classification. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2020, 53.3: 1-37.
- [51] WALFISH, Steven. A review of statistical outlier methods. *Pharmaceutical technology*, 2006, 30.11: 82.
- [52] LOMAX, Richard G.; HAHS-VAUGHN, Debbie L. *An introduction to statistical concepts*. Routledge, 2013.
- [53] BOŘIL, Tomáš. Testy Středních Hodnot. 16_testy_strednich_hodnot.utf8 [online]. [cit. 2023-6-23]. Dostupné z : https://fu.ff.cuni.cz/STAT/16_testy_strednich_hodnot.html
- [54] BANERJEE, Amitav, et al. Hypothesis testing, type I and type II errors. *Industrial psychiatry journal*, 2009, 18.2: 127.

- [55] ČSN, EN ISO. 25178-2. Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. Český normalizační institut, červenec, 2023.
- [56] LEE, Dong Kyu. Data transformation: a focus on the interpretation. Korean journal of anesthesiology, 2020, 73.6: 503-508.
- [57] ST-PIERRE, Anne P.; SHIKON, Violaine; SCHNEIDER, David C. Count data in biology—Data transformation or model reformation?. Ecology and evolution, 2018, 8.6: 3077-3085.
- [58] Log or not log (transform data) that's the question - PharmaLex. PharmaLex [online]. [cit. 2024-4-27] Dostupné také z: <https://www.pharmalex.com/thought-leadership/blogs/log-or-not-log-transform-data-thats-the-question/>
- [59] VANDERWEELE, Tyler J. On a square-root transformation of the odds ratio for a common outcome. Epidemiology, 2017, 28.6: e58-e60.
- [60] SELVAN, Tamil. Types Of Transformations For Better Normal Distribution. Towards Data Science, 2020, [online]. [cit. 2024-05-23] Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/types-of-transformations-for-better-normal-distribution-61c22668d3b9>
- [61] RAHUL, S. Transforming Data for Statistical Analysis: The Power of Box-Cox Transformation. Towards Data Science, 2023, [online]. [cit. 2024-05-23] Dostupné z: <https://ogre51.medium.com/transforming-data-for-statistical-analysis-the-power-of-box-cox-transformation-a4a059ad2397>
- [62] MELESHKO, S. V., et al. Methods for constructing reciprocal transformations. Journal of Vibration Testing and System Dynamics, 2023, 7.01: 49-58.
- [63] HE, Yaoyao; ZHENG, Yaya. Short-term power load probability density forecasting based on Yeo-Johnson transformation quantile regression and Gaussian kernel function. Energy, 2018, 154: 143-156.
- [64] AGGARWAL, Charu C., et al. Neural networks and deep learning. Cham: springer, 2018.

- [65] DHALIWAL, Ranjodh Singh, LEPAGE-RICHTER, Tho, SUCHMAN, Lucy. Neural Networks. University of Minnesota Press, 2024. ISBN: 9781452970493
- [66] SCHMIDHUBER, Jürgen. Deep learning in neural networks: An overview. Neural networks, 2015, 61: 85-117.
- [67] DA SILVA, Ivan Nunes, et al. Artificial neural network architectures and training processes. Springer International Publishing, 2017.
- [68] WU, Yu-chen; FENG, Jun-wen. Development and application of artificial neural network. Wireless Personal Communications, 2018, 102: 1645-1656.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D	trojrozměrný
AWJ	obrábění vodním paprskem
CDA	kritická diskurzivní analýza
CLA	snímač s chromatickou aberací
CO ₂	oxid uhličitý
EDA	exploratorní datová analýza
H ₀	nulová hypotéza
H _a	alternativní hypotéza
LBM	Obrábění laserem
PAM	obrábění plasmou
ŘP	řezný paprsek
GPU	grafická procesorová jednotka

