Hodnocení jakosti heterogenních povrchů pomocí statistických metod

Bc. Tomáš Zuzaňák

Diplomová práce
2024

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Bc. Tomáš Zuzaňák**
Osobní číslo:	**T22371**
Studijní program:	**N0788A270007 Řízení jakosti**
Forma studia:	**Prezenční**
Téma práce:	**Hodnocení jakosti heterogenních povrchů pomocí statistických metod**

Zásady pro vypracování

- Literární rešerše k problematice hodnocení povrchů.
- Statistické nalezení a stanovení diferencí mezi vyhodnocováním povrchů ve shodě s ISO *21920-1*, ISO *21920-2* a ISO 25 178.
- Provede se kontrola povrchů pomocí mikroskopu.
- Dále bude udělána analýza povrchů na bezkontaktním profiloměru.
- Následně budou naměřená data drsnosti povrchu statisticky hodnocena.

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

Seznam doporučené literatury:

1. *ČSN EN ISO 21920-1: Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Profil – Část 1: Indikace textury povrchu*. (2023) (01.06.2023). Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
2. *ČSN EN ISO 21920-2: Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Profil – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. (2023) (01.06.2023). Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
3. ČSN EN ISO 25178-2. Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 2012.
4. MELOUN, Milan, Jiří MILITKÝ a Martin HILL. *Statistická analýza vícerozměrných dat v příkladech*. Praha: Academia, 2012. Gerstner. ISBN 978-80-200-2071-0

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

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

L.S.

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

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

Ve Zlíně dne 27. února 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA
DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta: Tomáš Zuzaňák

……..
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce zkoumá heterogenní povrch vytvořený laserovým řezání s hlavním zaměřením na statistickou analýzu a vyhodnocení drsnosti povrchu. Teoretická část se zabývá topografií povrchu, laserovým řezáním a statistickým zpracováním dat. Praktická část práce zahrnuje sběr dat poskytující informace o topografii povrchu použitím bezkontaktního profilometru Talysurf CLI 500. Cílem práce bylo provést statistické vyhodnocení pomocí parametru Ra a Rz, porovnat měřené vzorky a nalézt vhodnou regresi, která vhodně popisuje data. Pro nalezení křivky, která nejlépe odpovídá bodům byla použita kubická regrese a asymptotický konvexní model.

Klíčová slova: heterogenní povrch, řezání laserem, drsnost povrchu, regresní analýza

ABSTRACT

The thesis investigates a heterogeneous surface created by laser cutting with the main focus on statistical analysis and surface roughness evaluation. The theoretical part deals with surface topography, laser cutting and statistical data processing. The practical part of the thesis involves the collection of data providing information on the surface topography using a Talysurf CLI 500 non-contact profilometer. The aim of the work was to perform a statistical evaluation using the Ra and Rz parameters, to compare the measured samples and to find a suitable regression that adequately describes the data. A cubic regression and an asymptotic convex model were used to find the curve that best fits the points.

Keywords: heterogenous surface, laser beam cutting, surface roughness, regression analysis

Tímto bych chtěl poděkovat paní Ing. Mileně Kubišové Ph.D. za cenné rady, ochotu a konzultace při vypracování diplomové práce. V neposlední řadě bych také chtěl poděkovat své rodině za podporu během mého studia.

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

OBSAH

ÚVOD **9**
I TEORETICKÁ ČÁST **10**
1 TOPOGRAFIE POVRCHU **11**
1.1 DRSNOST POVRCHU 11
1.2 METODY MĚŘENÍ POVRCHŮ 12
1.3 TERMÍNY A DEFINICE DLE NORMY ČSN EN ISO 21920-2 13
1.3.1 Termíny a definice 13
1.3.2 Výškové parametry 17
2 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE **18**
2.1 ŘEZÁNÍ PLAZMOVÝM OBLOUKEM 18
2.2 ŘEZÁNÍ LASEREM 19
2.3 PARAMETRY LASERU 22
2.3.1 CO_2 laser 22
2.3.2 Vláknový laser 23
2.3.3 Tepelně ovlivněná zóna 24
3 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ DAT **25**
3.1 ROZDĚLENÍ DAT 25
3.2 TESTOVÁNÍ STATISTICKÉ HYPOTÉZY 25
3.3 REGRESNÍ ANALÝZA 26
3.3.1 Lineární regrese 26
3.3.2 Nelineární regrese 28
3.4 SHLUKOVÁ ANALÝZA CLU 29
3.4.1 Pokroky v algoritmech shlukování 30
3.4.2 Euklidovská vzdálenost 30
3.4.3 Manhattanská vzdálenost 31
3.4.4 K-Means 32
3.5 EXPLORATIVNÍ ANALÝZA DAT 32
3.5.1 Histogram 34
3.5.2 Boxplot 34
3.5.3 Q-Q graf 35
3.5.4 Fáze EDA 35
3.6 JEDNOROZMĚRNÁ ANALÝZA 36
3.7 DVOUROZMĚRNÁ ANALÝZA 37
3.7.1 T-test: 37
3.7.2 ANOVA: 37
3.7.3 Rozptylový graf: 37
3.8 VÍCEROZMĚRNÁ ANALÝZA 38

3.8.1 Techniky vícerozměrné analýzy 38
3.9 INITIAL DATA ANALYSIS (IDA) 39
II PRAKTICKÁ ČÁST 40
4 CÍLE PRÁCE 41
5 MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ 42
5.1.1 Povrch vzorků 43
5.2 POSTUP MĚŘENÍ 44
6 VYHODNOCENÍ DAT 46
6.1 METODIKA EDA 47
6.2 BOXPLOT 49
6.4 DEANŮV–DIXONŮV TEST 51
6.5 LINEÁRNÍ REGRESE 53
6.6 VIZUALIZACE PARAMETRU RA A RZ 67
6.7 DENDOGRAMY 71
ZÁVĚR 74
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 79
SEZNAM OBRÁZKŮ 80
SEZNAM TABULEK 82

ÚVOD

Hodnocení jakosti heterogenních povrchů, zejména těch, které vznikly řezáním laserem, představuje v současné době jednu z významných výzev v oblasti průmyslového inženýrství a materiálového výzkumu. Laserové řezání se stalo klíčovým procesem v mnoha odvětvích průmyslu, jako je automobilový průmysl, elektronika nebo biomedicína díky své schopnosti precizně a efektivně zpracovávat různé materiály s vysokou přesností. Nicméně s nárůstem složitosti výrobních procesů a požadavků na kvalitu, vzniká potřeba efektivního hodnocení jakosti výsledných povrchů.

Heterogenní povrchy, které vznikají během procesu laserového řezání, často vykazují různé mikrostrukturní vlastnosti a chemické složení v závislosti na parametrech řezání, použitých materiálech a prostředí, ve kterém je proces prováděn. Tato rozmanitost činí jejich vyhodnocení náročným úkolem. Tradiční metodiky pro hodnocení povrchové jakosti mohou být nevhodné nebo nedostatečné, jelikož nereflektují specifické charakteristiky laserově řezaných povrchů.

Cílem této diplomové práce je prozkoumat problematiku hodnocení jakosti heterogenních povrchů vzniklých laserovým řezáním a navrhnout vhodné metody a postupy pro jejich efektivní analyzování.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TOPOGRAFIE POVRCHU

Analýza topografie povrchu má vysoký význam pro řadu funkčních aplikací. V některých případech je definována jako otisk výrobního procesu, jehož význam může být v procesu kontroly naprosto zásadní. [1]

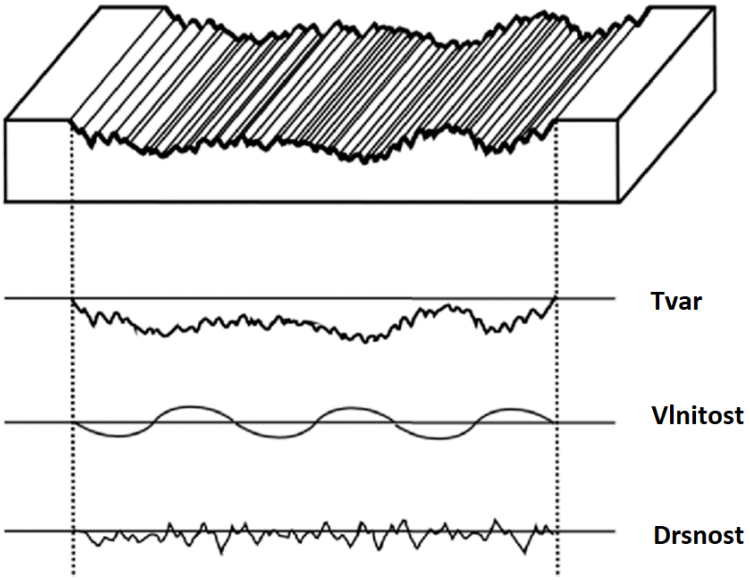
Výsledná topografie povrchu závisí na mechanických a fyzikálních vlastnostech materiálu nástroje a obrobku, geometrii nástroje a na řezných podmínkách, především na velikosti posuvu a řezné rychlosti. Nepravidelnosti povrchu mohou být následkem výrobní techniky, vibrací, výchylek a vnitřní struktury materiálu. Plánování parametrů a údajů pro obrábění vyžaduje proto zvýšenou pozornost, zejména u dokončovacích operací. [2, 3]

1.1 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu je významným faktorem při hodnocení kvality obrábění a řadí se mezi důležité vlastnosti, které hrají zásadní úlohu při hodnocení kvality struktury. [4, 5]

Drsnost povrchu obrobených ploch významně ovlivňuje pracovní vlastnosti, opotřebení a životnost součástí. Její vyhodnocení má důležitou roli při zajištění spolehlivosti a stability dílů, snižování koeficientu tření a zlepšování kvality.

Povrch se skládá ze tří složek: drsnosti, vlnitosti a tvaru. [4]



Obrázek 1 Tvar, vlnitost a drsnost [6]

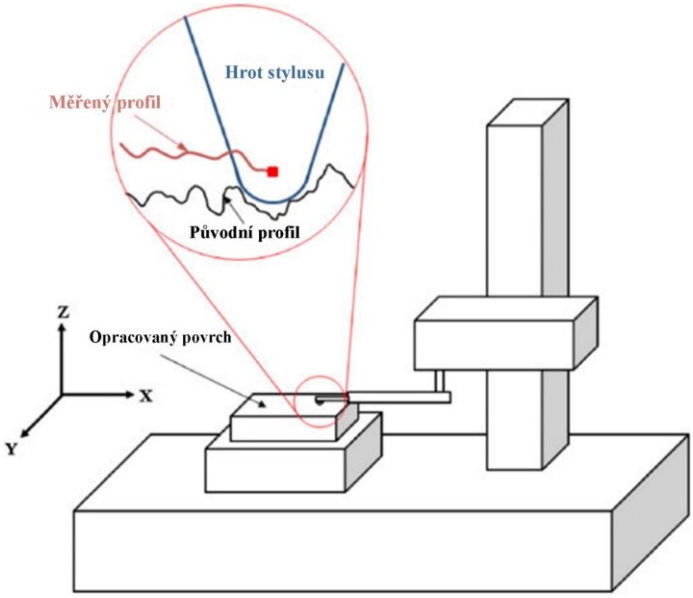
Základním předpokladem vyhodnocování drsnosti povrchu je oddělit efektivně drsnost povrchu od signálů topografie povrchu. Pro oddělení drsnosti povrchu a dalších nízkofrekvenčních složek je v současné době hlavní metodou technologie filtrování. [4]

1.2 Metody měření povrchů

Aby bylo možné získat relevantní výsledky, musí být nejprve navržena vhodná metoda měření. Tyto metody lze obecně rozdělit na měření přímé, bezkontaktní a porovnávací.

[1, 7]

Metoda přímého měření využívá pro měření drsnosti povrchu stylus, jehož hrot se pohybuje po povrchu. Metoda je sice jednoduchá a běžně používaná, ale může dojít k nežádoucímu poškození křehkých struktur. Bezkontaktní metody nahrazují tento stylus optickými senzory a světelnými nebo ultrazvukovými impulsy. [7, 5]



Obrázek 2 Stylusový profilometr [8]

Pro odstranění limitů kontaktních metod přišly na řadu bezkontaktní techniky, které umožňují vyhodnocovat měření drsnosti povrchu prostřednictvím optických zařízení. Přístroje pro měření drsnosti založené na rozptylu světla představil Brodmann. Měření drsnosti bylo pro svou bezkontaktní povahu zvoleno jako náhradní řešení pro případy, kde není vhodné měřit mechanickým stylusem, který by poškodil měkké povrchy. [5]

Pro jednoduché vizuální nebo hmatové ověření slouží porovnávací metody užitečné v případech, kdy je třeba parametry drsnosti stanovit pouze přibližně. [7]

1.3 Termíny a definice dle normy ČSN EN ISO 21920-2

Dříve používaná norma ČSN EN ISO 4287 byla nahrazena normou ČSN EN ISO 21920-2, která je účinná od července roku 2023. [9]

1.3.1 Termíny a definice

Následující text obsahuje základní definice dle normy ČSN EN ISO 21920-2.

