



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

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**

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 **Disertační práce.**

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

Práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

Poděkování:

Ráda bych tímto vyjádřila své upřímné poděkování všem, kteří mě podporovali a provázeli během mého doktorského studia, a bez jejichž pomoci by tato disertační práce nikdy nespátřila světlo světa.

Na prvním místě bych chtěla poděkovat svým školitelům, prof. Dr. Vladimíru Patovi, prof. Ing. Ivanu Hudcovi, PhD. a doc. Ing. Roderikovi Plavcovi, PhD. za jejich cenné odborné vedení, trpělivost a podporu. Vaše rady a neustálá ochota sdílet své bohaté vědomosti mě nejen obohatily odborně, ale také inspirovaly na mé akademické cestě. Mé díky patří i mé konzultantce, Ing. Mileně Kubišové, Ph.D., která mě provázela svou trpělivostí, pečlivostí a laskavým přístupem. Dále bych chtěla vyjádřit svou hlubokou vděčnost prof. Ing. Berenice Hausnerové, Ph.D., za její neutuchající podporu a pomoc během celého mého studia. Bez jejího vedení, povzbuzení a cenných rad by dokončení mého studia nebylo možné. Velké poděkování směřuji také pracovním studijního oddělení jak z Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, tak ze Slovenské technické univerzity v Bratislavě. Vaše ochota pomoci a vstřícnost při řešení administrativních nástrah byly neocenitelné a vždy jste mi pomohly nalézt cestu v někdy komplikovaném systému akademických požadavků. Speciální díky patří Ing. Barboře Ludrovkové, PhD., za její pomoc při praktické části této práce.

Zvláštní poděkování patří mé rodině, která byla mou oporou po celou dobu studia. Děkuji za vaši nepřetržitou motivaci, důvěru ve mne a bezmeznou podporu, kterou jste mi projevovali nejen v těžkých chvílích, ale i během každodenního života. Dále bych chtěla poděkovat všem svým přátelům, kteří tu pro mě byli a poskytovali mi emocionální podporu, ať už při sdílení radostí nebo během náročných období, kdy jsem potřebovala povzbudit.

Mé největší díky patří mému nejlepšímu příteli, Martině. Děkuji Ti za tvou trpělivost, porozumění a neustálou podporu během celého studia. Byla jsi pro mě neocenitelným pilířem, který mě podržel ve chvílích, kdy jsem pochybovala o sobě i o tom, zda studium zvládnou dokončit.

A konečně, ten nejhlubší a nejupřímnější dík směřuje k mé mamince. Bez Tvé neustálé lásky, podpory a víry ve mne bych tuto cestu nikdy nedokončila. Děkuji Ti za všechno, co jsi pro mě udělala – tato práce je nejen mým úspěchem, ale i Tvým.

Tato disertační práce byla spolufinancována z projektů Interní Grantové Agentury Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně IGA/FT/2023/004 a IGA/FT/2024/002.

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 efektivitu 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 | 6 |
| 1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY | 10 |
| 2. MATEMATICKÝ PŘEHLED | 14 |
| 2.1 Funkce | 14 |
| 2.2 Spojitost | 14 |
| 2.3 Maxima a minima | 15 |
| 2.4 Konvexita a konkavita | 15 |
| 2.5 Inflexní body | 17 |
| 3. NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ | 18 |
| 3.1 Obrábění laserem | 18 |
| 3.1.1 CO ₂ LASER | 20 |
| 3.1.2 Nd: YAG laser | 20 |
| 3.2 Obrábění vodním paprskem | 22 |
| 3.3 Obrábění plasmou | 24 |
| 4. PROBLEMATIKA HETEROGENNÍCH POVRCHŮ | 26 |
| 4.1 Heterogenní povrch po obrábění nekonvenčními technologiemi | 26 |
| 5. METODY MĚŘENÍ DRSNOSTI | 28 |
| 5.1 Kontaktní metoda | 28 |
| 5.2 Bezkontaktní metoda | 28 |
| 6. STATISTICKÉ NÁSTROJE PRO HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHŮ | 30 |
| 6.1 Textura povrchu | 30 |
| 6.2 Parametry drsnosti | 30 |
| 6.3 Pravidlo 16 % | 31 |
| 6.4 Exploratorní datová analýza | 32 |
| 6.5 Normální (Gaussovské) rozdělení dat a jeho testování | 32 |
| 6.6 Transformace dat | 33 |
| 6.6.1 Logaritmická transformace | 34 |
| 6.6.2 Square Root transformace | 34 |

| | | |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.6.3 | Box-Coxova transformace..... | 35 |
| 6.6.4 | Reciproční transformace..... | 36 |
| 6.6.5 | Yeo-Johnsonova transformace | 36 |
| 6.7 | Testování outlierů | 37 |
| 6.8 | Testování hypotéz..... | 37 |
| 6.8.1 | Chyby při testování hypotéz..... | 38 |
| 7. | NEURONOVÉ SÍTĚ..... | 40 |
| 7.1 | Druhy neuronových sítí..... | 41 |
| 7.1.1 | Způsob učení..... | 41 |
| 7.1.2 | Architektura sítě..... | 41 |
| 7.1.3 | Typu aplikace..... | 42 |
| 8. | CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE..... | 44 |
| 9. | ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE | 45 |
| 9.1 | Způsob měření heterogenního povrchu a získání dat pro další práci | 45 |
| 9.2 | Dílní závěry a možná vědecká poznání..... | 47 |
| 9.3 | Exploratorní datová analýza získaných dat | 47 |
| 9.3.1 | Testy normality | 48 |
| 9.3.2 | Testy odlehklých hodnot | 49 |
| 9.3.3 | Deskriptivní statistika | 53 |
| 9.4 | Aplikace 3D parametrů na heterogenní povrch | 55 |
| 9.5 | Analýza závislosti drsnosti povrchu na hloubce řezu..... | 57 |
| 9.6 | Způsoby popisu závislosti drsnosti povrchu na hloubce řezu | 60 |
| 9.6.1 | Popis průběhu pomocí parciální lineární a nelineární regrese | 61 |
| 9.6.2 | Popis průběhu pomocí parciální nelineární regrese pro primární oblast | 65 |
| 9.6.3 | Souhrnný popis průběhu pomocí nelineární regrese | 68 |
| 9.6.4 | Transformace dat | 72 |
| 9.6.5 | Logaritmická transformace..... | 73 |
| 9.6.6 | Box-Coxova transformace | 75 |
| 9.6.7 | Johnsonova transformace | 78 |

| | | |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.6.8 | Parciální transformace dat..... | 80 |
| 9.7 | Neuronová síť..... | 87 |
| 10. | SHRNUTÍ, VYHODNOCENÍ A POPIS METODIK PRO HODNOCENÍ HETEROGENNÍCH POVRCHŮ..... | 90 |
| 10.1 | Primární rozhodnutí o heterogenitě povrchu..... | 91 |
| 10.2 | Metodika navržená pro vědu a výzkum | 93 |
| 10.2.1 | Parciální popis dat..... | 94 |
| 10.2.2 | Parciálně klasický popis dat..... | 94 |
| 10.2.3 | Popis dat zcela..... | 95 |
| 10.3 | Metodika navržená pro praxi..... | 95 |
| 10.3.1 | Zjednodušená metodika navržená pro praxi | 96 |
| 11. | ZÁVĚR..... | 100 |
| 12. | PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI..... | 101 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 102 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 110 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 111 |
| | SEZNAM VZORCŮ..... | 114 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 115 |
| | PUBLIKAČNÍ AKTIVITY | 116 |
| | ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA | 118 |

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 polymetylmetakrylátu. 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. MATEMATICKÝ PŘEHLED

Drsnost zkoumanou v této práci lze považovat za určitý druh spojité funkce, který je možné matematicky popsat. Stejně tak lze nahlížet i na vlnitost. [12]

Vzhledem ke zmíněnému charakteru drsnosti jsou v následující kapitole popsány důležité matematické komponenty aplikovatelné na její zkoumání.

2.1 Funkce

Mějme množiny A a B , které jsou tvořeny reálnými čísly a dále platné $x \in A \quad \forall y \in B$. Pak každé zobrazení množiny A na množinu B lze nazvat funkcí proměnné x na množině A a lze zapsat,

$$y = f(x) \tag{1}$$

Závislá proměnná je tedy označována x (lze jej označit i jako argument) a nezávislá proměnná jako y . Množina A je nazývána definičním oborem a množina B funkčním oborem.

Lze tedy říct, že se jedná o předpis přiřazující každému x z množiny A právě jedno číslo y z množiny B . [13]

2.2 Spojitost

Spojitou funkcí lze nazývat funkci takovou, jejíž hodnoty se mění plynule. Čili jinými slovy, průběh funkce není přerušen v žádném jejím bodě.

Jedná se o jednu z nejpožadovanějších vlastností funkce, jelikož je často podmínkou mnoha matematických konstrukcí, jako jsou například derivace, či primitivní funkce.

Spojitosť reálných funkcí se obvykle definuje s použitím limit a to následovně:

- V bodě

Funkce f je spojitá v bodě C , jestliže platí $\lim_{x \rightarrow c} f(x) = f(c)$

- V intervalu

Funkce f je spojitá v intervalu (a, b) , jestliže pro každé $z \in (a, b)$ platí $\lim_{x \rightarrow z} f(x) = f(z)$ [13]

2.3 Maxima a minima

Jsou nazývány také jako extrémů funkce a jedná se o body, které ve svém okolí nabývají funkčního minima nebo maxima (nejnižší nebo nejvyšší hodnoty).

Při vyšetřování průběhu funkce v ní lze nalézt globální a lokální extrém. Lokálním extrémem se rozumí maximum či minimum jehož absolutní hodnota není nejvyšší hodnotou v průběhu funkce. Globální extrémem se rozumí maximum nebo minimum, jehož absolutní hodnota naopak je nejvyšší hodnotou.

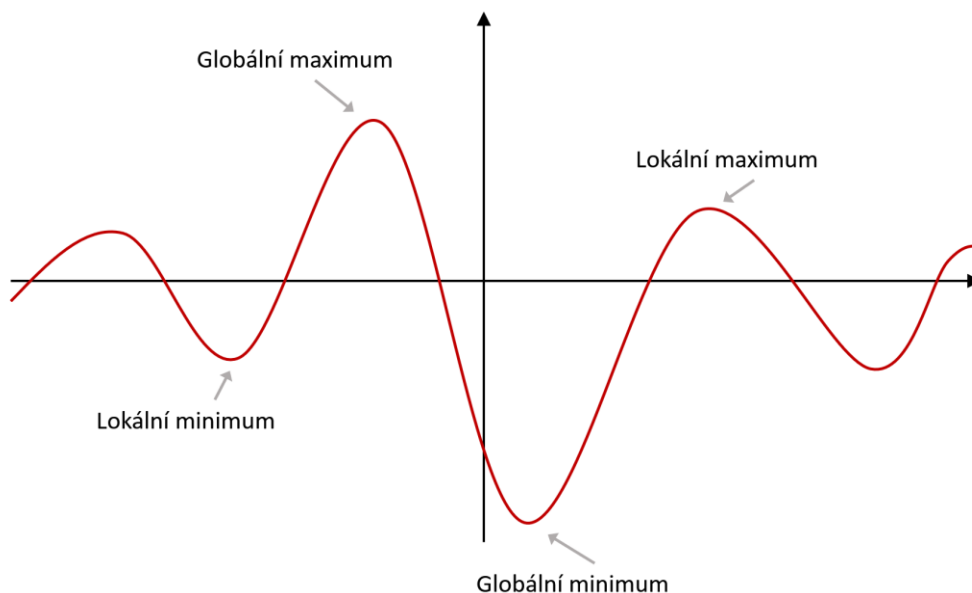
Maximum a minimum reálných funkcí lze definovat následovně:

- Maximum

Funkce f má v bodě C globální maximum, jestliže platí $f(x) \leq f(C)$

- Minimum

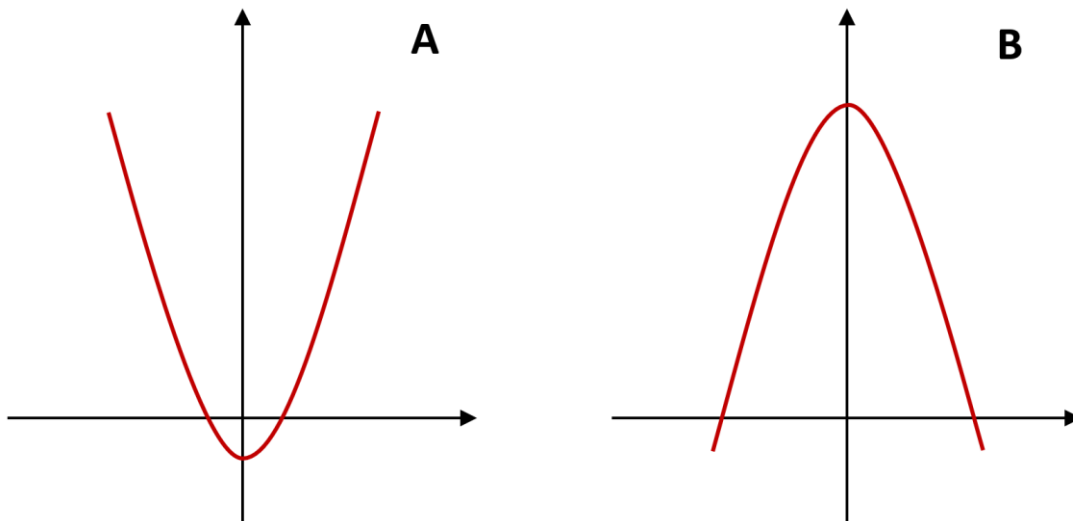
Funkce f má v bodě C globální minimum, jestliže platí $f(x) \geq f(C)$ [13]



Obr. 2.1 Funkční extrémy

2.4 Konvexita a konkavita

Tyto dva termíny definují smysl vyklenutí funkce. Konvexní funkce je vyklenuta směrem dolů a konkávní směrem nahoru. Na následujícím obrázku jsou znázorněny oba typy funkcí.



Obr. 2.2 A – konvexní funkce, B – konkávní funkce

Definice konvexní a konkávní funkce je následující:

- Konvexní funkce

Funkce f je konvexní, jestliže pro všechna x_1 a x_2 a pro všechny parametry $t \in (0; 1)$ platí následující,

$$f(tx_1 + (1-t)x_2) \leq tf(x_1) + (1-t)f(x_2) \quad (2)$$

- Konkávní funkce

Funkce f je konkávní, jestliže pro všechna x_1 a x_2 a pro všechny parametry $t \in (0; 1)$ platí následující,

$$f(tx_1 + (1-t)x_2) \geq tf(x_1) + (1-t)f(x_2) \quad (3)$$

V praxi se k určení konvexity nebo konkavity reálných rovnic používá druhá derivace funkce v bodě, ve kterém je první derivace rovna nule (v kritickém bodě) následovně,

$$f'(c) = 0 \wedge f''(c) > 0 \Rightarrow \text{konvexita} \quad (4)$$

$$f'(c) = 0 \wedge f''(c) < 0 \Rightarrow \text{konkavita}$$

[13] [14]

2.5 Inflexní body

Inflexním bodem se rozumí bod na křivce, kde se konkavita mění v konvexitu, nebo naopak.

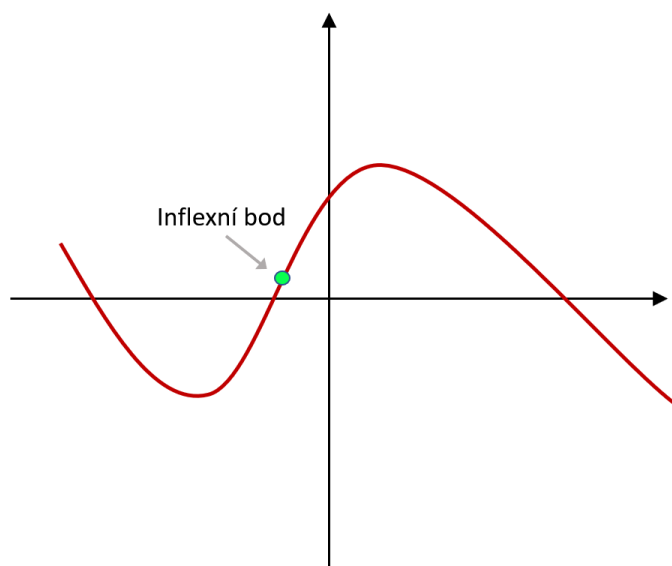
Speciálním případem inflexního bodu je stacionární inflexní bod, v němž je tečna křivky rovnoběžná s osou x a platí zde,

$$f'(c) = 0$$

(6)

V praxi se inflexní bod hledá následovně:

1. Výpočet druhé derivace funkce.
2. Nalezení tzv. *kandidátů* – bodů, kdy je druhá derivace funkce rovna nule.
3. Stanovení konvexity / konkavity funkce pod, mezi a nad hodnotou nalezených kandidátů.
4. Rozhodnutí o kandidátech. [13] [14]



Obr. 2.3 Inflexní bod na křivce

3. NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

S rozvojem vědy a techniky vznikaly nové materiály s takovými vlastnostmi, že k jejich obrábění konvenční metody nestačily, nebo byly příliš drahé. Z tohoto důvodu byl započat vývoj nových technologií, které budou schopny tyto materiály efektivně obrábět a budou dále také schopny složitějších obráběcích operací pro maximální využití potenciálu nově vzniklých materiálů.

Díky rozsáhlému výzkumu a vývoji vznikly technologie jako je obrábění laserovým paprskem, vodním paprskem a plasmou. Tyto technologie budou v této práci zmíněny. Dále vznikla také technologie elektrojiskrového obrábění, obrábění ultrazvukem a mnoho dalších.

Obrábění laserovým paprskem umožňuje velmi přesné a čisté řezy v různých materiálech, od kovů až po nekovové materiály. Výhody této technologie zahrnují vysokou rychlost a přesnost, minimální tepelné ovlivnění materiálu a možnost vytváření složitých tvarů. Obrábění vodním paprskem využívá vysokotlaký proud vody, často doplněný abrazivem, k řezání tvrdých materiálů, jako jsou kovy, sklo nebo kámen. Tato metoda je zvláště ceněná pro svou schopnost řezat materiály bez vzniku tepelně ovlivněné zóny. Plazmové obrábění zase využívá ionizovaného plynu k řezání elektricky vodivých materiálů s vysokou rychlostí a účinností.

Aby mohly být tyto nově vzniklé metody rozvíjeny a zlepšovány, je nutné pochopit nejen jejich princip, ale zkoumat i další atributy jimi tvořené, které jsou ukazatelem míry využití potenciálu při konkrétních obráběcích operacích. Tímto atributem je myšlena například drsnost vzniklého povrchu. [15]

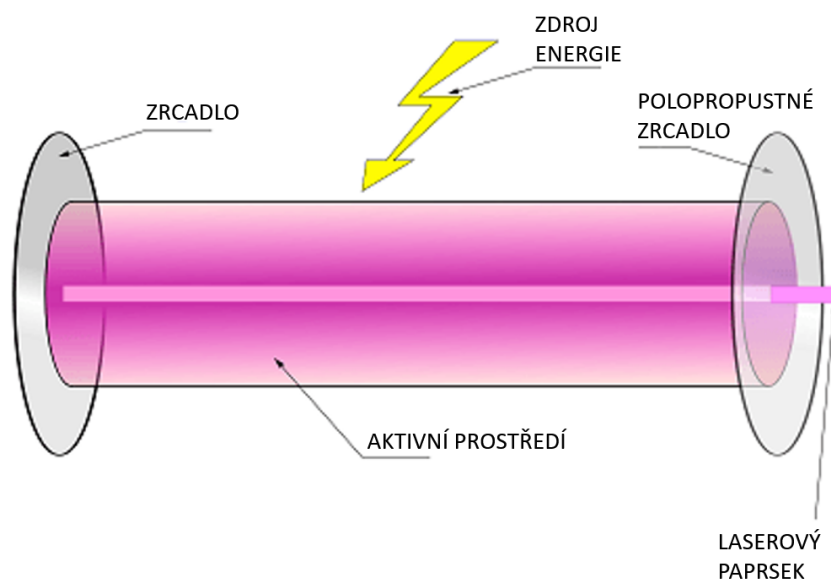
3.1 Obrábění laserem

Laser má široké spektrum využití, od svařování, přes sintrování až po vrtání či řezání nebo dokonce gravírování. Lze jej využívat pro mnoho různých materiálů, a i pro materiály, které jsou ovlivnitelné vysokou teplotou, či je vysoká teplota může poškodit, a to pro svou schopnost tepelně ovlivnit pouze úzkou zónu.

Obrábění laserovým paprskem s anglickou zkratkou LBM („*Laser Beam Machining*“) je možné díky vybuzečné emisi záření. Vybuzečná emise záření vzniká tím, že atom, který za běžných podmínek zůstává vždy ve stavu s nejnižší energií, přimějeme k tomu, aby přešel do stavu s vyšší energií. Toho docílíme tím, že atomu dodáme energii, která je jím absorbována. Atom za těchto podmínek posune elektron do vyšší energetické hladiny. Následný přechod elektronu do nižší hladiny žádoucího energetického stavu, vlivem vnějšího podnětu, způsobí emisi fotonů – světelného záření. [15] [16]

Laserové světlo je monochromatické, koherentní, velmi intenzivní a s minimální rozbíhavostí.

Lasery jsou dostupné v mnoha verzích a spolu s tím vzniklo i mnoho způsobů, jakými se rozdělují. Mohou se dělit podle skupenství materiálů použitých ke tvorbě světelného záření (pevnotázkové, kapalinové, plynové či polovodičové) nebo podle frekvence vysílaného záření (infračervené, světelné, ultrafialové a dále RTG nebo gama záření). Nejvíce obecná dělení jsou však podle aktivního prostředí, vlnové délky, výkonu, konstrukce zařízení, režimu paprsku, nebo druhu použití. [17]



Obr. 3.1 Základní konstrukce laserového zařízení [18]

Základní konstrukce laserového zařízení (Obr. 3.1) je vlastní všem laserům. Její komponenty jsou: aktivní látka, zdroj excitační energie, optický rezonátor a zrcadla.

Energie dodávaná atomům může být ve formě tepla, záření (výbojka), chemické energie, proud elektronů a další. Energií nabuzené atomy se snaží dostat zpět na svou původní energetickou hladinu, začne docházet k přechodům elektronů na nižší energetickou hladinu a tím způsobenou emisi záření. Takto emitované záření má různou frekvenci, směr i fázi, jinými slovy, nemá vlastnosti laserového paprsku. Optický rezonátor zajistí, aby se část tohoto emitovaného záření vracela zpět do aktivního prostředí. Konkrétně ta část záření, která má stejnou frekvenci, jako rezonátor. Jakmile je zachycena a poslána zpět do aktivního prostředí, je odražena plně propustným zrcadlem a dále prostoupí polopropustným zrcadlem, jako monochromatický koherentní paprsek. [18]

3.1.1 CO₂ LASER

Jedná se o druh laseru, který je v průmyslu velmi hojně využíván.

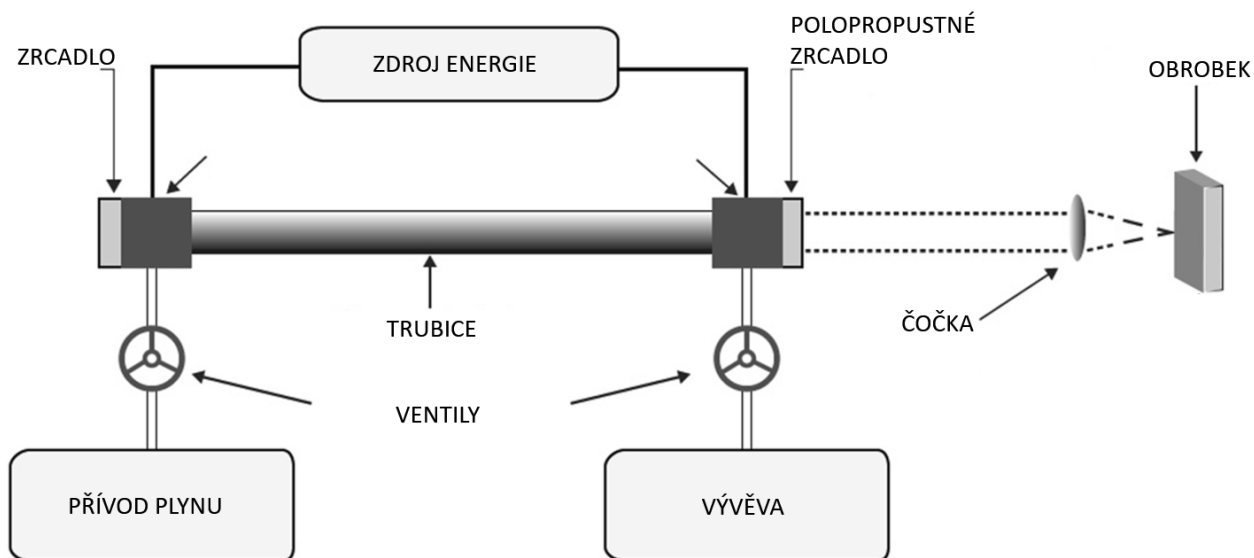
Plynným aktivním prostředím zde není pouze oxid uhličitý, jak by se z názvu mohlo zdát, ale směs plynů. Konkrétně směs oxidu uhličitého, dusíku a helia. Oxid uhličitý je v tomto případě aktivním médiem v prostředí, dusík je pomocným médiem pro reakci a helium slouží k depopulaci dolní energetické hladiny elektronů.

Toto zařízení je pak také nutné chladit chladicím médiem. K tomuto účelu se používá nejčastěji voda. Je důležité, aby teplota v dutině nepřekročila 127 °C. A dále je nutné v trubici udržovat nízký tlak, k čemuž slouží vývěva. [19] [20]

Paprsek CO₂ laseru vzhledem k jeho vlnové délce nelze vést optickým vláknem. V případě potřeby proto může být veden pouze sérií zrcadel. Jiné lasery je možné vést i optickými vlákny a je tak umožněna větší flexibilita ve způsobech obrábění. [20]

CO₂ laser je v průmyslu hojně využíván pro účely řezání, svařování nebo pro úpravy povrchů. [19]

Na obrázku níže je zobrazeno základní schéma CO₂ laseru.



Obr. 3.2 Schéma CO₂ laseru [21]

3.1.2 Nd: YAG laser

Tento druh laseru je, co se týče obrábění, rychlejší než výše zmíněný CO₂ laser. Také má větší výhodu při vrtání a řezání obecně pevnějších materiálů i s větší tloušťkou. Tuto výhodu má díky tomu, že v pulzním režimu dokáže bodově

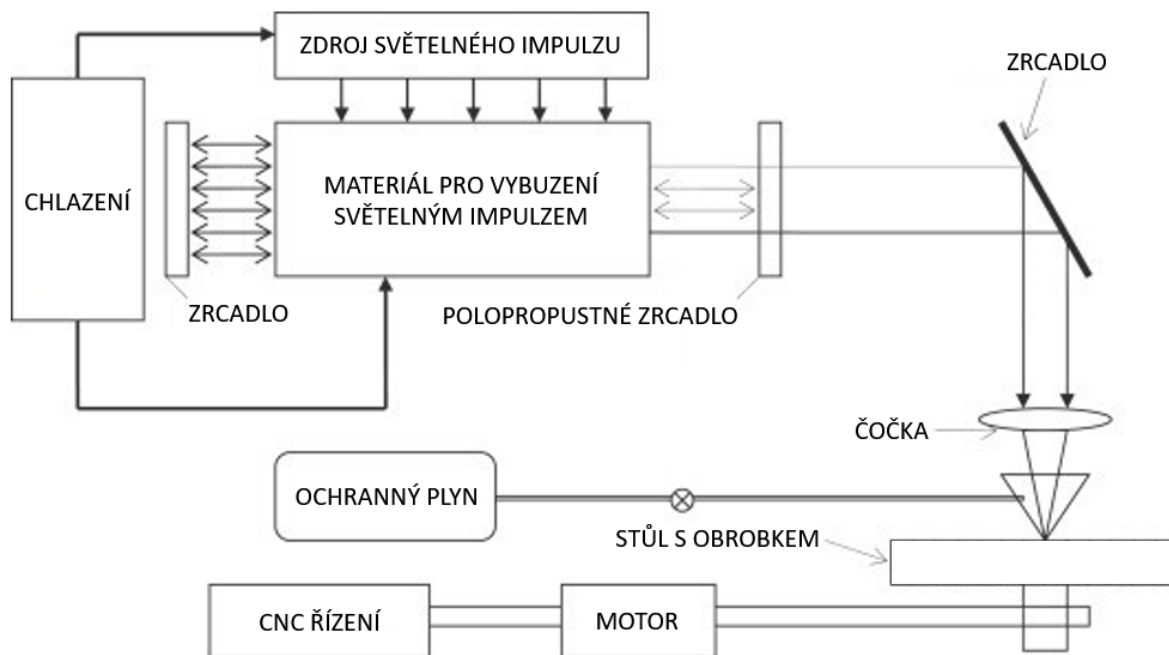
vyvinout velké množství energie v krátkém časovém intervalu a s tím i vyšší teplotu pro efektivnější úběr materiálu. [22]

Jedná se o pevnolátkový laser s krystalem se složením $Y_3Al_5O_{12}$ (ytrium, hliník, kyslík), který ještě dále obsahuje cca 1 % neodýmových iontů ND^{3+} . Neodýmové ionty jsou v tomto druhu laseru základem aktivního prostředí. V tomto specifickém složení krystalu YAG se neodýmové ionty používají jako dopant, který umožňuje generování laserového paprsku.

Dopant je příměs přidávaná do základního materiálu (obvykle polovodiče nebo krystalu) s cílem změnit jeho fyzikální vlastnosti, jako jsou například elektrické nebo optické vlastnosti. V kontextu laserů a polovodičů je dopant klíčovým prvkem, který umožňuje kontrolovat a upravovat vlastnosti materiálu a proto je Nd laser považován za velice přesný a spolehlivý.

Nd lasery jsou známé svou stabilitou a spolehlivostí, což z nich činí ideální volbu pro průmyslové aplikace, kde je požadována vysoká přesnost a spolehlivost. [15]

Na obrázku níže je vyobrazeno schéma Nd: YAG laseru.



Obr. 3.3 Schéma Nd: YAG laseru [23]

Mechanismus úběru materiálu

Laserový paprsek je pomocí čočky zaostřen do bodu. Tento proces zaostřování umožňuje seskupit veškerou energii paprsku do velmi malého bodu, čímž je maximalizována účinnost a přesnost laserového obrábění. V tomto bodě se nachází velmi vysoká koncentrace energie, která je absorbována povrchem materiálu a přeměněna na teplo. Tento tepelný efekt je klíčový pro proces obrábění, protože umožňuje rychlé a přesné odstraňování materiálu.

Míra absorpce je závislá především na intenzitě, vlnové délce a úhlu laserového paprsku vůči obrobku, dále pak na teplotě a odrazivosti obrobku. Vlnová délka laseru ovlivňuje, jak efektivně bude energie pohlcována různými materiály. Některé materiály například lépe absorbují infračervené světlo, zatímco jiné ultrafialové světlo. Intenzita laserového paprsku určuje množství energie dodávané na jednotku plochy, což přímo ovlivňuje účinnost a rychlost úběru materiálu. Úhel dopadu paprsku může měnit efektivní plošnou hustotu energie a tím i výslednou teplotu v místě kontaktu paprsku s obrobkem.

Teplota obrobku je dalším kritickým faktorem, který může ovlivnit účinnost laserového obrábění. Vyšší teplota materiálu může zlepšit absorpci laserové energie, což může vést k rychlejšímu tavení a odpařování. Na druhé straně, odrazivost materiálu může snižovat efektivitu procesu, protože část energie paprsku se odrazí a není využita k ohřevu materiálu.

Alfou a omegou mechanismu úběru materiálu laserovým paprskem je vznik vysoké teploty, která roztaví a odpaří materiál. Tento proces se nazývá „laserová ablace“. Laserová ablace je jev, při kterém laserový paprsek o vysoké energii velmi rychle zahřeje a odstraní materiál z povrchu obrobku. Laserová ablace je výhodná pro svou schopnost přesně řídit množství odstraněného materiálu, což umožňuje vytváření složitých tvarů s jemnými detaily. [15] [17] [24]

3.2 Obrábění vodním paprskem

Obrábění vodním paprskem našlo širokou škálu uplatnění ve výrobním odvětví. Mezi jeho přednosti patří možnost obrábění velkého množství druhů materiálů – kovy, nekovy, kompozity i keramika. Při obrábění vodním paprskem nevzniká teplo, a tudíž nedochází k tepelnému ovlivnění obráběného materiálu a díky tomu je možné řezat i tvarově velmi složité součásti, jelikož zde nehrozí riziko tepelné deformace. Povrch po obrábění touto technologií vykazuje vyšší integritu, než povrch obráběný laserovým paprskem a je díky ní možné řezat i větší tloušťky materiálu, v závislosti na materiálu i nad 250 mm. Obrábět vodním paprskem lze buď za použití abraziva: AWJ – „*Abrasive Water Jet machining*“, a nebo bez něj: WJM – „*Water Jet Machining*“. [25] [26]

Obrábění abrazivním vodním paprskem je možné rozdělit na dva druhy, dle způsobu tvorby abrazivního paprsku v trysce:

- Injekční – vzduch, abrazivum a voda.
- Suspenzní – abrazivum a voda.