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Časová osa vyjadřující nekonzistentnost metodiky	9
Obr. 3.1 Vzorek připravený k měření.....	11
Obr. 3.2 Graf závislosti Ra na vzdálenosti od vniku řezného paprsku a oblasti. 12	
Obr. 3.3 Grafický sumář pro vzorek 8, parametr Rz z programu Minitab.....	14
Obr. 3.4 Pravidlo 16 % aplikováno na data ze vzorku 8, parametru Rz	15
Obr. 3.5 Vzorek 4, Rz, proložení primární oblasti polynomem II. stupně.....	16
Obr. 3.6 Vzorek 4, Rz, proložení sekundární oblasti polynomem I. stupně	17
Obr. 3.8 Vzorek 4, Rz, proložení primární oblasti exponenciální funkcí	18
Obr. 3.10 Srovnání tvaru křivky exponenciálního a polynomického modelu	19
Obr. 3.11 Proložení vzorku 4 parametru Rz kubickým splinem (úprava)	20
Obr. 3.12 Proložení vzorku 4 parametru RSm kubickým splinem	20
Obr. 3.13 Výstup Johnsonovy transformace dat pro primární oblast parametru Rz vzorku 4.....	21
Obr. 3.14 Výstup Johnsonovy transformace dat pro sekundární oblast parametru Rz vzorku 4.....	22
Obr. 3.16 Regresní křivka neuronové sítě pro parametr Rz vzorku 4.....	23
Obr. 3.17 Graf reziduálních rozptylů pro navrženou neuronovou síť	23
Obr. 4.1 Rozhodovací diagram pro hodnocení drsnosti heterogenních povrchů	26
Obr. 4.3 Histogram pro vzorek 1 parametr Rp vygenerovaný v programu Excel	27
Obr. 4.4 Histogram pro náhodná data vygenerovaný v programu Excel.....	27
Obr. 4.5 Schéma měření heterogenního povrchu kontaktním drsnoměrem.....	30
Obr. 4.6 Graf časové řady pro parametr Rz vzorek 4.....	31
Obr. 4.8 Graf časové řady pro parametr Rz vzorek 4 v programu Excel.....	32
Obr. 4.9 Vzorek 4, parametr Rz, proložení polynomem III. Stupně	32

SEZNAM TABULEK

Tabulka 9.5 Zvolené parametry navržené neuronové sítě	24
---	----

PUBLIKAČNÍ AKTIVITY

Kvalifikační práce

1. **VRBOVÁ, Hana.** Porovnání mikro-mechanických a mechanických vlastností polyamidu 6, polyamidu 66, polykarbonátu a akrylonitril-butadienstyrenu. 2019. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10563/45397>. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Hýlová, L.
2. **VRBOVÁ, Hana.** Hodnocení jakosti povrchu biopolymerních dílů nenormativním způsobem. 2021. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10563/47226>. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Kubišová, M.

Publikace Web of Science

1. KUBIŠOVÁ, Milena, NOVÁK, Martin, KOUTŇÁK, Rostislav, **VRBOVÁ, Hana**, ŽALUDEK, Martin a KNEDLOVÁ, Jana. Metrological comparison between heterogeneous surfaces and their imprints. *Manufacturing Technology*, 2022.
2. **VRBOVÁ, Hana**, KUBIŠOVÁ, Milena, MĚŘÍNSKÁ, Dagmar, NOVÁK, Martin, PATA, Vladimír, KNEDLOVÁ, Jana, SEDLAČÍK, Michal a ŠUBA, Oldřich. The Implementation of Neural Networks for Polymer Mold Surface Evaluation. *Micromachines*, 2024, 15.1: 102.
3. **VRBOVÁ, Hana**, KUBIŠOVÁ, Milena, PATA, Vladimír, KNEDLOVÁ, Jana, JAVOŘÍK, Jakub a BOČÁKOVÁ, Barbora. Approach to Heterogeneous Surface Roughness Evaluation for Surface Coating Preparation. *Coatings*, 2024, 14.4: 471.
4. MARCANÍK, Miroslav, KUBIŠOVÁ, Milena, PATA, Vladimír, KNEDLOVÁ, Jana, ŠUBA, Oldřich, **VRBOVÁ, Hana**. Optimizing the Position of a Robotic Arm Using Statistical Methods. *Manufacturing Technology*, 2024, 24.4: 618-625.

Publikace Scopus

1. MARCANÍK, Miroslav, KUBIŠOVÁ, Milena, PATA, Vladimír, NOVÁK, Martin, **VRBOVÁ, Hana** a KNEDLOVÁ, Jana. Metrological evaluation of heterogeneous surfaces obtained by water jet cutting technology using artificial

intelligence elements. In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022. p. 012003.

2. KUBIŠOVÁ, Milena, KNEDLOVÁ, Jana, **VRBOVÁ, Hana**, PATA, Vladimír a BOČÁKOVÁ, Barbora. Statistical evaluation of hard-to-measure surfaces. DMSRE 2023. Praha: Institute of Physics of the Czech Academy of Sciences, 2023, 43. ISBN 978-80-907237-4-0.