Skin modelu

„*Model neideálního povrchu.*“ [10]

Textura povrchu

„*Geometrické nepravidelnosti obsažené v měřítku vymezeném povrchu.*“ [10]

Čára profilu

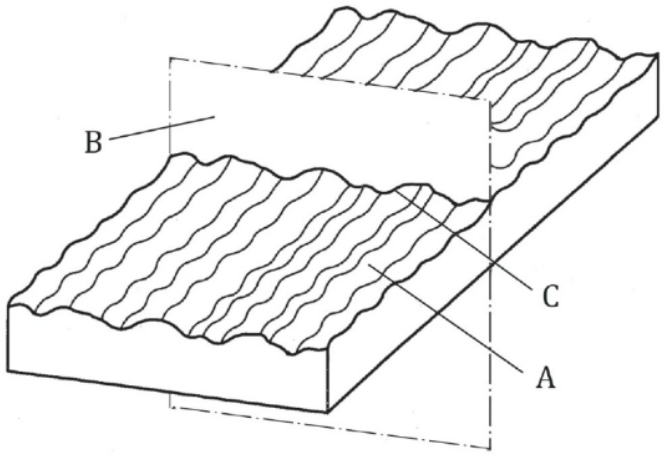
„*Průniková čára skin modelu a sečné roviny kolmé ke skin modelu a ve stanoveném směru.*“ [10]

Legenda

A-skin modelu

B-sečná rovina

C-čára profilu

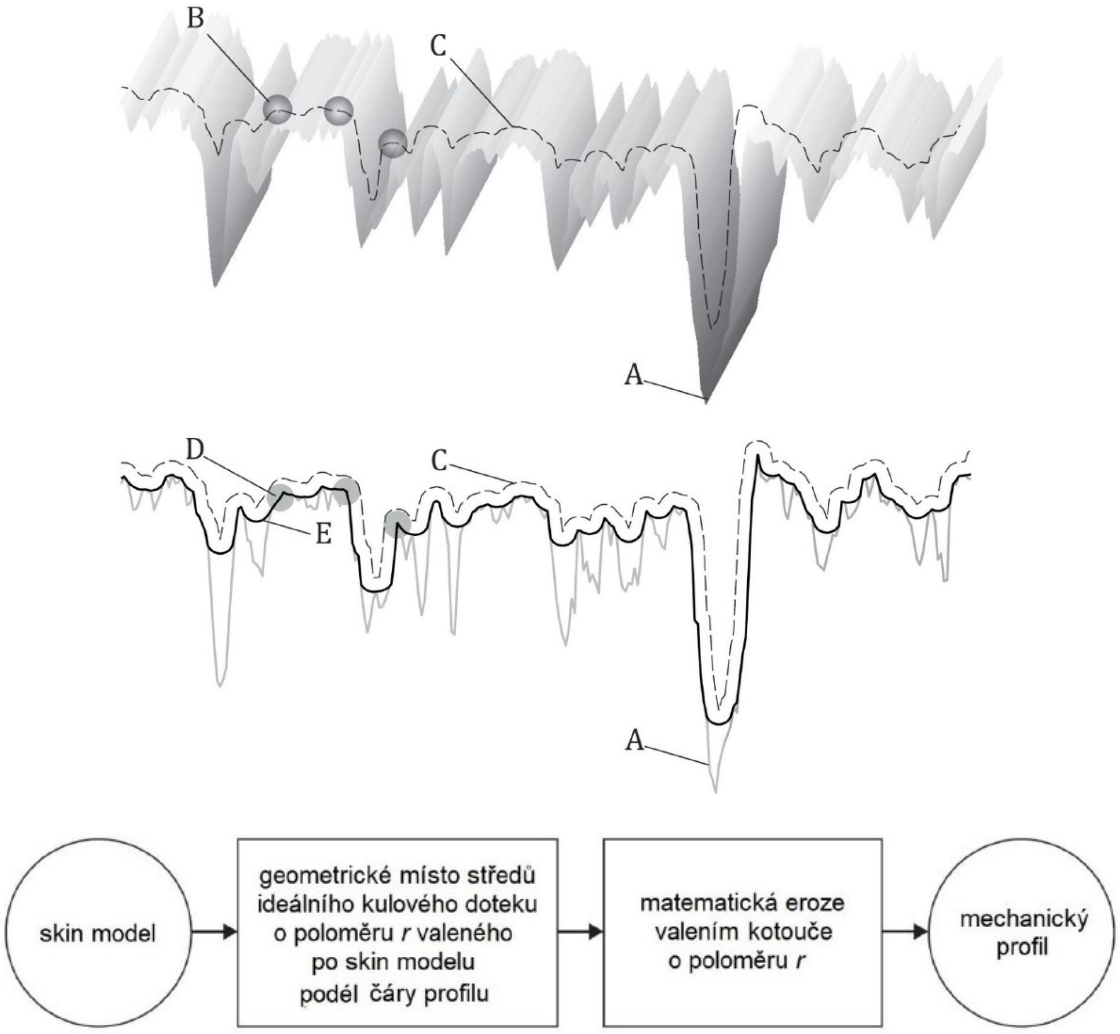


Obrázek 3 Čára profilu [10]

Mechanický profil

„*Rozhraní matematické eroze vzniklé valením kotouče o poloměru r po geometrickém místu středů ideálního kulového doteku o poloměru r, který je valen podél čáry profilu po skin modelu součásti.*“ [10]

Účinek mechanického filtrování je znázorněno na následujícím obrázku.



Legenda

A skin modelu

B ideální kulový dotek o poloměru *r*

C obalová křivka určující geometrické místo středů ideálního kulového doteku B valeného po skin modelu

D koule o poloměru *r*

E mechanický profil: rozhraní matematické eroze vzniklé valením kotouče D po obalové křivce C

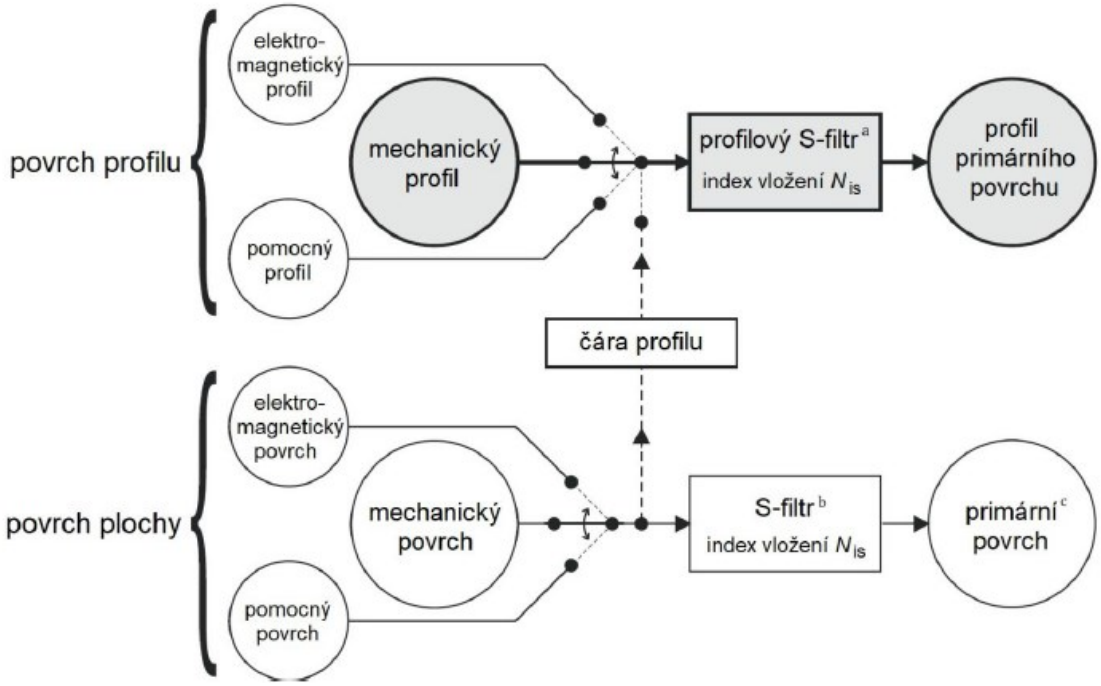
Obrázek 4 Mechanický profil [10]

Profil primárního povrchu

„*Čára profilu povrchu získaná tak, že daná čára profilu povrchu se reprezentuje jako specifikovaný primární matematický model se stanoveným indexem vložení* N_{is}.“ [10]

Index vložení (N_{is})

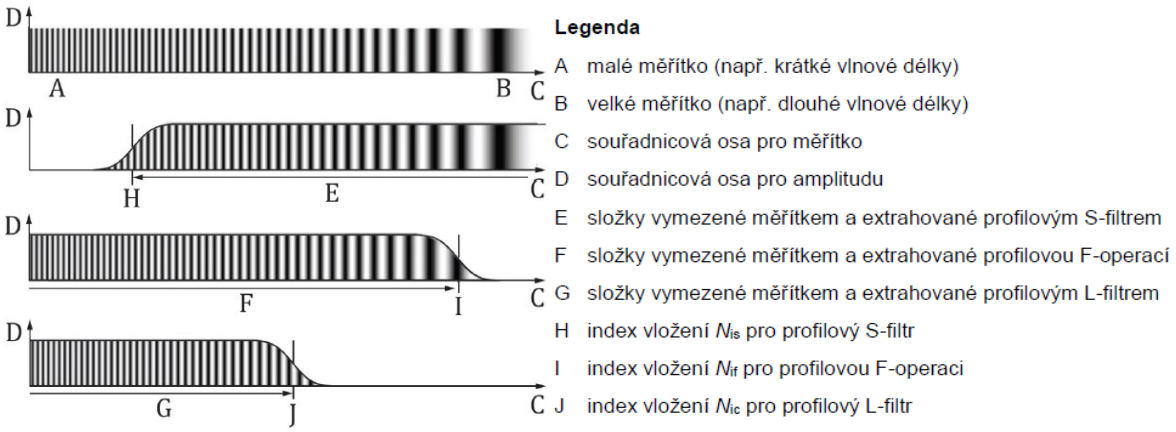
„*Číslo nebo soubor čísel indikující relativní úroveň vložení pro konkrétní primární matematický model.*“ [10]



Obrázek 5 Definice primárního povrchu a profilu primárního povrchu [10]

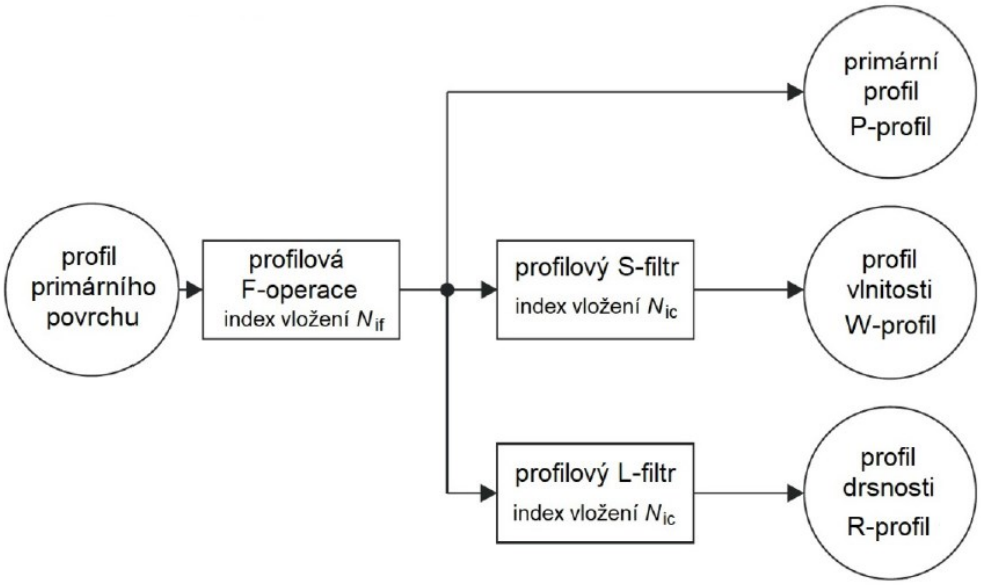
Elektromagnetický profil je povrch, který se získá elektromagnetickou interakcí se skin modelem součásti podél čáry profilu a profilový S-filtr je filtr sloužící k odstranění laterální složky malého měřítka z profilu.

Mezi další filtry patří L-filtr, který odstraní složky velkého měřítka z profilu a dále pak F-operace, která z profilu vyřadí vliv tvaru. [10]



Obrázek 6 Vztahy mezi S-filtrem, L-filtrem a F-operací [10]

Pro určení primárního profilu (P-profil), profilu vlnitosti (W-profil) a profilu drsnosti (R-profil) se postupuje podle měřícího postupu znázorňující obrázek 7.



Obrázek 7 Měřící postup pro určení P-profilu, W-profilu a R-profilu [10]

1.3.2 Výškové parametry

R_a-střední aritmetická výška

Parametr Ra je aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic a vypočítá se následovně.

$$R_a = \frac{1}{le}\int_0^{le} |z(x)|dx \tag{1}$$

R_{zx}-maximální výška úseku

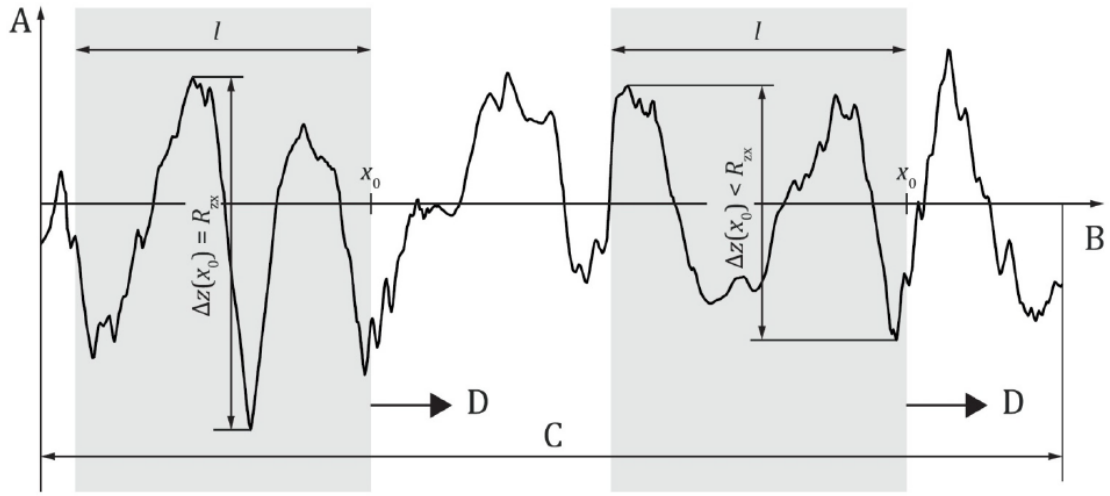
Parametr Rzx je rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší naměřenou hodnotou v úseku o délce *l*.

$$R_{zx}(l) = \max_{l \le x_0 \le l_e} (\Delta z(x_0)), \text{přičemž } \Delta z\,(x_0) = \max_{x \in X}(z(x)) - \min_{x \in X}(z(x)) \tag{2}$$

„x_0 *pohyblivá poloha pravé hranice uvažovaného úseku*

$\Delta z\,(x_0)$ *maximální hodnota rozdílu mezi nejvyšší hodnotou pořadnice a nejnižší hodnotou pořadnice v uvažovaném úseku v pohyblivé poloze* x_0

$X = \{x \in R | x_0 - l \le x \le x_0\}$ *soubor hodnot x uvažovaného úseku v pohyblivé poloze* x_0“ [10]



Legenda

A výška
B osa *x* (referenční čára)
C hodnocená délka
D pohyblivý úsek o délce *l*

Obrázek 8 Maximální výška úseku [10]

2 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE

V poslední době se v moderní výrobě ve velké míře provádí řezné operace, které jsou podporovány nekonvenčními technologiemi. Mezi tyto technologie se řadí řezání vodním paprskem, řezání laserem paprsku, ultrazvukové obrábění a řezání plazmovým obloukem. Předností nekonvenčních technologií řezání materiálů je zejména kvalita řezů a hospodárnost s možností zpracování různých typů materiálů. [11, 12]

2.1 Řezání plazmovým obloukem

Technologie PAC (Plasma arc cutting) využívá proud ionizovaného plynu s vysokou rychlostí a teplotou za účelem roztavení, odpaření a odstranění materiálu z povrchu.