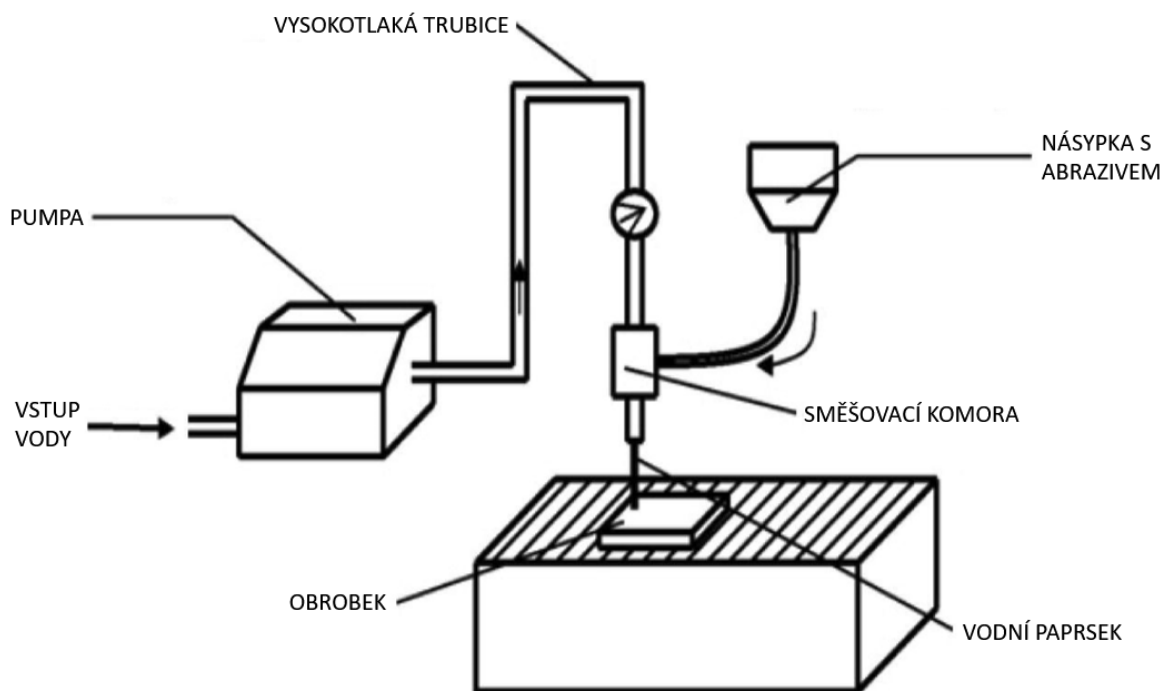
U injekční metody je voda pod vysokým tlakem hnána přes komoru, kde vsaje vzduch s abrazivem a následně pak z trysky vychází směs abraziva, vzduchu a vody.

Suspenzní metoda využívá vody s již přimíchaným abrazivem. [25]

Jako abrazivum je používán buď přírodní granát nebo uměle vytvořený oxid hlinitý či karbid křemíku. Velikost, tvar a tvrdost částic mají významný vliv na řezný výkon. Pokud velikost částic přesáhne mezní hodnotu, projeví se to snížením rychlosti úběru materiálu, jelikož se snižuje frekvence dopadu na povrch obrobku. [27]

Tento způsob obrábění je ekonomický a rychlejší než většina dalších nekonvenčních obráběcích metod. Je také méně hlučný a minimálně prašný.

Na obrázku níže je znázorněno schéma stroje pro obrábění vodním paprskem. V tomto případě se jedná o metodu AWJ s injekční metodou přimíchávání abraziva.



Obr. 3.4 Schéma obrábění vodním paprskem [28]

Mechanismus úběru materiálu

K úběru materiálu zde dochází vlivem eroze. Eroze je jev, při kterém na obráběný materiál dopadají abrazivní částice dispergované v tekutině. Abrazivní částice ubírají materiál čtyřmi základními mechanismy a to řezáním, křehkým lomem, tavením a únavou materiálu.

Způsob úběru materiálu je pak ovlivněn i úhlem dopadu abrazivní částice na povrch. Úhel je rozdělen na dvě zóny, dle převládajících mechanismů. Malý úhel je charakteristický pro opotřebení řezáním – „*řezným opotřebením*“. V této zóně vzniká tzv.: „*ploughing effect*“, kdy částička abraziva vyrývá do materiálu svou dráhu. Při velkém úhlu je obráběný povrch opotřebováván deformací. Materiál je nárazy částic zhutňován a zpevňován a vlivem dalších narážejících částic pak drolen a štěpen.

Dále je pak mechanismus závislý i na tvaru částic. Kulové částice mají tendence ke zhutňování a následnému štěpení a částice s ostrými hranami pak k řeznému opotřebovávání. [25]

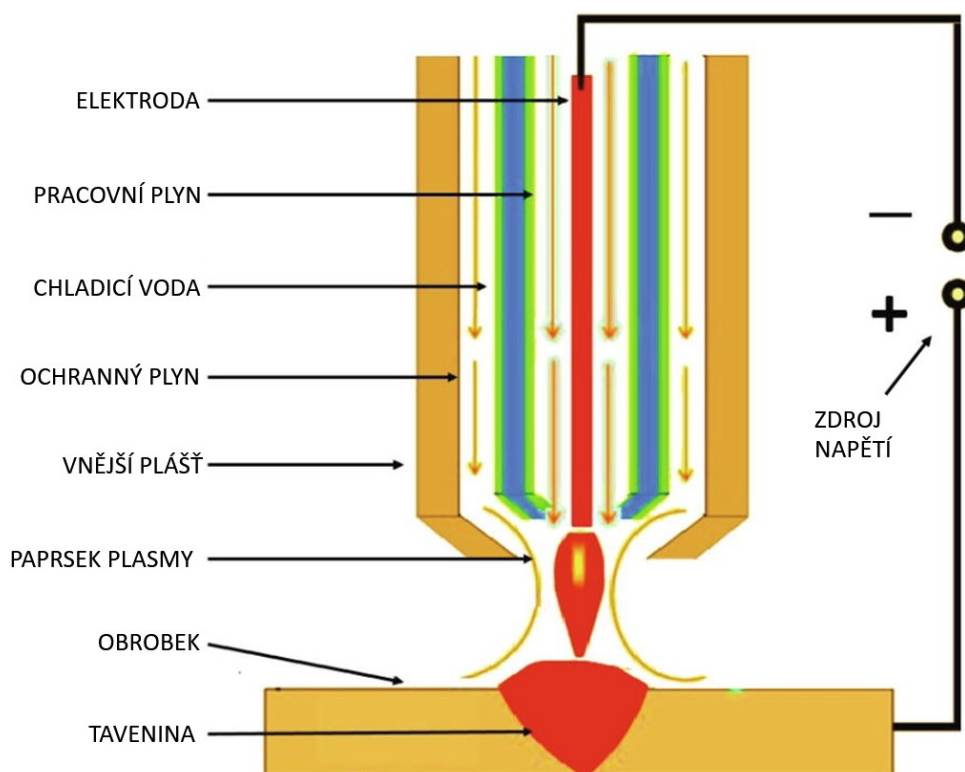
3.3 Obrábění plasmou

Plasma, které se při tomto způsobu obrábění užívá, vychází z plynného skupenství, které bylo zahřáto na takovou teplotu, že dosáhlo částečné či úplné ionizace. Ionizovaný plyn obsahuje kladné a záporné ionty, volné elektrony, atomy, fotony a radikály. Vzhledem k vysoké hustotě výskytu iontů a elektronů je také silně elektricky vodivý. [29]

Metoda obrábění plasmou je označována jako PAM – „*Plasma Arc Machining*“ a je založena na vyfukování ionizovaného plynu z trysky. Tento plyn má tak vysokou teplotu, že je schopen roztavit a odpařit obráběný materiál na povrchu obrobku. [15]

Nejčastěji se používá pro operace vyžadující vysokou teplotu, jako je například svařování, sintrování nebo tepelná či jiná úprava povrchu. Kvůli vysoké teplotě je proto nutné trysku chladit vodou. Díky této metodě je taktéž možné obrábět složité tvary, a i velmi tvrdé materiály. [6] [29]

Na následujícím obrázku je vyobrazeno schéma obrábění plasmou.



Obr. 3.5 Schéma obrábění plasmou [30]

Mechanismus úběru materiálu

Tryskou prochází směs pracovního a ochranného plynu pod tlakem přes prostor mezi katodou a anodou, kde je stejnosměrným proudem tvořen elektrický oblouk. Tento elektrický oblouk vzniká vlivem vysokého napětí mezi katodou a anodou, které ionizuje plyn v prostoru mezi těmito elektrodami. Elektrický oblouk způsobí ionizaci plynu a tím vznikne plasma s velmi vysokou teplotou. Plasma má extrémně vysokou energii a teplotu, která často dosahující několika tisíc stupňů Celsia.

Jakmile je plasma ve styku s povrchem obrobku, zahřeje jej nad bod tání. Tak je umožněno rychlé tavení a odstraňování materiálu z povrchu obrobku. Vysoká teplota plasmu je dostatečná k tomu, aby okamžitě roztavila materiál, se kterým přichází do styku. Takto roztavený materiál je buď odpařen, nebo odmrštěn proudem plasmu. Proud plasmu, pohybující se vysokou rychlostí, efektivně odstraňuje roztavený materiál z místa zpracování, což zajišťuje čistý a přesný řez. [15] [29]

4. PROBLEMATIKA HETEROGENNÍCH POVRCHŮ

S heterogenním povrchem je možné se nejčastěji setkat u nekonvenčních obráběcích metod, jako je například obrábění laserem, vodním paprskem či paprskem plasmu. Příčinou vzniku takového povrchu je slábnutí řezného média a odchylování paprsku z osy, vlivem kontaktu s řezaným materiálem a vzniklou třískou. Jinými slovy, paprsek v průběhu řezu ztrácí na kinetické energii a tím na své intenzitě.

Slábnoucí intenzita způsobuje změnu drsnosti plochy řezaného materiálu s postupující hloubkou řezu a to tak, že se dochází k nárustu drsnosti. Datovou analýzou a zkoumáním bylo zjištěno, že heterogenní povrch lze rozdělit do tří oblastí:

- **Primární** – Jedná se o oblast na vstupu řezného média. Vyznačuje se nejvyšší kvalitou povrchu a minimální možnou hodnotou drsnosti povrchu vzhledem k použité technologii a vstupním podmínkám.
- **Sekundární** – Tato oblast je nazývána jako *přechodová*. Je charakteristická poklesem kvality řezu a nárustem drsnosti.
- **Terciární** – Oblast s nejnižší kvalitou řezu a nejvyšší drsností. Lze zde také pozorovat tzv. „*rýhování*“, kdy je, pro některé účely v průmyslu, obráběný díl zcela znehodnocen. Z tohoto důvodu je také uváděna maximální hloubka řezu u konkrétních technologií. [31]

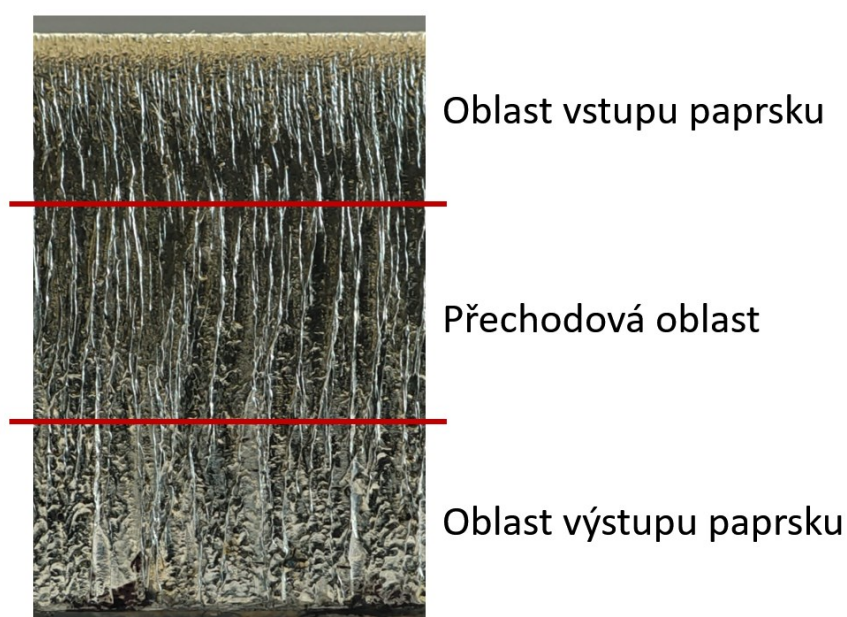
4.1 Heterogenní povrch po obrábění nekonvenčními technologiemi

Při obrábění laserem je laserový paprsek odkláněn materiálem a tvořenou třískou a spolu s předáváním energie do obrobku také slábne. Tímto dochází k postupnému snižování kvality povrchu s rostoucí hloubkou řezu a zvyšujícím se výskytem kolizí paprsku s materiálem a kapičkami roztaveného materiálu.

Tento povrch lze nazvat typickým heterogenním povrchem, jelikož při dostatečné řezné hloubce je ve většině případů složen ze tří zmíněných oblastí. Primární oblast s nejvyšší možnou kvalitou povrchu se nachází na vstupu laserového paprsku, kde má paprsek ještě vysokou energii. S postupným předáváním energie do procesu řezání materiálu paprsek slábne a vzniká tím sekundární oblast se zvýšenou drsností povrchu. Pokud je hloubka řezaného materiálu dostatečná, dochází k vytvoření terciární oblasti, kde je drsnost povrchu největší, kvalita nízká a je zde možnost vzniku rýhování a tím, v některých případech, znehodnocení obrobku z hlediska kvality povrchu. [20] [32]

Rýhování a obecně velmi špatná kvalita řezu v terciární oblasti vzniká v důsledku vychylování paprsku z osy v kombinaci s opětovným tuhnutím laserem taveného materiálu. Materiál je v oblasti primární a sekundární roztaven a proudem částic laserového paprsku přenášen do oblasti terciární, kde dochází k jeho opětovnému tuhnutí po stranách v řezu. [33]

U řezání vodním paprskem a plasmatem je důvodem pro snižování kvality povrchu se zvyšující se hloubkou řezu právě snižování energie paprsku vlivem její přeměny do procesu řezání. Při řezání vodním paprskem zde ještě hraje roli turbulentní proudění a následné vířivé proudy, které vznikají vychylováním paprsku vody kolizí s třískou a v neposlední řadě také případný rozpad a odrazy abraziva. [20] [34]



Obr. 4.1 Ukázka heterogenního povrchu vzniklého řezáním laserem [35]

Na obrázku výše je ukázka typického heterogenního povrchu s vyobrazenými oblastmi. Charakter tohoto povrchu po obrábění výše zmíněnými technologiemi se značně liší od těch konvenčních. Je proto nutné k němu, z hlediska kvality obrobeneho povrchu, přistupovat odlišně, než je přistupováno k povrchům homogenním. [12]

5. METODY MĚŘENÍ DRSNOSTI

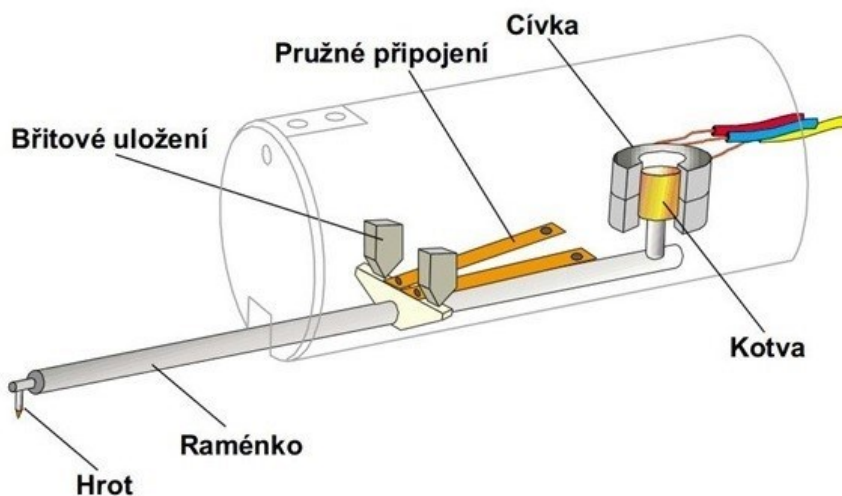
Pro měření drsnosti je k dispozici mnoho různých přístrojů. V některých oborech je drsnost měřena v řádech nanometrů či až v atomárním měřítku, ovšem pro většinu technických povrchů postačují mikroskopické metody. Obecně lze tyto metody pro měření drsnosti rozdělit na kontaktní a bezkontaktní. [36] [37]

5.1 Kontaktní metoda

Metoda je založena na snímání drsnosti povrchu pomocí pohybu normovaného hrotu. Hrot je položen na povrchu a pohybuje se konstantní rychlostí. Vychylováním hrotu nerovnostmi na zkoumaném povrchu jsou získávány výškové souřadnice, a ty jsou dále z analogového signálu v převodníku digitalizovány. [37]

Výhodou kontaktního snímání je jeho rychlost, jednoduchá manipulace a relativně nízká pořizovací cena zařízení. Snímání hrotem také není náchylné na hrubé chyby, které mohou vzniknout nasnímáním cizích částic, nečistot nebo zbytků procesních kapalin na povrchu, jelikož jsou hrotem jednoduše odsunuty. [37] [38]

Na obrázku níže je vyobrazeno schéma kontaktního drsnoměru.



Obr. 5.1 Schéma přístroje pro kontaktní metodu snímání povrchu [39]

5.2 Bezkontaktní metoda

Tato metoda je založena na snímání povrchu optickou technologií. Měření je tak prováděno pomocí laseru či CLA snímače.

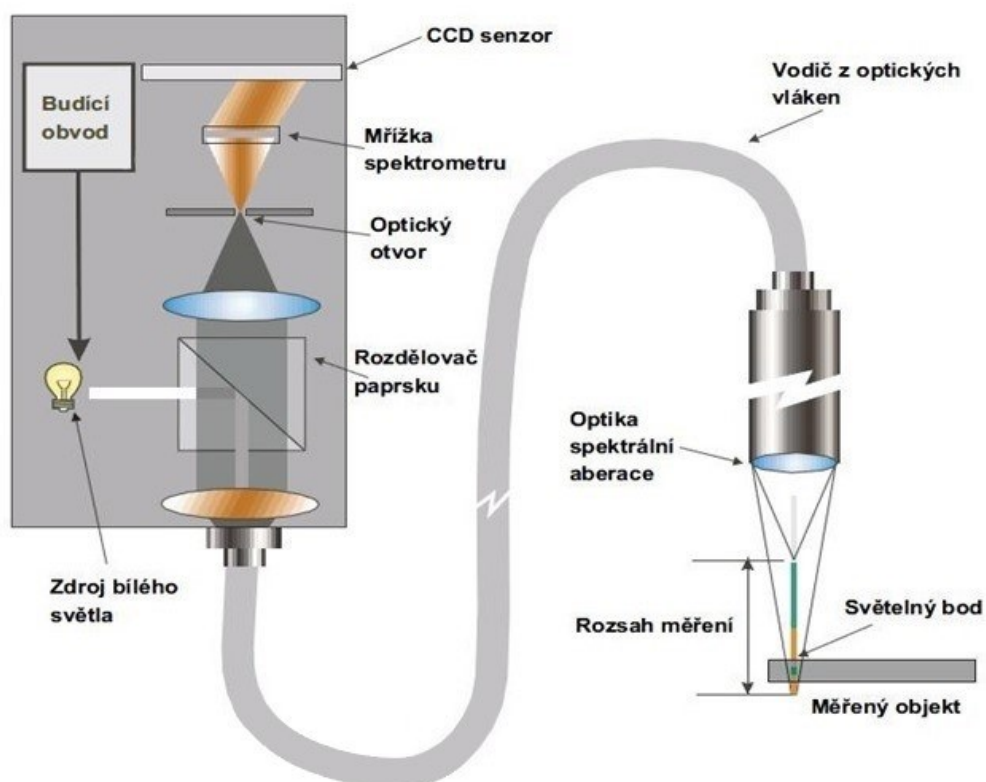
Pro přesnější a nejpoužívanější snímač CLA je principem rozklad světla do výškových souřadnic rovnoměrnou fokusací vlnových délek skrz celou výšku pole měření. Konkrétní odražené vlnové délky jsou zachyceny senzorem a na

základě vyhodnocení hodnoty odražené vlnové délky je každému bodu přiřazena výšková souřadnice. [36] [37]

Nevýhoda této metody tkví v citlivosti na znečištění povrchu, které může ovlivnit měření. Zároveň je tato metoda relativně přesná s možností měření povrchu ve 3D. [40]

Tato metoda je také nejvhodnější pro snímání heterogenních povrchů, jelikož se na tomto typu povrchu vyskytují prudké změny v drsnosti. [31]

Níže je vyobrazeno schéma bezkontaktního drsnoměru.



Obr. 5.2 Schéma přístroje pro bezkontaktní metodu snímání povrchu [39]

6. STATISTICKÉ NÁSTROJE PRO HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHŮ

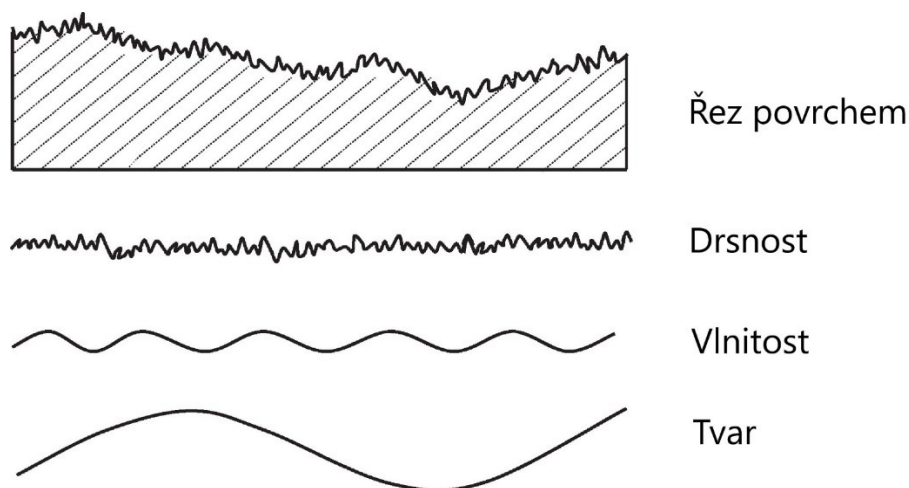
Pro hodnocení jakosti povrchů je třeba různých statistických nástrojů a znalosti pojmů a nástrojů pro hodnocení drsnosti povrchu. Zmíněny v následujících podkapitolách vycházejí z normy ČSN EN ISO 21920, která se zabývá geometrickými specifikacemi výrobků. Popsány jsou pouze ty potřebné pro tuto práci.

6.1 Textura povrchu

Povrch obecně je možné rozložit do tří kategorií a těmi jsou:

- Drsnost – procesní stopa po nástroji.
- Vlnitost – textura nesoucí drsnost.
- Tvar – geometrická podoba. [41]

Níže na obrázku je vyobrazena textura povrchu s jejím rozložením do třech zmíněných kategorií.



Obr. 6.1 Rozložení povrchu na drsnost, vlnitost a tvar [42]

6.2 Parametry drsnosti

Pokud jsou parametry drsnosti používány samostatně, v nedostatečném počtu nebo v nevhodné kombinaci, mohou být takto interpretovaná data zavádějící. Pokud by se na povrchu například vyskytlo několik extrémních výchylek v drsnosti, bude například parametr R_a zkrácen těmito extrémními hodnotami. Proto se při analýzách drsnosti povrchu doporučuje volit porovnávaných parametrů více a zároveň těch nejvhodnějších pro účely srovnávání. [37]

Níže jsou popsány vybrané parametry drsnosti, které se svou podstatou jeví být nejvhodnějšími pro popis heterogenních povrchů:

- **Ra** – Aritmetický průměr výškových souřadnic v měřené délce. [43]

Jedná se o nejvíce používaný parametr pro vyjádření drsnosti povrchu. Pro plošné měření ve třech rozměrech se užívá parametru **Sa**, které je jeho obdobou – jedná se o aritmetický průměr výškových souřadnic na ploše. [37]

- **Rz** – Průměr rozdílů mezi pěti největšími a nejmenšími změřenými výškovými souřadnicemi v měřené základní délce. [43]

Parametr **Rz** je používán jako doplňující parametr k povrchům, u kterých je možné měřit pouze na omezené délce. Jedná se o jakousi pojistku proti špatné interpretaci dat vzniklé buď jejich nedostatkem, nebo extrémními hodnotami. Jeho obdobou pro měření ve třech rozměrech je parametr **Sz**. [41]

- **Rt** – Rozdíl mezi největší a nejmenší změřenou výškovou souřadnicí v měřené celkové délce. [43]

- **Rp** – Nejvyšší hodnota výškové souřadnice. [43]

Pro měření ve třech rozměrech se používá parametr **Sp** – Nejvyšší hodnota výškové souřadnice na měřené ploše.

- **Rv** – Nejnižší hodnota výškové souřadnice. [43]

Pro měření ve třech rozměrech se používá parametr **Sv** – Nejnižší hodnota výškové souřadnice na měřené ploše.

- **RSm** – Průměr vzdáleností mezi jednotlivými prvky tvořících drsnost. [43]

Používán pro hodnocení vzdálenosti mezi jednotlivými prvky – například pro optimalizaci rychlosti posuvu při obrábění. [41]

- **Rdc** – Hodnota rozdílu mezi dvěma úseky materiálového poměru vyjádřených Abbott-Firestonovou křivkou. [43] [44]

6.3 Pravidlo 16 %

V rámci normy ČSN EN ISO 21920 je zahrnuto několik pravidel sloužících pro zpřesnění hodnocení jakosti povrchu. Jedním z nejdůležitějších je pravidlo 16 %.

Toto pravidlo uvádí, že při vyhodnocování parametrů drsnosti smí být maximálně 16 % naměřených hodnot nad stanovenou hodnotou horní meze, aby byl povrch považován za přijatelný. Tato hodnota je zpravidla stanovena jako součet aritmetického průměru a směrodatné odchylky, viz rovnice níže.

$$U = \bar{x} + s$$

(7)

Pravidlo je navrženo tak, aby eliminovalo vliv extrémních hodnot a odchylek v naměřených datech. Tyto odchylky mohou být způsobeny například nečistotami na povrchu, vady materiálu, vady vzniklé při tvorbě třísky nebo chyby měřidel, které neodpovídají měřenému povrchu.

V praxi to znamená, že pokud je méně než 16 % hodnot nad stanovenou horní mezí, je povrch vyhodnocen jako přijatelný. [43]

6.4 Exploratorní datová analýza

Základy této analýzy byly položeny Johnem W. Tukey, který ji popsal jako detektivní práci s daty. V podstatě jde o filozofii či přístup, při kterém statistik zkoumá data bez předpojatosti – **objektivně**, tak aby prozkoumal vše, co mu data mohou říci o studovaném jevu. Zmíněnou analýzu pan Tukey staví do kontrastu s konfirmační datovou analýzou (CDA), kde je nejdříve vytvořen závěr, který je později testován.

Tukey dále tvrdí, že by se tyto dva přístupy neměly používat odděleně od sebe, ale měly by se vzájemně doplňovat. [45]

Postup exploratorní datové analýzy:

1. Určení typu dat.
2. Celkové zhodnocení (vyhledávání trendů, šikmosti nebo špičatosti dat atd.).
3. Vyhledání chyb či outlierů (a následné vyřazení chyb z dat).
4. Otestování normality dat.
5. Zhodnocení možností použití konkrétních metod a postupů v testování dat.

K exploratorní analýze je samozřejmě využívána široká škála grafických a statistických nástrojů. Nejpoužívanějšími z nich jsou boxplotové diagramy, histogramy a spojnicové grafy. [46]

6.5 Normální (Gaussovské) rozdělení dat a jeho testování

Normalita dat je velmi důležitý předpoklad pro další testování dat. Mezi nejběžnější statistické nástroje sloužící k testování patří například korelační a regresní analýza. Tyto nástroje je možné použít pouze v případě, pokud jsou data normálně (gaussovsky) rozdělena. Z tohoto důvodu se v rámci exploratorní analýzy vždy přistupuje k testování normality dat. [47] [48]

Nejjednodušší způsob, jak otestovat normalitu je posouzení podle tvaru histogramu. V případě normality je ve tvaru symetrického zvonu (gaussiány). Ovšem zde se jedná pouze o odhad. [48]

Pro významně přesnější odhad normality dat se využívá testů s pomocí softwaru.

Vybrané testy normality dat seřazené od nejpřesnější metody po tu méně přesnou:

- Shapiro-Wilk test
- Anderson-Darling test
- Shapiro-Francia
- Hosking L-moments
- Chen-Shapiro
- Coin
- Brys-Hubert-Struyf-Bonett-Seler
- Adjusted-Jarque-Bera [48]

6.6 Transformace dat

Většina nástrojů statistické analýzy je založena na předpokladu normality dat. Pokud tento předpoklad není splněn, statistické analýzy z dat, která nejsou normálně rozložena, mohou vést k nesprávným výsledkům. To představuje vážný nedostatek pro důvěryhodné vědecké výsledky. Ačkoliv se to tak na první pohled nemusí zdát, mnohá data nesplňují předpoklad normality. Existuje ale relativně jednoduchý statistický nástroj, který umožňuje přeměnit rozložení dat z nenormálního na normální – *transformace dat*. Kromě toho může transformace například změnit nelineární vztah mezi proměnnými na lineární a stabilizovat odhadovanou variaci v lineárním modelování. [56]

Transformací máme vícero druhů. Ovšem vždy je třeba vybírat po předchozím pečlivém uvážení všech přidružených aspektů.

Jako první by měla proběhnout obecná diagnostika dat. Na to je možné využít některý z běžně používaných nástrojů, jako je histogram, nebo grafický sumář v programu Minitab. Také je třeba ověřit normalitu dat, aby byla potvrzena nutnost transformace dat. K tomuto účelu může posloužit Anderson-Darlingův nebo Shapiro-Wilkův test normality.

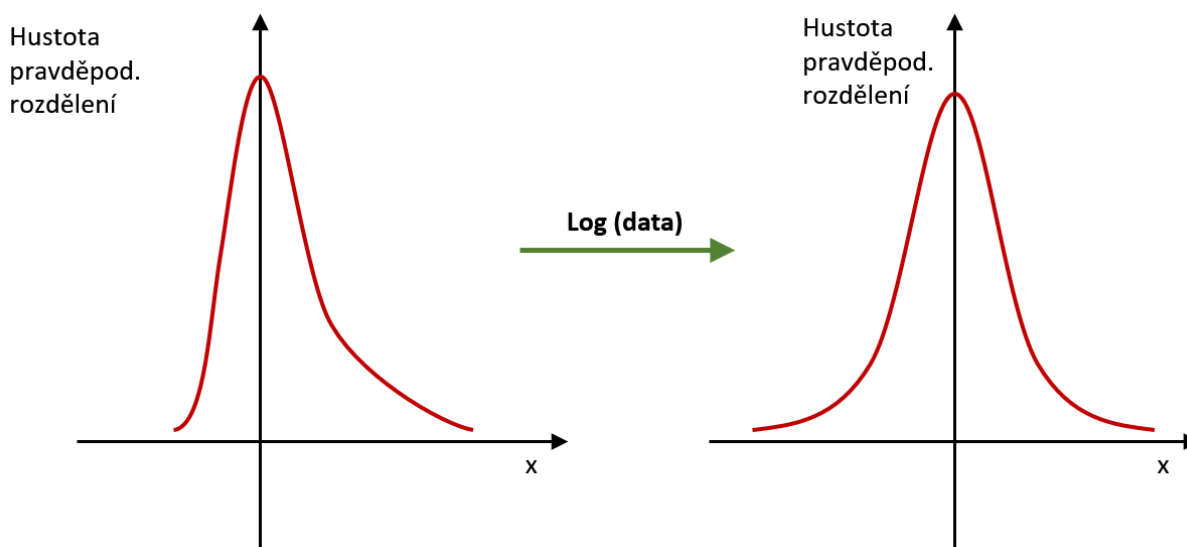
Dále je třeba identifikovat problém s nenormalitou dat čili problém s jejich rozdělením. Například pokud budou data charakterizována výraznou šikmostí je nutné použít transformaci, která tuto šikmost zmírní. Pokud jsou v datech

přítomny například outliery, které data zkreslují, je pak vhodné použít transformaci zmírňující jejich dopad. [57]

Nejdůležitějším krokem je pak výběr vlastní transformace. Níže jsou uvedeny příklady těch nejčastěji používaných.