Konferenční příspěvky

1. **VRBOVÁ, Hana**, KUBIŠOVÁ, Milena, PATA, Vladimír a MARCANÍK, Miroslav. Evaluation of replicas of biological samples surface quality. Proceedings M2D2022 – 9th International Conference on Mechanics and Materials in Design Funchal/Portugal 26-30 June 2022, Editors J.F. Silva Gomes and S.A. Meguid, pp.379-388

2. KNEDLOVÁ, Jana, KUBIŠOVÁ, Milena, JAVOŘÍK, Jakub, **VRBOVÁ, Hana**, DUŠEK, Vojtěch. The effect of moisture on laser beam wood machining. 33rd Joint Seminar, Development of Materials Science in Research and Education. (článek přijat k recenzi)*

3. BÍLEK, Ondřej, ZLÁMAL, Jan, KNEDLOVÁ, Jana, **VRBOVÁ, Hana**. The impact of surface roughness of replaceable cutting inserts treated with MRF technology on the turning process. 33rd Joint Seminar, Development of Materials Science in Research and Education. (článek přijat k recenzi)*

4. **VRBOVÁ, Hana**, BÍLEK, Ondřej, PATA, Vladimír, MARCANÍK, Miroslav, KNEDLOVÁ, Jana and HOŘAVA, Cyril. Evaluating surface quality of heterogeneous surfaces produced by non-conventional machining technologies: methodological advances and challenges. 33rd Joint Seminar, Development of Materials Science in Research and Education. (článek přijat k recenzi)*

** bude publikováno v Journal of Physics: Conference Series (ISSN: 1742-6596 online, 1742-6588 print), indexován v databázi SCOPUS, Conference Proceedings Citation Index - Science (CPCI-S), (Clarivate, Web of Science), Chemical Abstracts, INSPEC a jiné.*

ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA

Jméno:	Hana Vrbová
Datum narození:	26. 4. 1997
Místo narození:	Zlín
Národnost:	Česká
Adresa:	tř. Svobody 738, Zlín 4, 763 02
Afilace:	Ústav výrobního inženýrství, Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Vavrečkova 5669, 760 01 Zlín
E-mail:	h_vrbova@utb.cz
VZDĚLÁNÍ:	
2021 - současnost	Doktorské studium v oboru: Procesní inženýrství, Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, (téma disertační práce: Matematické metody hodnocení drsnosti tvarově obrobené plochy v blízkosti inflexních bodů)
2019–2021	Magisterské studium v oboru: Kvalita a řízení jakosti, Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, (téma diplomové práce: Hodnocení jakosti povrchu biopolymerních dílů nenormativním způsobem)
2016–2019	Bakalářské studium v oboru: Technologická zařízení, Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně (téma bakalářské práce: Porovnání mikro- mechanických

	a mechanických vlastností polyamidu 6, polyamidu 66, polykarbonátu a akrylonitril-butadienstyrenu)
ŘEŠENÉ PROJEKTY:	
09/2021 – 12/2021	Člen řešitelského kolektivu UTB ve Zlíně, FT – Ústav výrobního inženýrství Projekt: IGA/FT/2021/006
01/2022 – 12/2022	Člen řešitelského kolektivu UTB ve Zlíně, FT – Ústav výrobního inženýrství Projekt: IGA/FT/2022/007
01/2023 – 12/2023	Člen řešitelského kolektivu UTB ve Zlíně, FT – Ústav výrobního inženýrství Projekt: IGA/FT/2023/004
01/2024 – současnost	Člen řešitelského kolektivu UTB ve Zlíně, FT – Ústav výrobního inženýrství Projekt: IGA/FT/2024/002
PEDAGOGICKÁ ČINNOST:	
Zimní semestr 2021/2022	Výuka 3. ročníku bakalářského studia – Jakost a metrologie
Zimní semestr 2022/2023	Výuka 1. ročníku magisterského studia – Technická měření a zpracování dat
2021 – současnost	Individuální doučování předmětu Procesní inženýrství III.

Ing. Hana Vrbová, Ph.D.

**Matematické metody hodnocení drsnosti tvarově obrobené plochy
v blízkosti inflexních bodů**

Mathematical Methods of Roughness Evaluation of Machined Surface Close to
the Inflection Points

Teze disertační práce

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: Ing. Hana Vrbová, Ph.D.

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání 2024

Pořadí vydání: první

ISBN 978-80-7678-316-4