Řezání plazmovým obloukem je účinný proces pro řezání, tvarování a drážkování těžko obrobitelných materiálů, složitých profilů, trubek, desek, a především je vhodný pro křivky a kružnice. Samotná optimalizace tohoto procesu je náročná z důvodu mnoha vstupních parametrů a složitého mechanismu řezání. [11, 13, 14]

Plazma je často považována za čtvrtý stav hmoty a vzniká zahřátím plynu na velmi vysokou teplotu, při které nejsou elektrony vázány na jádro atomu nebo působením silného elektromagnetického pole, které vyvolá ionizaci atomů plynu, jež způsobí vznik elektrického náboje.

Teploty plazmy se pohybují v rozmezí od 10 000 do 30,000 °C a pro její vznik se používá elektrický oblouk, vytvořený přivedením vysokého napětí do elektrody umístěné uvnitř řezné hlavy, tzv. pilotní oblouk. Zároveň dochází k zavedení plynu do trysky mezi elektrodou a tělesem plazmového hořáku. Při kontaktu s obloukem se plyn zahřeje do bodu, kdy se z něj stane plazma. [11, 14]

Použitím této metody se nedosahuje vysoké kvality, nicméně provoz tohoto systému je levnější než provoz systémů se vstřikováním vody nebo duálním plynem.

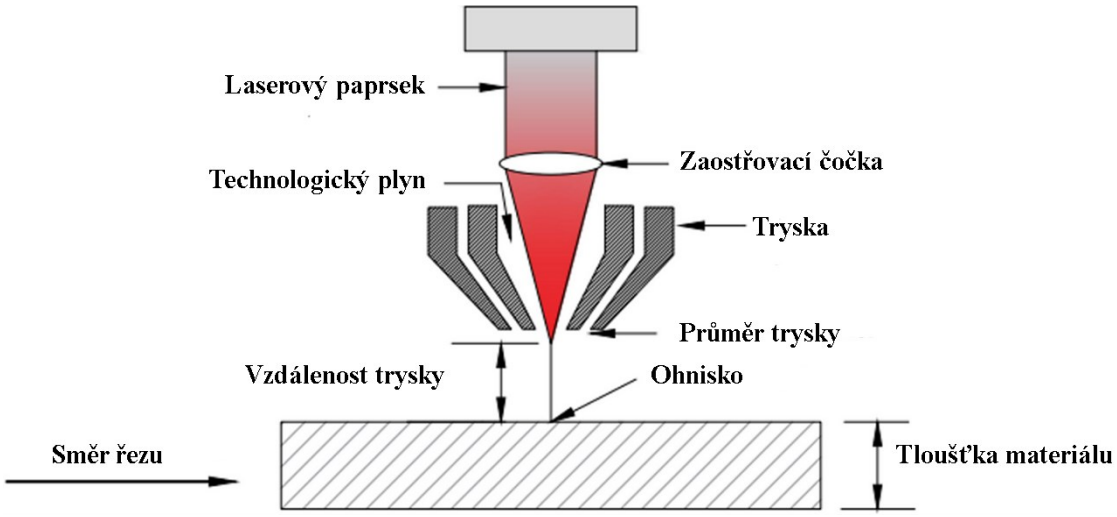
Mezi výhody řezání plazmovým obloukem patří široké uplatnění při tepelném řezání legovaných, uhlíkových, nízkolegovaných ocelí a neželezných kovů, vysoká rychlost řezání a řezání materiálu o tloušťce až 150 mm. Metoda lze použít i na řezání vysoce reflexních materiálů a je levnější ve srovnání s technologiemi, jako je řezání laserem. [11]

Řezání plazmovým obloukem se původně používalo k řezání obtížně obrobitelných materiálů a později se její použití rozšířilo na velké množství dalších výrobních operací, při nichž je zapotřebí vysoké koncentrace tepelné energie. [11]

2.2 Řezání laserem

Lasery dělíme na pevnolátkové, plynové, kapalinové a polovodičové. Výhodou pevnolátkových laserů je krátká vlnová délka, koncentrace světla a dobrá stabilita. Je vhodný pro přesné obrábění. Pro jeho nízkou energetickou účinnost se však používá především k děrování, bodovému svařování a řezání tenkých desek. Pro porovnání, plynové lasery zejména lasery CO_2 dosahují výkonu 45 kW v kontinuálním režimu a 5 kW v pulzním režimu, a jsou tedy používány nejčastěji ve strojírenském a zpracovatelském průmyslu. [15]

Laserové řezání je technika využívající tepelnou energii bez přímého kontaktu s obrobkem. Princip spočívá v aplikaci vysoce výkonného, koherentního a monochromatického laserového paprsku o širokém spektru vlnových délek na povrch obrobku. Během procesu absorbuje obrobek energii laserového paprsku, což způsobuje rychlé zvýšení teploty v místě zaostření. Tento vzrůst teploty má za následek tavení a odpařování materiálu, čímž dochází k řezání. [12]



Obrázek 9 Řezání laserem. [16]

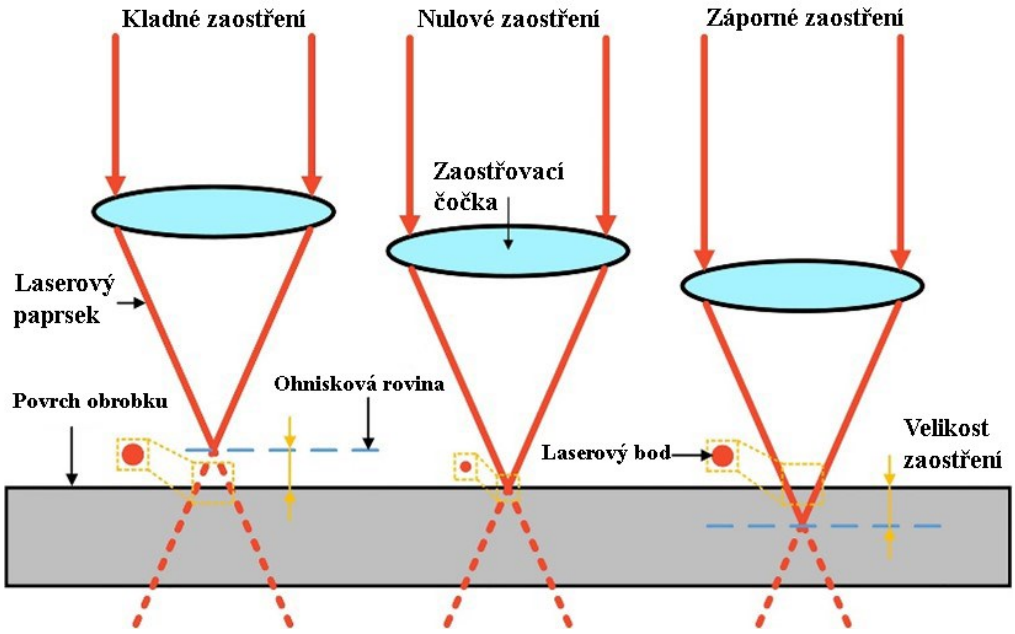
Tato technologie se řadí k nejvíce využívaným bezkontaktním způsobům řezání vodivých i nevodivých materiálů, titanu, nerezové oceli a hliníku. Dále pak nekovové materiály, například dřevo, sklo, plasty, keramika a kompozity. [12, 16]

Laserové řezání využívá 4 hlavní techniky, kterými jsou řezání odpařováním, řezání řízeným lomem, tavné řezání s asistencí kyslíku a tavné řezání využívající inertní plyn, jako je dusík nebo argon. [17]

Velikost zaostření neboli poloha ohniska je vzdálenost mezi ohniskem laseru a povrchem obrobku.

Definujeme 3 typy zaostření

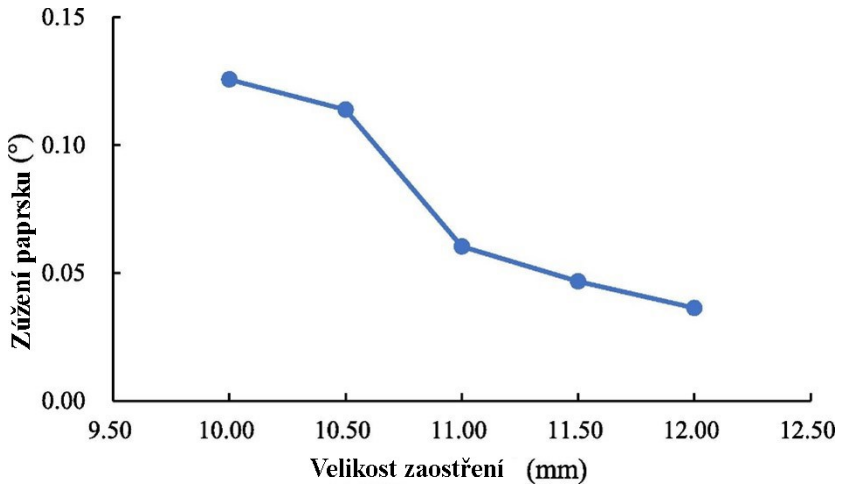
- Kladné zaostření – Ohnisková rovina je nad obrobkem. Rozšiřuje se spodní část řezu, a to zlepšuje proudění plynu a tekutost taveniny.
- Záporné zaostření – Ohnisková rovina je pod obrobkem.
- Nulové zaostření – Ohnisková rovina je umístěna na povrchu obrobku. [17]



Obrázek 10 Poloha ohniska [17]

Zaostřovací systém se skládá z přívodního vlákna, výstupní optiky vlákna, kolimátoru, zaostřovací optiky a ochranného skla, které má za úkol chránit zaostřovací optiku před znečištěním z procesu řezání. [15]

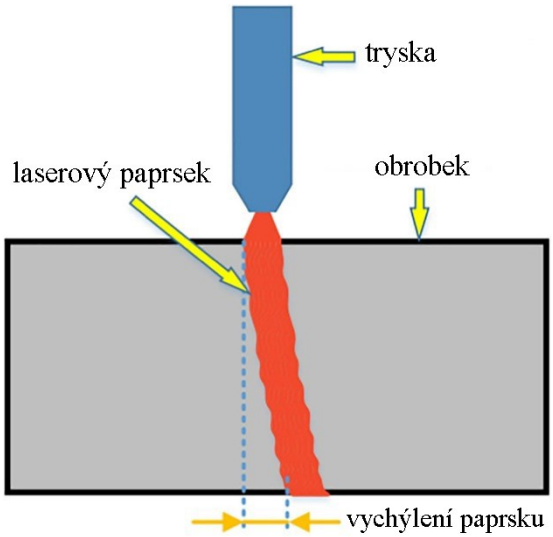
Zaostření je velice důležité. Následující obrázek vypovídá, že zúžení paprsku je úměrné velikosti zastření. S rostoucím zaostřením se paprsek zužuje. [17]



Obrázek 11 Změna zúžení paprsku vlivem velikosti zaostření [17]

Z důvodu rozptylu energie není řezná dráha laseru svislá. Výchozí poloha laserového paprsku je od vstupního místa posunuta, jak ukazuje obrázek 12.

Teplota materiálu se po uplynutí určité doby přiblíží k bodu tání a materiál je v daném okamžiku odfouknut pomocným plynem. Výsledkem je zúžení a zkosení řezné hrany na spodním povrchu. [17]



Obrázek 12 Vychýlení laserového paprsku [17]

Ve srovnání s konvenčními technologiemi řezání má laserové řezání mnoho výhod, mezi něž patří absence řezné síly, malá šířka záběru, vysoká řezná rychlost a ochrana životního prostředí. [17]

Dalšími výhodami v porovnání s jinými technologiemi má laserová technologie minimalizaci ztrát materiálu, vysokou přesnost a snadnou automatizaci. [12, 16]

Metoda řezání laserem má ovšem značné nevýhody spočívající ve vysokých nákladech na samotný stroj a jeho provoz. Kvalita řezu je významně ovlivněna vstupními faktory. Za účelem dosažení vysoké kvality řezu, která se liší v závislosti na vlastnostech materiálu, je tedy nutné optimalizovat parametry procesu. Dále je zapotřebí kontrolovat změny mikrostruktury na povrchu řezaného materiálu, jelikož rychlé ochlazení může vést k nežádoucím účinkům, které mohou způsobit poruchy. [12]

Laserové řezání nachází uplatnění v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu, při stavbě lodí, vrtání malých otvorů a svařování. [12, 16]

2.3 Parametry laseru

Řezání laserem se skládá ze dvou parametrů, kterými jsou parametry paprsku a parametry procesu.

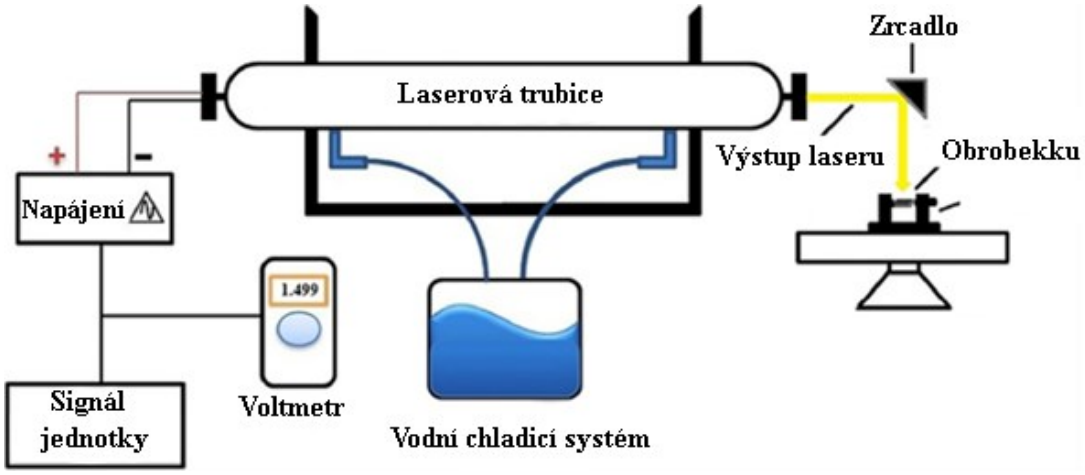
Parametry paprsku tvoří intenzita výkonu, vlnová délka, velikost svazku, polarizace svazku, pulzní výkon pokračující vlny, typy svazků, charakteristiky svazků a režim svazku.