6.6.1 Logaritmická transformace

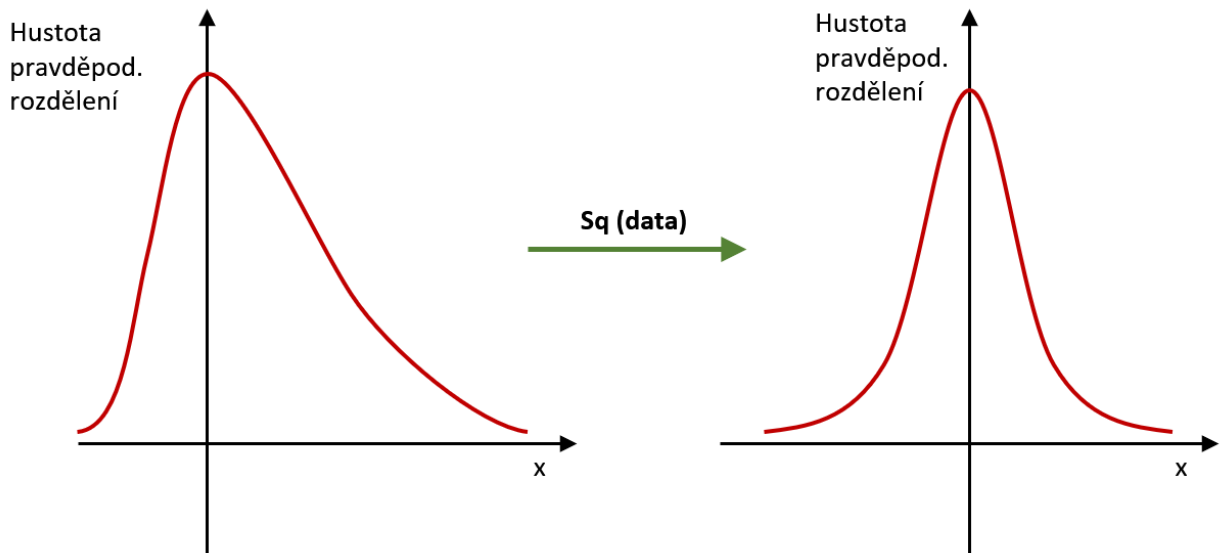
Používána pro pozitivně zešikmená data, kde jsou některé hodnoty výrazně vyšší než zbytek hodnot. Je použitelná pouze pro kladné hodnoty. V datech se tedy nesmějí nacházet žádná záporná čísla. Principem její funkce je, že „stlačí“ odlehle hodnoty blíže k sobě a jejich dopad posléze není tak výrazný. [58]



Obr. 6.2 Grafická ukázka logaritmické transformace dat [58]

6.6.2 Square Root transformace

Používá se pro mírně zešikmená data, nebo data, která mají několik vysokých hodnot, ale nejsou extrémně zešikmená. Vzhledem k tomu, že funguje na principu odmocňování původních hodnot, je velmi jednoduchá a snadno aplikovatelná, ale není tak účinná jako logaritmická transformace. Je použitelná pouze pro kladné hodnoty. [59]



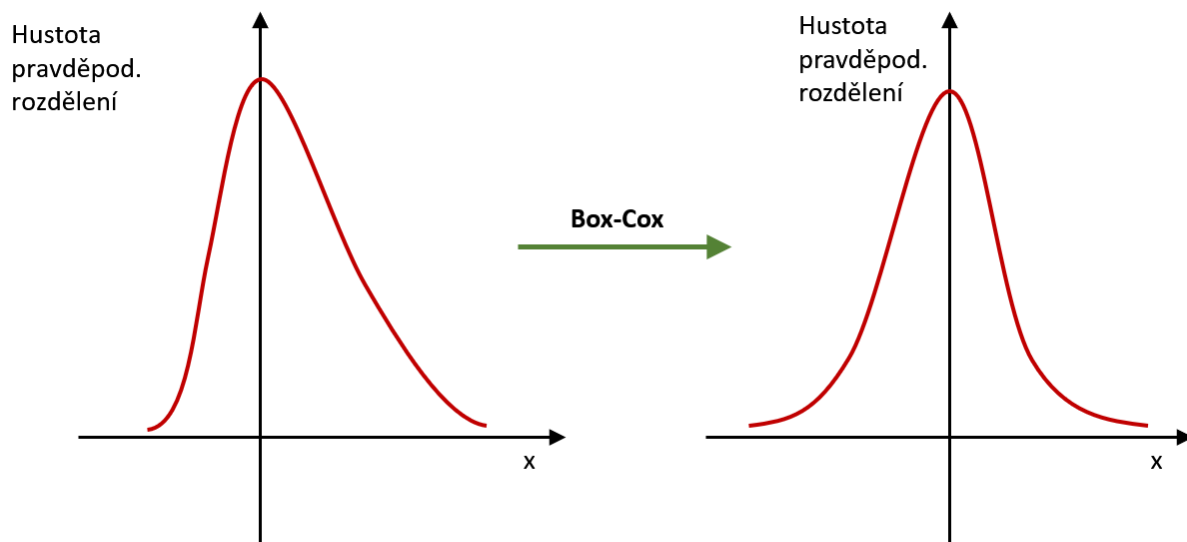
Obr. 6.3 Grafická ukázka Square root transformace dat [60]

6.6.3 Box-Coxova transformace

Tato transformace je flexibilnější, než logaritmická nebo Square root transformace a také více účinná. Principem její funkce je stabilizovat rozptyl hodnot. Používá se pro pozitivně zešikmená data a je schopná je uvést do téměř normálního rozdělení. Principem je převod dle vztahu s parametrem lambda „ λ “, který v podstatě určuje typ transformace následovně:

- **Hodnota blízka 1:** Transformace je blízka identitě, což znamená, že data byla blízko normálnímu rozdělení, nebo byla normální.
- **Hodnota blízka 0:** Transformace je blízka logaritmické transformaci, což naznačuje, že data mají exponenciální povahu nebo široký rozptyl.
- **Jiná hodnota:** Různé hodnoty λ poskytují různé nelineární transformace, které mohou více nebo méně ovlivňovat strukturu a rozdělení dat.

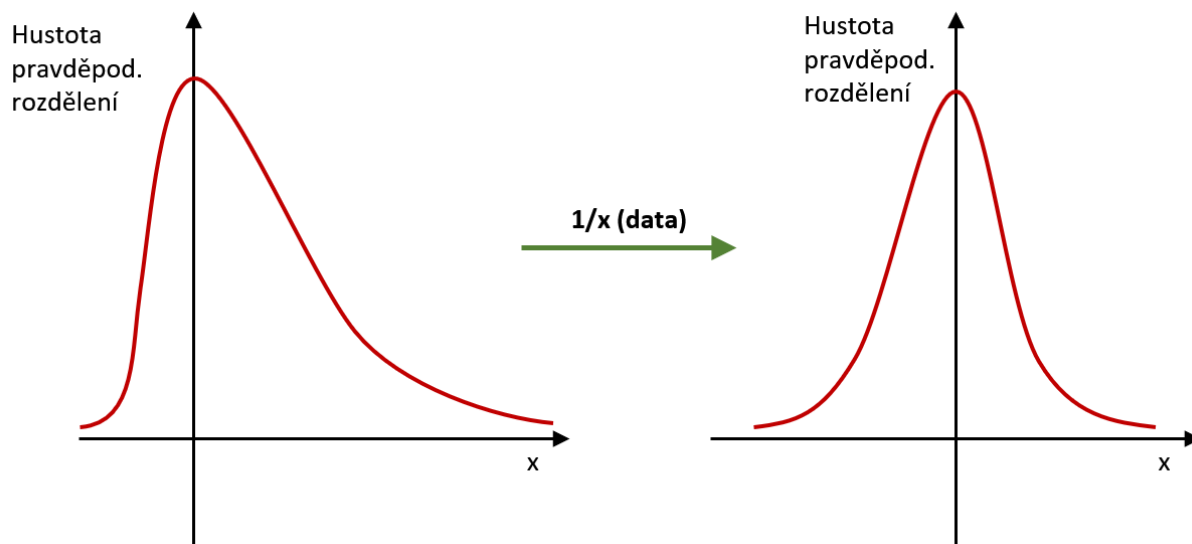
Její nevýhodou je, že je použitelná pouze pro data neobsahující záporné hodnoty. [61]



Obr. 6.4 Grafická ukázka Box-Cox transformace dat [61]

6.6.4 Reciproční transformace

Používá se pro výrazně pozitivně zešikmená data. Principem fungování je převedení každé hodnoty na její převrácenou, a to vede k výrazné redukci vlivu odlehlých hodnot. Omezením je použitelnost pouze pro kladné hodnoty. [62]

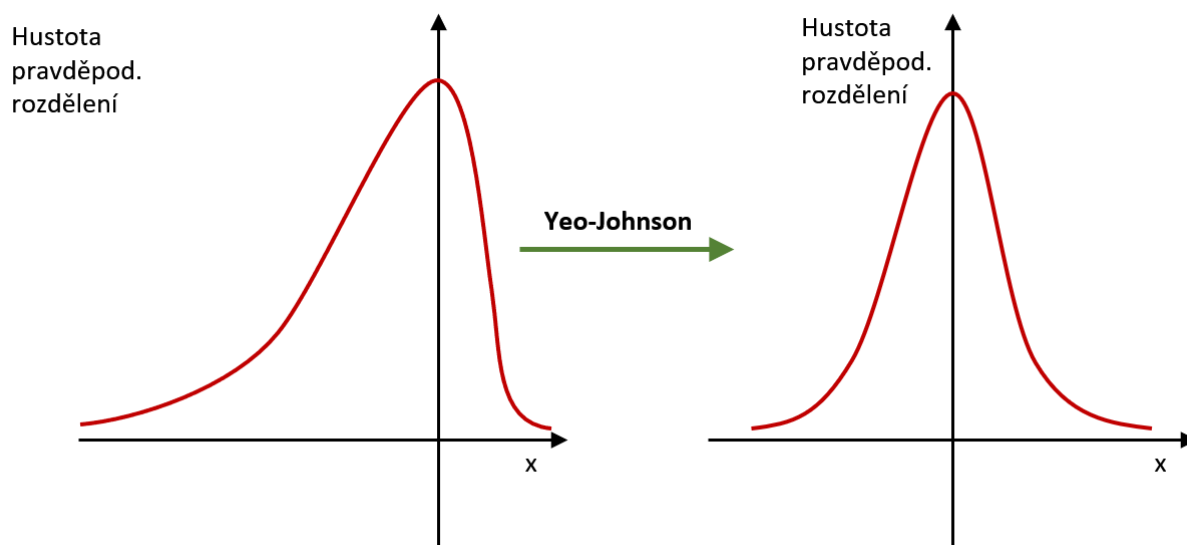


Obr. 6.5 Grafická ukázka reciproční transformace dat [60]

6.6.5 Yeo-Johnsonova transformace

Transformace dat, která je nejflexibilnější ze všech výše uvedených metod transformací. Podobá se Box-Coxově transformaci, ale hodí se pro data jak

negativně, tak pozitivně zešikmená a obecně pro širokou škálu různých variací datových rozptylů. Její největší výhodou je, že se v datech mohou nacházet jak kladné, tak i záporné hodnoty, včetně těch nulových. [63]



Obr. 6.6 Grafická ukázka Yeo-Johnsonovy transformace dat [60]

6.7 Testování outlierů

Outlierem, či odlehlou hodnotou se rozumí hodnota, která je výrazně odchýlena od ostatních hodnot v souboru dat, ve kterém se vyskytuje. Tyto odlehlé hodnoty mohou být problémem pro následné testování dat, protože data zkreslují. V rámci metodiky EDA je proto důležité datové soubory otestovat a zjistit, zdali se jedná „pouze“ o odlehlou hodnotu nebo chybu. Pokud je na základě testu zjištěno, že se jedná o odlehlou hodnotu, je v souboru ponechána, zatímco odhalenou chybu je ze souboru nutné odstranit. [49] [50]

Nejjednodušší způsob odhalení odlehlých hodnot je za pomoci boxplotového diagramu.

Pokud jsou data normálně rozdělena, přistupuje se nejčastěji k použití Grubbsova testu odlehlých hodnot. Na jeho základě je stanoveno, zdali se jedná o odlehlou hodnotu nebo chybu. [51]

6.8 Testování hypotéz

Nedílnou součástí statistického testování je testování hypotéz. Aby bylo možné provést test například o shodnosti průměrů nebo rozptylů, testování hypotéz je toho nutnou součástí.

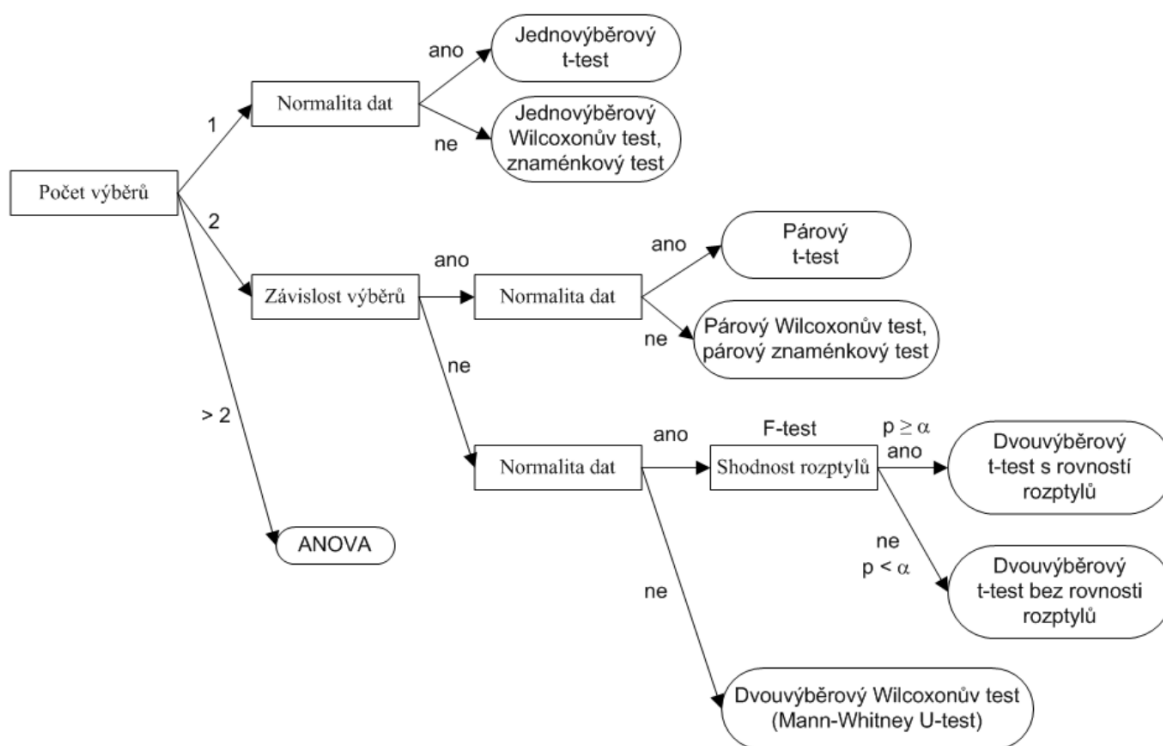
Například v případě testování shodnosti průměrů dvou souborů dat je nejdříve třeba položit nulovou hypotézu (průměry se statisticky významně **neliší**),

hypotézu alternativní (průměry se statisticky významně liší) a dále pak postupovat dle návodu níže.

Postup při testování hypotéz je následující:

1. Formulace nulové a alternativní hypotézy – H_0 ; H_a .
2. Zvolení hladiny významnosti α .
3. Zvolení nejvhodnějšího testu.
4. Určení kritického oboru nebo kritické hodnoty – t_{krit} .
5. Výpočet a vyčíslení.
6. Na základě kritické hodnoty nebo oboru rozhodnutí o zamítnutí či nezamítnutí nulové hypotézy. [52]

Při volbě nejvhodnějšího testu je možné se řídit dle následujícího diagramu.



Obr. 6.7 Diagram pro volbu vhodného testu při testování hypotéz [53]

Při testování hypotéz můžeme chybně rozhodnout o zamítnutí nebo nezamítnutí nulové hypotézy. Následující kapitola je věnována těmto možným chybám.

6.8.1 Chyby při testování hypotéz

Při testování hypotéz se může stát, že je nesprávně zamítnuta či nezamítnuta nulová hypotéza.

Tímto je možné se dopustit hned dvou chyb:

- **Chyba I. druhu** – α (zamítáme H_0 , ačkoliv ve skutečnosti platí).
- **Chyba II. druhu** – β (nezamítáme H_0 , ačkoliv ve skutečnosti neplatí).

Pravděpodobnost, že vznikne jedna z těchto chyb vychází ze zvolené hladiny významnosti α . Ta je nejčastěji v praxi volena 0,05. V tomto případě je pravděpodobnosti vzniku chyby 1 ku 20.

V následující tabulce jsou graficky zobrazeny způsoby vzniku obou výše zmíněných chyb při položení nulové hypotézy H_0 a alternativní hypotézy H_1 . [46] [54]

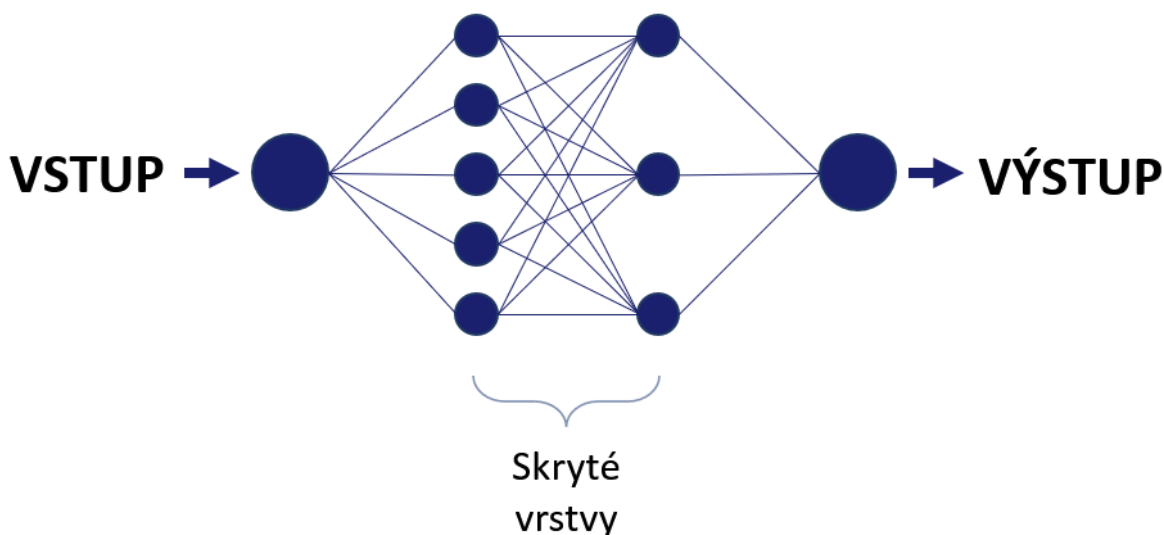
Tabulka 6.1 Způsob vzniku chyb I. a II. druhu při položení H_0 a H_1

| | | Výsledek testu | |
|------------|-------------|--------------------|--------------------|
| | | Platí H_0 | Platí H_0 |
| Skutečnost | Platí H_0 | Správné rozhodnutí | Chyba I. druhu |
| | Platí H_0 | Chyba II. druhu | Správné rozhodnutí |

7. NEURONOVÉ SÍTĚ

Jedná se pokročilé matematické modely, které jsou inspirovány činností lidského mozku. Neuronové sítě využívají principu funkce biologických neuronů, což jsou základní stavební kameny lidského nervového systému. Neuronové sítě se vyznačují schopností učení a přizpůsobování se na základě vstupních dat, což jim umožňuje modelovat složité nelineární vztahy v datech, na které běžné statistické nástroje již bohužel nestačí.

Každý neuron v neuronové síti přijímá vstupy, na které jsou poté aplikovány váhové operace, a následně je využito nelineárních aktivačních funkcí. Neuronové sítě jsou uspořádány do vrstev, přičemž každá vrstva plní specifickou úlohu. Vstupní vrstva přijímá data, skryté vrstvy provádějí složité výpočty a výstupní vrstva produkuje konečné výsledky. Neuronová síť může vypadat následovně. [64]



Obr. 7.1 Model neuronové sítě perceptronového typu

Neuronové sítě nacházejí široké uplatnění v mnoha oblastech, včetně rozpoznávání řeči, zpracování obrazu, predikce finančních trhů, zdravotní diagnostiky a autonomního řízení. Díky svým schopnostem učení a adaptace se stávají nepostradatelným nástrojem v moderní technologii a výzkumu.

Vývoj neuronových sítí je v dnešní době hnán kupředu a podporován nejen díky své využitelnosti a široké aplikovatelnosti, ale také je současně poháněn i pokroky v hardwarových technologiích, zejména v grafických procesorových jednotkách (GPU), které umožňují rychlejší a efektivnější trénování těchto modelů. Dalšími důležitými aspekty jsou algoritmy optimalizace a velké množství dostupných dat, které neuronové sítě využívají pro učení a ty jsou pak díky obrovské internetové síti velmi snadno dostupná. [64] [65]

7.1 Druhy neuronových sítí

Neuronové sítě se mohou dělit podle vícero charakteristik, jako je jejich architektura, nebo způsob učení. V následujících řádcích jsou uvedeny vybrané dělicí charakteristiky:

7.1.1 Způsob učení

Pro trénování neuronové sítě je nutná sada trénovacích dat, která obsahuje vstupy a na základě typu učení pak mohou obsahovat i jim odpovídající výstupy. Tato data pak slouží k tomu, aby se síť naučila rozpoznávat souvislosti a vzory. Data mohou být poskytována různými způsoby, uvedené jsou tři hlavní.

- *Učení s učitelem:*

Učení s učitelem je nejběžnější způsob trénování neuronových sítí. Síť se učí na základě trénovacích dat, která obsahují vstupy i odpovídající správné výstupy. Cílem je naučit se mapovat vstupy na výstupy co nejpřesněji. Typické aplikace zahrnují klasifikaci (např. rozpoznávání předmětů na obrázku) a regresi (např. předpověď ekonomické situace).

- *Učení bez učitele:*

Při učení bez učitele jsou neuronové sítě trénovány pouze na vstupních datech bez známých výstupů. Síť se snaží najít struktury a vzory v datech. Tento způsob učení je užitečný pro objevování skrytých vztahů v datech.

- *Učení posilováním:*

Učení posilováním zahrnuje trénování sítě prostřednictvím interakce s prostředím. Síť získává odměny nebo tresty za své akce a cílem je maximalizovat celkovou odměnu. Tento způsob učení se často používá v robotice, hrách a dalších oblastech, kde je důležité rozhodování v reálném čase. [66]

7.1.2 Architektura sítě

Neuronové sítě mohou mít různé architektury, které se liší svou strukturou a jsou také vhodné pro různé typy úloh. Níže jsou uvedené tři nejčastěji používané architektury neuronových sítí.

- *Vícevrstevné neuronové sítě perceptronového typu:*

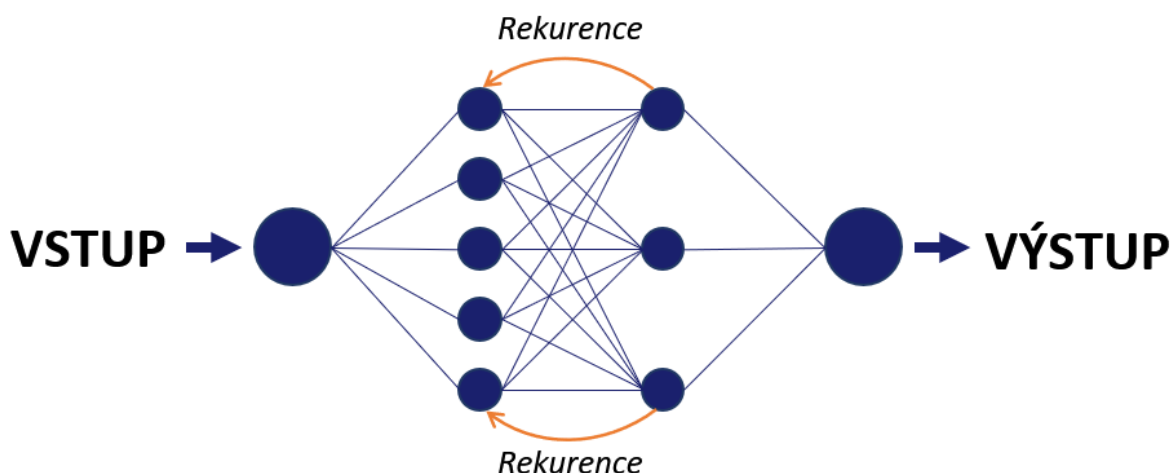
Tato architektura je základním typem neuronových sítí, které obsahují jednu nebo více skrytých vrstev perceptronů mezi vstupní a výstupní vrstvou. Perceptron, či uzel, je základní prvek, který je učen rozpoznávat a třídit vstupy do dvou skupin pomocí matematických výpočtů. Všechny vrstvy jsou plně propojené a používají se pro širokou škálu úloh, jako je klasifikace a regrese. Tyto sítě jsou základem pro tzv. „hluboké učení“, jelikož jejich skryté vrstvy, neboli jejich množství, umožňuje tuto činnost vykonávat. Síť tak uspořádává získané informace s hierarchickým rozložením, a to pak vede ke zlepšení rozpoznávání vzorů a vazeb.

- *Konvoluční neuronové síť:*

Jsou navrženy speciálně pro zpracování obrazových dat. Používají konvoluční vrstvy, které zachycují a zpracovávají prostorové vlastnosti z obrazů. Konvoluční neuronové sítě jsou ideální pro úlohy, jako je rozpoznávání obrázků, detekce obličejů a zpracování obrazových dat.

- *Rekurentní neuronové síť:*

Tyto sítě jsou navrženy pro zpracování sekvenčních dat, jako jsou časové řady nebo text. Mají zpětné vazby, které jim umožňují uchovávat informace o předchozích stavech. Některé variace tohoto typu architektury řeší problémy s dlouhodobou datovou závislostí a jsou široce používány v úlohách, jako je například strojový překlad nebo predikce časových řad. [67]



Obr. 7.2 Model rekurentní neuronové sítě

7.1.3 Typu aplikace

Neuronové sítě díky svým vlastnostem mají také velmi široké spektrum využití. Níže jsou uvedeny tři hlavní typy jejich aplikace.

- *Klasifikace:*

Klasifikace je proces přiřazování vstupů do předem nadefinovaných kategorií. Neuronové sítě se často používají pro rozpoznávání obrázků (např. rozpoznávání konkrétních objektů na obrázku), klasifikaci textu, jako je například analýza stylu psaní nebo ke zdravotnické diagnostice, příkladem může být rozpoznávání vad nohou z dat o chůzi. Obzvláště efektivní pro tento typ úlohy jsou konvoluční neuronové sítě, které jsou zmíněny výše.

- *Regrese:*

Regrese se používá k predikci spojitéch hodnot na základě vstupních dat. Neuronové sítě mohou předpovídat vývoj počasí, ceny akcií na burze, spotřebu elektrické energie v různých časech nebo vývoj ekonomické situace. Pro regresní

úlohy jsou nejčastěji využívány vícevrstvé sítě perceptronového typu nebo rekurentní neuronové sítě.

- *Generování dat:*

Generování dat zahrnuje vytváření nových datových vzorů, které jsou obsaženy v trénovacích datech. Například generativní adversariální sítě jsou široce používány pro generování realistických obrázků, hudby a textu a autoencodery se používají pro redukci šumu a rekonstrukci dat. [68]

8. CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Doposud je problematika drsnosti povrchu založena na řešení popsaném 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.

9. 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.

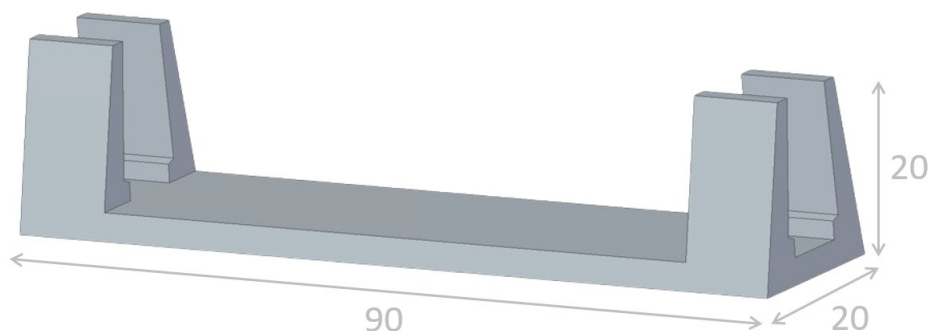
Vybrané vhodné nástroje byly zapracovány do navržené metodiky, která bude sloužit pro hodnocení a popis dat drsnosti heterogenních povrchů.

9.1 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.

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.

Vzhledem k charakteru tvaru vzorků a z toho plynoucí nestabilitě bylo nutné vytvořit přípravek, který stabilitu při měření zajistí. V programu Catia byl vytvořen model přípravku, který byl optimalizován pro úsporu materiálu a následně vytištěn na 3D tiskárně. Na obrázku níže je tento model vyobrazen s naznačenými rozměry v jednotkách milimetrů.



Obr. 9.1 Přípravek pro stabilizaci vzorku při měření

Spolu s přípravkem byly vyrobeny i čepičky pro přípravu operačního pole měření, které napomohly konzistentní lokalizaci měřené plochy na vzorcích a to

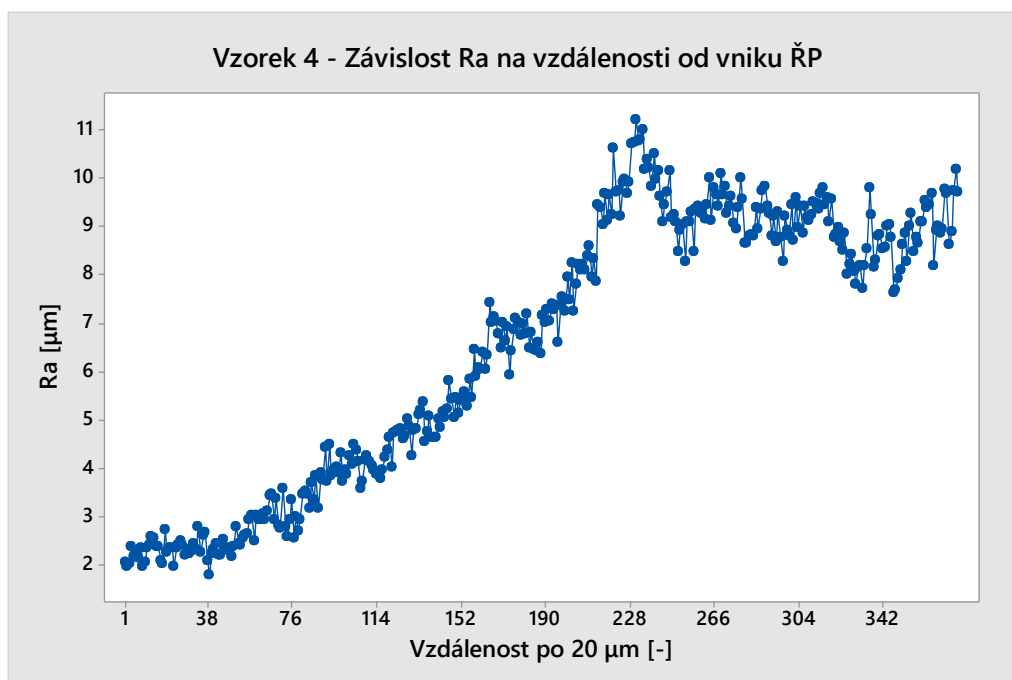
30 mm od levé hrany všech vzorků. Na obrázku níže ukázka přípravy operačního pole s pomocí vyrobených čepiček.



Obr. 9.2 Příprava operačního pole měření

Měření všech deseti vzorků proběhlo v zajištěných laboratorních podmínkách v co nejkratším možném časovém intervalu, včetně konfigurace počtu jednotlivých měřených řezů a nastavení průběhu měření v přidruženém softwaru, to vše pro zajištění opakovatelnosti.

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 (*popsána v kapitole 6.4.*). 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 Ra na vzdálenosti od vniku řezného paprsku pro vzorek č. 4.



Obr. 9.3 Graf závislosti Ra na vzdálenosti od vniku řezného paprsku

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.

9.2 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.

9.3 Exploratorní datová analýza získaných dat

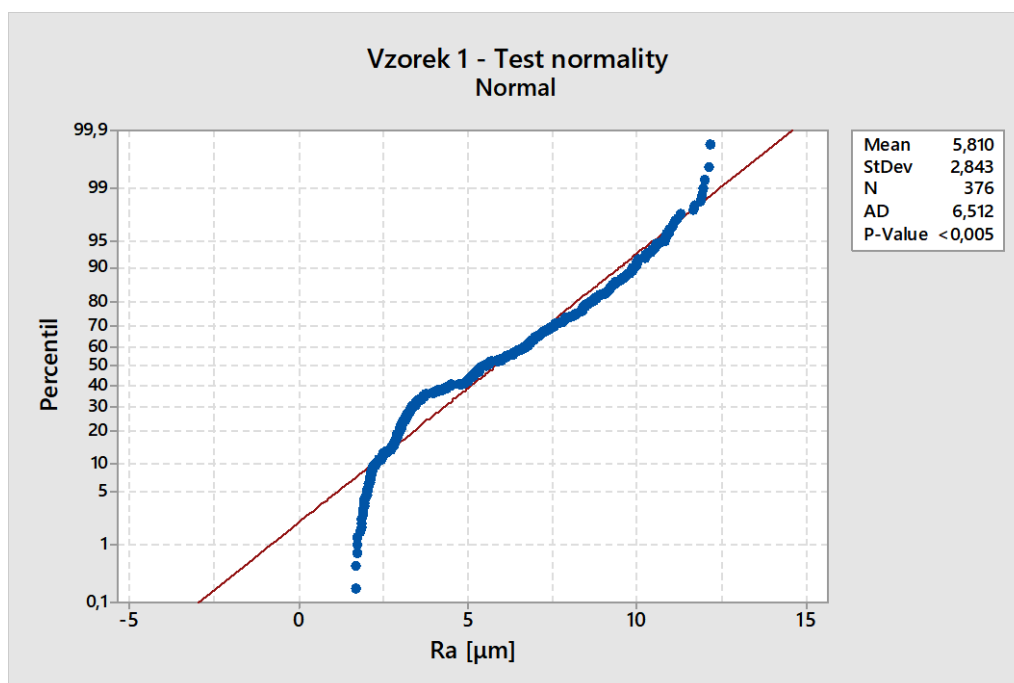
Jak již bylo zmíněno v kapitole 6.4, exploratorní datová analýza (EDA) slouží k objektivnímu zkoumání dat tak, aby bylo zjištěno vše, co ve zkoumaných datech může být potenciálně obsaženo. Tato analýza se zpravidla provádí v několika krocích: určení typu dat, celkové zhodnocení (např. hledání trendů, šikmosti nebo špičatosti), nalezení chyb či outlierů (a případné odstranění dotčených hodnot) a testování normality dat.

V kapitolách níže bude exploratorní datová analýza použita pro prozkoumání získaných dat. Nejdříve budou data otestována na normalitu, což je klíčové,

jelikož na základě potvrzení či vyvrácení normality budou voleny další statistické postupy. Dále budou v datech vyhledány outliers, které budou dále vyšetřeny pomocí příslušných testů. Pokud by byla podezřelá hodnota shledána hrubou chybou, a ne pouze odlehlou hodnotou, je nutné ji ze souboru odstranit, jelikož by mohla nežádoucím způsobem zkreslovat data.

9.3.1 Testy normality

Pro účely testování normality získaných dat drsnosti heterogenního povrchu byl vybrán Anderson-Darlingův test, s nastavenou hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. Tento komplexní testovací proces byl proveden pomocí softwaru Minitab. Po dokončení testu bylo zjištěno, že žádný z analyzovaných datových souborů nevykazoval normální hustotu rozdělení pravděpodobnosti, což naznačuje, že data neodpovídají předpokladu normality. V grafu níže je vyobrazen výsledek Anderson-Darlingova testu v programu Minitab.