Mezi procesní parametry laseru patří poloha ohniska, zaostření na laserové paprsky, dvojitá zaostřovací čočka, průměr trysky, pomocný plyn a tlak, odstupová vzdálenost, řezná rychlost a zarovnání. [16]

2.3.1 CO_2 laser

CO_2 laser je využíván k řezání většiny silných kovových materiálů, mezi něž patří kovové desky a vyztužené kovové desky. Výsledkem je, že CO_2 laser má vyšší energetickou náročnost oproti jiným laserům. [16]

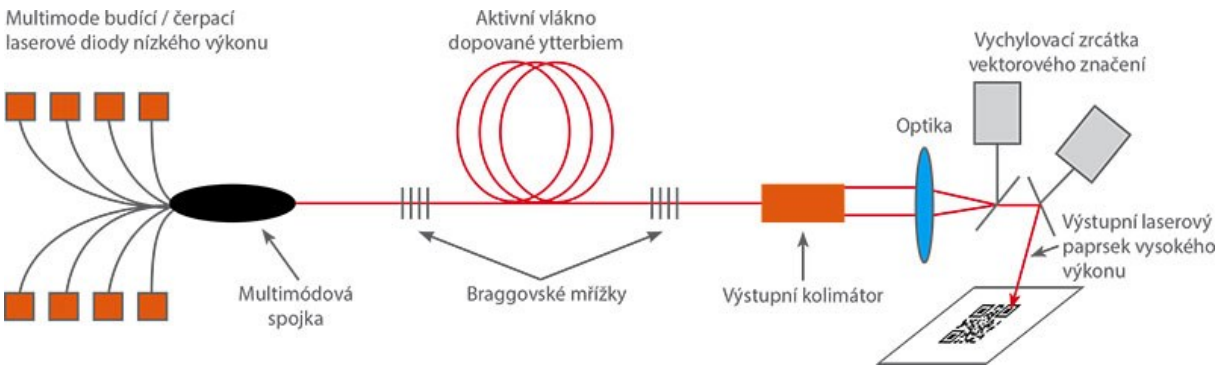
Laser se pohybuje v infračervené oblasti spektra 3-30 μm při vlnové délce 10,6 μm. Pro zvýšení rychlosti řezání a hladkosti řezu je laserový řezací stroj CO_2 vybaven tryskami pro přívod kyslíku a stlačeného vzduchu nebo inertního plynu N_2. [15]



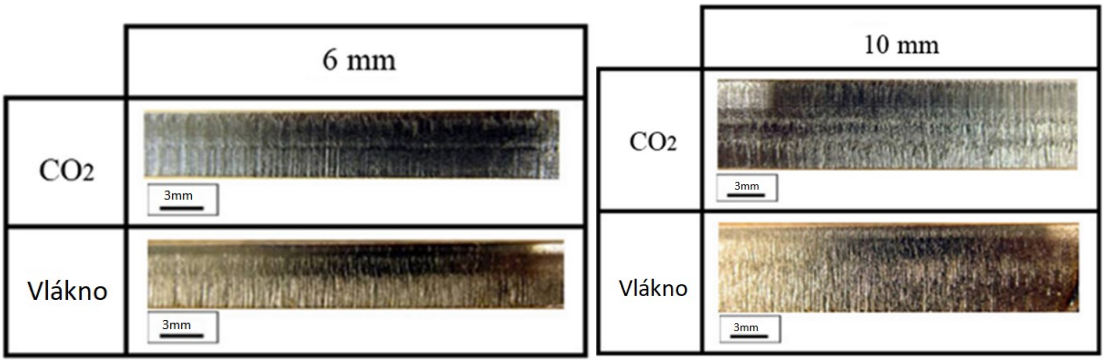
Obrázek 13 CO_2 laser [16]

2.3.2 Vláknový laser

Vláknový laser umožňuje rychlejší a přesnější řezání tenkých plechů. Pokud však jde o silnější plechy, kvalita řezného povrchu je nižší, než kvalita řezání CO_2 laserem při stejné rychlosti řezání jak je patrné z obrázku 15, kde je porovnaný řez materiálu AISI 304 (nerezová ocel) při použití vláknového laseru a CO_2 laseru pro tloušťky 6 a 10 mm. [16]



Obrázek 14 Princip vláknového laseru [18]



Obrázek 15 Řezné plochy AISI 304 získaných pomocí CO_2 a vláknového laseru [16]

Kvalita řezu plechu o tloušťce 6 mm řezaná CO_2 dosahuje lepších výsledků než vláknový laser, avšak ani jedna z technologií nevykazuje lepší kvalitu v případě tloušťky 10 mm. [16]

2.3.3 Tepelně ovlivněná zóna

Při řezání plazmovým obloukem dochází k intenzivní koncentraci tepla v oblasti řezu. Tato oblast se nazývá tepelně ovlivněná zóna HAZ (Heat Affed Zone). Tepelně ovlivněná zóna souvisí především s typem a tloušťkou materiálu. [11]

HAZ představuje zónu, ve které došlo ke změně mikrostruktury, ale nedošlo k roztavení a její velikost vypovídá o změně vlastností materiálu. [16]

3 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ DAT

Výběr vhodné statistické metody je velice důležitý při analýze dat, jelikož nevhodně zvolená statistická metoda způsobuje vážné nedostatky při interpretaci výsledků.

Pro zvolení vhodné statistické metody je zapotřebí znalost předpokladů a podmínek statistických metod, podle kterých lze zvolit příslušnou statistickou metodu pro analýzu dat.

Základní statistické metody, které se používají při analýze dat je popisná statistika, která poskytuje shrnutí dat prostřednictvím hodnot, jako je průměr, medián a směrodatná odchylka. Na základě dat stanovuje závěry pomocí statistických testů, jako je studentův t-test a ANOVA.

Při výběru vhodné statistické metody je podstatný cíl a účel statistické analýzy, typ dat a rozdělení použitých dat. [19]

3.1 Rozdělení dat

Data lze rozdělit na nominální, ordinální a diskrétní, pro které se používají neparametrické metody, zatímco pro spojitá data se používají parametrické i neparametrické metody.

Do parametrických testů se řadí všechny typy t-testů a F-testů. Pro porovnání průměrů mezi dvěma skupinami se používá Studentův t-test, naopak pro porovnání průměrů mezi třemi nebo více skupinami se používá F-test.

Parametrické metody jsou ve srovnání s neparametrickými metodami silnějším testem pro zjišťování rozdílů mezi skupinami, ale z důvodu některých přísných předpokladů, včetně normality dat a velikosti vzorku, není možné použít parametrický test v každé situaci.

Základním ukazatelem parametrické metody je průměr, který je velmi ovlivněn odlehlými hodnotami, zatímco v neparametrické metodě je základním ukazatelem medián, na který nemají odlehlé hodnoty vliv. [19]

3.2 Testování statistické hypotézy

Při testování hypotéz je zapotřebí řídit se daným postupem.

- Formulace nulové a alternativní hypotézy
- Volba hladiny významnosti

- Volba testovací statistiky
- Určení kritického oboru
- Vyčíslení testovací statistiky a výpočet kvantilů
- Rozhodnutí, zda zamítneme nebo nezamítneme nulovou hypotézu Ho [20]

		Výsledek testu	
		platí H_0	neplatí H_0
Skutečnost	platí H_0	správné rozhodnutí pravděpodobnost **1 - α** **spolehlivost testu**	chyba I. druhu pravděpodobnost **α** **hladina významnosti**
	neplatí H_0	chyba II. druhu pravděpodobnost **β** **hladina významnosti**	správné rozhodnutí pravděpodobnost **1 - β** **síla testu**

Obrázek 16 Testování statistických hypotéz [21]

3.3 Regresní analýza

Regresní analýza představuje významnou statistickou metodu, která je běžně používána k určení vztahu mezi závislou proměnnou a jednou nebo více nezávislými proměnnými. [22]

3.3.1 Lineární regrese

Lineární regrese je metoda, která umožňuje vyjádřit lineární vztah a souvislost mezi spojitou závislou a nezávislou proměnnou prostřednictvím lineární rovnice. Lineární závislost tvrdí, že při každé změně jedné proměnné dochází k odpovídající změně druhé proměnné.

[23, 24]

Lineární regrese umožňuje nalézt korelační koeficient v lineárním vztahu mezi dvěma nebo více proměnnými, na základě kterého lze mezi proměnnými proložit přímku a predikovat budoucí hodnoty. [25]

Interpretace výsledků lineární regrese obsahuje několik výstupů:

- Konfidenční interval

Zpravidla je stanovený na 95 % a vyjadřuje přesnost odhadu koeficientu nezávislé proměnné.

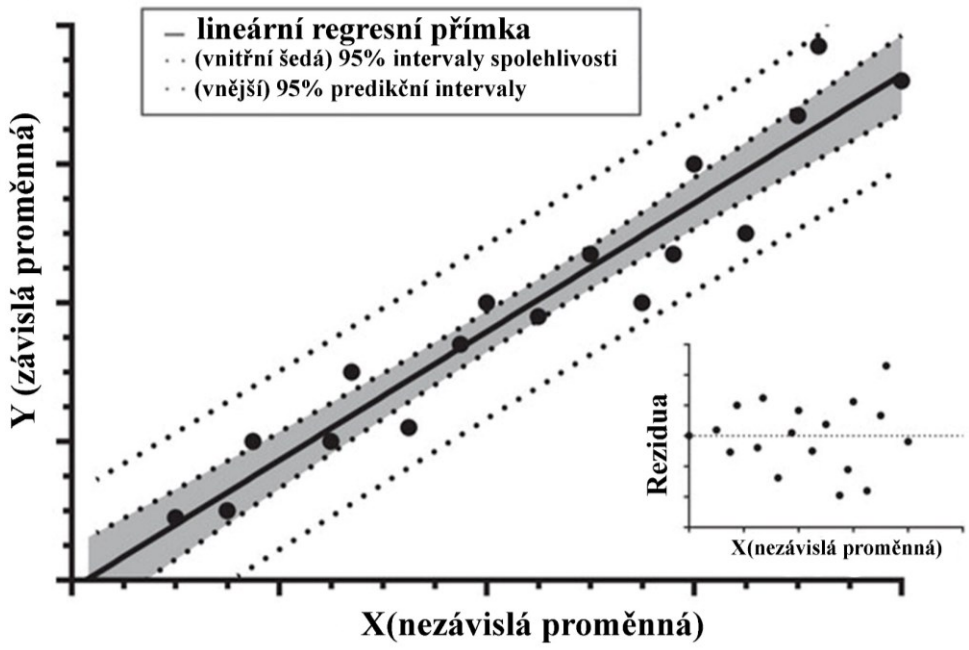
- Hodnota P

Vyjadřuje, zda je vztah mezi nezávislou a závislou proměnnou statisticky významný či nevýznamný. [24]

- Koeficient determinace R^2

R^2 je bezrozměrná hodnota mezi 0,0 a 1,0, která vyjadřuje sílu lineárního vztahu. I když je v praxi hodnota 1,0 nedosažitelná, charakterizuje datové body uspořádané do dokonalé přímky, a tedy znalost hodnoty X umožňuje určit hodnotu Y se stoprocentní jistotou.

Čím je hodnota R^2 vyšší, tím větší je jistota, že data odpovídají lineárnímu regresnímu modelu. [23]



Obrázek 17 Lineární regrese [23]

V mnoha situacích není vztah mezi proměnnými lineární, a proto nemusí být lineární regrese optimální volbou a využijí se nelineární regrese. [22]

3.3.2 Nelineární regrese

Zatímco lineární regrese přiřazuje data k přímkové funkci, nelineární regrese přiřazuje data k rovnici, která nejlépe vystihuje příslušnou závislost mezi proměnnými.
Nelineární regrese je flexibilnější a umožňuje zachytit i složité trendy. Je ovšem obtížnější na interpretaci. [22, 23]

Nelineární regrese s sebou přináší i své nevýhody. Hlavní nevýhodou je zvýšená složitost modelů. Pro nelineární regresní modely jsou zapotřebí komplexnější matematické algoritmy, což může ztížit jejich interpretaci a aplikaci. Kromě toho jsou tyto modely citlivější na odlehlé hodnoty a chyby v datech. Z toho vyplývá, že přesnost modelu je závislá na kvalitě dat. [22]

Následující část obsahuje příklady nelineárních regresních technik.

- Polynomická regrese

Polynomická regrese je typ regresní analýzy, který slouží k modelování vztahu mezi nezávislou proměnnou x a závislou proměnnou y pomocí polynomu n-tého stupně. Tento typ regrese je často využíván v situacích, kdy lineární aproximace není adekvátní pro popis vztahu mezi sledovanými proměnnými.

Polynomická funkce je funkce tvaru $f_{(x)} = a_0 + a_1x + a_2x^2 + ... + a_nx^n$

kde $a_0, a_1, a_2, ..., a_n$ jsou regresní koeficienty.

Tento model může být užitečný v situacích, kdy je vztah mezi proměnnými zakřivený a nelze jej zachytit přímkou. [22]

- Logistická regrese

Metoda používaná k modelování vztahu mezi závislou proměnnou a jednou nebo více spojitými nezávislými proměnnými. Logistická regrese je široce využívána zejména v případech, kdy je závislá proměnná binární, což znamená, že má dvě kategorie např. 0 nebo 1. Používá se v oblastech, jako je epidemiologie a sociální vědy. [22]

- Exponenciální regrese

Exponenciální regrese se používá k modelování vztahů mezi proměnnými, kde závislá proměnná se mění exponenciálně s nezávislou proměnnou. Tato regrese je využívána v mnoha oborech, mezi které patří finance, biologie a fyzika, kde se často setkáváme s exponenciálními jevy.