Obr. 9.4 Graf s výsledkem testu normality z programu Minitab

Jelikož byla hodnota hladiny významnosti nastavena na obligátních $\alpha = 0,05$, pak platí, že pokud je p-hodnota nižší než 0,05, lze s 95 % pravděpodobností tvrdit, že zkoumaný soubor dat nenesе znaky normálního rozdělení a lze jej tedy považovat za soubor s jiným než normálním rozdělením.

Níže je uvedena tabulka s hodnotami pro všechny vzorky a všechny získané parametry.

Tabulka 9.1 Výsledné p-hodnoty Anderson-Darlingova testu normality

| Číslo vzorku | p-hodnota testu normality | | | | | |
|--------------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Rp | Rv | Rz | Ra | Rδc | RSm |
| Vzorek 1 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Vzorek 2 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Vzorek 3 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Vzorek 4 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Vzorek 5 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Vzorek 6 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Vzorek 7 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Vzorek 8 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Vzorek 9 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Vzorek 10 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |

Z tabulky číslo 9.1 je patrné, že žádný ze souborů dat nemá normální rozdělení. Výsledná hodnota Anderson-Darlingova testu normality je u všech zkoumaných souborů s parametry drsnosti nižší než stanovená hodnota $\alpha = 0,05$ a tudíž lze s 95 % pravděpodobností tvrdit, že žádný z těchto výběrových souborů nepochází ze souboru s normálním rozdělením dat.

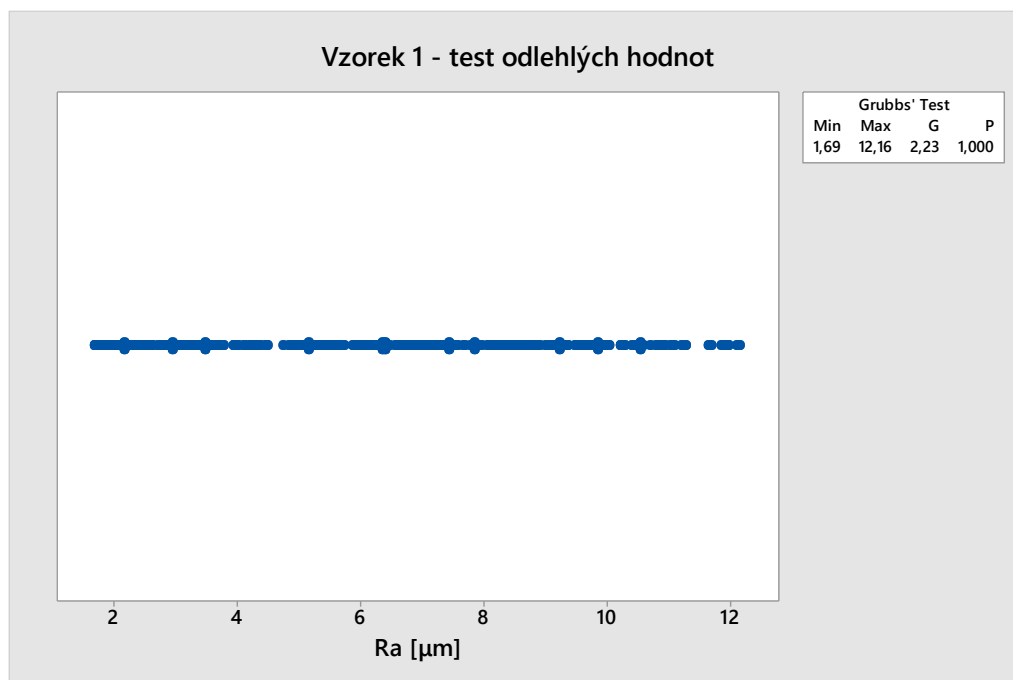
Nepřítomnost normálního rozdělení ve zkoumaných datech by mohla být způsobena přítomností hrubých chyb v souborech. Tyto hrubé chyby lze odhalit otestováním dat na přítomnost odlehlých hodnot.

9.3.2 Testy odlehlých hodnot

V rámci metodiky EDA je nutné data otestovat na přítomnost odlehlých hodnot, a tudíž ne pouze z titulu nepřítomné normality.

Pomocí testů odlehlých hodnot jsou v souborech dat vyhledávány takzvané „ouliery“, hodnoty zdánlivě se nacházející mimo shluk hodnot v souboru. Takové hodnoty je po jejich nalezení nutné vyšetřit a pomocí testů hypotéz rozhodnout, zdali se jedná „pouze“ o ouliery, anebo o hrubé chyby. Outliery jsou v datech ponechávány a ze statistického hlediska jsou považovány za hodnoty s určitou nastavenou jistotou pocházející ze zkoumaného souboru dat. Ovšem hrubé chyby je nutné ze souboru vyřadit, jelikož tyto hodnoty ze statistického hlediska nejenže s určitou mírou pravděpodobnosti neodpovídají zkoumanému souboru dat a nepatří do něj, ale mohou zkreslovat data natolik, že jsou pak na základě testu normality vyhodnocena jako data s jiným rozdělením než normálním. Zpravidla se jedná o hodnoty vzniklé působením lidského faktoru, či selháním přístrojového vybavení, a proto neodpovídají datovému souboru, v němž se nachází.

K účelům testování získaných dat byl zvolen Grubbsův test odlehlých hodnot. Hladina významnosti byla nastavena na $\alpha = 0,05$. Níže v grafu je vyobrazen výsledek Grubbsova testu v programu Minitab.



Obr. 9.5 Graf s výsledkem testu odlehlých hodnot v programu Minitab

Níže je uvedena tabulka s výslednými p-hodnotami Grubbsova testu odlehlých hodnot pro všechny naměřené soubory dat.

Tabulka 9.2 Výsledné p-hodnoty Grubbsova testu outlierů

| Číslo vzorku | p-hodnota testu outlierů | | | | | |
|--------------|--------------------------|-----|-------|----|-------|-------|
| | Rp | Rv | Rz | Ra | Rδc | RSm |
| Vzorek 1 | 0,01 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Vzorek 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,002 |
| Vzorek 3 | 1 | 0,6 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Vzorek 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Vzorek 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Vzorek 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Vzorek 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,981 | 1 |
| Vzorek 8 | 0,011 | 1 | 0,163 | 1 | 1 | 1 |
| Vzorek 9 | 0,501 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Vzorek 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,981 | 1 |

Jak již bylo zmíněno, hladina významnosti byla nastavena na $\alpha = 0,05$. Teorie hypotéz byla v tomto případě stanovena následovně:

- H_0 : Všechny hodnoty dat pocházejí ze stejného souboru.
- H_a : Nejmenší nebo největší hodnota je hrubou chybou.

Pokud je výsledná p-hodnota Grubbsova testu vyšší, než 0,05, nezamítáme položenou nulovou hypotézu H_0 a tvrdíme, že všechna data pochází z tohoto souboru. To vše s pravděpodobností 95 %.

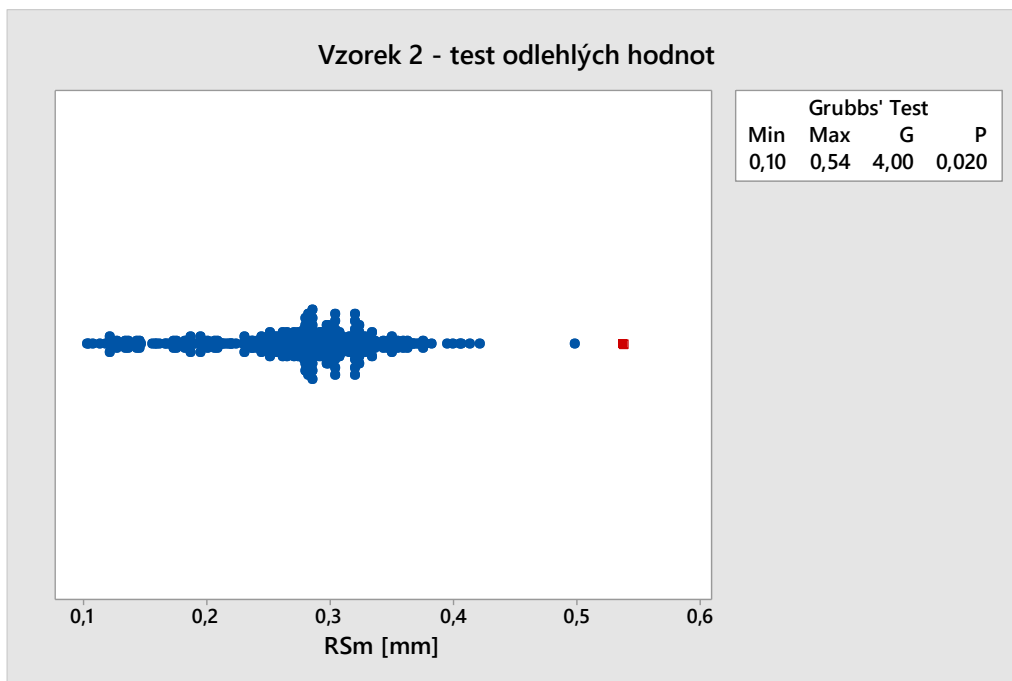
V testovaných datech se vyskytly soubory, jejichž výsledná p-hodnota byla nižší než 0,05. V tomto případě zamítáme nulovou hypotézu ve prospěch alternativní hypotéza H_a a s pravděpodobností 95 % tvrdíme, že se v datech vyskytují hrubé chyby. Tyto hodnoty je třeba odstranit. Níže je dialogového okna vystřižen výstup s hodnotami, které Grubbsův test vyhodnotil jako hrubé chyby, obsahující název sloupce, řádek a hodnotu.

| Outlier | | |
|----------|-----|---------|
| Variable | Row | Outlier |
| Rp_1 | 371 | 52,860 |
| Rsm_2 | 373 | 0,581 |
| Rp_8 | 276 | 68,401 |

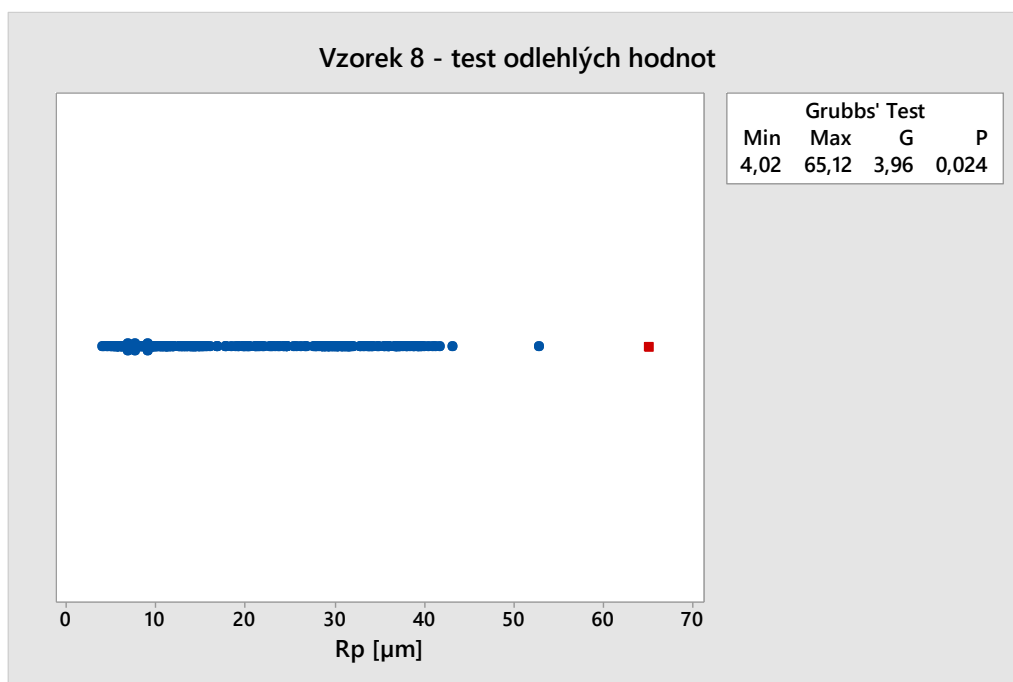
Obr. 9.6 Výstup Grubbsova tesu z programu Minitab

Grubbsův test dokáže při jedné iteraci odhalit pouze jednu hrubou chybu, proto je třeba jej zopakovat.

Opakovaný test odhalil, že se v datech ze souboru Rp_1 (parametr Rp vzorku číslo 1) nenachází žádné další hrubé chyby. Další dva dotčené soubory jsou zatíženy dalšími hrubými chybami. Je tak patrné i z grafického znázornění Grubbsova testu obou souborů níže.



Obr. 9.7 Výsledek Grubbsova testu s hrubou chybou pro parametr RSm pro vzorek č. 2



Obr. 9.8 Výsledek Grubbsova testu s hrubou chybou pro parametr Rp pro vzorek č. 8

Po odstranění hodnot označených Grubbsovým testem znázorněných v obrázcích výše byl test opakován. Výsledkem tohoto testu byla v obou posuzovaných případech p-hodnota vyšší než 0,05 a tím byla nezamítnuta nulová hypotéza, která tvrdí, že všechny hodnoty dat pocházejí ze stejného souboru.

Celkem tedy u souboru dat parametru drsnosti R_p vzorku číslo 1 proběhla jedna iterace a u dvou zbývajících vzorků číslo 2 a 8 s parametry R_{Sm} a R_p proběhly celkem dvě iterace Grubbsova testu odlehlých hodnot pro každý vzorek. Takové množství iterací Grubbsova testu v rámci několika málo jednotek je ze statistického hlediska zcela v pořádku.

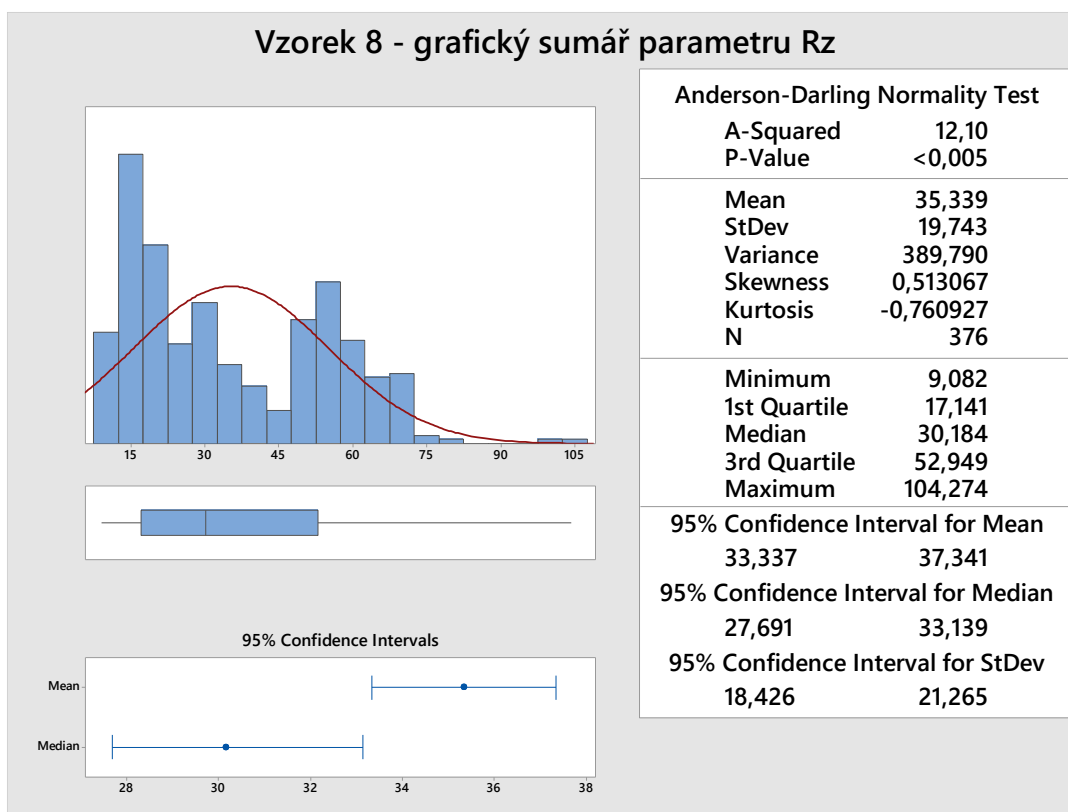
Nyní lze přistoupit k opakování testu normality u souborů s vyřazenými hrubými chybami.

Výsledkem opakovaného Anderson-Darlingova testu normality byly p -hodnoty nižší než 0,05 a tudíž závěrem testu tedy je, že žádný z testovaných souborů nenese znaky normálního rozdělení, a lze je tedy označit za soubory dat s jiným rozdělením než normálním, to vše s pravděpodobností $\alpha = 0,05$.

Jak již bylo řečeno výše, v datech vyskytující se hrubé chyby mohou způsobit takové zkreslení dat, že je pomocí testů vyvrácena jejich normalita. Ovšem ani po odstranění přítomných hrubých chyb nebylo rozhodnuto o normalitě dat, a tedy veškeré zkoumané soubory dat nemají normální rozdělení ani po odstranění hrubých chyb. 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.

9.3.3 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.



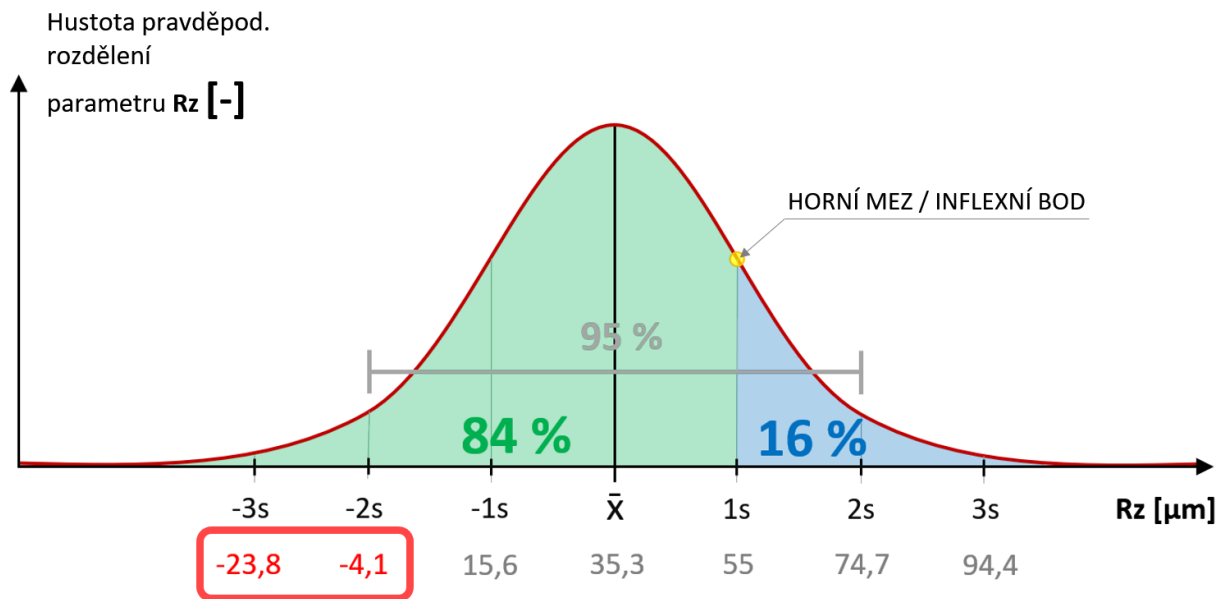
Obr. 9.9 Grafický sumář pro vzorek 8, parametr Rz z programu Minitab

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.

V kapitole 6.3 je popsáno pravidlo 16 %. To 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. 9.10 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.

9.4 Aplikace 3D parametrů na heterogenní povrch

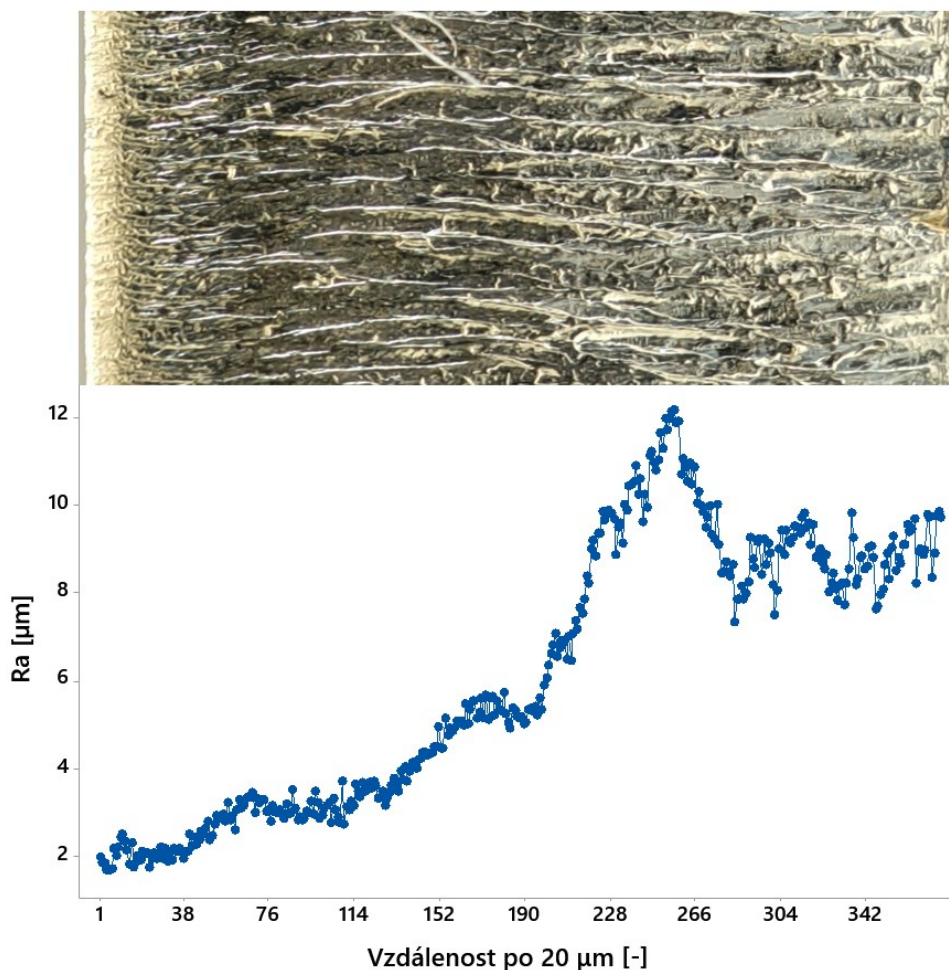
3D parametry drsnosti představují pokročilý přístup k hodnocení drsnosti povrchu, který poskytuje podrobnější a přesnější informace než tradiční 2D měření. Zatímco 2D parametry, jako Ra a Rz, zkoumají nerovnosti po linii – řezu, 3D parametry, jako Sa (aritmetický průměr výškových souřadnic v měřené ploše) a Sp (maximální výška vrcholu na měřené ploše), hodnotí povrch po celé (měřené) ploše povrchu. Takto rozšířené měření umožňuje lepší predikci povrchových vlastností, (například predikce opotřebení nebo adheze) a poskytuje komplexnější

a reálnější pohled na celkový stav povrchu. Tyto parametry jsou standardizovány v normě ČSN EN ISO 25178-2. [55]

Funkčnost 3D parametrů drsnosti je založena na předpokladu, že povrchové nerovnosti mají normální (Gaussovo) rozdělení. Tento předpoklad je nezbytný pro správné fungování výpočtových metod. Pokud povrch nemá normální rozdělení parametrů drsnosti, mohou být výsledky těchto výpočtů nesprávné nebo zavádějící. Výpočetní vzorce pro 3D parametry, jako jsou S_a (aritmetická střední výška) a S_p (maximální výška vrcholu) jsou totiž odvozeny za předpokladu normálního rozdělení, a jejich fyzikální význam a interpretace jsou platné pouze ve zmíněném kontextu.

Dalším problémem je, že korelační funkce, které popisují prostorové vlastnosti povrchu a jsou pro 3D parametry základem, mají pro svou správnou funkci opět předpokládanou normalitu, a tudíž pak nejsou přesné pro povrchy s jiným než normálním rozdělením. To může vést k nesprávným výsledkům popisu drsnosti zkoumaného povrchu, a tedy i k chybným výpočtům a interpretacím. Dále i prediktivní schopnost 3D parametrů drsnosti je založena na faktu, že posuzovaná data odpovídají normálnímu rozdělení; bez tohoto předpokladu mohou být predikce vlastností hodnocených povrchů nepřesné, což omezuje praktickou užitečnost těchto parametrů.

Z hlediska obecného hodnocení drsnosti povrchu je relativně nejzásadnější fakt, že by došlo ke kompletní ztrátě informací o průběhu změn v hodnotách drsnosti s rostoucí hloubkou řezu.



Obr. 9.11 Srovnání fotografie povrchu a grafu průběhu parametru Ra vzorku číslo 1

Na obrázku výše je přirovnání fotografie povrchu vzorku číslo 1 ke grafu průběhu hodnot drsnosti parametru Ra. Tyto cenné informace by byly za užití 3D parametrů drsnosti ztraceny.

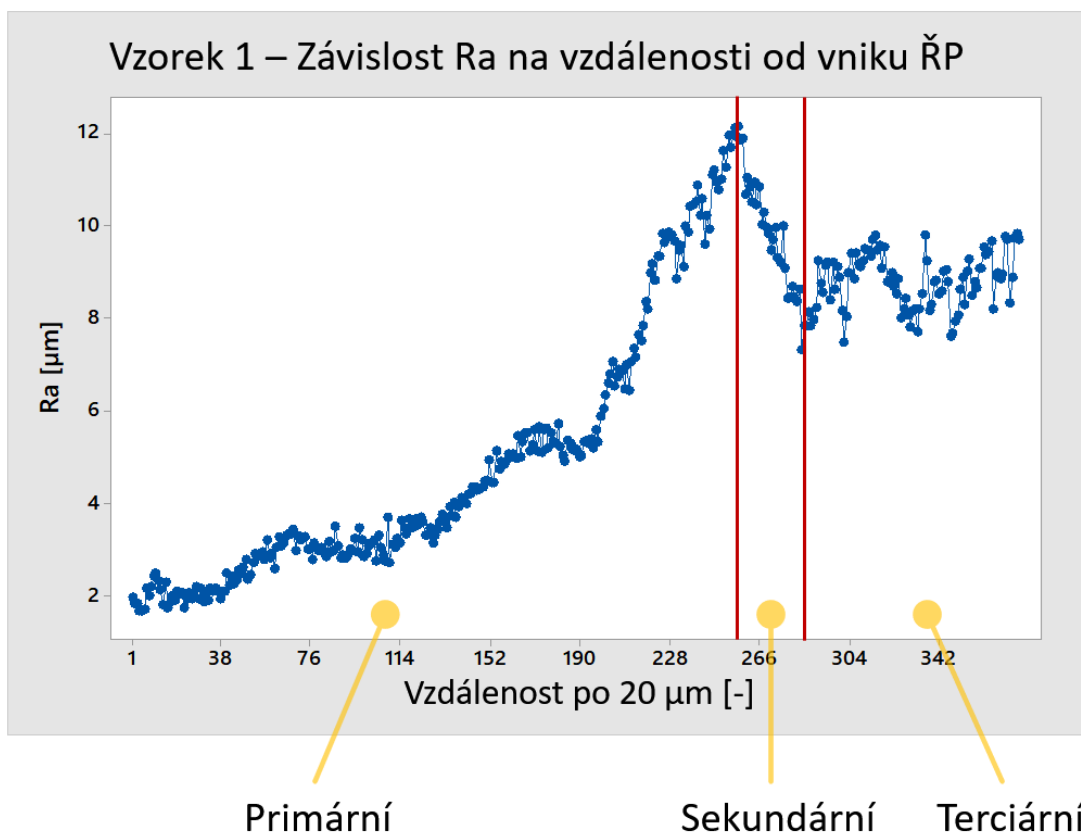
9.5 Analýza závislosti drsnosti povrchu na hloubce řezu

Zkoumáním grafů závislosti měřených parametrů byla potvrzena přítomnost tří oblastí heterogenních povrchů popsaných v kapitole 4.1. Tyto tři oblasti byly zaznamenány u parametrů Ra, Rp, Rv, Rz, a Rđc. Parametr RSm nevykazoval známky výskytu tří oblastí.

Parametr RSm se chová jinak, než ostatní získané parametry a vykazuje pouze vzestupný trend. Tento parametr popisuje průměrnou vzdálenost mezi jednotlivými prvky. Je tak patrné i z fotografií heterogenního povrchu, že se vzdálenosti mezi jednotlivými prvky postupně rozšiřují.

Ačkoliv je průběh dat parametru RSm odlišný od ostatních dat, i tak byla pomocí Anderson-Darlingova testu vyvrácena normalita a je třeba nalézt vhodný způsob pro hodnocení dat tohoto parametru.

Níže na obrázku je graf závislosti hodnoty parametru na vzdálenosti od vniku řezného paprsku již rozdělen na tři výše zmíněné oblasti.



Obr. 9.12 Rozdělení průběhu drsnosti na měřené ploše do tří oblastí

V grafu lze pozorovat vzestupný trend drsnosti s rostoucí vzdáleností od vniku řezného paprsku. Tato oblast byla nazvána *primární oblastí*, její počátek je v místě vstupu řezného paprsku do obrobku a vyznačuje se z počátku nejvyšší možnou kvalitou povrchu v rámci této jedné řezné operace a naopak na jejím konci nejnižší kvalitou. Paprsek vstupuje do obrobku se svou potenciální maximální energií, kterou postupně odevzdává do procesu řezání. Paprsek tak v počátku této oblasti nejúčinněji interaguje s materiálem a vytváří tak relativně čistý a hladký řez. Následně energii odevzdává do procesu řezání, tím oslabuje, a to vede až k nejvyšší dosažené drsnosti povrchu, jelikož v této oblasti je energie paprsku parciálně vyčerpána, což zapříčiňuje méně efektivní řezání a tím vyšší drsnost povrchu.

Sekundární oblast se vyznačuje klesající drsností. Tento jev se může zdát poněkud záhadný, ale vysvětlení je jednoduché.

V kapitole 3.1 byl popsán mechanismus úběru třísky operací laserového řezání. Hlavním činitelem úběru je tzv.: laserová ablace. Jedná se o proces, kdy je energie koncentrována v malém bodě, pohlcena obrobkem a následně přeměněna na teplo. Teplota v místě kontaktu paprsku s obrobkem naroste velmi rychle do té

míry, že je materiál přímo odpařen. Jakmile je ale tato energie, způsobující tak významný nárůst teploty, postupně odevzdávána, není jí pak dostatek k tomu, aby materiál odpařila a „pouze“ jej roztaví.

Roztavený materiál je poté rozháněn v místě řezu, vyplňuje hluboké rýhy a opětovně tuhne. To způsobuje snížení drsnosti, jelikož jsou hluboké rýhy zaplněny.

Sestupný trend lze vysvětlit tím, že vymizení laserové ablace z procesu řezání není skokové. Energie se spolu s postupujícím paprskem v obrobku ztrácí graduálně a ne skokově. Tudíž dochází k postupnému snižování množství energie, které „postačí“ pro laserovou ablaci. To až dokud se proces nedostane do bodu, kdy už laserová není možná, jelikož není dostatek energie pro odevzdání do mechanismu odpařování materiálu – jinak řečeno, ani pro jednu jeho molekulu.

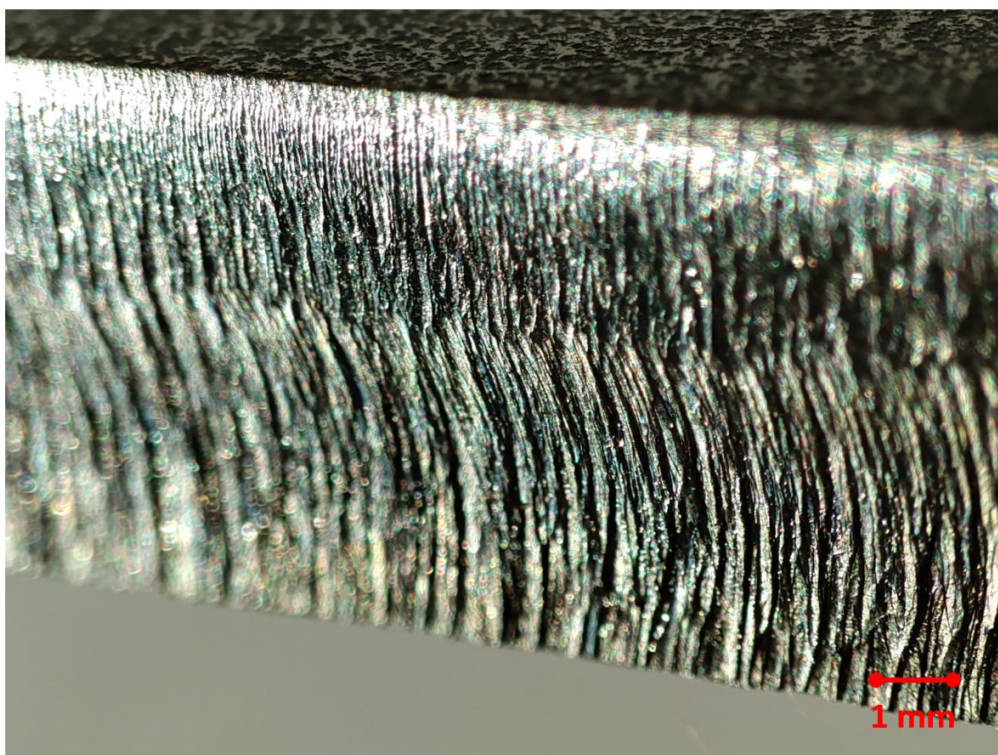
Pro *terciární oblast* je charakteristická relativně konstantní drsnost s hloubkou řezu. Patrně zde dochází pouze k tavení materiálu a jeho opětovnému tuhnutí na stěnách řezu. Stěny již nemají tak vysokou teplotu, a proto k opětovnému tuhnutí dochází mnohem snáze. Paprsek, natolik vychylován a odrážen o stěny v řezu, má pak tendenci vyhlazovat a vytvářet tak povrch, na kterém již nedochází k výraznějším změnám drsnosti s hloubkou řezu.