Exponenciální funkce je funkce tvaru $f_{(x)} = ab^x$ kde a a b jsou regresní koeficienty. [22]

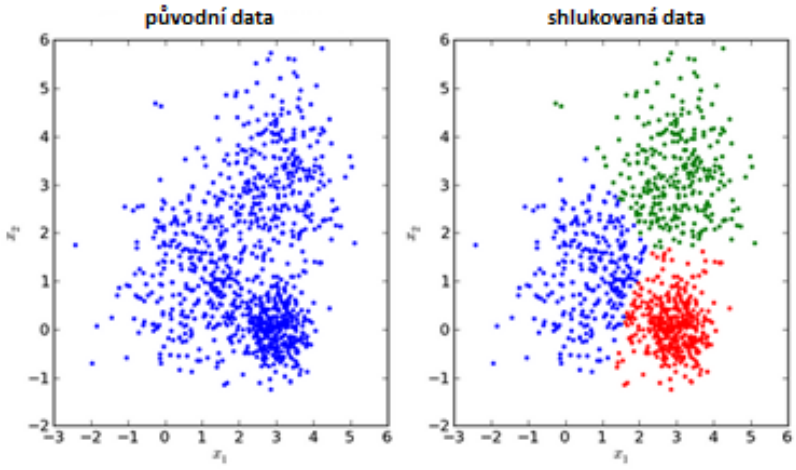
3.4 Shluková analýza CLU

Metoda shlukování CLU (Cluster analyisis) spočívá v použití algoritmů k seskupení datových bodů do skupin nazývaných shluky na základě míry podobnosti. Účelem shlukové analýzy je objevit vzory a struktury v souboru dat, které mohou poskytnou náhled na skryté vztahy a souvislosti.

Existuje celá řada měr podobnosti, které je možno použít. Jedná se o Euklidovskou vzdálenost, Manhattanovu vzdálenost, Minkowského vzdálenost, Jaccardovu podobnost a kosinovou podobnost. K případnému rozšíření těchto měr lze použít transformační techniky a najít tak skryté vazby mezi datovými body v transformovaném prostoru. [20, 26, 27]

Shluková analýza má široké využití v různých oblastech jako je biologie-klasifikace živočichů a rostlin, medicína-identifikace nemoci a jejich stádia, analýza obrazu a videa, analýza sociálních sítí, kybernetická bezpečnost a průzkum trhu. [27, 28]

Při posuzování vzdáleností hraje velmi významnou roli posouzení podobnosti nebo pravidelnosti mezi údaji. Tento postup slouží k pochopení, s jakými údaji jsou data údajně vzájemně propojená, podobná, nepodobná, a které posouzení vzdálenosti je potřebné k jejich porovnání. [29]



Obrázek 18 Shlukovaná data [30]

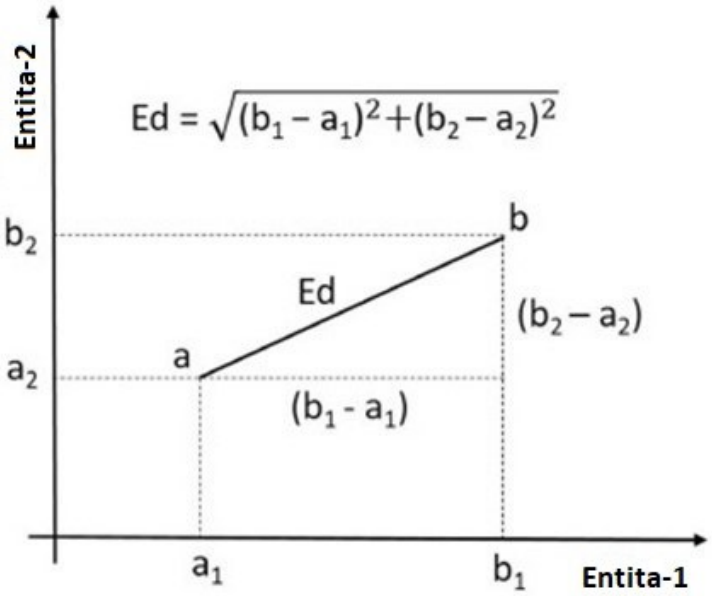
3.4.1 Pokroky v algoritmech shlukování

Vývoj a zdokonalování shlukovacích algoritmů určených k řešení řady výzev a typů dat je předmětem neustálé práce výzkumníků. Mezi oblasti vývoje patří odolnost vůči vysokorozměrným datům.

S rostoucí velikostí dat se zkoumají shlukovací algoritmy, které jsou schopny efektivně pracovat s vysokorozměrnými daty. [27]

3.4.2 Euklidovská vzdálenost

Euklidovská vzdálenost je vzdálenost mezi body na přímce v euklidovské oblasti. Jedná se o délku přepony pravého trojúhelníka a její výpočet je založen na Pythagorově větě. Při shlukování se uvažuje euklidovská vzdálenost, jestliže je interval mezi dvěma body od centroidu stejný, přičemž body se nacházejí ve stejném nebo opačném směru. [28, 31]



Obrázek 19 Euklidovská vzdálenost mezi dvěma subjekty [31]

Euklidovská vzdálenost je velmi účinná, jsou-li soubory dat uspořádány do kompaktních skupin. [31]

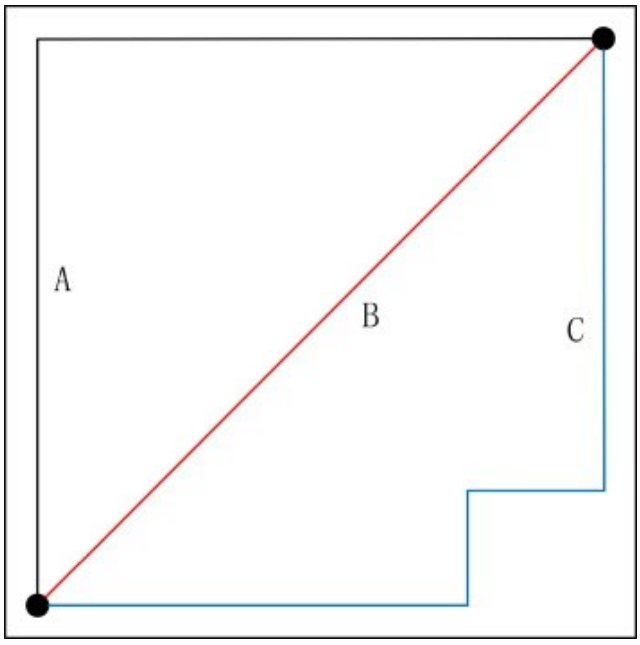
Mezi nejčastěji diskutované metody pro shlukování se řadí metoda faktorizace nezáporných matic NMF (nonnegative matrix factorization), spektrální shlukování a k-means.

Metoda NMF a metoda k-means využívá k měření podobností mezi datovými body euklidovskou vzdálenost v původním prostoru, avšak metody spektrálního shlukování využívají pro určení podobností euklidovskou vzdálenost v transformovaném prostoru, a tím jsou schopny odhalit některé skryté struktury v datových souborech. [26]

3.4.3 Manhattanská vzdálenost

Známá také jako vzdálenost městských bloků, vzdálenost mezi dvěma body nebo mezi dvěma vektory.

Manhattanská vzdálenost nepředstavuje přímou vzdálenost mezi dvěma body, která se využívá u euklidovské vzdálenosti. [27, 32]



Obrázek 20 Manhattanská a euklidovská vzdálenost [32]

Červená čára B reprezentuje euklidovskou vzdálenost, která odpovídá přímce mezi dvěma body. Černá čára A spolu s modrou čárou C reprezentují manhattanskou vzdálenost. [32]

3.4.4 K-Means

Metoda shlukování K-means se široce používá v mnoha oblastech a zpravidla slouží jako srovnávací metoda. K-means seskupuje datové body podle jejich vzdálenosti k centroidu jednotlivých shluků do předem určeného počtu (k) shluků. [26, 27]

3.5 Explorativní analýza dat

Explorativní analýza dat (EDA) je metoda analýzy, která pomáhá lépe porozumět datům. Umožňuje odhalit vzory, souvislosti, odlehlé hodnoty, chybějící hodnoty a další vlastnosti skryté v datech, které mohou poskytnout cenné informace a sloužit jako podklad pro rozhodování. Patří mezi ně odlehlé hodnoty a vlastnosti dat, které mohou být neočekávané. Prostřednictvím EDA lze identifikovat korelace mezi proměnnými, trendy nebo odlehlé hodnoty, které pouhým pohledem na čísla nemusí být v souboru dat patrné. [25, 33, 34, 35]

Metoda je zaměřená na analýzu a pochopení dat prostřednictvím vizualizace a statistiky s cílem získat náhled na data, rozpoznat vzorce a otestovat hypotézy, na základě kterých lze provést další analýzu. [36]

EDA je významnou první fází každé analýzy dat. Zjištění, kde se vyskytují odlehlé hodnoty a jak mezi sebou proměnné souvisejí, umožňuje navrhnout statistické analýzy, které přinesou užitečné výsledky. [33]

Nedůkladné prozkoumání datových souborů má za následek vyvození chybných závěrů a při nesprávném nebo vůbec žádném provedení průzkumné analýzy dat se mohou soubory dat chybně interpretovat a učinit špatná rozhodnutí.

Explorativní analýza dat spočívá v několika postupech, od uspořádání datových souborů až po provedení potřebných analýz za použití vizuálních technik. Mezi nejčastější používané techniky vizualizace EDA patří histogramy, krabicové grafy, rozptylové diagramy, deskriptivní statistika, korelační koeficienty a shluková analýza. [25]

EDA pomáhá včas identifikovat problémy s kvalitou dat. Včasné zachycení a náprava problémů s kvalitou dat může ušetřit čas i úsilí. [37]

Pokud provádíme analýzu dat, mělo by použité rozhraní dávat přednost především názornosti a snadnému přístupu k datům.

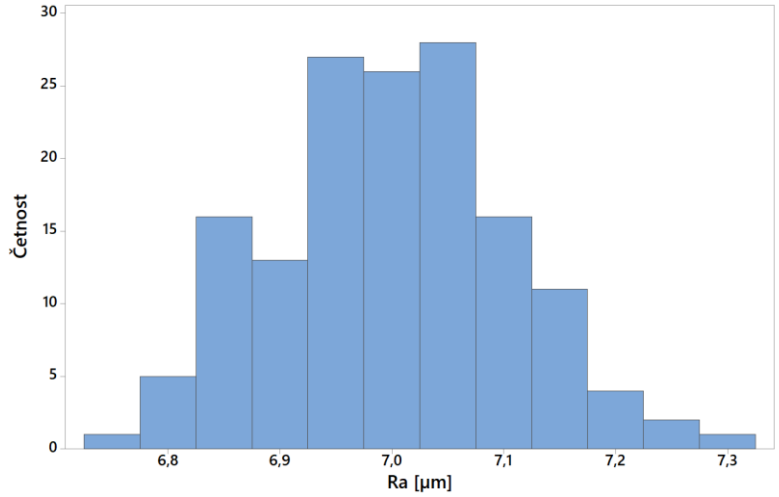
Na vzniku a rozvoji EDA se podílel v 60. letech minulého století americký matematik John Tukey, který zpopularizoval myšlenku explorativní analýzy dat jako přirozený doplněk konfirmační analýzy dat (CDA). Jak sám napsal „*Jednoduchý graf přinesl analytikovi dat více informací než jakýkoli jiný přístroj.*“ [35, 38]

Během doby, kdy Tukey začal psát o explorativní analýze dat, se počítačoví vědci jako Engelbart, Kay, Sutherland a mnoho dalších věnovali průkopnickému úsilí v oblasti vývoje softwarových rozhraní umožňujících člověku přístup ke složitým problémovým situacím. To vede k rychlejšímu pochopení a řešení problémů, které se dříve zdály neřešitelné. [38]

Prvním krokem explorační analýzy dat je zkoumání distribuce hodnot různých proměnných. Ke zkoumání rozložení dat se používají grafické metody, jako jsou histogramy, krabicové grafy pro vizualizaci rozložení hodnot a odhalení případných odlehlých hodnot. [25, 33]

3.5.1 Histogram

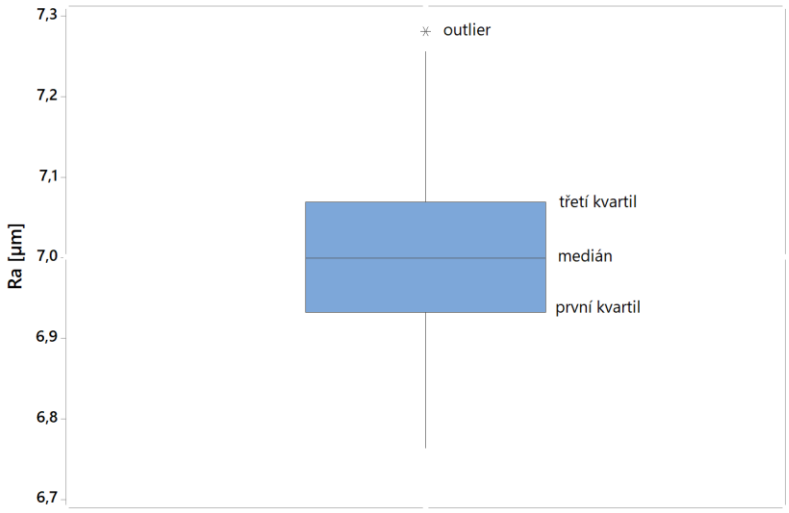
Jedná se o grafy, které se používají k vizualizaci rozložení dat dané proměnné. Zobrazují rozdělení četností dané proměnné ve formě sloupců, ve kterých výška každého sloupce udává četnost proměnné v daném rozsahu. Osa y může znázorňovat počet pozorování, procento z celkového počtu nebo podíl z celkového počtu. [25, 33, 36]



Obrázek 21 Histogram

3.5.2 Boxplot

Poskytuje grafické znázornění zobrazující medián, kvartily a odlehlé hodnoty. Je užitečný zejména pro porovnání rozdělení různých podskupin jedné proměnné. Je tvořen obdélníkem ohraničeným 25. a 75. percentilem, vodorovnou čarou nebo bodem v místě mediánu, svislými čarami a outlierem, který je zobrazen na obrázku 22. [33, 36]

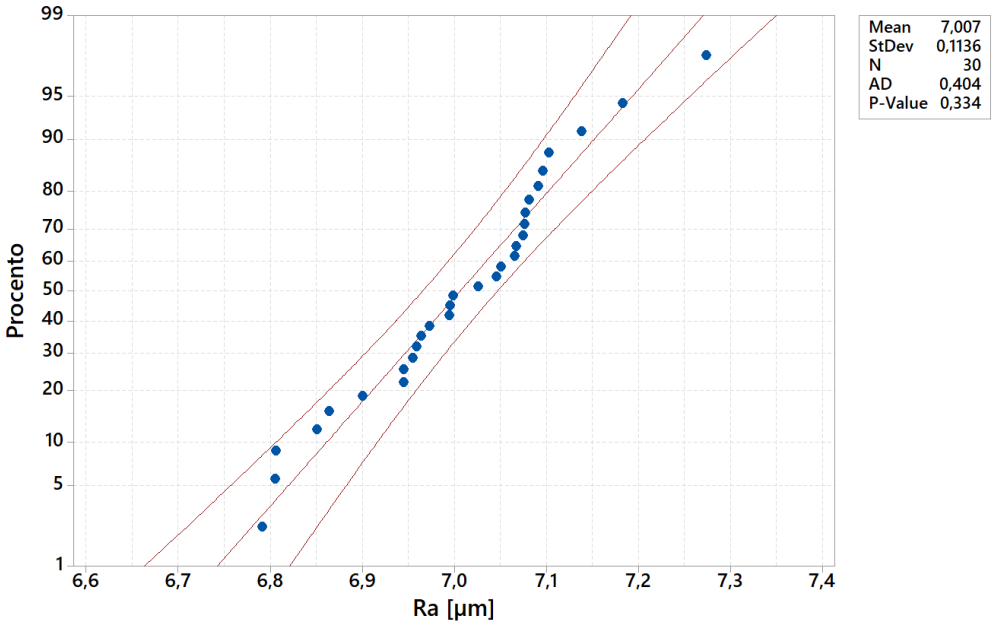


Obrázek 22 Boxplot

3.5.3 Q-Q graf

Používá se ke grafickému porovnání proměnné s určitým teoretickým rozdělením nebo k porovnání s rozdělením jiné proměnné. Častým použitím Q-Q grafu je ověření, zda má sledovaná proměnná normální rozdělení. [33]

Koncem 80. let 20. století se vizualizace stala podoborem počítačové vědy, který se soustředil na pochopení vizuálních metod získaných z počítačové grafiky a zaměřoval se na aplikace v oblastech, jako je lékařské zobrazování, planetární vědy a molekulární modelování. [38]



Obrázek 23 Q-Q graf

3.5.4 Fáze EDA

- Získávání dat

Shromažďování potřebných dat, které je vhodné uspořádat do podoby, se kterou lze snadno pracovat, jako je například tabulka.

- Čištění dat

Čištění dat spočívá v identifikaci a opravě chyb, chybějících hodnot, odlehlých hodnot a nesrovnalostí v souboru dat. Jedná se o důležitý krok v procesu EDA, jelikož zajišťuje kvalitu a přesnost dat použitých pro analýzu.

- Zpracování chybějících údajů:

Chybějící údaje jsou v tomto kroku identifikovány a vhodným způsobem zpracovány. Jedná se například o nulové nebo prázdné hodnoty.

- Zpracování odlehlých hodnot:

Odlehlé hodnoty mohou ovlivnit analýzu a způsobit nespolehlivost výsledků. Pro zpracování odlehlých hodnot se používá několik technik, jako je vyřazení nebo transformace dat.

- Vizualizace dat

Slouží ke zkoumání vzorců a vzájemných souvislostí v datech. Na základě grafů a diagramů lze odhalit trendy, odlehlé hodnoty a korelace, které ze souhrnných statistik nemusí být na první pohled zřejmé. Využívají se histogramy, krabicové grafy, rozptylové grafy a sloupcové grafy. [36, 37]

- Popisná statistika

Používají se základní statistické parametry, jako je střední hodnota, medián, modus, rozsah, rozptyl a směrodatná odchylka umožňující získat přehled o rozdělení dat.

- Testování hypotéz

Slouží ke zjištění, zda je určitý soubor nebo souvislost v datech statisticky významný. Spočívá v definování nulové a alternativní hypotézy a na základě testování hypotéz se stanoví závěry o datech. Je zapotřebí také určit, zda-li se jedná o data kvalitativní nebo kvantitativní. [36, 37]

3.6 Jednorozměrná analýza

Představuje typ explorační analýzy dat, zaměřující se na zkoumání jedné proměnné. Dále je užitečná při určování vzorců a trendů v datech.

Tento způsob zkoumání poskytuje efektivní způsob, který umožňuje porozumět jednotlivým proměnným, aby bylo možné lépe pochopit celý soubor dat.

Jednorozměrnou analýzu je možné provádět pomocí mnoha statistických metod a grafických technik. Mezi nejčastější metody patří histogramy, boxplot a deskriptivní statistika, která spočívá ve výpočtu průměru, mediánu, rozptylu, směrodatné odchylky a rozpětí. [25, 36]

3.7 Dvourozměrná analýza

Spočívá ve statistické analýze dvou proměnných současně. Prostřednictvím analýzy lze určit vztah mezi dvěma proměnnými a porozumět vzájemnému chování proměnných. Ke znázornění vztahu mezi dvěma proměnnými se používají rozptylové grafy, které slouží k identifikaci trendů nebo vzorců. Pro hodnocení linearity, pokud existuje mezi dvěma proměnnými se používá korelační koeficient. [25, 36]

K provedení dvourozměrné analýzy se využívají různé statistické metody:

3.7.1 T-test:

Používá se k porovnání průměrných hodnot. T-test vychází z předpokladu, že spojitá proměnná je v každé skupině normálně rozdělena a rozptyly jsou shodné. Výsledkem T-testu je p hodnota, která vyjadřuje, existuje-li významný rozdíl mezi průměrnými hodnotami. [36]

3.7.2 ANOVA:

Metoda sloužící k porovnání průměrných hodnot spojité proměnné mezi více než dvěma skupinami. Na základě ANOVA se určí p hodnota, která udává, zda existuje významný rozdíl mezi průměrnými hodnotami. [36]

3.7.3 Rozptylový graf:

Umožňuje názorně zobrazit vztah mezi dvěma proměnnými a identifikovat případné vzorce nebo trendy. [36]

3.8 Vícerozměrná analýza

Označovaná také jako MVA se používá k identifikaci vzorců a rozeznání vztahů mezi proměnnými v souboru dat.

3.8.1 Techniky vícerozměrné analýzy

- Shluková analýza

Slouží k seskupování datových bodů založených na jejich vzájemné podobnosti, a umožňuje tak identifikovat vzory v datech i případné odlehlé hodnoty.

- Analýza hlavních komponent PCA

PCA (Principal component analysis) patří k nejznámějším metodám vícerozměrné analýzy dat. Metoda spočívá v redukci vícerozměrného souboru dat na menší komponenty, pomocí nichž lze pak snadněji vizualizovat data. [25]

Jako první ji představil Karl Pearson v roce 1901 a následně ji nezávisle na něm v roce 1933 rozvinul Harold Hotelling. Do nástupu počítačů nebyla stejně jako ostatní vícerozměrné metody příliš podporována. [25, 28, 35]

Hlavní cíle PCA:

- Získat nejpodstatnější informace z dat.
- Zredukovat a zjednodušit původní soubor dat.
- Transformovat data z původních proměnných do menšího počtu latentních proměnných.
- Redukovat šum v datech. [28, 35]

Problémy v PCA

V analýze se lze setkat s problémy jako je užití příliš málo nebo příliš mnoho hlavních komponent, data neobsahují předpokládanou informaci, neodstranění odlehlých hodnot

zapříčiněné hrubými chybami nebo odstranění hodnot obsahující důležitou informaci, která vede ke zkreslení výsledku. [28, 35]

3.9 Initial data analysis (IDA)

IDA bývá často zaměňována s explorativní analýzou dat (EDA), vzhledem k širokému spektru společných nástrojů, včetně moderní vizualizace dat. Zatímco EDA slouží k vytváření hypotéz, IDA poskytuje především přehlednost a integritu předpokladů umožňujících provádět zodpovědně příslušné statistické analýzy za účelem zodpovězení předem definovaných výzkumných otázek.

IDA dodává data připravená k analýze obsahující spolehlivé informace o vlastnostech dat a přináší výzkumným pracovníkům možnosti, jak s daty efektivně a zodpovědně pracovat.

IDA se skládá z následujících fází:

- nastavení metadat
- čištění dat
- kontrola dat
- počáteční zpracování dat
- dokumentace

Všechny uvedené fáze představují základní činnosti pro všechny výzkumné pracovníky, jež analyzují data. [39]

IDA lze popsat jako první krok analýzy dat. Slouží k ověřování, zda pozorovaná data odpovídají očekáváním vztahujícím se k daným hodnotám. Může poskytnout potřebný kontext o vlastnostech a strukturách dat, který umožní vyhnout se případným nástrahám.

[39]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

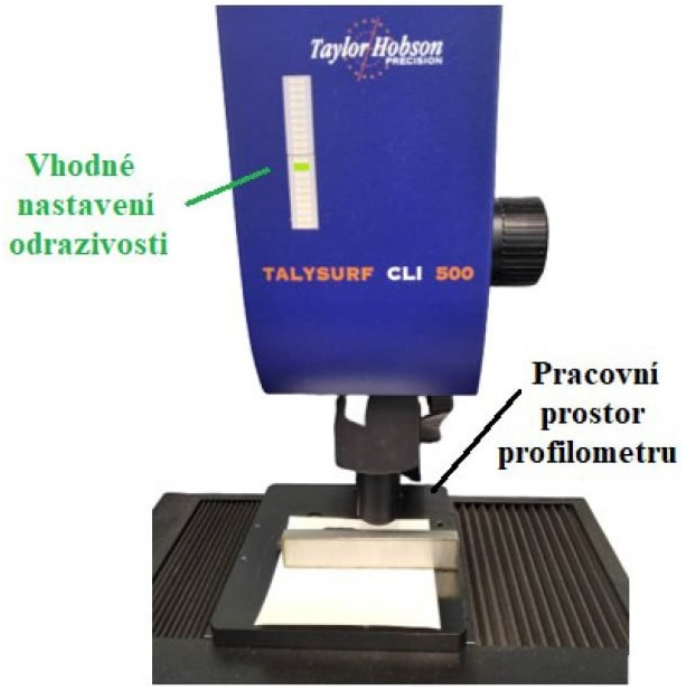
4 CÍLE PRÁCE

V rámci diplomové práce se zabývám problematikou hodnocení povrchů. Prvním krokem je provádění literární rešerše, která nám poskytuje potřebný kontext a porozumění dané problematiky. Následně přistupujeme k praktické části, která je zaměřena na kontrolu povrchů za použití mikroskopu a bezkontaktního profiloměru Talysurf CLI 500. Tato kombinace nám umožňuje získat komplexní a důkladný obraz povrchových vlastností zkoumaných materiálů. Naměřená data jsou pak podrobena statistické analýze s cílem zhodnotit jejich drsnost a identifikovat případné rozdíly či podobnosti mezi jednotlivými metodami hodnocení. Tímto způsobem se snažíme přispět k lepšímu porozumění problematiky hodnocení povrchů a poskytnout informace, které mohou být využity v praxi při hodnocení materiálů.

5 MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ

Pro měření drsnosti heterogenního povrchu byl použit přístroj Talysurf CLI 500. Jde o měřící přístroj společnosti Taylor Hobson, který slouží k bezkontaktnímu měření struktury povrchu.

Tento přístroj je vybaven CLA konfokální hlavou a softwarem Talymap 3D ve verzi GOLD, což umožňuje nejen sběr dat o povrchu, ale i jejich následné vyhodnocení. Jeho hlavním účelem je 3D měření drsnosti povrchu a je velice vhodný pro měření malých součástí.



Obrázek 24 Talysurf CLI 500

Talysurf CLI 500 pracuje s rozkladem bílého světla a umožňuje měření struktury povrchu ve třech osách.

Konfokální hlava CLA rozkládá odražené paprsky z povrchu vzorku a dále je vyhodnocuje podle jejich vlnových délek. [40]

Tabulka 1 Technické parametry [40]

Celkové rozměry [mm]	500 x 310 x 450
Rozměry pracovního prostoru [mm]	50 x 50 x 50
Hmotnost [kg]	55
Nosnost [kg]	10
Osové rozlišení [µm]	0,5
Maximální rychlost posuvu [mm/s]	30

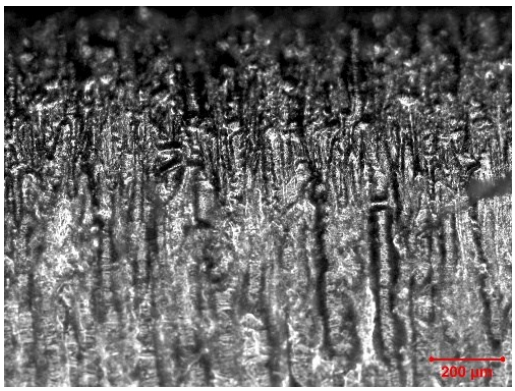
5.1 Vzorky pro analýzu

Vzorky, které byly řezány laserem, jsou vyrobeny z materiálu 1.4828, který je známý také pod označením X15CrNiSi20-12. Jedná se o žáruvzdornou austenitickou chromniklovou ocel s přídavkem křemíku, je široce využíván v průmyslu díky své vynikající chemické odolnosti při vysokých teplotách, které nepřesahují 950°C.

Díky možné svařitelnosti a své chemické odolnosti se materiál 1.4828 stává velice vhodným pro výrobu součástí, které jsou vystaveny vysokým teplotám, jako jsou průmyslové pece, výměníky tepla a parní kotle. Tato slitina je nezbytným prvkem v chemickém průmyslu, energetice a strojírenství. [41, 42]

5.1.1 Povrch vzorků

Při laserovém řezání vznikají povrchy se změnami parametrů drsnosti v závislosti na poloze. Drsnost povrchu se zvyšuje zpravidla ve směru hloubky řezu v důsledku zeslabení laserového paprsku. Jednotlivé metody zkoumající drsnost takových povrchů se liší a jsou nejednotné, což může vést ke ztrátě důležitých informací a případně k nepřesnému interpretování výsledků.



Obrázek 25 Vstupní část_10. vzorek

Obrázek 26 Zlom_10. vzorek

Obrázek 27 Výstupní část_10. vzorek

Na obrázku 25 je zobrazena vstupní část. Jedná se o primární oblast, která je popsaná v kapitole 6.1 Metodika EDA. Poté nastává zlom mezi primární a sekundární oblastí, který je patrný na obrázku 26 a odpovídá vzdálenosti 1,5mm (Obrázek 31). Výstupní část (Obrázek 27) odpovídá oblasti terciální.

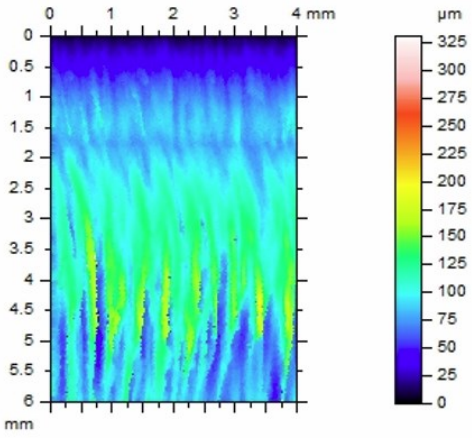
5.2 Postup měření

Na začátku měření je nezbytné si měřený povrch prohlédnout za účelem zjištění, zda se na povrchu nenachází škrábance, které by negativně ovlivnili naměřená data a výsledný závěr.