Obr. 9.13 Fotografie heterogenního povrchu z mikroskopu

Na obrázku 9.13 je vyobrazen jev, který byl pozorován při zkoumání povrchu vzorků pod mikroskopem. Je zde patrná náhlá změna směru rýh. Fenomén nebyl zjevný z fotografií provedených při kontrole vzorku před samotným měřením,

ovšem jakmile byl vzorek vhodně pootočen a nasvícen, byl patrný velmi jasně. Níže na obrázku je možné jej vidět z větší vzdálenosti.



Obr. 9.14 Heterogenní povrch

Tato náhlá změna směru může být způsobena několika faktory souvisejícími s interakcí laserového paprsku s materiálem. Jedním z nich je difrakce paprsku, ke které dochází při jeho průchodu ve větší hloubce řezu. Okraje v řezu mohou fungovat jako bariéry a to způsobuje rozptyl a ohyb paprsku, což způsobuje změnu jeho směru a následně změnu směru rýh v řezu. Dalším faktorem mohou být tepelné deformace způsobené velmi intenzivním zahříváním materiálu během řezání laserem. Vlivem takového tepla se může struktura materiálu místy deformovat, což mění tvar a šířku řezu a ovlivňuje směr paprsku a ze směru paprsku plynoucích rýh. Kromě toho může odraz paprsku od stěn drážky způsobovat jeho opakovaná interakce s materiálem. Tyto odrazy mění úhel šíření paprsku a mohou vést k interferenci a tím následně k dalšímu zahřívání drážky.

9.6 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 nenese 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.

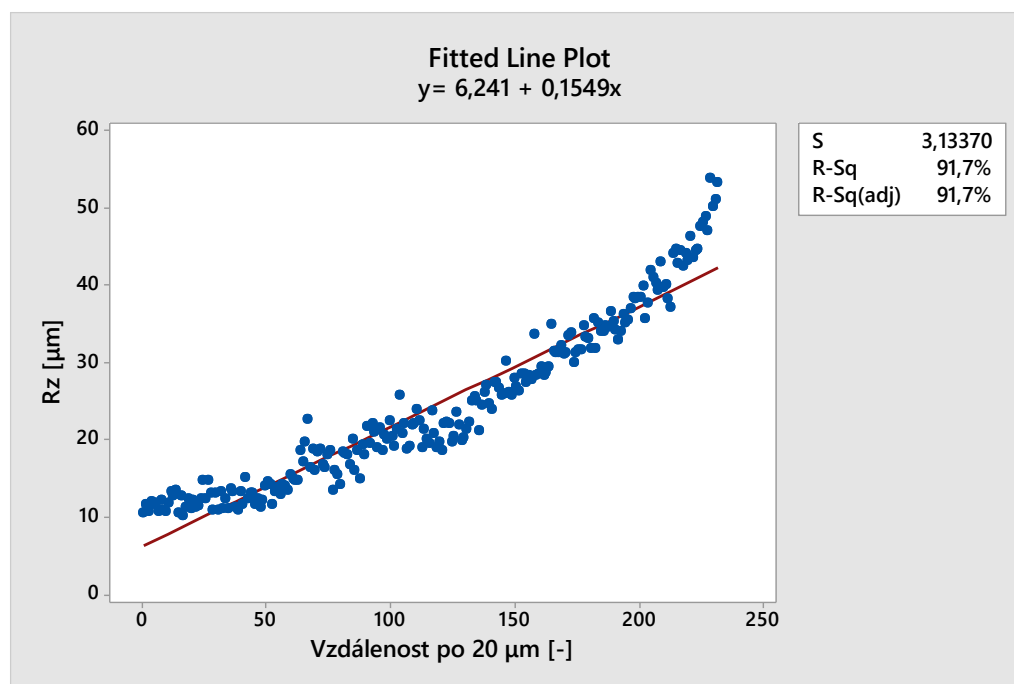
V následujících kapitolách jsou popsány možnosti pro hodnocení drsnosti heterogenního povrchu a jejich následné zhodnocení.

9.6.1 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 R_a , R_p , R_v , R_z , a $R_{\delta c}$, jelikož parametr R_{Sm} neobsahuje tři zmíněné oblasti.

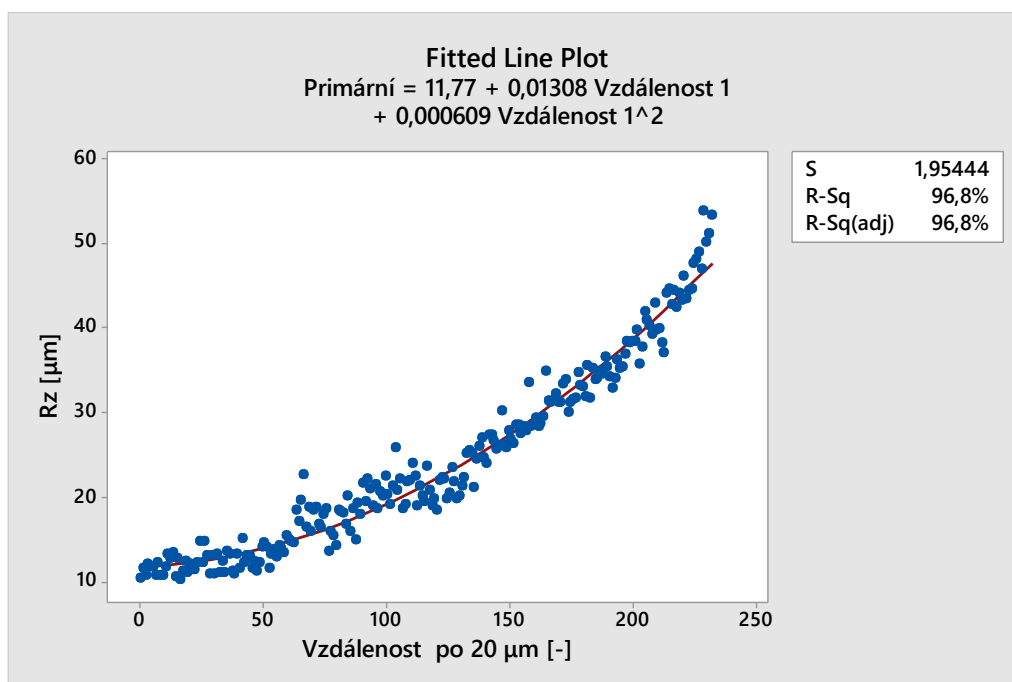
Míru dosažené těsnosti proložení dat regresní křivkou lze posoudit podle hodnot regresního rabatu $R-Sq(adj)$ nalezené regresní křivky. Čím blíže je tato hodnota 100 %, tím lepší proložení bylo získáno.

Nejdříve nalezneme vhodný regresní model pro primární oblast. Níže na obrázku je výsledné proložení z programu Minitab pro parametr R_z , vzorku číslo 4.



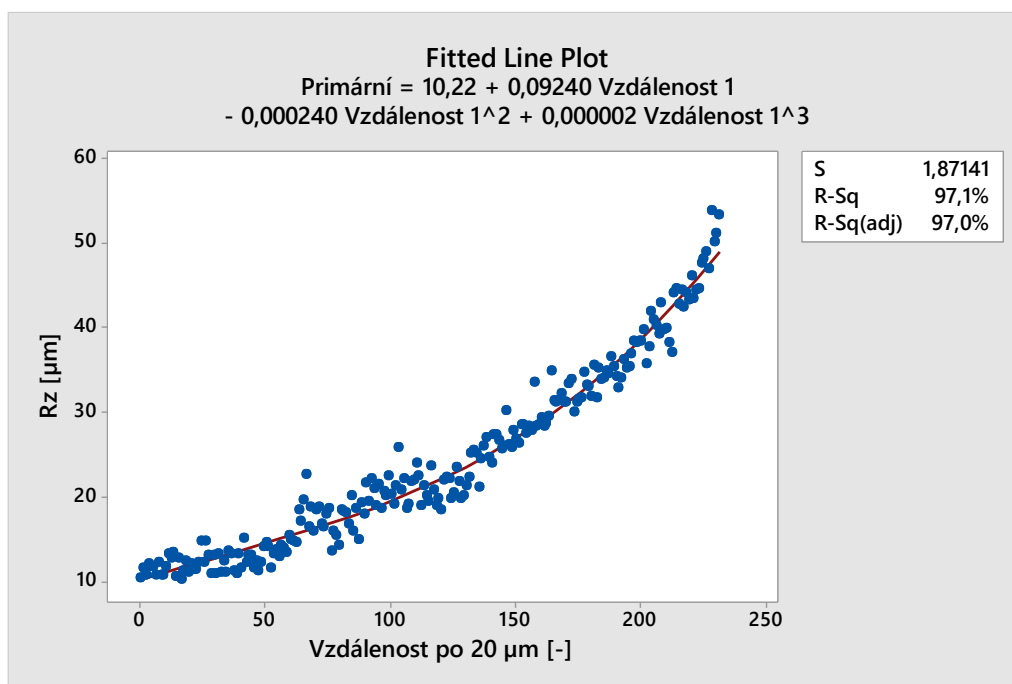
Obr. 9.15 Vzorek 4, R_z , proložení primární oblasti polynomem I. stupně

Hodnota regresního rabatu je 91,7 %, což je přijatelná hodnota. Ovšem z pohledu na proložení dat přímkou je patrné, že průběh dat bude lépe popsán polynomem II. či III. stupně.



Obr. 9.16 Vzorek 4, Rz, proložení primární oblasti polynomem II. stupně

Z výsledné hodnoty regresního rabatu, která narostla o 5,1 %, lze konstatovat, že polynom druhého stupně průběh dat v primární oblasti popisuje přesněji.



Obr. 9.17 Vzorek 4, Rz, proložení primární oblasti polynomem III. Stupně

Na základě výsledků z grafu výše, stoupla hodnota regresního rabatu při proložení dat polynomem III. stupně o 0,2 %. Vzhledem k hodnotám drsnosti a jejich rozsahu je tato hodnota zanedbatelná.

Nyní je třeba zhodnotit, zdali je volený model významný. To bude provedeno ve statistickém programu QC Expert.

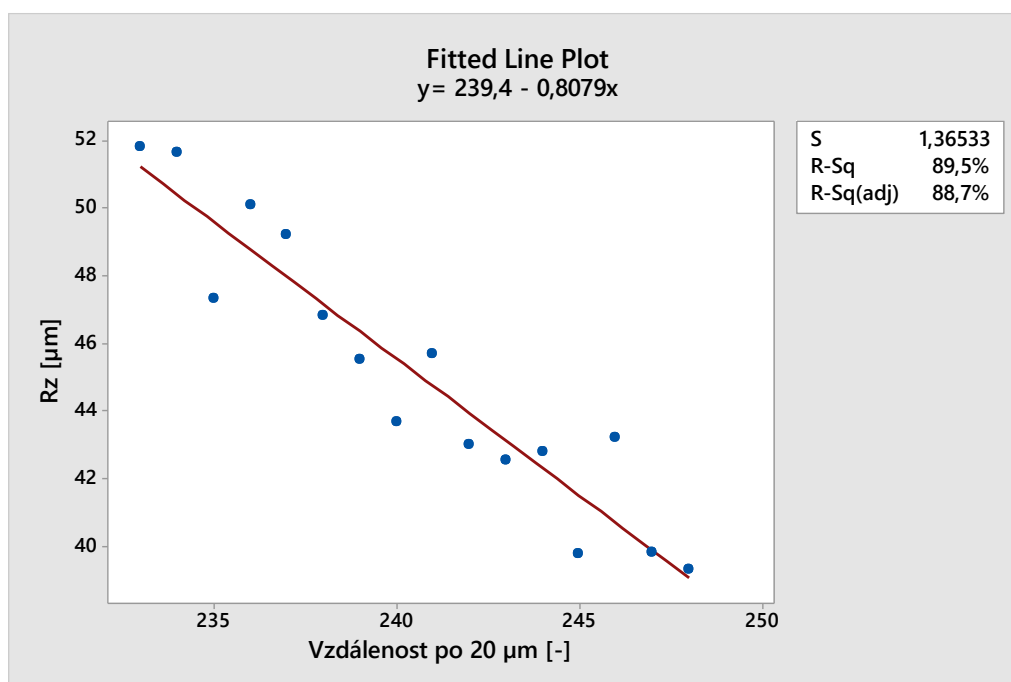
| | |
|-------------------------------------------|-------------------|
| Fisher-Snedecoruv test významnosti modelu | |
| Hodnota kritéria F : | 2516.515632 |
| Kvantil F (1-alfa, m-1, n-m) : | 2.644194479 |
| Pravděpodobnost : | 0 |
| Záver : | Model je významný |

Obr. 9.18 Testování významnosti použitého modelu v programu QC Expert

Výsledkem Fisher-Snedecorova testu bylo potvrzení významnosti modelu.

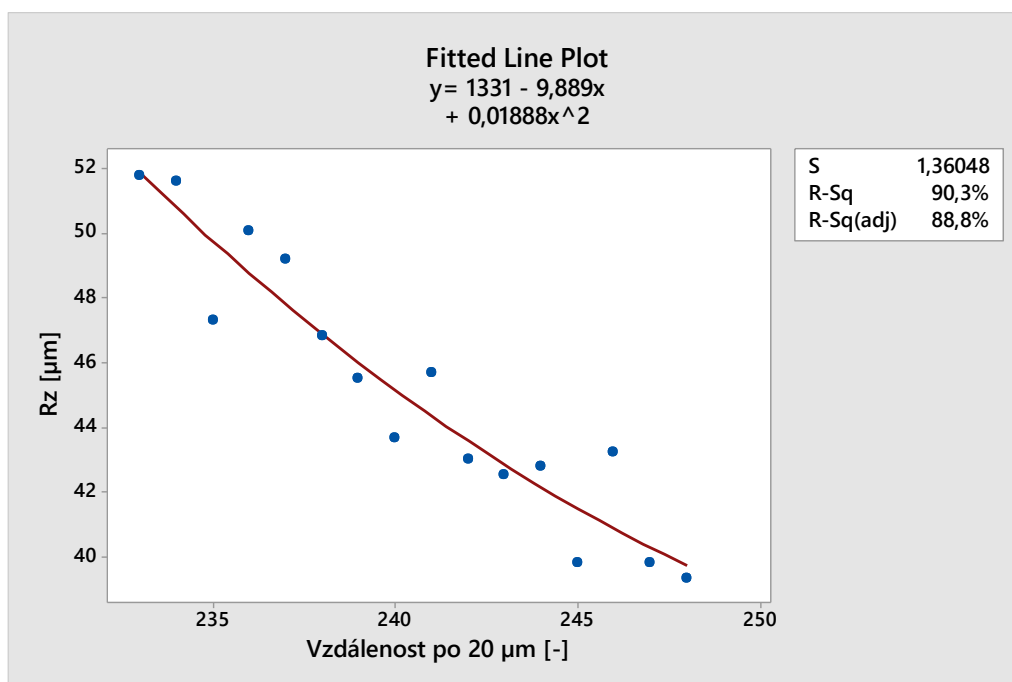
Závěrem tedy je, že pro popis průběhu dat primární oblasti je po zhodnocení výsledků vhodné proložení dat polynomem II. stupně. Ačkoliv je polynom III. stupně nejpřesnější, je nutné metodiku optimalizovat a volit řešení nejen přesná, ale také v poměru ku přesnosti ne příliš náročná a složitá, aby bylo v co nejvyšší míře eliminováno riziko vzniku chyb vlivem lidského faktoru.

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



Obr. 9.19 Vzorek 4, Rz, proložení sekundární oblasti polynomem I. stupně

Hodnota regresního rabatu v poměru omezeného počtu dat se při proložení dat polynomem I. stupně jeví jako dostačující. V následujícím grafu je zobrazeno proložení polynomem druhého stupně pro ověření dostatečnosti prvního pokusu.



Obr. 9.20 Vzorek 4, Rz, proložení sekundární oblasti polynomem II. stupně

Regresní rabat v případě proložení dat ze sekundární oblasti stoupl o pouhé 0,1 % a tím je potvrzeno, že pro hodnocení sekundární oblasti je nejvhodnější polynom I. stupně.

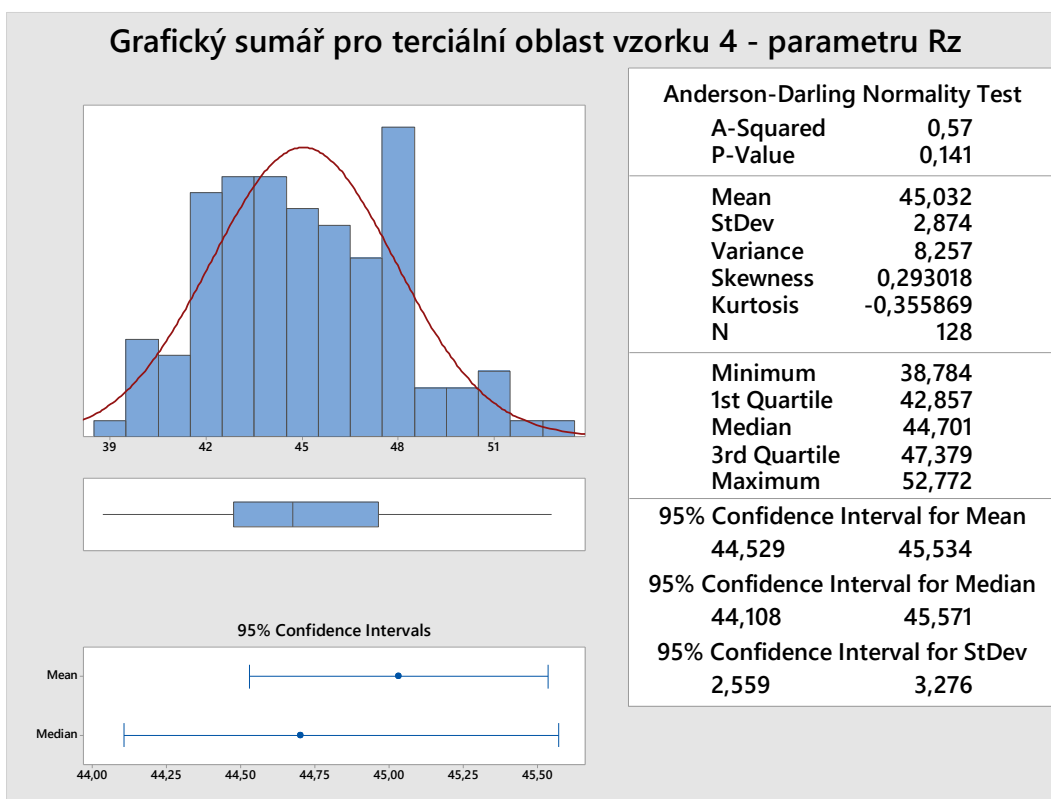
Totéž bylo potvrzeno i v programu QC Expert, kde byla významnost modelu potvrzena pomocí Fisher-Snedecorova testu.

| | |
|-------------------------------------------|-------------------|
| Fisher-Snedecoruv test významnosti modelu | |
| Hodnota kritéria F : | 60.49329815 |
| Kvantil F (1-alfa, m-1, n-m) : | 3.805565253 |
| Pravdepodobnost : | 2.598561408E-007 |
| Záver : | Model je významný |

Obr. 9.21 Testování významnosti použitého modelu v programu QC Expert

Závěrem tedy je, že pro popis průběhu dat sekundární oblasti je po zhodnocení výsledků vhodné proložení dat polynomem I. stupně.

Terciární oblast se jeví být rozdělena Gaussovsky – normálně. Proto bude prvním krokem otestování normality. Pro tento účel byl zvolen grafický sumář v programu Minitab.



Obr. 9.22 Grafický sumář pro terciální oblast vzorku 4 – parametru Rz

Výsledkem Anderson-Darlingova testu bylo potvrzení normality v terciální oblasti, a proto je na tuto oblast možné použít klasických statistických metod. To bylo potvrzeno i u zbytku zkoumaných datových souborů.

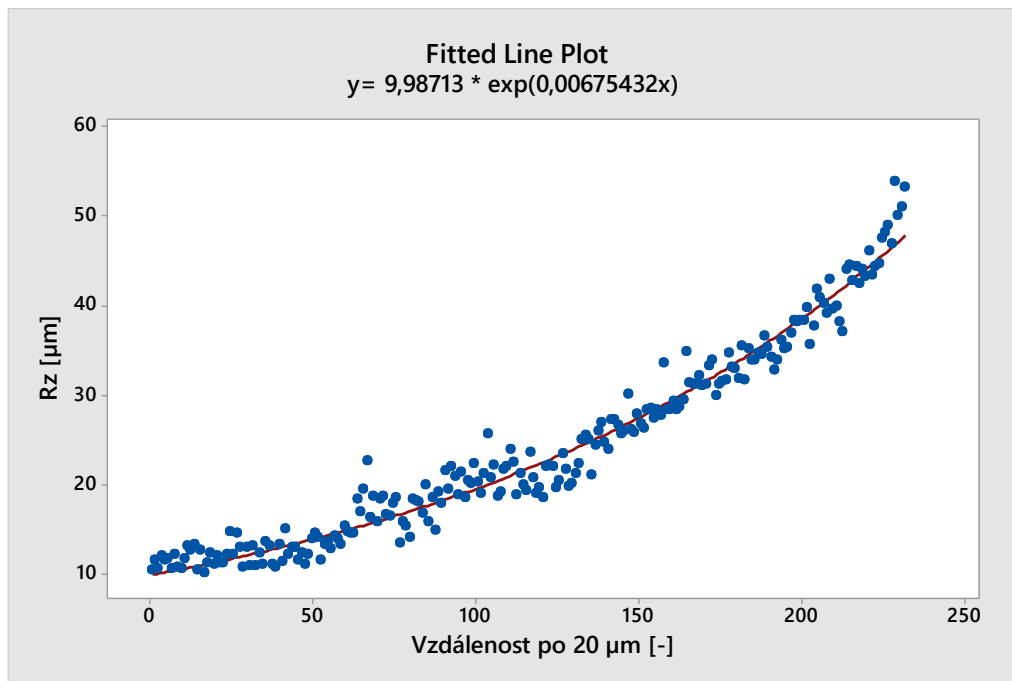
Pro parciální popis průběhu drsnosti heterogenního povrchu je nutné jej rozdělit do tří oblastí, které budou popisovány odděleně. Pro primární oblast, kdy dochází k nárůstu drsnosti až do globálního maxima, se jeví jako nejvhodnější použít polynom II. stupně. Pro sekundární oblast, která má od globálního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

9.6.2 Popis průběhu pomocí parciální nelineární regrese pro primární oblast

Jak již bylo řečeno výše, 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. 9.23 Vzorek 4, Rz, proložení primární oblasti exponenciální funkcí

Z grafu je patrné, že by exponenciální funkce mohla přijatelně popisovat data. Je ale nutná kontrola výsledných hodnot regrese z programu Minitab.

| Summary | |
|------------|---------|
| Iterations | 22 |
| Final SSE | 848,149 |
| DFE | 230 |
| MSE | 3,68760 |
| S | 1,92031 |

Obr. 9.24 Výsledné hodnoty nelineární regrese

První výslednou hodnotou je počet iterací. V našem případě je to 22 iterací. Tato hodnota znamená, kolik iterací potřeboval algoritmus, aby vyhledal nejvhodnější řešení. 22 iterací je obvykle přijatelný počet a naznačuje, že algoritmus nebyl nijak extrémně zatěžující.

Druhou hodnotou je tzv: součet čtverců chyb. Jedná se o míru rozptylu dat kolem použité regresní křivky. Čím nižší je hodnota, tím lépe model odpovídá datům. Posouzením rozsahu dat lze hodnotu chyby považovat za přijatelnou.

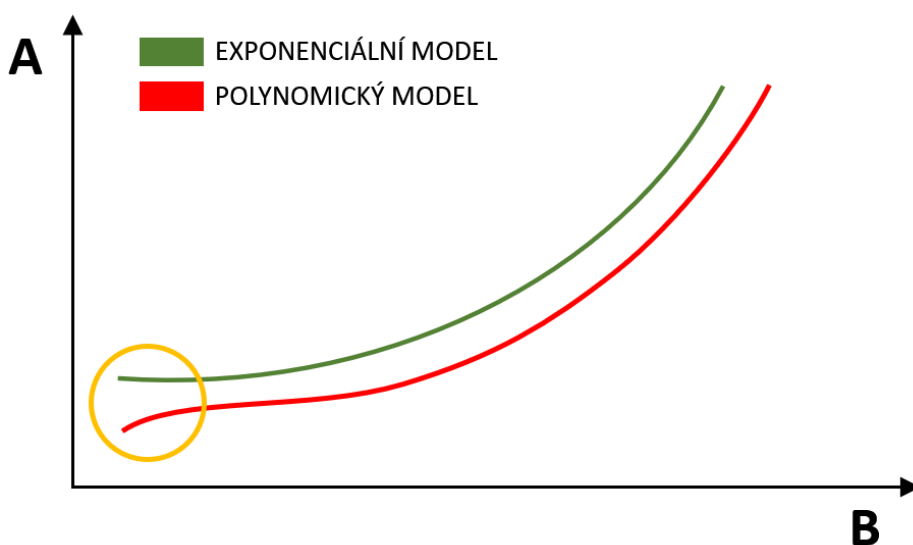
Třetím získaným údajem je počet stupňů volnosti pro chyby. Je to počet pozorování (počet hodnot) minus počet parametrů modelu. Vysoká hodnota naznačuje dostatečný počet hodnot vzhledem k počtu parametrů, které jsou odhadovány.

Čtvrtým údajem je střední kvadratická chyba. Jedná se o průměrnou chybu na jeden datový bod. Jedná se tedy o podíl součtu čtverců chyb a počtu stupňů volnosti pro chyby. Čím nižší tato hodnota je, tím lépe použitý model popisuje data. Výslednou hodnotu 3,69 lze považovat za přijatelnou.

Posledním získaným údajem je standardní chyba regrese. Jedná se o průměrnou predikční chybu a výsledná hodnota opět naznačuje, že je model přijatelný.

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 obrázku níže.



Obr. 9.25 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 model exponenciální.

Použití exponenciální křivky umožňuje lépe přizpůsobit model skutečným datům. Výsledky této analýzy ukazují, že exponenciální model poskytuje velmi přesný popis dat, což je také prokázáno nízkou chybou modelu. Tato nízká chyba

znamená, že rozdíl mezi predikovanými hodnotami a skutečnými pozorovanými hodnotami je minimální, což naznačuje vysokou přesnost modelu.

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 skutečně odpovídá datům. Grafické vyjadřování je v tomto procesu velmi důležité, jelikož zobrazení dat umožňuje lépe rozpoznat vzory, trendy nebo anomálie, které mohou být v datech jinak přehlédnuty.

Závěrem je ale také třeba říct, že při výběru vhodného modelu je důležité zvážit nejen výsledné hodnoty regrese, jako je počet iterací nebo střední kvadratická chyba, ale také praktičnost, jako je 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.

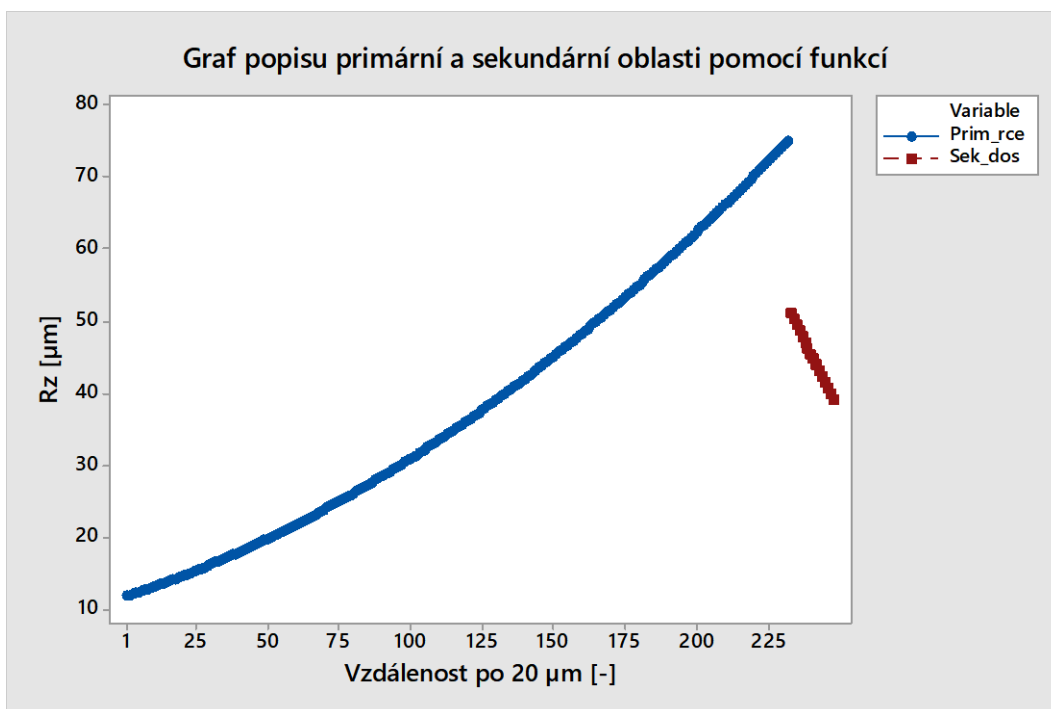
9.6.3 Souhrnný popis průběhu pomocí nelineární regrese

Nejvhodnějším řešením by se při souhrnném popisu průběhu drsnosti jevílo použití jedné funkce opisující celý průběh dat. Ovšem vzhledem ke složitosti průběhu dat, neexistuje funkce, která by jej přesně popsala o odpovídala jemu.

Z toho důvodů je nutné průběh dat rozložit do několika úseků, na každý z nich použít vhodnou funkci a následně tyto funkce spojit.

V případě dat získaných řezáním laserového paprsku se bude jednat o rozdělení na tři již zmíněné oblasti.

Problém ale nastává již u spojení prvních dvou úseků. Dosazení do příslušných funkcí a vynesení na společný graf je znázorněno v následujícím obrázku.



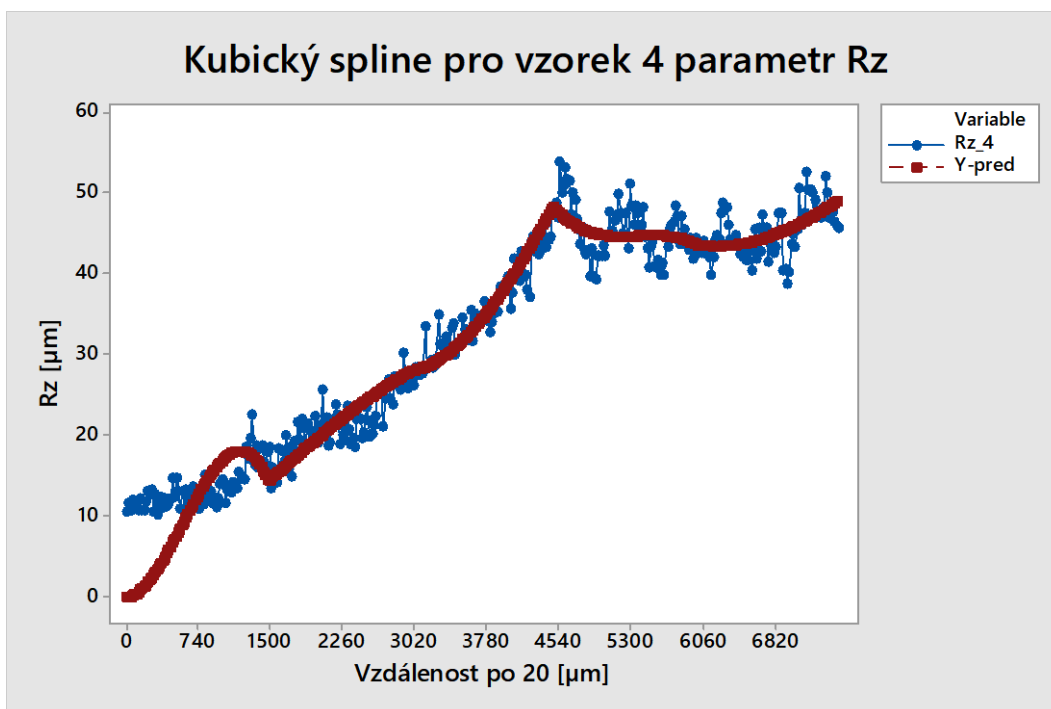
Obr. 9.26 Graf popisu primární a sekundární oblasti pomocí funkcí pro vzorek 4 parametr Rz

Z grafu je jasně patrné, že nedošlo ke konjunkci výsledných hodnot z popisných funkcí a je zde patrný značný rozdíl v predikované koncové hodnotě primární oblasti a počáteční hodnotě sekundární oblasti. Z tohoto důvodu je takové řešení nevhodné.

Možností, jak se s tímto problémem vypořádat, je například funkce kubického splinu dostupný v programu QC Expert.