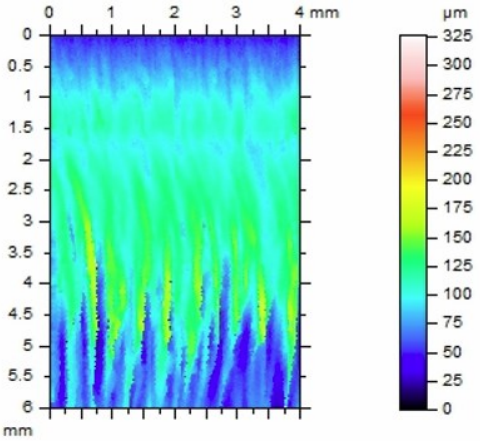
Jakmile je vzorek ustaven a přístroj zkalibrován, nastává měření využitím softwaru Talymap GOLD. Následně se nastaví odrazivost, která by měla být nad 40 %.

U všech 10 vzorků byl rozměr měřené plochy nastaven na 4x6 mm.

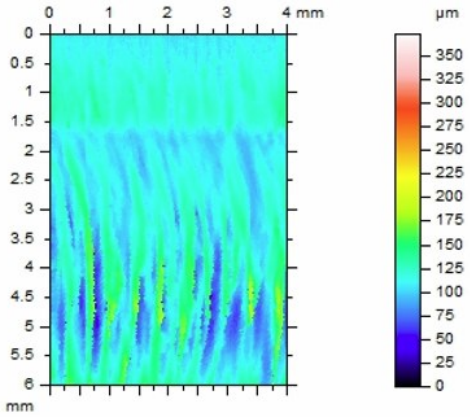
U hrubě nasnímaných dat (Obrázek 28) je zapotřebí odfiltrovat tvar a vlnitost. Nejprve se provádí vyrovnání povrchu (Obrázek 29) využitím metody nejmenších čtverců pomocí funkce levelling a následně vypuštění tvaru (Obrázek 30) použitím polynomu 2. stupně.



Obrázek 28 Hrubě nasnímaná data_10. vzorek

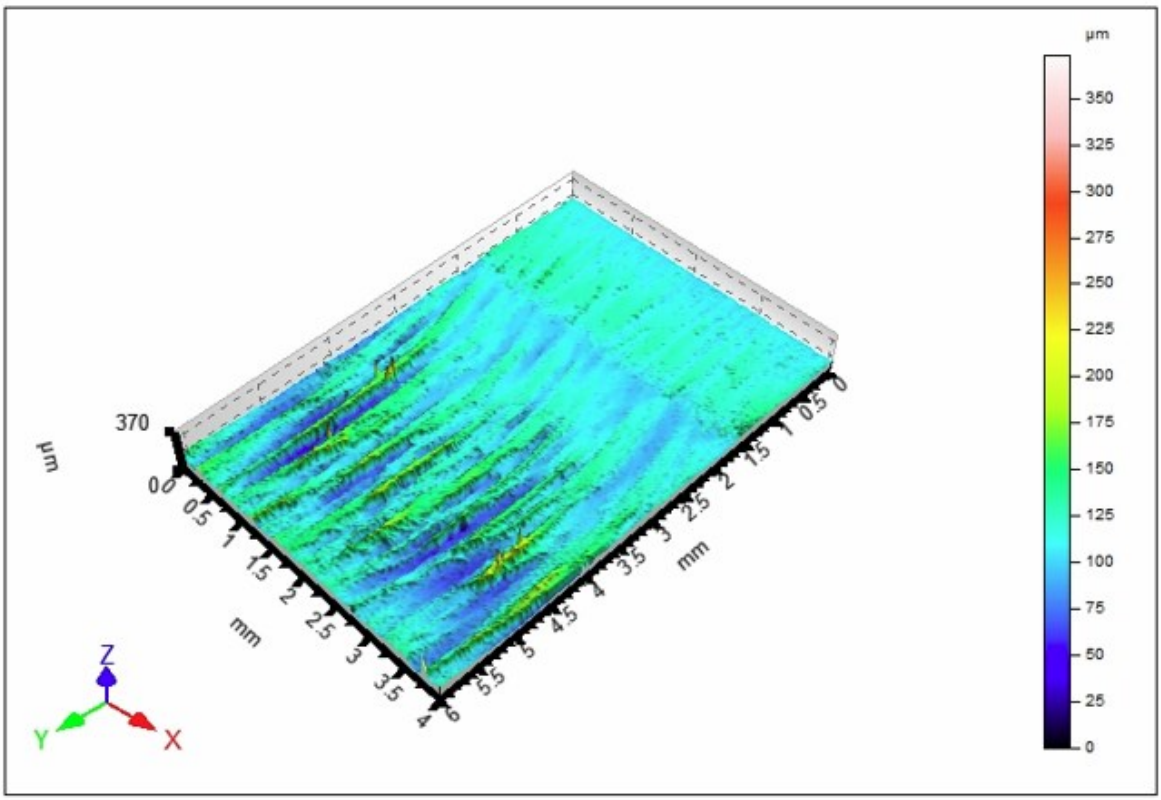


Obrázek 29 Vyrovnání povrchu_10. vzorek



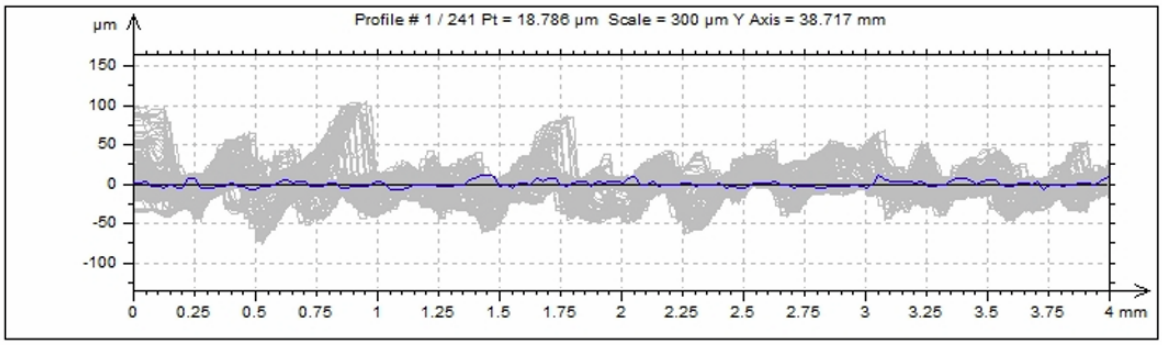
Obrázek 30 Vypuštění tvaru_10. vzorek

Po převedení na 3D vizualizaci naměřeného povrchu získáme výsledek, ze kterého je odstraněna vlnitost a zůstává drsnost, kde osa X charakterizuje vyhodnocovaný profil.



Obrázek 31 Drsnost povrchu_10. vzorek

Využitím funkce Convert into a series of profiles (převod na řadu profilů) se povrch rozdělil na 241 řezů a ve směru východ-západ vytvořil následující graf.



Obrázek 32 Grafické znázornění řezu povrchu

6 VYHODNOCENÍ DAT

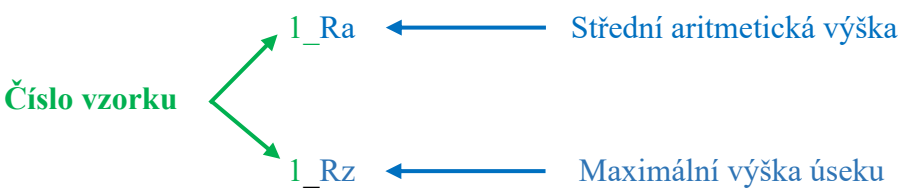
Pro vyhodnocení dat byly použity parametry Ra a Rz.

Ra je dle normy ČSN EN ISO 21920-2 střední aritmetická výška. Parametr Ra byl zvolen, protože jde o nejvíce hodnocený a nejdůležitější parametr v oblasti hodnocení drsnosti povrchu. Rz měří výškový rozdíl mezi nejvyšším vrcholem a nejnižším údolím v určitém měřicím úseku. Kombinace těchto parametrů umožňuje komplexní analýzu povrchu.

1_Ra	1_Rz	2_Ra	2_Rz	3_Ra	3_Rz	4_Ra	4_Rz	5_Ra	5_Rz	6_Ra	6_Rz	7_Ra	7_Rz	8_Ra
1,688	11,007	2,215	10,080	1,475	7,787	2,114	10,794	1,494	7,611	1,715	8,145	1,818	11,414	1,598
1,848	11,899	1,870	11,414	1,410	7,533	1,901	8,243	1,389	7,491	1,946	11,792	1,944	11,843	1,825
2,111	10,699	1,913	9,984	1,399	7,596	1,955	10,279	1,664	8,973	1,752	8,645	1,749	9,196	1,628
1,903	9,612	1,963	10,356	1,570	8,637	1,893	10,623	1,390	7,328	2,056	9,751	1,839	7,815	1,753
2,128	10,003	1,847	9,539	1,674	7,848	1,932	9,661	1,688	8,607	2,360	12,993	1,880	9,519	1,668
1,753	9,145	1,589	9,337	1,458	7,897	1,943	9,568	1,799	8,756	2,047	10,010	1,971	10,955	1,540
1,731	8,758	1,962	11,477	1,559	8,801	2,120	10,516	2,052	12,041	1,848	10,240	1,808	10,120	1,821
2,094	9,978	2,190	10,396	1,690	9,168	1,936	9,195	1,820	10,611	2,046	11,463	1,937	10,553	1,744
2,120	12,303	2,121	10,286	1,795	7,866	2,127	10,750	2,204	10,609	2,173	11,450	2,303	11,339	1,627
1,821	8,238	2,025	11,278	2,084	11,695	2,182	10,636	1,965	9,760	2,093	12,163	2,002	11,959	1,800
2,075	11,297	1,925	8,550	2,167	11,418	2,037	9,201	1,982	9,035	2,309	11,763	1,862	9,231	1,861
1,868	8,807	2,132	13,468	1,854	9,250	2,020	10,556	1,962	9,713	2,612	14,027	1,715	9,116	1,685
1,987	8,932	2,371	11,435	2,321	11,485	2,039	10,062	1,967	10,194	2,747	13,768	1,647	9,650	2,000
1,864	8,307	2,299	11,435	2,302	11,542	2,024	10,271	2,077	10,277	2,146	10,160	1,727	9,415	1,678
1,833	7,956	2,344	10,635	1,992	11,747	1,998	11,709	1,985	11,504	2,140	11,710	1,675	8,579	2,240
1,963	11,136	2,297	11,955	2,206	11,303	1,918	10,369	1,736	8,960	2,557	14,127	1,880	9,894	1,832
1,892	8,824	2,089	9,202	2,361	12,384	1,892	10,376	1,904	9,419	1,810	11,102	1,688	8,207	1,942
2,087	12,666	2,222	10,800	2,106	10,397	1,946	9,696	1,899	9,581	2,013	12,002	1,423	7,829	2,009

Obrázek 33 Naměřené hodnoty

Vyhodnocené údaje jsou značené následovně:

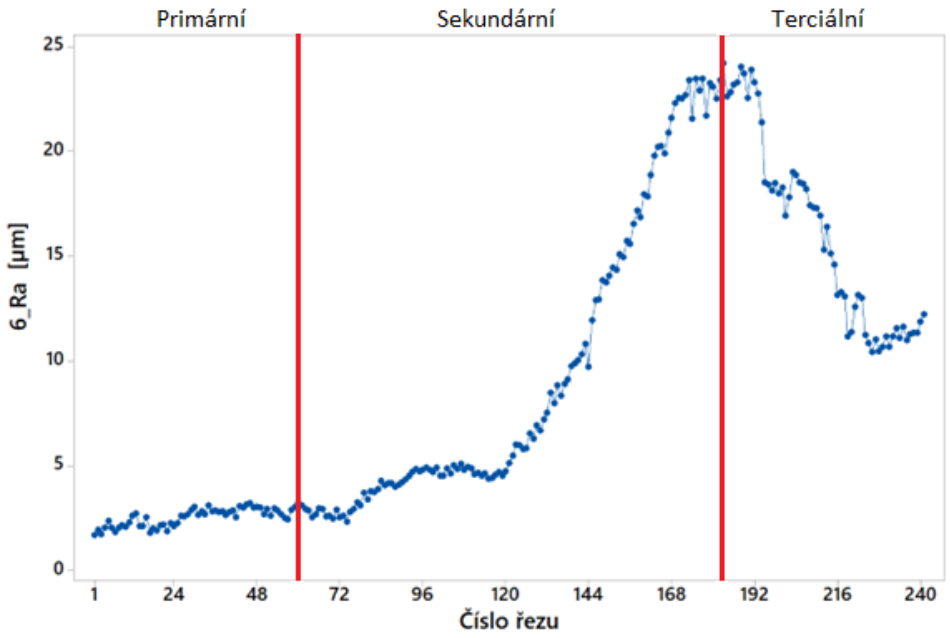


6.1 Metodika EDA

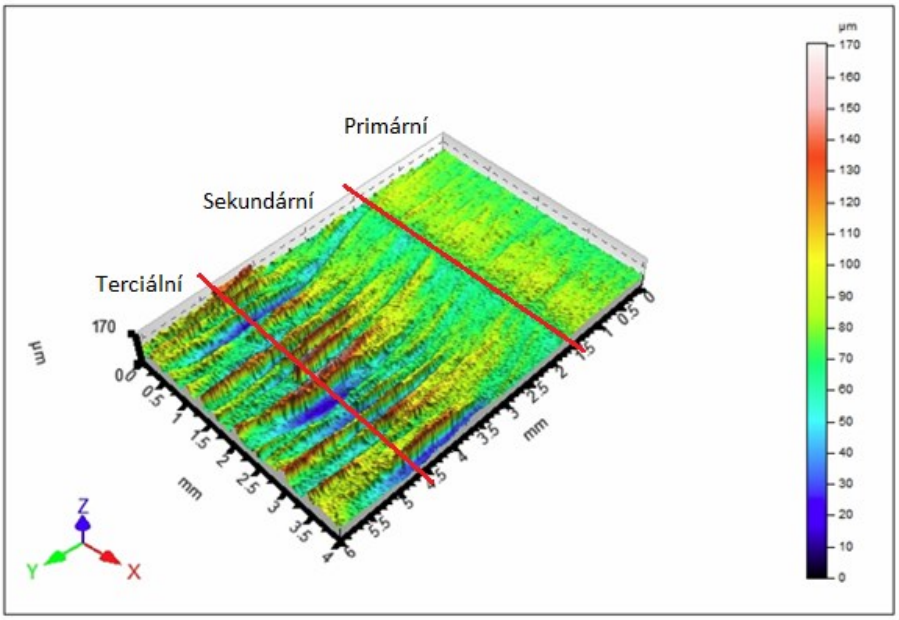
Výsledky měření byly nejprve zpracovány metodikou EDA (explorativní datová analýza), což umožnilo identifikovat základní charakteristiky, vzory a trendy v datech. Tato analýza poskytla důležité informace o distribuci dat, jejich rozptylu a případných odlehlých hodnotách. Tato technika nám umožnila hlouběji porozumět struktuře a charakteristikám dat prostřednictvím vizualizace.