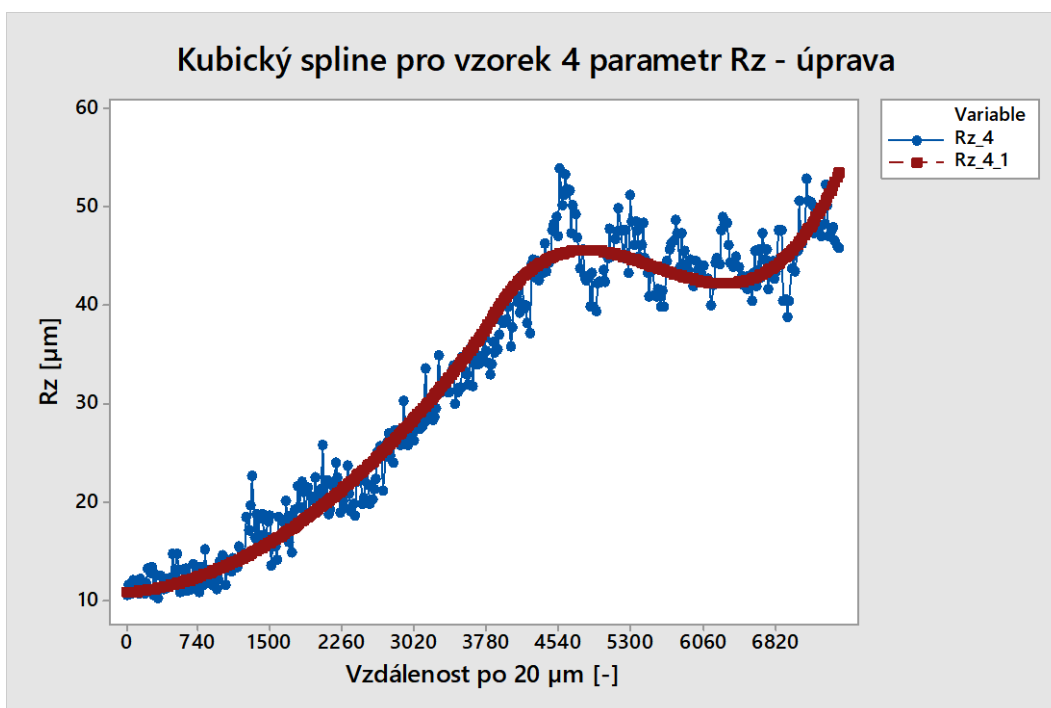
Tento nástroj rozdělí data do zvoleného počtu úseků, které jsou spojeny uzly. Tyto uzly jsou poté proloženy kubickými polynomy a jsou v každém bodě spojitě, dokonce i mezi jednotlivými úseky.

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 5.



Obr. 9.27 Proložení vzorku 4 parametru Rz kubickým splinem

Z grafu výše je patrné, že nástroj kubického spline popisuje průběh dat obstojně. Ovšem s výjimkou počáteční oblasti. To může být způsobeno například nevhodně stanoveným počtem uzlů. Tento počet byl upraven a postup opakován s výsledkem uvedeným v obrázku níže.



Obr. 9.28 Proložení vzorku 4 parametru Rz kubickým splinem (úprava)

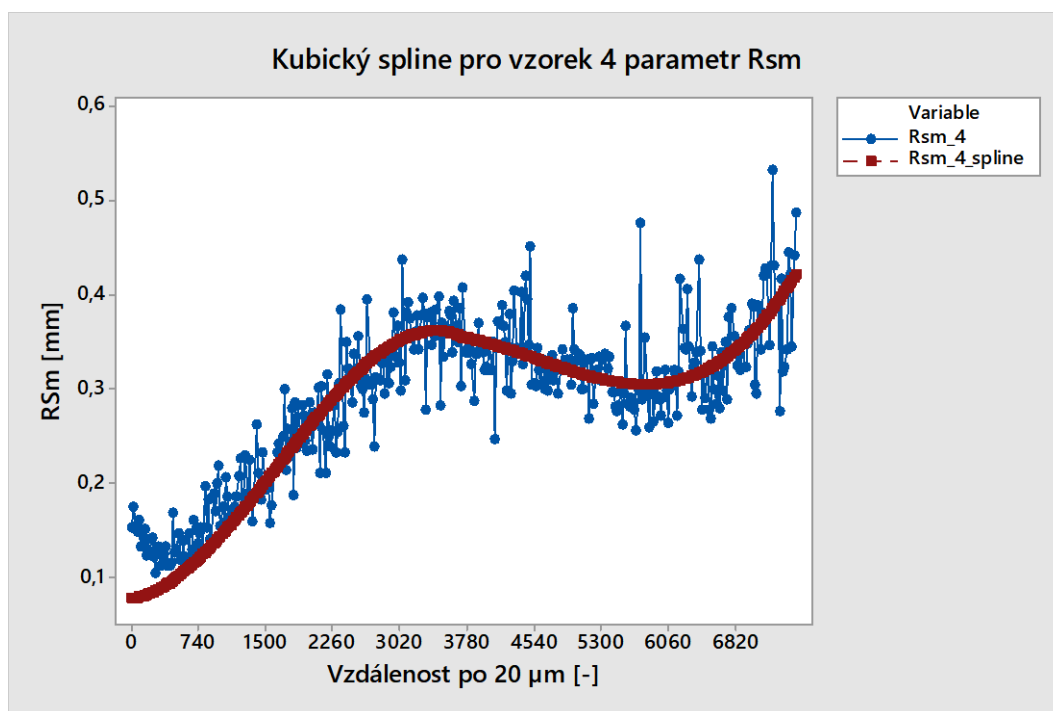
Pro nejpřesnější popis dat byla po několika pokusech zvolena hodnota dvou úseků čili jeden uzel. Volba počtu uzlů je velmi důležitá, jelikož u tohoto nástroje významně ovlivňuje konečnou interpolaci.

Níže v tabulce jsou uvedeny parametry kubických polynomů pro jednotlivé úseky.

Tabulka 9.3 Parametry modelu pro vzorek 4, parametr Rz

| Parametry modelu pro vzorek 4, Rz | | | | | |
|-----------------------------------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Číslo úseku | Počet dat | A (0) | A (1) | A (2) | A (3) |
| 1 | 188 | 0,078189 | 1,65E-05 | 6,28E-08 | -1,27E-11 |
| 2 | 188 | -0,24661 | 0,0004444 | -1,04E-07 | 7,56E-12 |

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



Obr. 9.29 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.

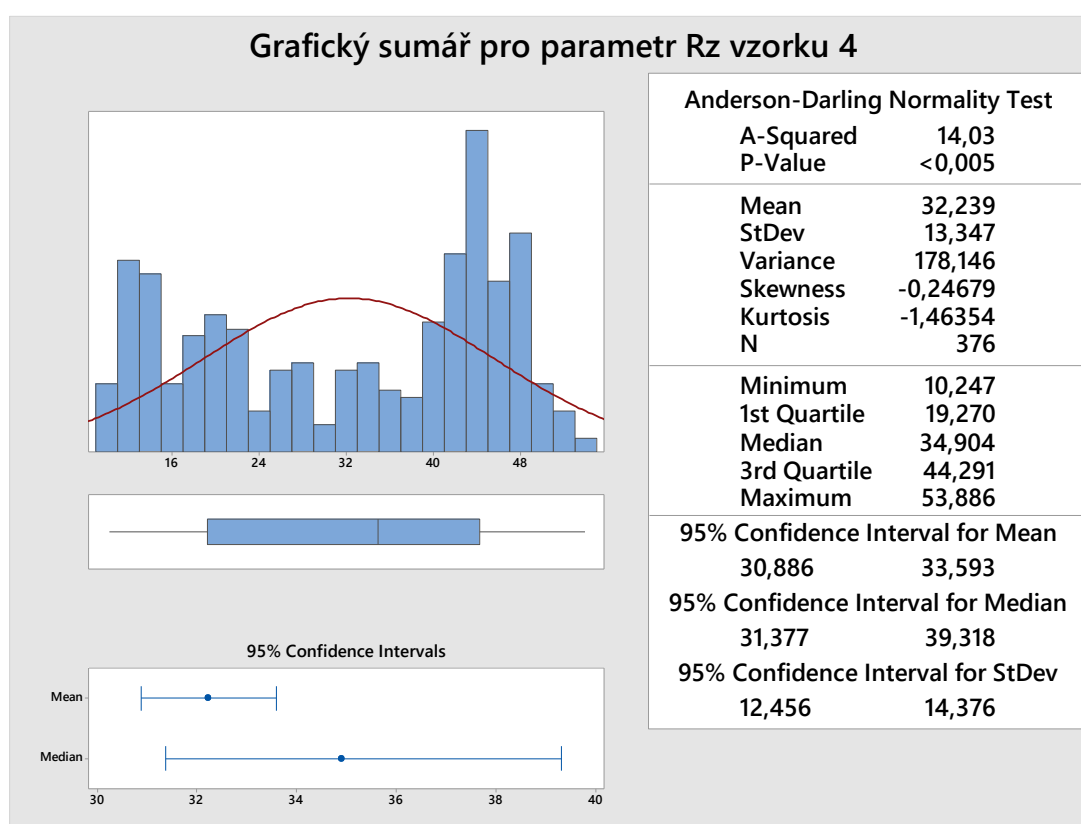
Níže v tabulce jsou uvedeny výsledné parametry pro jednotlivé úseky.

Tabulka 9.4 Parametry modelu pro vzorek 4, parametr RSm

| Parametry modelu pro vzorek 4, RSm | | | | | |
|------------------------------------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Číslo úseku | Počet dat | A (0) | A (1) | A (2) | A (3) |
| 1 | 188 | 10,86875 | 8,65E-04 | 1,68E-06 | -1,21E-11 |
| 2 | 188 | -318,058 | 0,2023917 | -3,70E-05 | 2,22E-09 |

9.6.4 Transformace dat

Pro to, aby byla zvolena vhodná transformace dat pro zkoumaný soubor je nutná jeho celková analýza a zhodnocení. Tu lze provést například pomocí grafického sumáře, který byl zmíněn v předchozích kapitolách.



Obr. 9.30 Grafický sumář pro parametr Rz vzorku 4

Na základě grafického sumáře a z něj konkrétně Anderson-Darlingovým testem, byla s výslednou p-hodnotou nižší než 0,05 vyvrácena normalita dat. To je v tomto případě motivací pro jejich transformaci, aby se data přiblížila normálnímu rozdělení. Pak, po potvrzení normality, na data mohou být použity statistické nástroje, které normalitu vyžadují.

Důležitým atributem pro výběr vhodné transformace je šikmost, v sumáři „skewness“, dat. Výsledek z grafického sumáře se blíží nule, což značí, že data

jsou přibližně symetricky rozdělena a nemají výrazný pravostranný, ani levostranný sklon.

Špičatost, v sumáři „*kurtosis*“, svou hodnotou -1,04653 značí, že data jsou rozdělena poněkud plošeji než běžná normální data. Data tak mají menší špičatost a kratší „ocasy“ na stranách, což je patrné i z grafického zobrazení dat histogramem a proložením Gaussiánou.

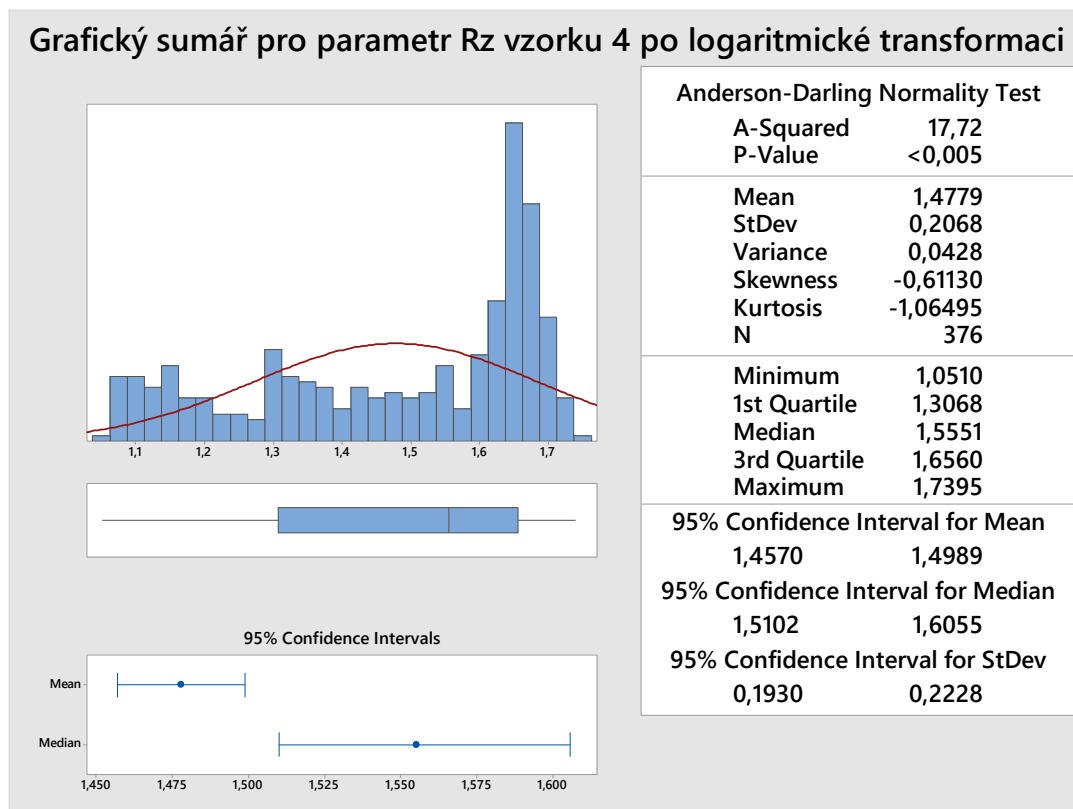
Vzhledem k charakteristikám dat by mohla být užitečná logaritmická transformace. Data sice nevykazují výrazný pravostranný sklon, ovšem tato transformace by mohla být užitečná, pokud by se v datech nacházely skryté pravostranné odchylky nebo extrémní hodnoty, které nejsou zřejmé na první pohled.

9.6.5 Logaritmická transformace

Logaritmická transformace byla provedena pro parametr obsahující tři oblasti v programu Minitab a to podle vztahu:

$$Y' = \log(Y + 1) \tag{8}$$

Pro vyhodnocení funkčnosti logaritmické analýzy byl v programu Minitab vyvolán grafický sumář pro transformovaná data.



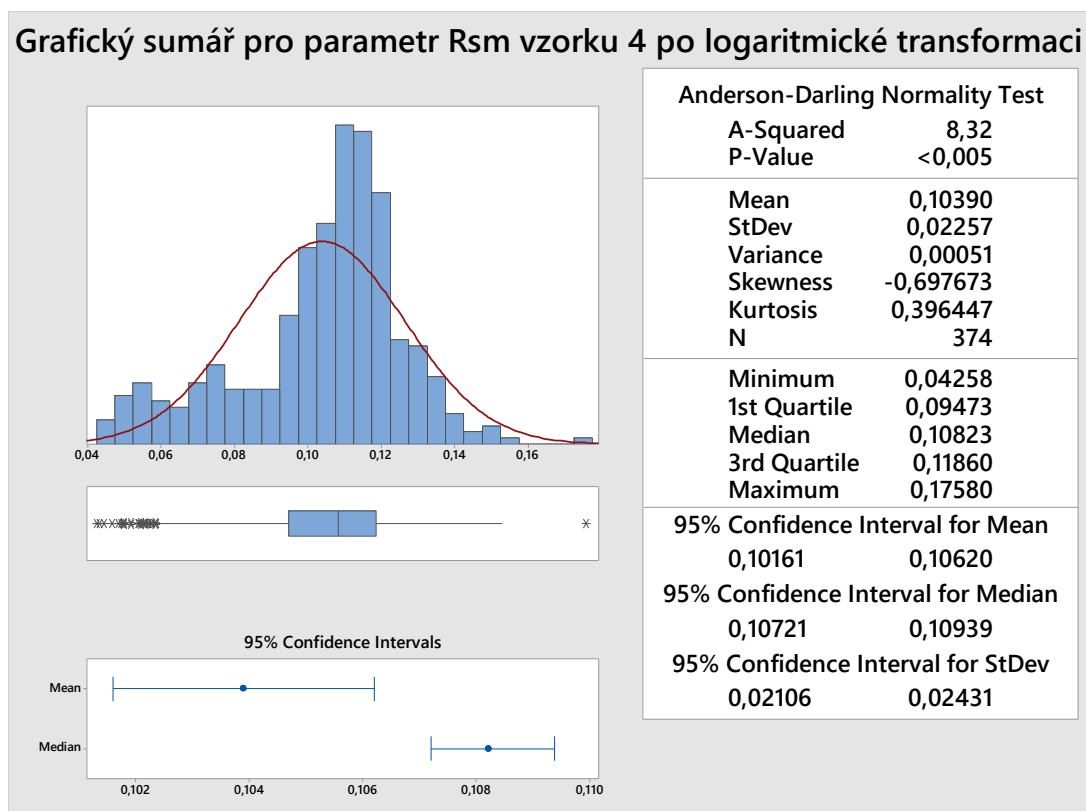
Obr. 9.31 Grafický sumář pro parametr Rz vzorku 4 po logaritmické transformaci

Na základě výsledků z grafického shrnutí lze konstatovat, že logaritmická transformace není vhodná pro tento typ dat.

Normalita byla Anderson-Darlingovým testem s p-hodnotou nižší než 0,05 vyvrácena. Zvýšila se také hodnota kvadratické chyby a konfidenční intervaly aritmetického průměru a mediánu nejsou v konjunkci.

Z výsledků je tedy patrné, že logaritmická transformace nepřinesla očekávané výsledky a je třeba zvážit provedení jiných transformací pro tento typ dat.

Nyní bude stejná transformace aplikována na data, ve kterých se oblasti nevyskytují, v našem případě parametr RSm. Transformace bude také provedena v programu Minitab dle vztahu číslo 8.



Obr. 9.32 Grafický shrnutí pro parametr RSm vzorku 4 po logaritmické transformaci

Ani při transformaci dat parametru RSm nebylo dosaženo normality – vyvrácena p-hodnotou nižší než 0,05 v rámci Anderson-Darlingova testu.

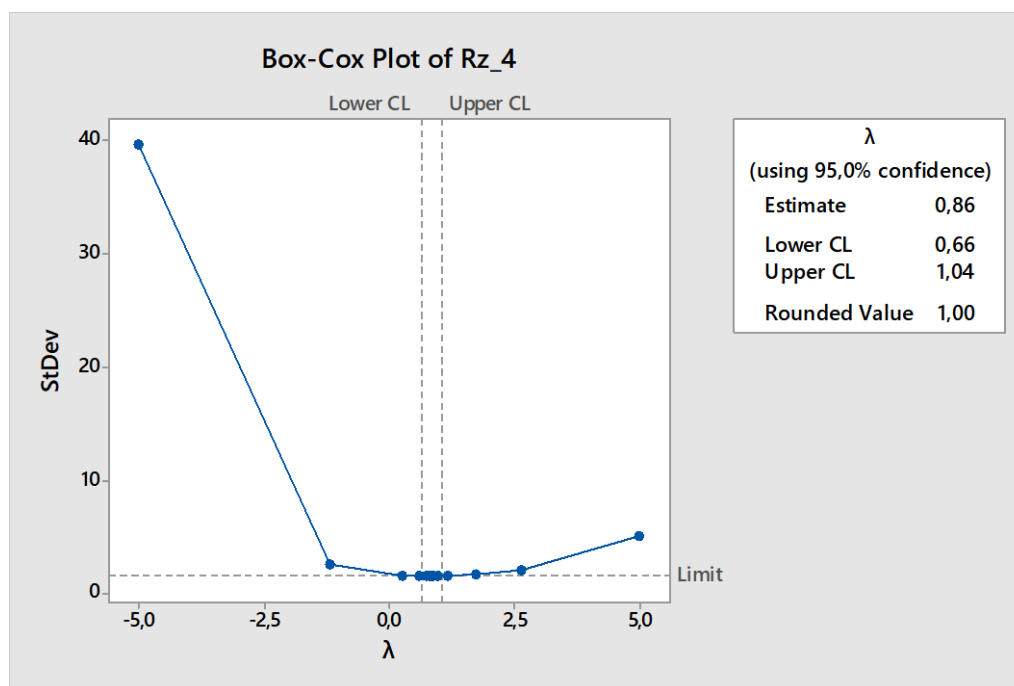
Další vhodnou transformací by mohla být Box-Coxova transformace. Tato transformace je, co se týče charakteru dat, velmi flexibilní. Vyžaduje pouze kladná data, což data zamýšlená k transformaci splňují.

9.6.6 Box-Coxova tranformace

Box-Coxova transformace byla provedena pro data se třemi oblastmi pomocí příkazu v programu Minitab, podle následujícího vztahu:

$$\begin{cases} \frac{Y^\lambda - 1}{\lambda} & \text{pro } \lambda \neq 0 \\ \log(Y) & \text{pro } \lambda = 0 \end{cases}$$

(9)



Obr. 9.33 Výstup Box-Coxovy transformace dat pro parametr Rz vzorku 4

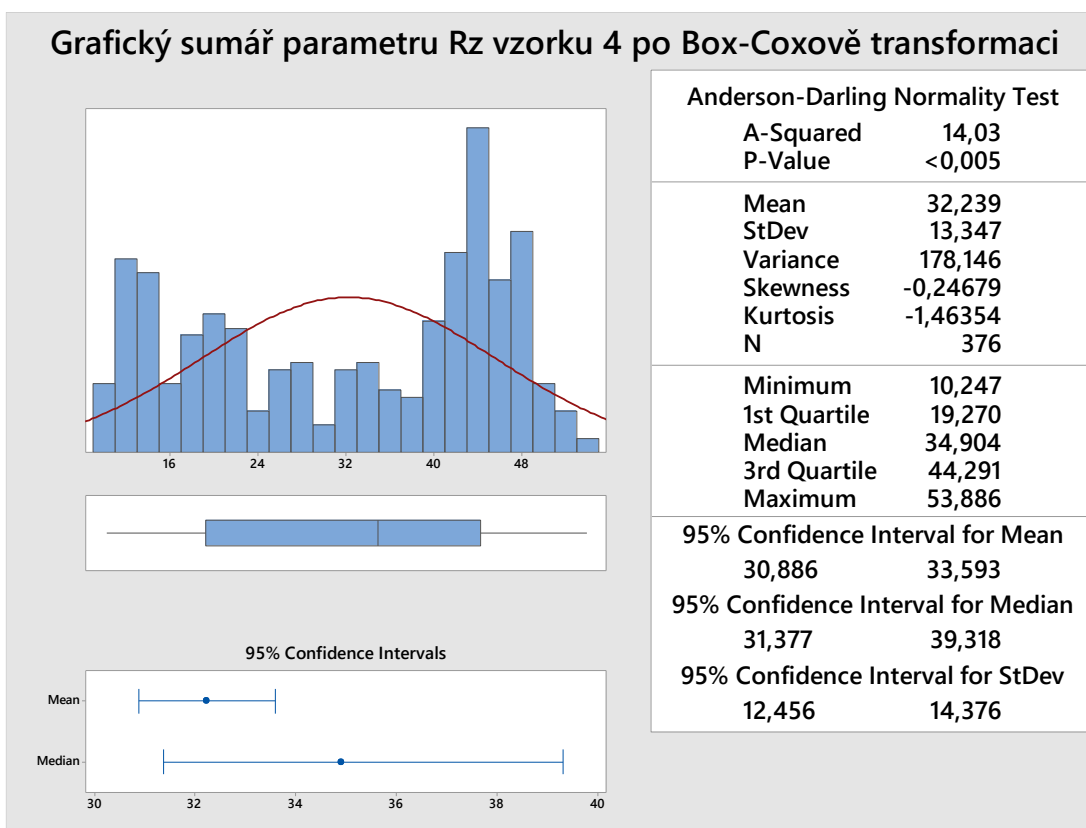
Výsledná hodnota lambda byla výpočtem v programu Minitab stanovena na 0,86. Po dosažení do rovnice a ověření absence nulových hodnot v souboru byla transformace provedena pomocí vztahu:

$$Y' = \frac{Y^{0,86} - 1}{0,86}$$

(10)

Dle byl vyvolán grafický sumář pro ověření funkčnosti datové transformace.

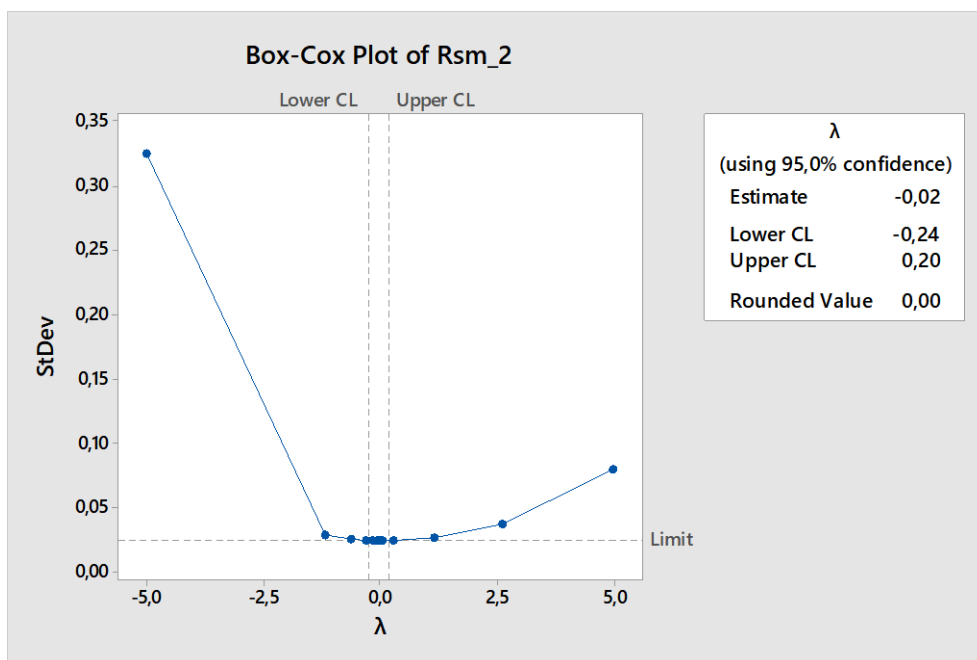
Grafický sumář parametru Rz vzorku 4 po Box-Coxově transformaci



Obr. 9.34 Grafický sumář parametru Rz vzorku 4 po Box-Coxově transformaci

Výsledky z grafického sumáře vyvrátili použitelnost Box-Coxovy transformace na zkoumaná data. Normalita byla vyvrácena Anderson-Darlingovým testem s p-hodnotou nižší než 0,05. Ačkoliv byla zachována částečná konjunkce konfidenčních intervalů aritmetického průměru a mediánu, ani tak nebylo dosaženo kýženého výsledku.

Dále byla provedena transformace dat parametru bez oblastí, a to parametru RSm. Byla provedena v programu Minitab, dle vztahu číslo 10.

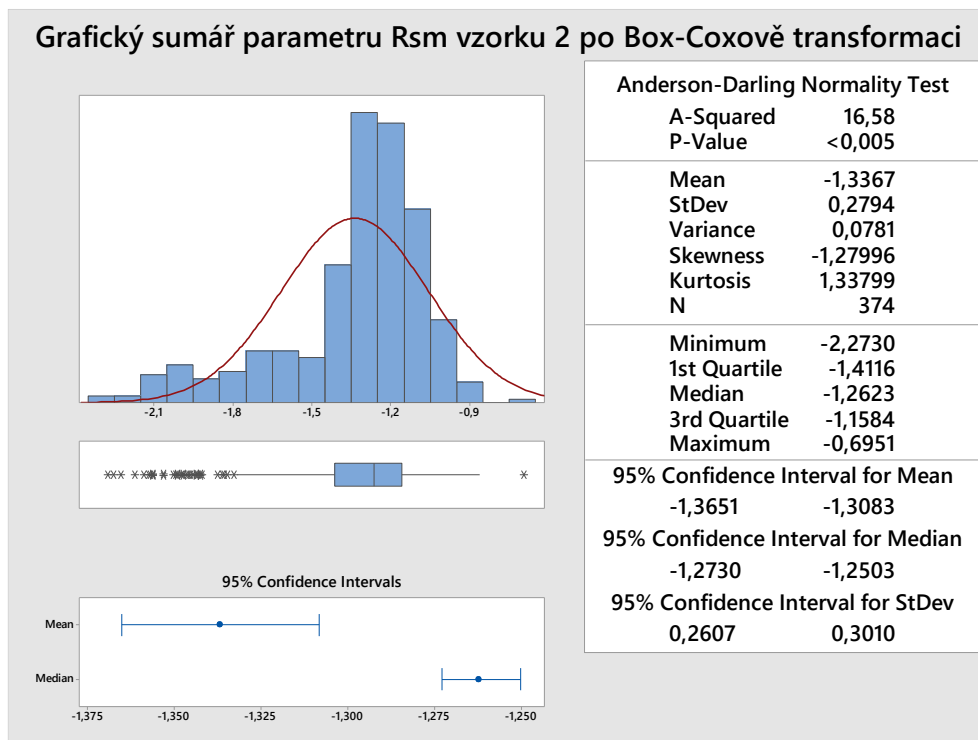


Obr. 9.35 Výstup Box-Coxovy transformace pro parametr RSm vzorku 2

Výsledná hodnota lambda byla dle programu Minitab stanovena na -0,02. Po dosazení do rovnice a následném ověření absence nulových hodnot ve zkoumaném souboru byla transformace provedena pomocí vztahu:

$$Y' = \frac{Y^{-0,02} - 1}{-0,02}$$

(11)



Obr. 9.36 Grafický sumář parametru RSm vzorku 2 po Box-Coxově transformaci

Bohužel, ani v tomto případě nebylo dosaženo požadovaného výsledku a normalita byla vyvrácena.

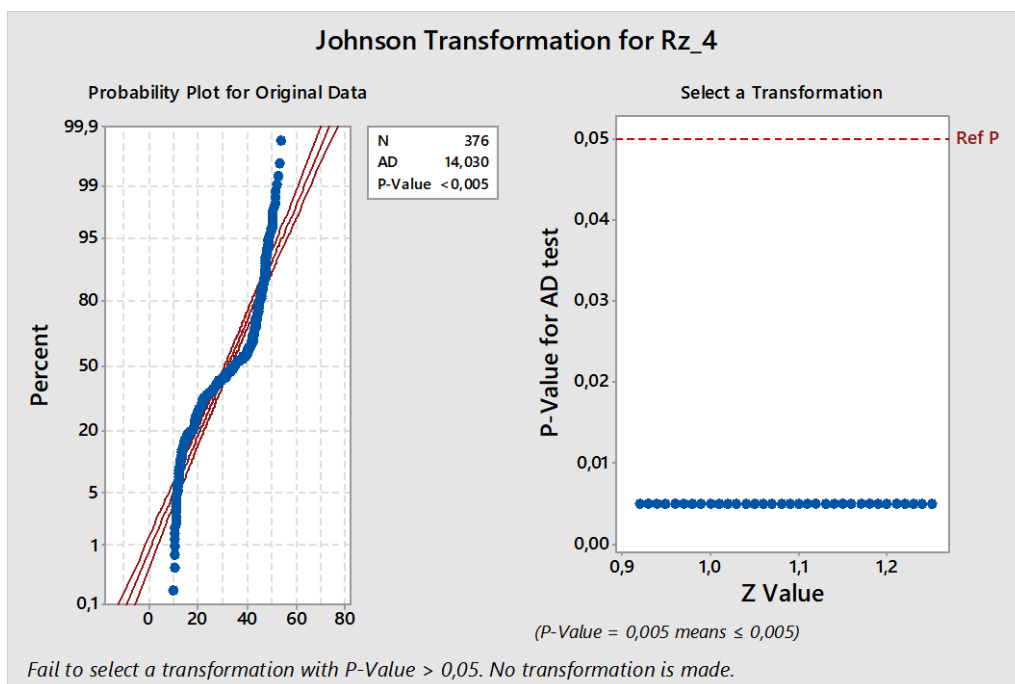
Další možností transformace dat, pokud Box-Coxova nepřinesla kýžený výsledek, je Johnsonova transformace.

9.6.7 Johnsonova transformace

Johnsonova transformace dat s vyskytujícími se oblastmi byla provedena v programu Minitab za pomoci následujícího vztahu:

$$Y' = g(Y)$$

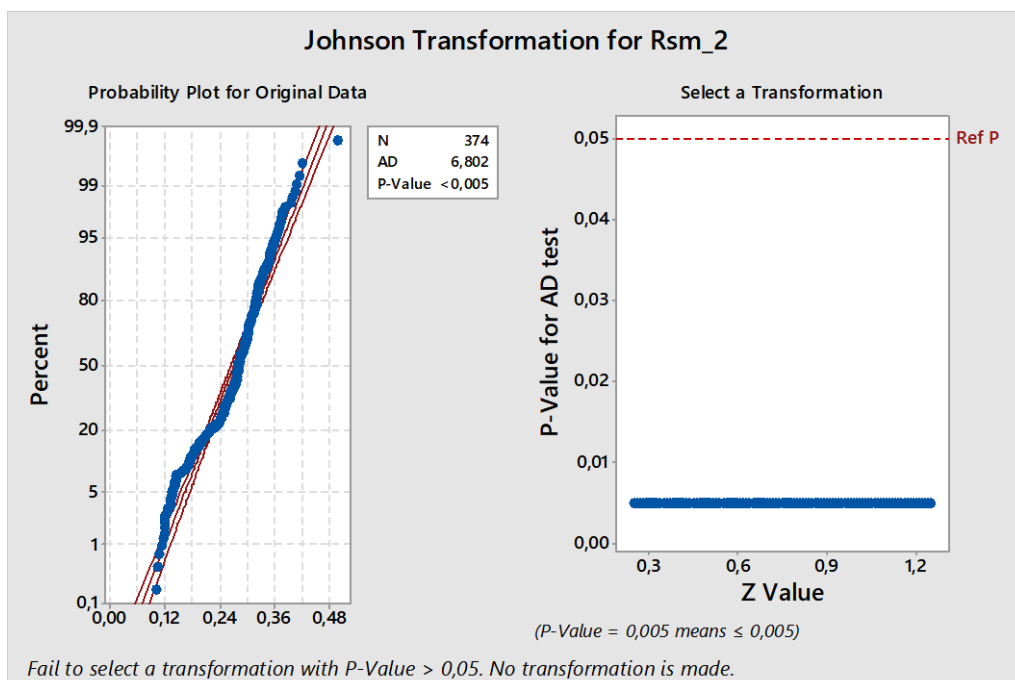
(12)



Obr. 9.37 Výstup Johnsonovy transformace dat pro parametr Rz vzorku 4

Na základě výstupu Johnsonovy transformace dat je možné konstatovat, že ani tento nástroj nevedl k požadovanému výsledku.

Dále byla tato transformace aplikována i na data bez vyskytujících se tří oblastí, podle vztahu číslo 12.



Obr. 9.38 Výstup Johnsonovy transformace dat pro parametr RSm vzorku 2

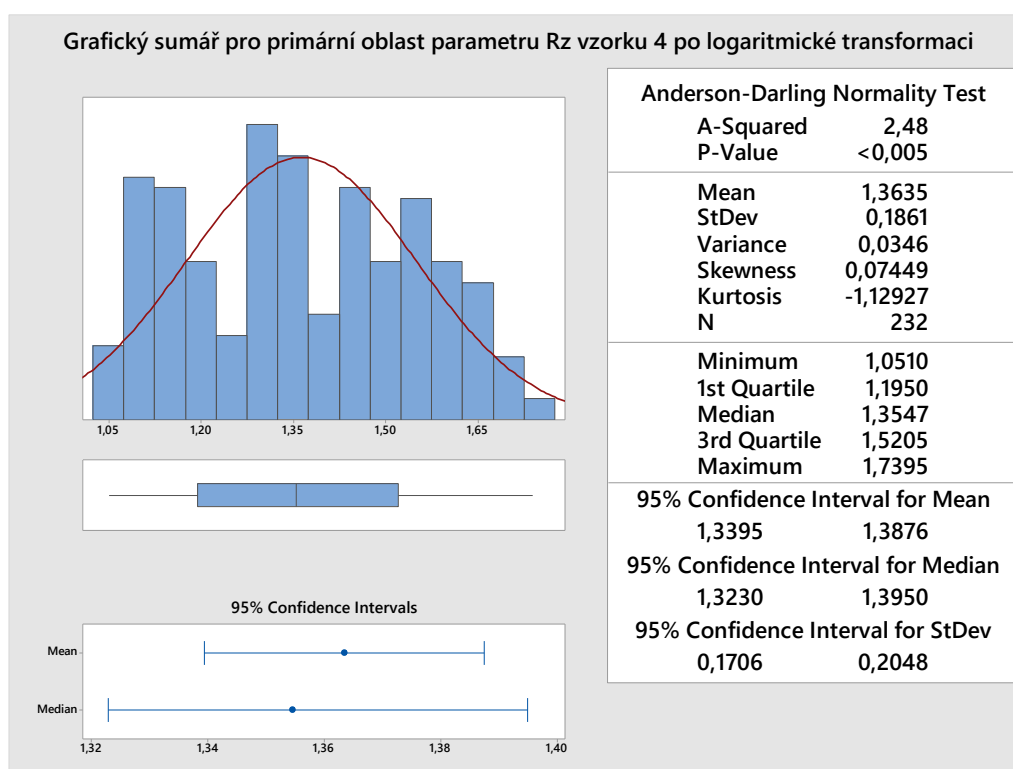
Na základě výstupu výše lze říci, že transformace dat parametru RSm nevedla k jejich normalizaci.

Důvodem, proč jsou transformace dat neúspěšné může být hned několik. V případě těchto dat se ale jako nejpravděpodobnější důvod jeví přílišný rozptyl a variabilita dat, která je zkresluje natolik, že je nelze transformovat pomocí zvolených transformačních nástrojů.

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

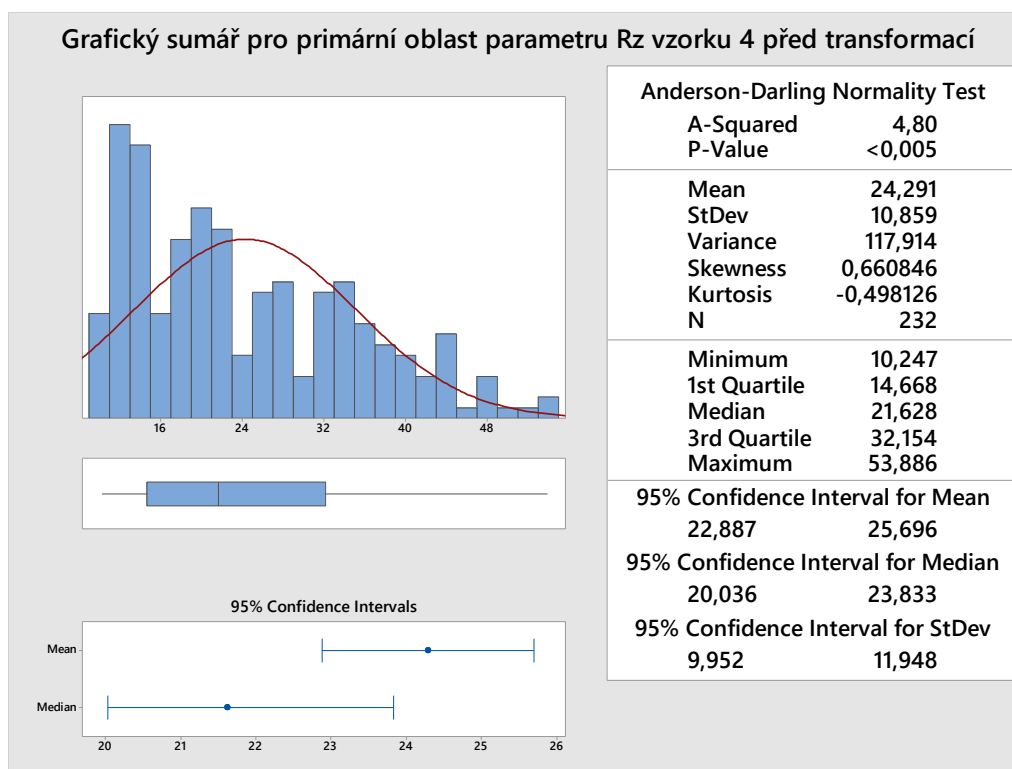
9.6.8 Parciální transformace dat

Nejdříve bude na primární oblasti parametru Rz vzorku 4 provedena logaritmická transformace za pomoci vztahu číslo 8.



Obr. 9.39 Grafický sumář primární oblasti parametru Rz vzorku 4 po logaritmické transformaci

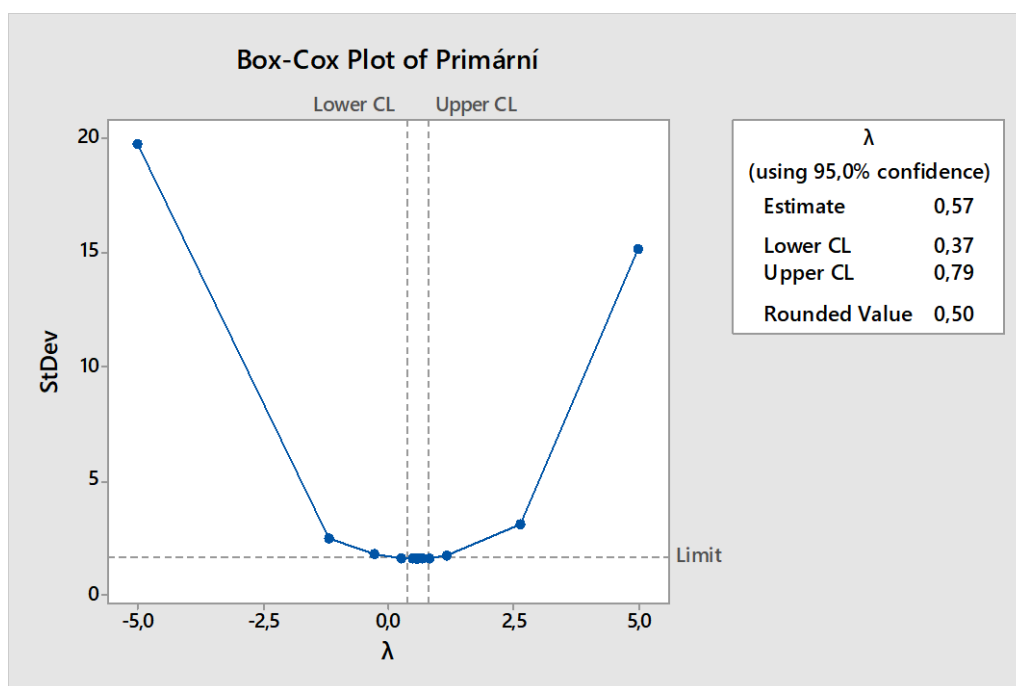
Pro snazší srovnání je níže vyvolán grafický sumář primární oblasti parametru Rz bez transformace.



Obr. 9.40 Grafický sumář primární oblasti parametru Rz vzorku 4 před transformací

Po srovnání těchto dvou grafických sumářů lze vyvodit, že transformací došlo k přiblížení dat k normálnímu rozdělení. Ze sumáře je patrné, že po transformaci došlo k plné konjunkci konfidenčních intervalů aritmetického průměru a mediánu. Dále se značně snížila kvadratická chyba a boxplotový diagram je výrazně symetričtější než před transformací. Obecně lze říci, že ačkoliv byla normalita vyvrácena Anderson-Darlingovým testem s výslednou p-hodnotou nižší než stanovená hodnota α , je velmi pravděpodobné, že se podaří nalézt vhodnou transformaci, která bude účinná a naplní počáteční požadavek pro normalizaci dat.

Proto bude dále přistoupeno k Box-Coxově transformaci primární oblasti stejného vzorku, a to podle vztahu číslo 9.



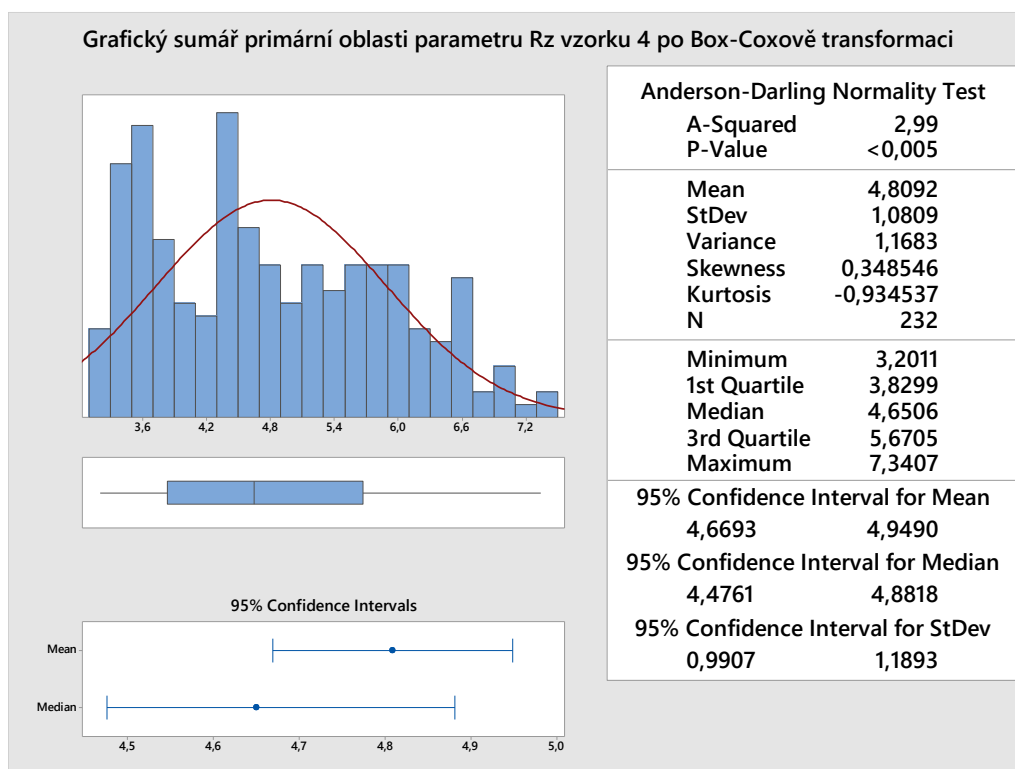
Obr. 9.41 Výstup Box-Coxovy transformace dat pro primární oblast parametru Rz vzorku 4

Výsledná hodnota lambda byla za pomoci programu Minitab stanovena na 0,57. Po dosazení do rovnice a ověření, zdali se v souboru nenachází žádné nulové hodnoty, byla transformace provedena pomocí vztahu:

$$Y' = \frac{Y^{0,57} - 1}{0,57}$$

(13)

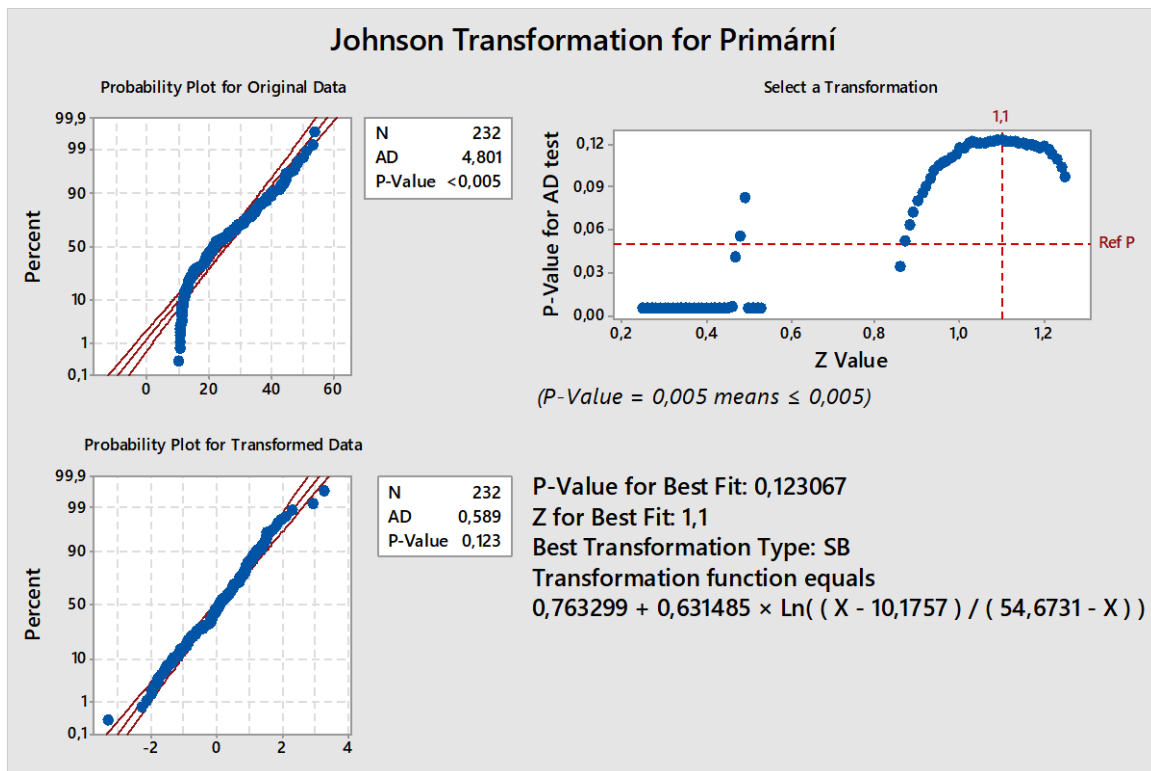
Pro posouzení normality byl vyvolán grafický sumář.



Obr. 9.42 Grafický sumář primární oblasti parametru Rz vzorku 4 po Box-Coxově transformaci

I po užití Box-Coxovy transformace byla vyvrácena normalita. Ačkoliv při srovnání grafických sumářů dat před a po transformaci lze konstatovat, že došlo k nepatrnému přiblížení dat k normálnímu rozdělení.

Jako poslední bude aplikována Johnsonova transformace dle vztahu číslo 12.



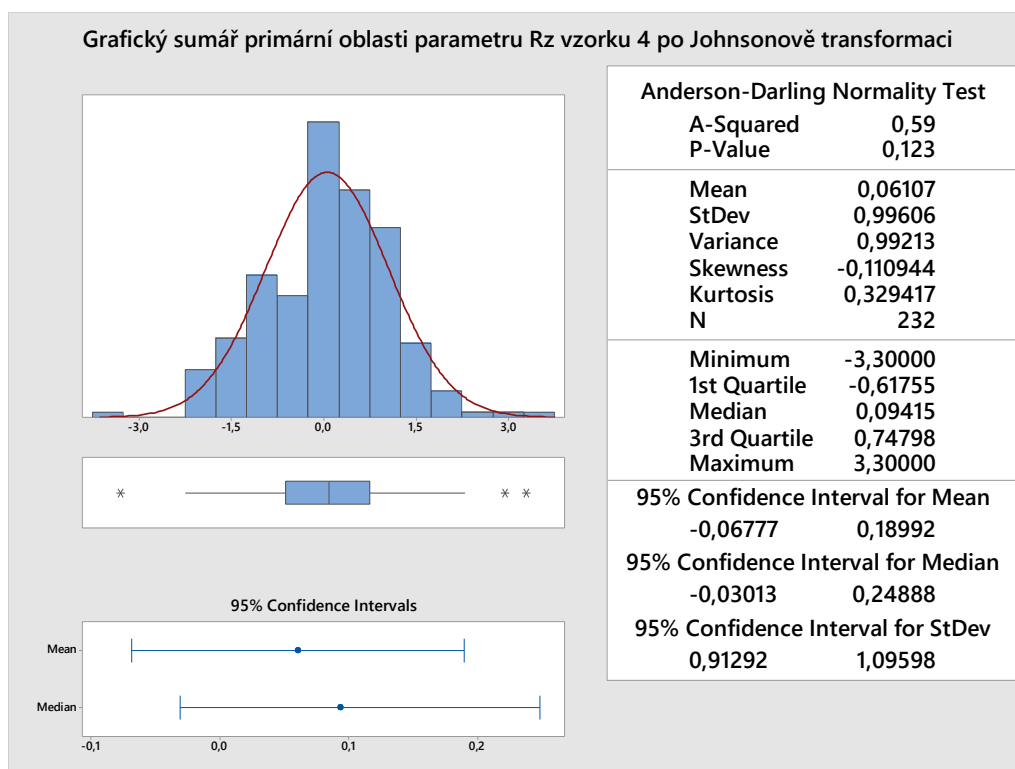
Obr. 9.43 Výstup Johnsonovy transformace dat pro primární oblast parametru Rz vzorku 4

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

$$Y' = 0,763299 + 0,631485 * \text{Ln}\left(\frac{Y + 10,1757}{54,6731 - Y}\right)$$

(14)

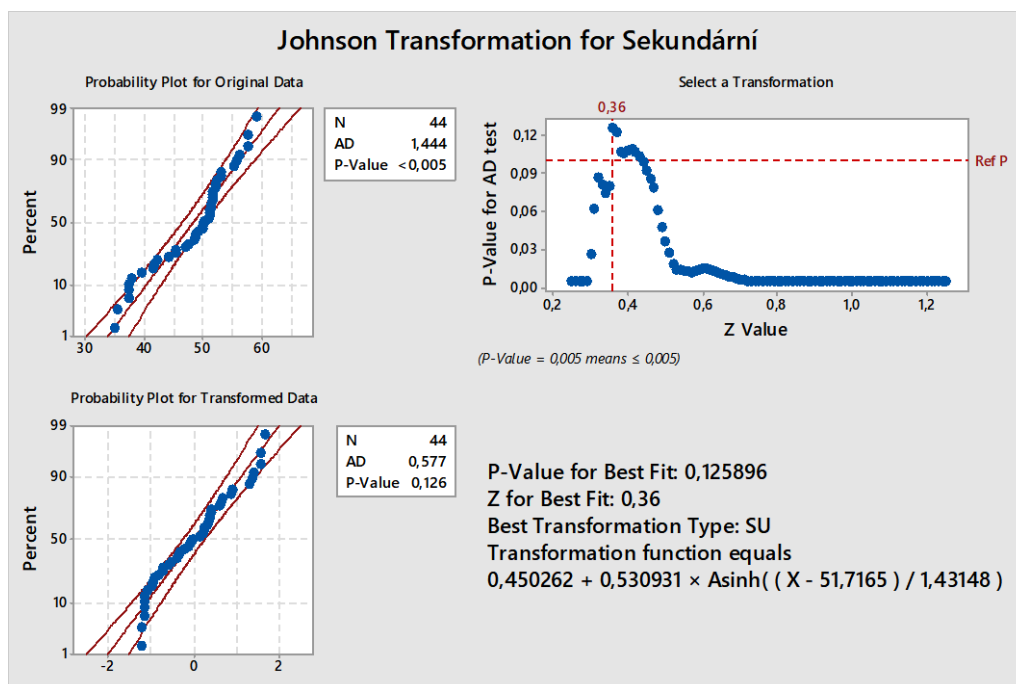
Následně proběhla obligátní kontrola vyvoláním grafického sumáře.



Obr. 9.44 Grafický sumář primární oblasti parametru Rz vzorku 4 po Johnsonově transformaci

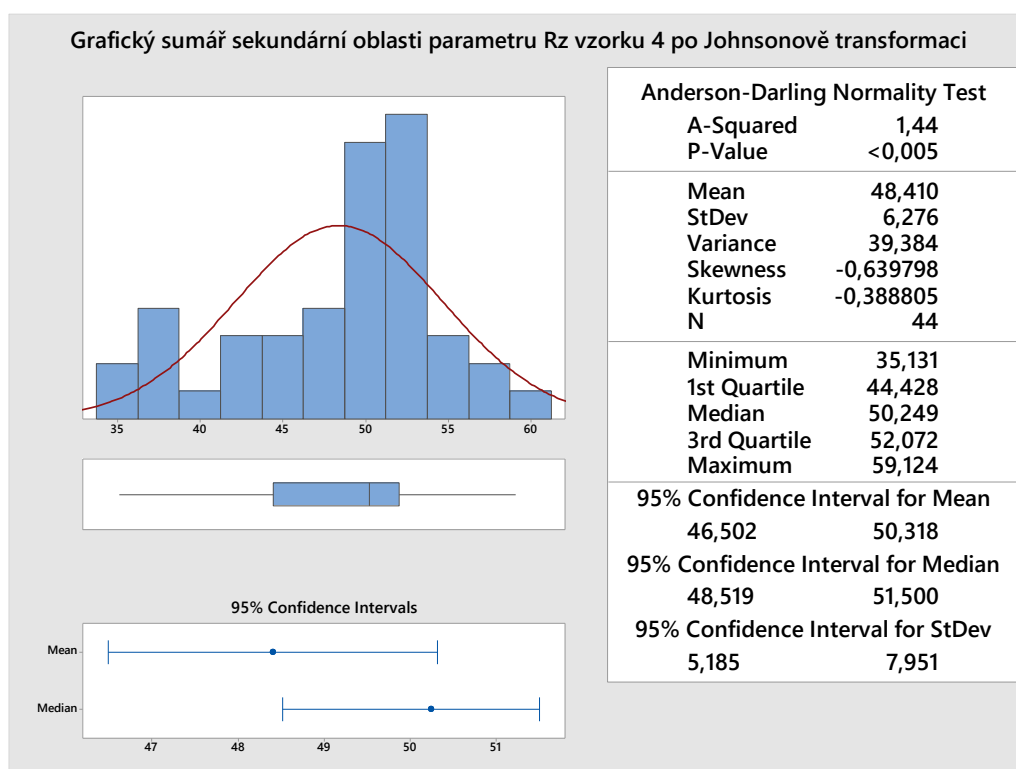
Z grafického sumáře je patrná normalita dat. Ta byla potvrzena Anderson-Darlingovým testem. Boxlot je symetrický, konfidenční intervaly aritmetického průměru a mediánu jsou v převažující konjunkci.

Dále bude Johnsonova transformace aplikována i na sekundární oblast dat.



Obr. 9.45 Výstup Johnsonovy transformace dat pro sekundární oblast parametru Rz vzorku 4

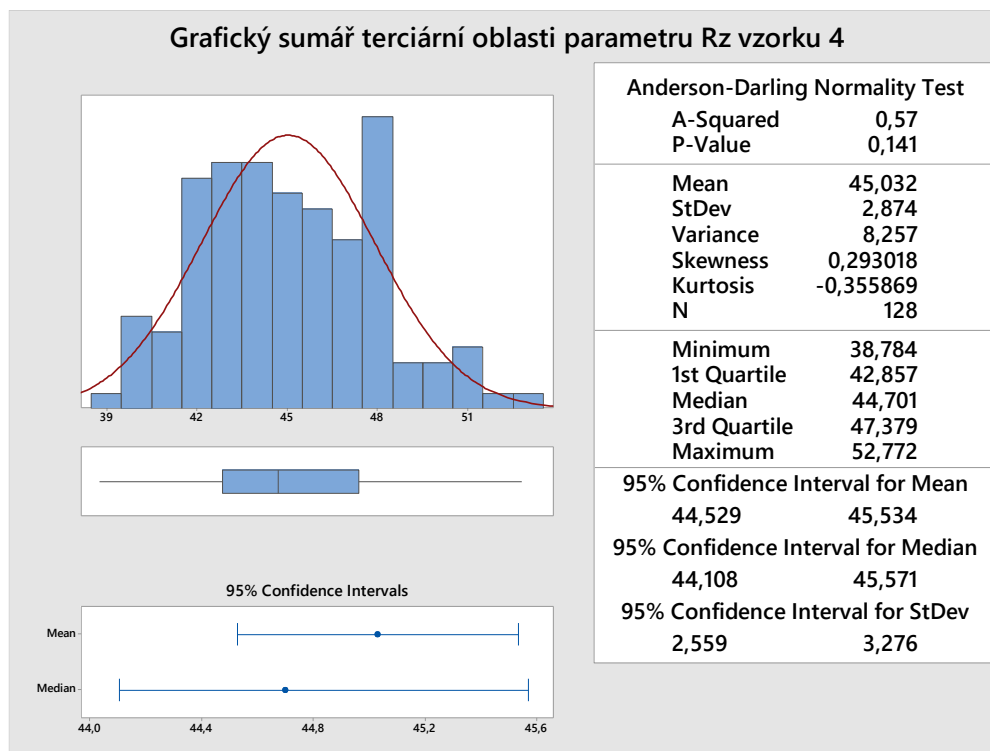
Pro úplnou kontrolu bude vyvolán grafický sumář pro sekundární oblast parametru Rz vzorku 4.



Obr. 9.46 Grafický sumář sekundární oblasti parametru Rz vzorku 4 po Johnsonově transformaci

Anderson-Darlingovým testem s výslednou p-hodnotou vyšší než 0,05 byla potvrzena normalita zkoumaných dat.

Co se týče terciární oblasti, zde mají data normální rozdělení, a tudíž není třeba je nijak transformovat. Níže je vyvolán grafický sumář pro terciární oblast parametru Rz vzorku 4.



Obr. 9.47 Grafický sumář terciární oblasti parametru Rz vzorku 4

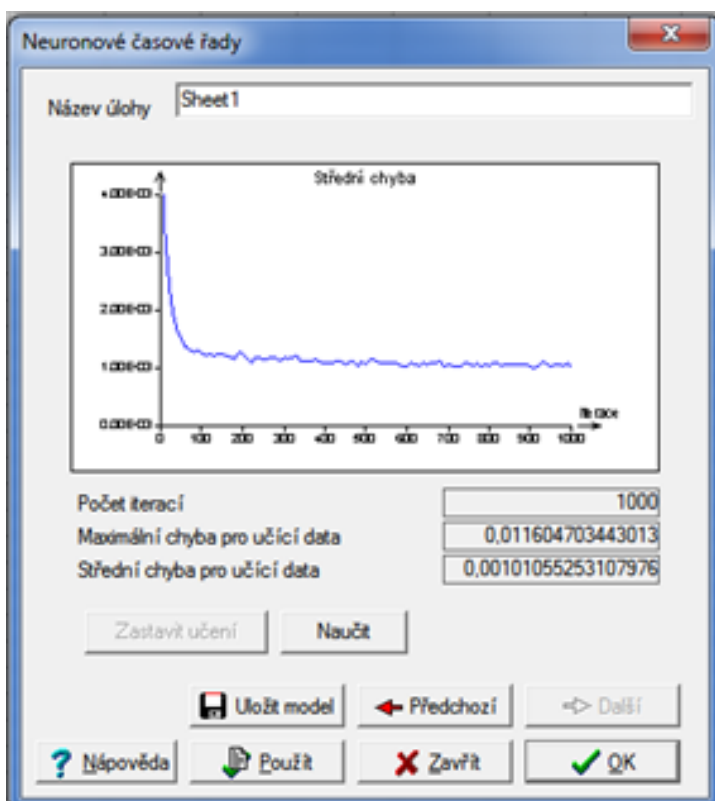
Na základě výstupů z programu Minitab lze konstatovat, že navržené řešení transformovat jednotlivé oblasti odděleně přináší kýžené výsledky. Primární i sekundární oblasti byly úspěšně transformovány do souborů s normálním rozdělením a nyní je možné je dále analyzovat za pomoci statistických nástrojů,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

9.7 Neuronová síť

Pro popis dat pomocí neuronové sítě je nejdříve nutné zvolit její vhodný typ. V případě dat získaných z heterogenního povrchu je nejvhodnější volbou neuronová síť perceptronového typu řešící regresní úlohu.

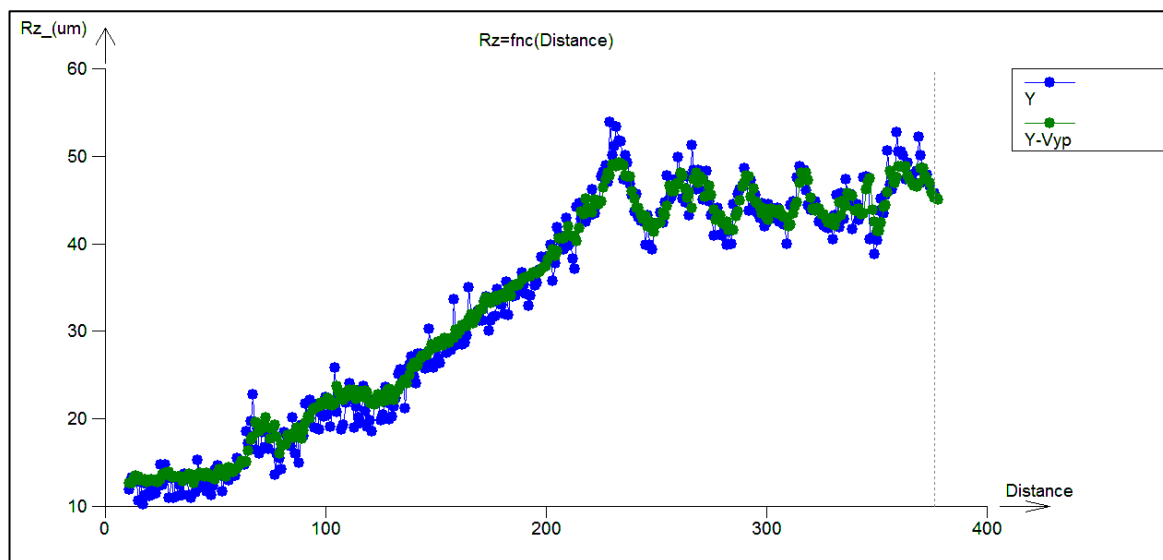
Dále je třeba nalézt vhodný počet skrytých vrstev a počet neuronů v nich obsažených. Tento krok se nazývá „konfigurace neuronové sítě“.

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. Níže na obrázku je zobrazena vypočtená chyba použité neuronové sítě.



Obr. 9.48 Zobrazení střední chyby v programu QC Expert

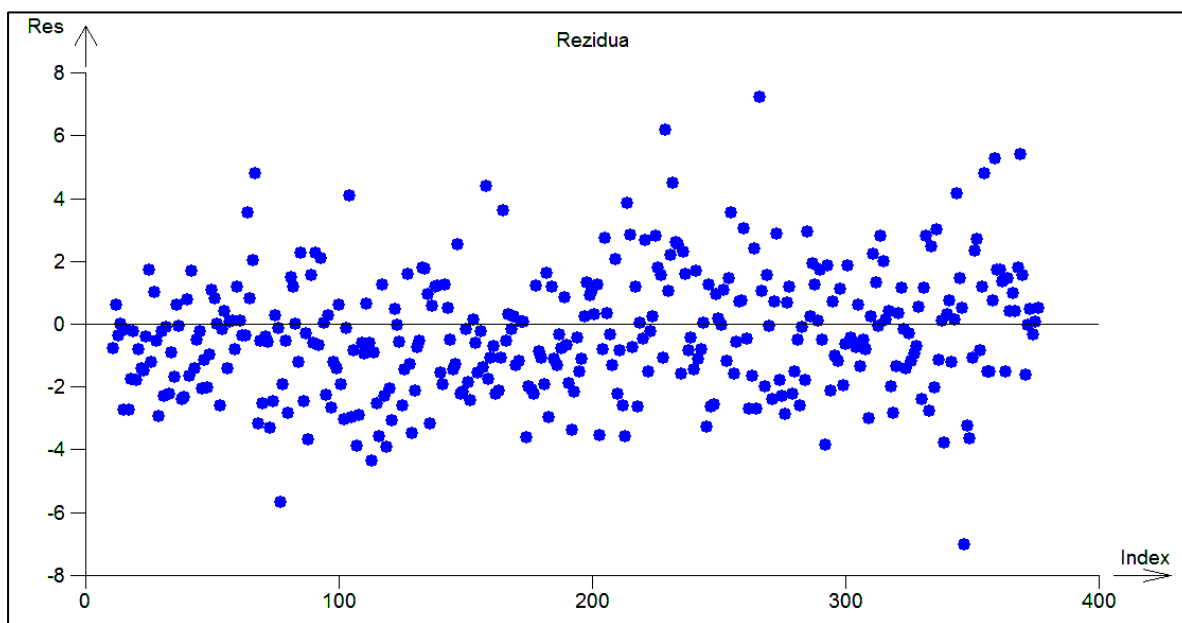
Po ověření konfigurace byla zobrazena regresní křivka ze zkoumaných dat. V tomto případě je vyobrazena regresní křivka dat získaných ze vzorku 4, parametru Rz.



Obr. 9.49 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. 9.50 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 9.5 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 |

10. SHRNUÍ, 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.**

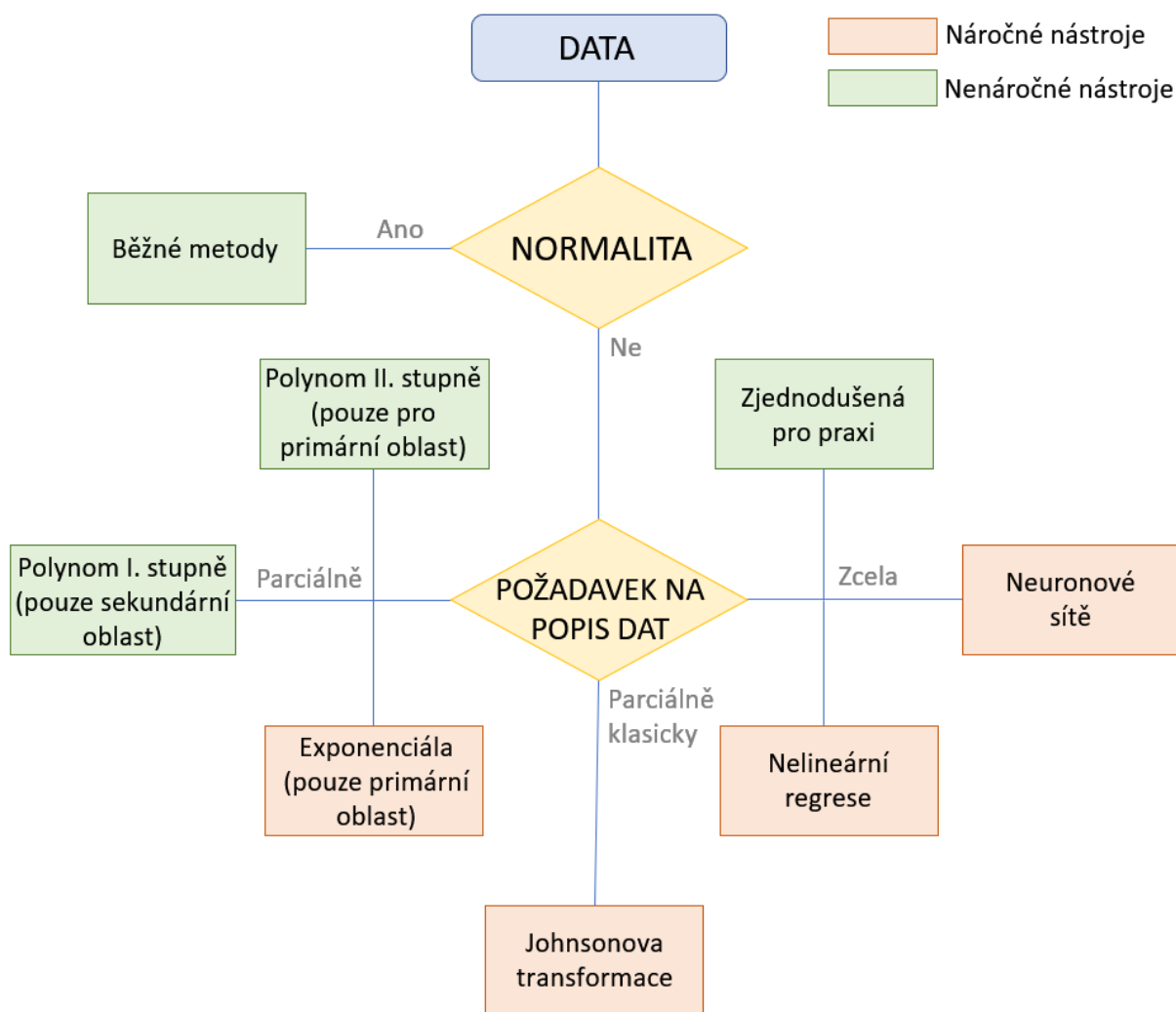
Ne vždy platí, že čím je určitý nástroj přesnější, tím je ve všech ohledech lepší. Rozumí se tím konkrétně například použitelnost různých složitých nástrojů pro praxi. Některé nástroje popisované v této práci jsou, vzhledem k přínosu, který při konkrétním použití přinášejí koncovému uživateli, předimenzované. 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 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. 10.1 Rozhodovací diagram pro hodnocení drsnosti heterogenních povrchů

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

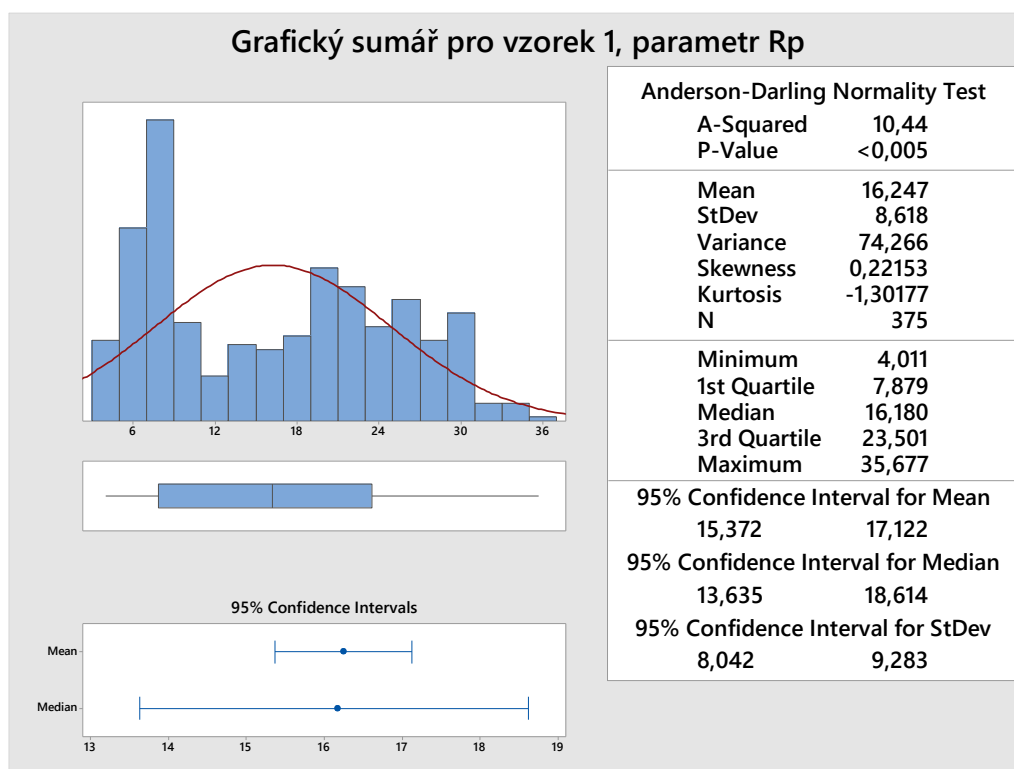
10.1 Primární rozhodnutí o heterogenitě povrchu

Primárně je nutné rozhodnout o tom, zdali je námi zkoumaný povrch heterogenní či nikoliv.

Na základě výsledků v této disertační práci lze konstatovat, že hlavní charakteristikou heterogenních povrchů je absence normality dat. Proto je nutné analyzovaná data otestovat na normalitu. Na základě výsledků testu normality bude poté rozhodováno o metodice pro popis dat.

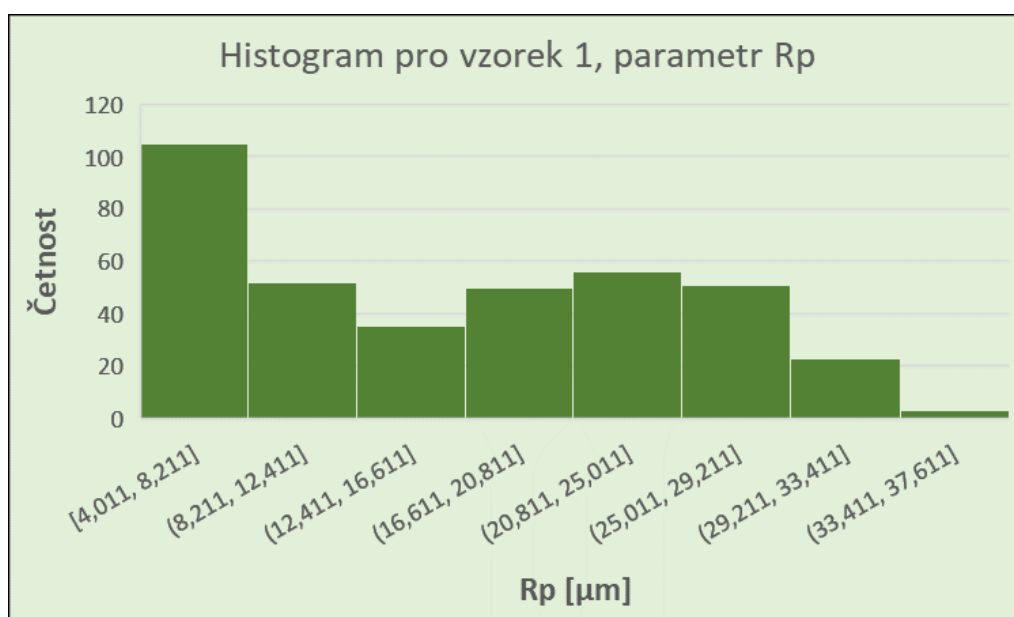
Pro vědu a výzkum je doporučeno použít Anderson-Darlingův test s nastavenou hladinou významnosti $\alpha = 0,05$.

Tento test lze provést například vyvoláním grafického sumáře v programu Minitab. Grafický sumář je vyobrazen v následujícím obrázku.



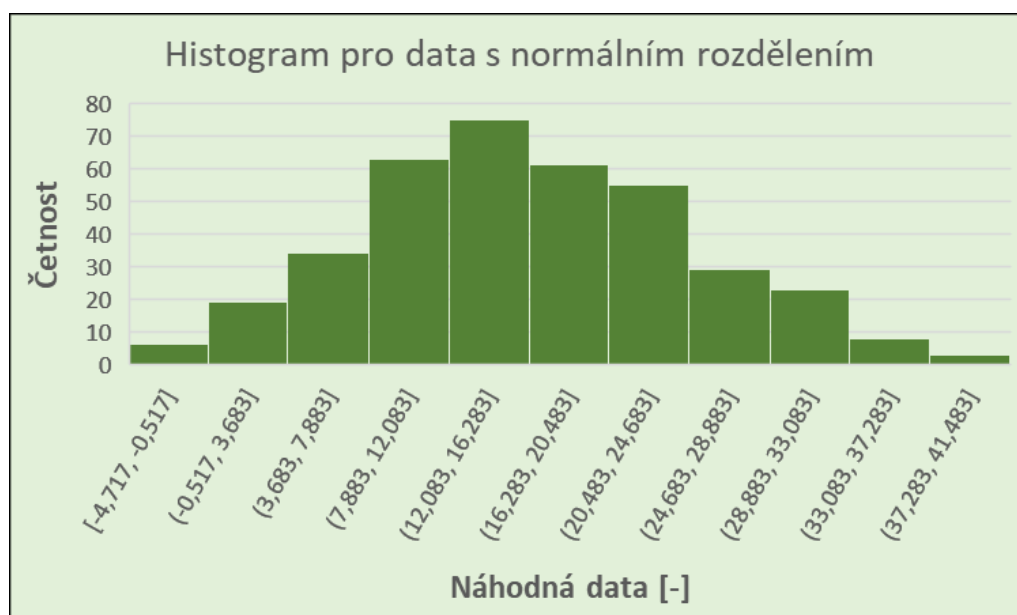
Obr. 10.2 Grafický sumář pro vzorek 1, parametr Rp

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 Rp.



Obr. 10.3 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. 10.4 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.

10.2 Metodika navržená pro vědu a výzkum

Po provedeném testu normality je poté třeba v rámci exploratorní datové analýzy provést test odlehlých hodnot. Ten je popsán v kapitole 9.3.2. Pokud se v souboru vyskytují odlehlé hodnoty, je třeba je otestovat a na základě provedeného testu rozhodnout, zdali se jedná pouze o odlehlé hodnoty, které budou v souboru ponechány či se jedná o hrubé chyby a ty je nutné ze souboru vyřadit.

Následně je pak dle rozhodovacího diagramu v obrázku v kapitole 10 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 odrážkách jsou rozepsány jejich mechanismy, způsoby aplikace, výhody a vhodnost užití, popřípadě limitace jednotlivých metodik.

10.2.1 Parciální popis dat

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

Primární oblast se vyznačuje vzestupným trendem hodnot parametrů drsnosti až do bodu maxima. Sekundární oblast je charakteristická lineárním sestupem drsnosti až do terciární oblasti, kde se nenachází žádný trend a data se zde jeví být rozdělena náhodně.

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 v různých oblastech, které jsou popsány v *kapitolách 4.1 a 9.5*. 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 popsanych 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 $R_{\delta c}$. Průběh parametru R_{Sm} nelze hodnotit parciálně, jelikož ve svém průběhu neobsahuje žádné oblasti.

10.2.2 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.

10.2.3 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.

10.3 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

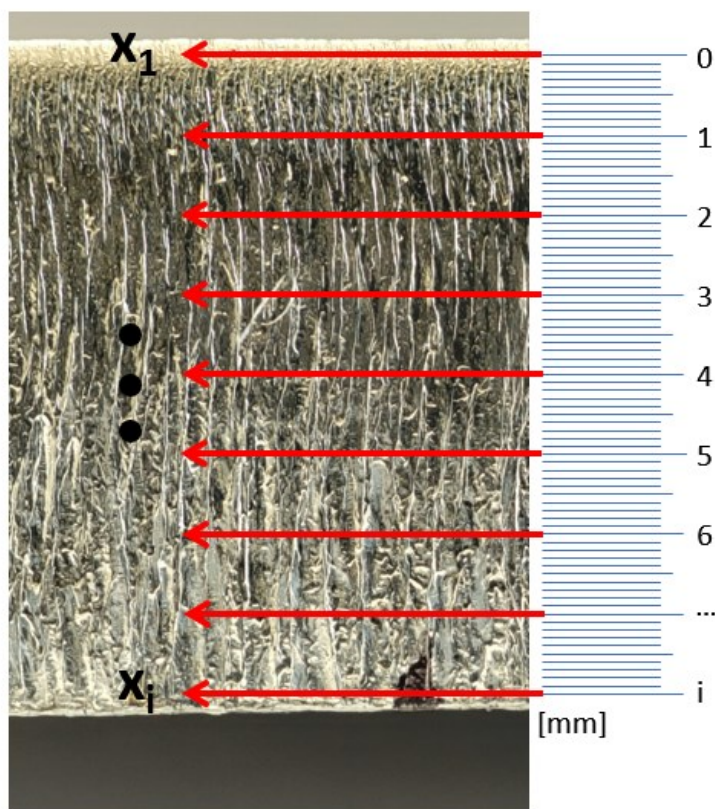
metoda limitována omezenou přesností je, vzhledem k požadavkům v praxi, více než dostačující.

10.3.1 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.

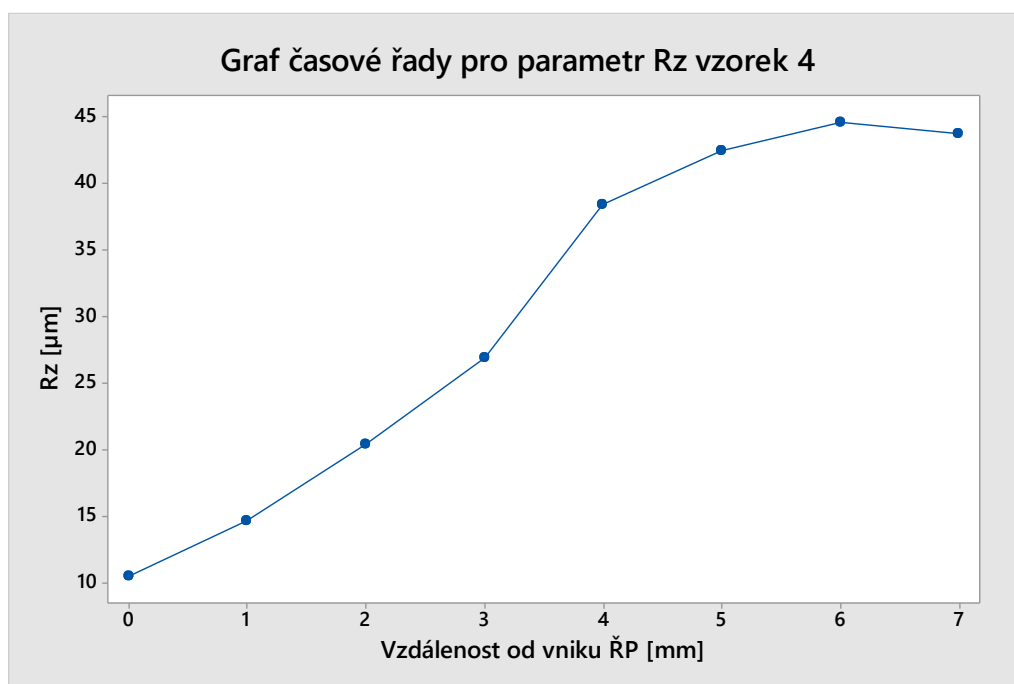


Obr. 10.5 Schéma měření heterogenního povrchu kontaktním drsnoměrem

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.

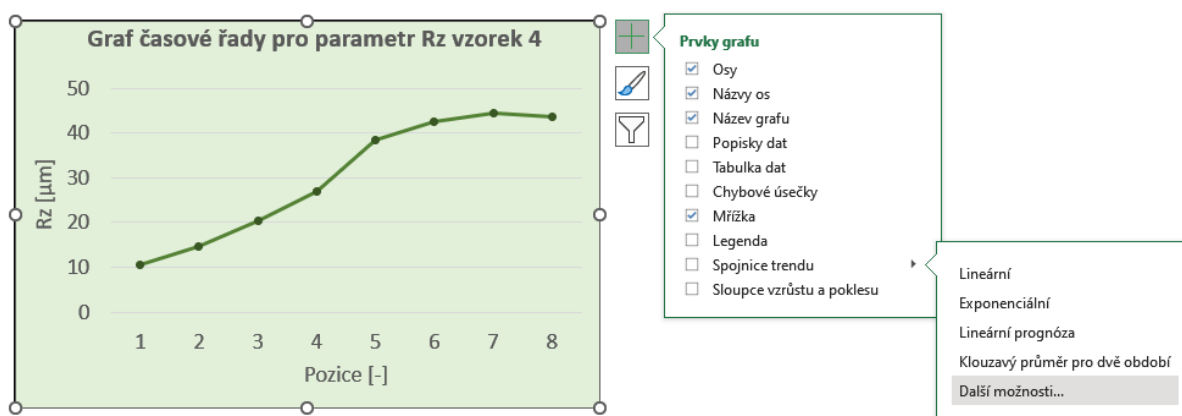
Dále je pak v dostupném programu vygenerován graf časové řady, obrázek níže.



Obr. 10.6 Graf časové řady pro parametr Rz vzorek 4

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

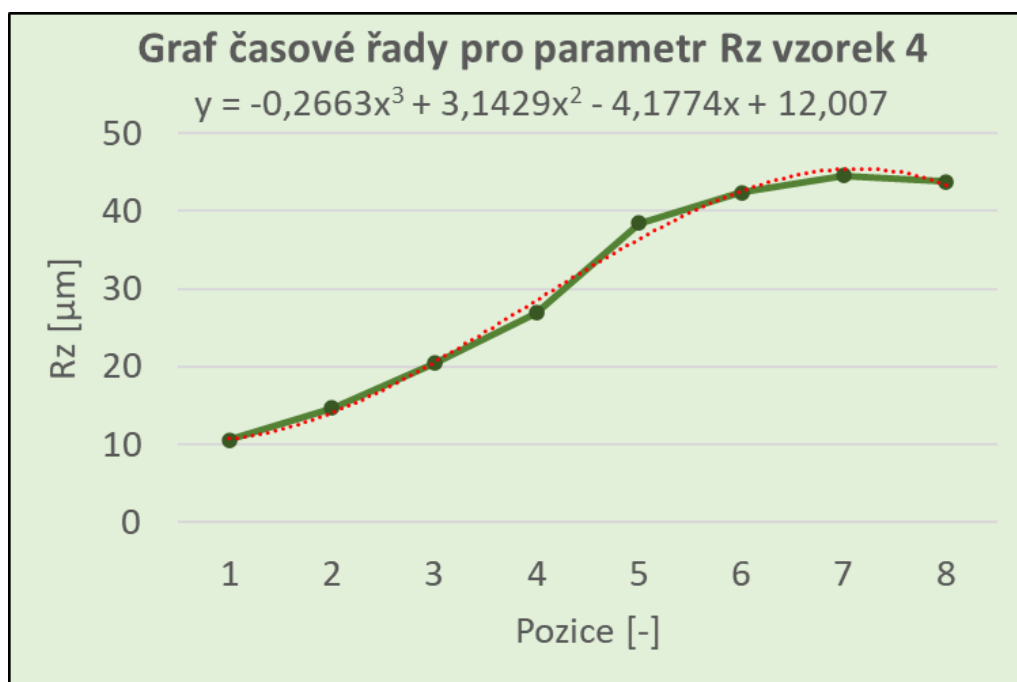
Následně data proložíme polynomem III. stupně, lze tak učinit i v běžně dostupném programu Excel následovně.



Obr. 10.7 Postup proložení dat polynomem III. Stupně v programu Excel

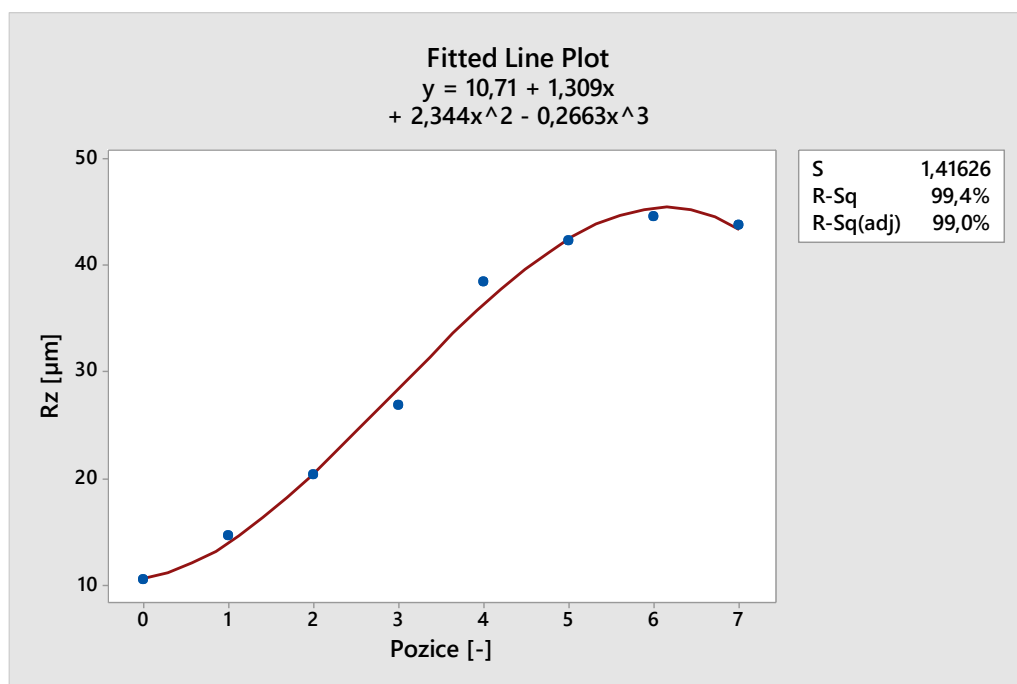
Klikneme na ikonu s prvky grafu, sjedeme myši až ke spojnicím trendu, kde z výběru zvolíme „další možnosti“. Ve zobrazeném dialogovém okně zvolíme možnost polynomické regrese a v počtu stupňů vybereme číslici 3. Následně nezapomene zaškrtnout možnost zobrazení rovnice polynomu třetího stupně.

Výsledkem bude graf časové řady s proložením polynomem III. Stupně a zobrazenou rovnicí pro tuto funkci.



Obr. 10.8 Graf časové řady pro parametr Rz vzorek 4 v programu Excel

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



Obr. 10.9 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.

Je také ale nutno říci, metoda popsaná v této kapitole je pouze orientační. Je proto třeba ji používat velmi obezřetně a nestavět na výsledcích získaných z tohoto postupu nikterak závažná tvrzení a závěry.

11. 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 10. 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.

12. 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. CO 2 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. Ekhlaur 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 | 13 |
| Obr. 2.1 Funkční extrémy | 15 |
| Obr. 2.2 A – konvexní funkce, B – konkávní funkce | 16 |
| Obr. 2.3 Inflexní bod na křivce | 17 |
| Obr. 3.1 Základní konstrukce laserového zařízení [18]..... | 19 |
| Obr. 3.2 Schéma CO ₂ laseru [21]..... | 20 |
| Obr. 3.3 Schéma Nd: YAG laseru [23]..... | 21 |
| Obr. 3.4 Schéma obrábění vodním paprskem [28] | 23 |
| Obr. 3.5 Schéma obrábění plasmou [30] | 25 |
| Obr. 4.1 Ukázka heterogenního povrchu vzniklého řezáním laserem [35] | 27 |
| Obr. 5.1 Schéma přístroje pro kontaktní metodu snímání povrchu [39] | 28 |
| Obr. 5.2 Schéma přístroje pro bezkontaktní metodu snímání povrchu [39]..... | 29 |
| Obr. 6.1 Rozložení povrchu na drsnost, vlnitost a tvar [42]..... | 30 |
| Obr. 6.2 Grafická ukázka logaritmické transformace dat [58] | 34 |
| Obr. 6.3 Grafická ukázka Square root transformace dat [60]..... | 35 |
| Obr. 6.4 Grafická ukázka Box-Cox transformace dat [61]..... | 36 |
| Obr. 6.5 Grafická ukázka reciproční transformace dat [60] | 36 |
| Obr. 6.6 Grafická ukázka Yeo-Johnsonovy transformace dat [60] | 37 |
| Obr. 6.7 Diagram pro volbu vhodného testu při testování hypotéz [53] | 38 |
| Obr. 7.1 Model neuronové sítě perceptronového typu | 40 |
| Obr. 7.2 Model rekurentní neuronové sítě | 42 |
| Obr. 9.1 Přípravek pro stabilizaci vzorku při měření | 45 |
| Obr. 9.2 Příprava operačního pole měření | 46 |
| Obr. 9.3 Graf závislosti Ra na vzdálenosti od vniku řezného paprsku..... | 46 |
| Obr. 9.4 Graf s výsledkem testu normality z programu Minitab..... | 48 |
| Obr. 9.5 Graf s výsledkem testu odlehklých hodnot v programu Minitab | 50 |
| Obr. 9.6 Výstup Grubbsova testu z programu Minitab..... | 51 |
| Obr. 9.7 Výsledek Grubbsova testu s hrubou chybou pro parametr RSm pro vzorek č. 2 | 52 |
| Obr. 9.8 Výsledek Grubbsova testu s hrubou chybou pro parametr Rp pro vzorek č. 8 | 52 |
| Obr. 9.9 Grafický sumář pro vzorek 8, parametr Rz z programu Minitab | 54 |
| Obr. 9.10 Pravidlo 16 % aplikováno na data ze vzorku 8, parametru Rz..... | 55 |
| Obr. 9.11 Srovnání fotografie povrchu a grafu průběhu parametru Ra vzorku číslo 1 | 57 |
| Obr. 9.12 Rozdělení průběhu drsnosti na měřené ploše do tří oblastí | 58 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 9.13 Fotografie heterogenního povrchu z mikroskopu | 59 |
| Obr. 9.14 Heterogenní povrch | 60 |
| Obr. 9.15 Vzorek 4, Rz, proložení primární oblasti polynomem I. stupně | 61 |
| Obr. 9.16 Vzorek 4, Rz, proložení primární oblasti polynomem II. stupně | 62 |
| Obr. 9.17 Vzorek 4, Rz, proložení primární oblasti polynomem III. Stupně | 62 |
| Obr. 9.18 Testování významnosti použitého modelu v programu QC Expert.... | 63 |
| Obr. 9.19 Vzorek 4, Rz, proložení sekundární oblasti polynomem I. stupně | 63 |
| Obr. 9.20 Vzorek 4, Rz, proložení sekundární oblasti polynomem II. stupně | 64 |
| Obr. 9.21 Testování významnosti použitého modelu v programu QC Expert.... | 64 |
| Obr. 9.22 Grafický sumář pro terciární oblast vzorku 4 – parametru Rz..... | 65 |
| Obr. 9.23 Vzorek 4, Rz, proložení primární oblasti exponenciální funkcí | 66 |
| Obr. 9.24 Výsledné hodnoty nelineární regrese | 66 |
| Obr. 9.25 Srovnání tvaru křivky exponenciálního a polynomického modelu | 67 |
| Obr. 9.26 Graf popisu primární a sekundární oblasti pomocí funkcí pro vzorek 4 parametr Rz..... | 69 |
| Obr. 9.27 Proložení vzorku 4 parametru Rz kubickým splinem..... | 70 |
| Obr. 9.28 Proložení vzorku 4 parametru Rz kubickým splinem (úprava) | 70 |
| Obr. 9.29 Proložení vzorku 4 parametru RSm kubickým splinem | 71 |
| Obr. 9.30 Grafický sumář pro parametr Rz vzorku 4..... | 72 |
| Obr. 9.31 Grafický sumář pro parametr Rz vzorku 4 po logaritmické transformaci | 73 |
| Obr. 9.32 Grafický sumář pro parametr RSm vzorku 4 po logaritmické transformaci | 74 |
| Obr. 9.33 Výstup Box-Coxovy transformace dat pro parametr Rz vzorku 4 | 75 |
| Obr. 9.34 Grafický sumář parametru Rz vzorku 4 po Box-Coxově transformaci | 76 |
| Obr. 9.35 Výstup Box-Coxovy transformace pro parametr RSm vzorku 2 | 77 |
| Obr. 9.36 Grafický sumář parametru RSm vzorku 2 po Box-Coxově transformaci | 78 |
| Obr. 9.37 Výstup Johnsonovy transformace dat pro parametr Rz vzorku 4 | 79 |
| Obr. 9.38 Výstup Johnsonovy transformace dat pro parametr RSm vzorku 2 ... | 79 |
| Obr. 9.39 Grafický sumář primární oblasti parametru Rz vzorku 4 po logaritmické transformaci..... | 80 |
| Obr. 9.40 Grafický sumář primární oblasti parametru Rz vzorku 4 před transformací | 81 |
| Obr. 9.41 Výstup Box-Coxovy transformace dat pro primární oblast parametru Rz vzorku 4..... | 82 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 9.42 Grafický sumář primární oblasti parametru Rz vzorku 4 po Box-Coxově transformaci | 83 |
| Obr. 9.43 Výstup Johnsonovy transformace dat pro primární oblast parametru Rz vzorku 4 | 84 |
| Obr. 9.44 Grafický sumář primární oblasti parametru Rz vzorku 4 po Johnsonově transformaci..... | 85 |
| Obr. 9.45 Výstup Johnsonovy transformace dat pro sekundární oblast parametru Rz vzorku 4 | 86 |
| Obr. 9.46 Grafický sumář sekundární oblasti parametru Rz vzorku 4 po Johnsonově transformaci..... | 86 |
| Obr. 9.47 Grafický sumář terciární oblasti parametru Rz vzorku 4 | 87 |
| Obr. 9.48 Zobrazení střední chyby v programu QC Expert | 88 |
| Obr. 9.49 Regresní křivka neuronové sítě pro parametr Rz vzorku 4 | 88 |
| Obr. 9.50 Graf reziduálních rozptylů pro navrženou neuronovou síť | 89 |
| Obr. 10.1 Rozhodovací diagram pro hodnocení drsnosti heterogenních povrchů | 91 |
| Obr. 10.2 Grafický sumář pro vzorek 1, parametr Rp | 92 |
| Obr. 10.3 Histogram pro vzorek 1 parametr Rp vygenerovaný v programu Excel | 92 |
| Obr. 10.4 Histogram pro náhodná data vygenerovaný v programu Excel | 93 |
| Obr. 10.5 Schéma měření heterogenního povrchu kontaktním drsnoměrem | 96 |
| Obr. 10.6 Graf časové řady pro parametr Rz vzorek 4 | 97 |
| Obr. 10.7 Postup proložení dat polynomem III. Stupně v programu Excel | 97 |
| Obr. 10.8 Graf časové řady pro parametr Rz vzorek 4 v programu Excel | 98 |
| Obr. 10.9 Vzorek 4, parametr Rz, proložení polynomem III. Stupně | 98 |

SEZNAM VZORCŮ

| | | |
|--------|---------------------------------------------------------------|----|
| (1) | Obecný vzorec funkce..... | 14 |
| (2) | Platnost konvexity funkce..... | 16 |
| (3) | Platnost konkavity funkce..... | 16 |
| (4) | Důkaz konvexity | 16 |
| (5) | Důkaz konkavity | 17 |
| (6) | Stacionární inflexní bod..... | 17 |
| (7) | Hodnota horní meze (pravidlo 16 %) | 32 |
| (8) | Obecný vztah pro logaritmickou transformaci | 73 |
| (9) | Obecný vztah pro Box-Coxovu transformaci | 75 |
| (10) | Vztah pro Box-Coxovu transformaci pro data s oblastmi | 75 |
| (11) | Vztah pro Box-Coxovu transformaci pro parametr R_{sm} | 77 |
| (12) | Obecný vztah pro Johnsonovu transformaci..... | 78 |
| (13) | Vztah pro Box-Coxovu transformaci pro primární oblast..... | 82 |
| (14) | Vztah pro Johnsonovu transformaci pro primární oblast | 84 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 6.1 Způsob vzniku chyb I. a II. druhu při položení H_0 a H_1 | 39 |
| Tabulka 9.1 Výsledné p-hodnoty Anderson-Darlingova testu normality..... | 49 |
| Tabulka 9.2 Výsledné p-hodnoty Grubbsova testu outlierů | 50 |
| Tabulka 9.3 Parametry modelu pro vzorek 4, parametr R_z | 71 |
| Tabulka 9.4 Parametry modelu pro vzorek 4, parametr R_{Sm} | 72 |
| Tabulka 9.5 Zvolené parametry navržené neuronové sítě | 89 |

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

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

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

Disertační práce

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

Náklad: 2 kusy

Sazba: Ing. Hana Vrbová

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání 2024