Ze zkoumaných dat získaných z povrchu řezaného laserem lze identifikovat tři hlavní oblasti. Jedná se o oblast primární, sekundární a terciální. Při řezání laserem dochází k rozptylu tepelné energie, a to způsobuje rozdílnou drsnost v závislosti na poloze měření.

Grafické znázornění zobrazuje exponenciální růst v primární a sekundární oblasti. Primární oblast končí na hodnotě 60, která odpovídá vzdálenosti 1,5mm. Hodnota rozdělující sekundární oblast od terciální je 183. Dle obrázku 35 se jedná o vzdálenost 4,6mm zvýrazněná červenou čarou, která odpovídá lokálnímu maximu.

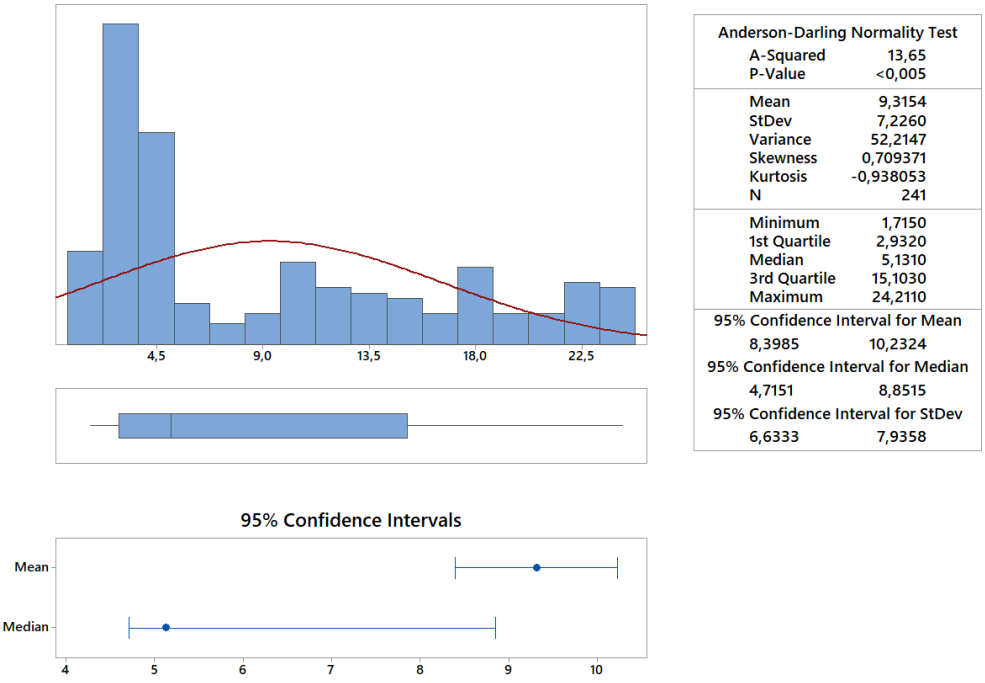


Obrázek 34 Rozptylový graf parametru 6_Ra



Obrázek 35 Drsnost povrchu_6. vzorek

Metodou EDA se testovalo, zda data vykazují normální rozdělení a zjistilo se, že normální rozdělení nevykazuje žádný ze souborů dat. Jako příklad je zde uveden grafický sumář parametru Ra vzorku č. 6.

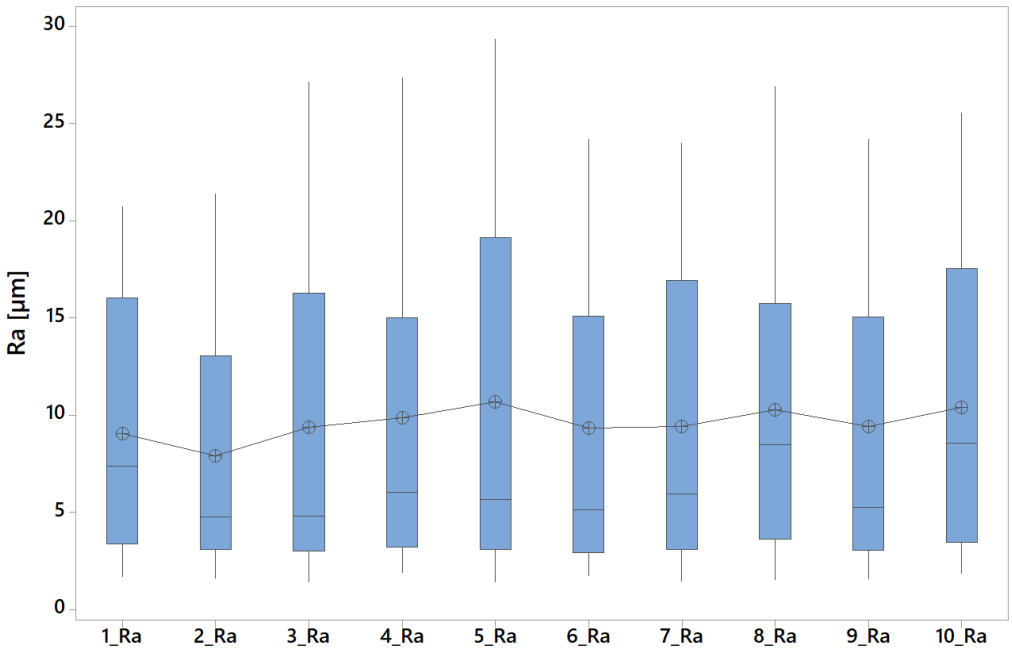


Obrázek 36 Grafický sumář 6_Ra

P hodnota Anderson-Darlingova testu je menší než 0,005 ($p<\alpha=0,05$). Zamítám H_0, která tvrdí, že data pochází z normálního rozdělení N (μ, σ^2).

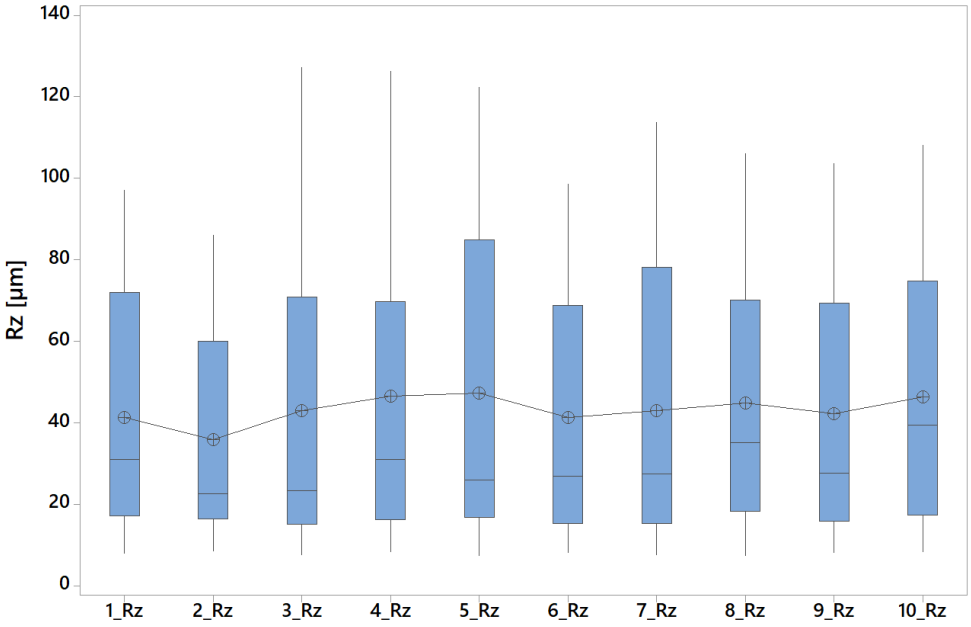
6.2 Boxplot

Boxplot se využívá k zobrazení rozptylů v jednotlivých čtvrtích.



Obrázek 37 Boxplot parametru Ra

Dolní kvartil všech 10 vzorků má hodnotu kolem 3,5µm, avšak horní kvartil se pohybuje od 13µm (2_Ra) do 19µm (5_Ra). Maximální hodnota 29,35µm se vyskytuje u vzorku č.5 (5_Ra). Na první pohled je také zřejmé, že hodnoty nacházející se od dolního kvartilu do mediánu vykazují nízký rozptyl. Jedná se o oblast, ve které se vyskytuje 25 % hodnot.



Obrázek 38 Boxplot parametru Rz

Z boxpolů parametru Rz je patrné, že se hodnoty s malým rozptylem nacházejí ve spodní části boxu, tedy oblast mezi dolním kvartilem a mediánem. Zato hodnoty vyskytující se mezi mediánem a horním kvartilem vykazují rozptyl vysoký. Nejvyšší hodnota mediánu je viditelná na 10. vzorku a jde o hodnotu 39,38 µm. Lze ji také najít v tabulce 2.

6.3 Hodnoty parametru Ra a Rz

Následující tabulky porovnávají průměr, medián, směrodatnou odchylku, variační koeficient, minimum a maximum parametru Ra a Rz.

Tabulka 2 Hodnoty parametru Ra

Ra	Průměr	Medián	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Minimum	Maximum
	[µm]	[µm]	[µm]	[%]	[µm]	[µm]
1_Ra	9,06	7,36	6,22	68,70	1,69	20,74
2_Ra	7,88	4,75	5,87	74,54	1,59	21,39
3_Ra	9,37	4,81	8,13	86,70	1,40	27,13
4_Ra	9,86	6,00	7,93	80,39	1,89	27,35
5_Ra	10,69	5,64	9,16	85,71	1,39	29,35
6_Ra	9,32	5,13	7,23	77,57	1,72	24,21
7_Ra	9,41	5,93	7,17	76,14	1,42	24,00
8_Ra	10,27	8,46	7,31	71,18	1,54	26,91
9_Ra	9,43	5,24	7,84	83,12	1,58	24,20
10_Ra	10,40	8,55	7,46	71,76	1,86	25,56

Tabulka 3 Hodnoty parametru Rz

Rz	Průměr	Medián	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Minimum	Maximum
	[µm]	[µm]	[µm]	[%]	[µm]	[µm]
1_Rz	41,24	31,00	27,85	67,55	7,96	97,11
2_Rz	35,79	22,77	23,45	65,52	8,55	85,94
3_Rz	42,99	23,29	33,91	78,90	7,53	127,20
4_Rz	46,64	31,00	35,10	75,26	8,24	143,23
5_Rz	47,20	25,85	37,08	78,55	7,33	122,29
6_Rz	41,23	26,79	28,48	69,08	8,14	98,50
7_Rz	43,00	27,41	31,64	73,58	7,46	113,73
8_Rz	44,72	35,08	29,20	65,30	7,29	105,98
9_Rz	42,19	27,66	31,19	73,93	8,15	103,66
10_Rz	46,78	39,38	31,67	67,70	8,37	125,07

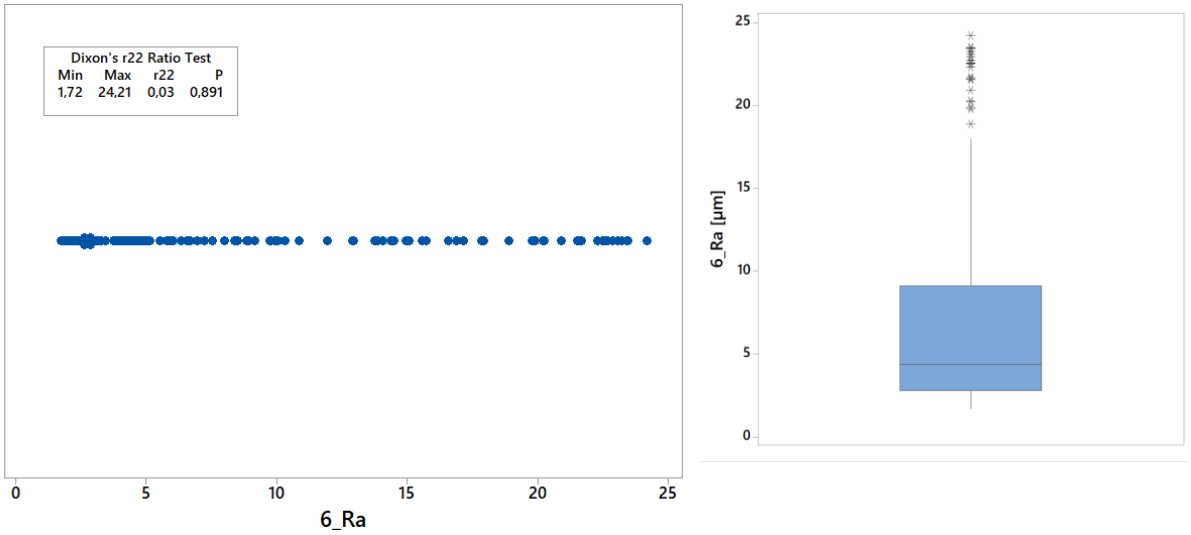
Pro správnou interpretaci není vhodné použít následující hodnocení dat zobrazené v tabulce. Důvodem je předpoklad normálního rozdělení a výsledek 1_Ra=9,06±6,22 µm by znamenal že podle Gaussovy křivky pravděpodobností by 95 % hodnot leželo v intervalu od -3,38 do 21,5 µm.

6.4 Deanův–Dixonův test

Pro veškeré následující grafy a tabulky jsou využity data pocházející pouze z primární a sekundární oblasti, jelikož data z terciální oblasti by měla negativní vliv na statistickou analýzu a regresi.

Před samotnou regresí je zapotřebí provést test na odlehlé hodnoty. Grubbsův test je vhodný pouze pro data s normálním rozdělením a udává o kolik směrodatných odchylek se liší extrémní hodnota od průměru.

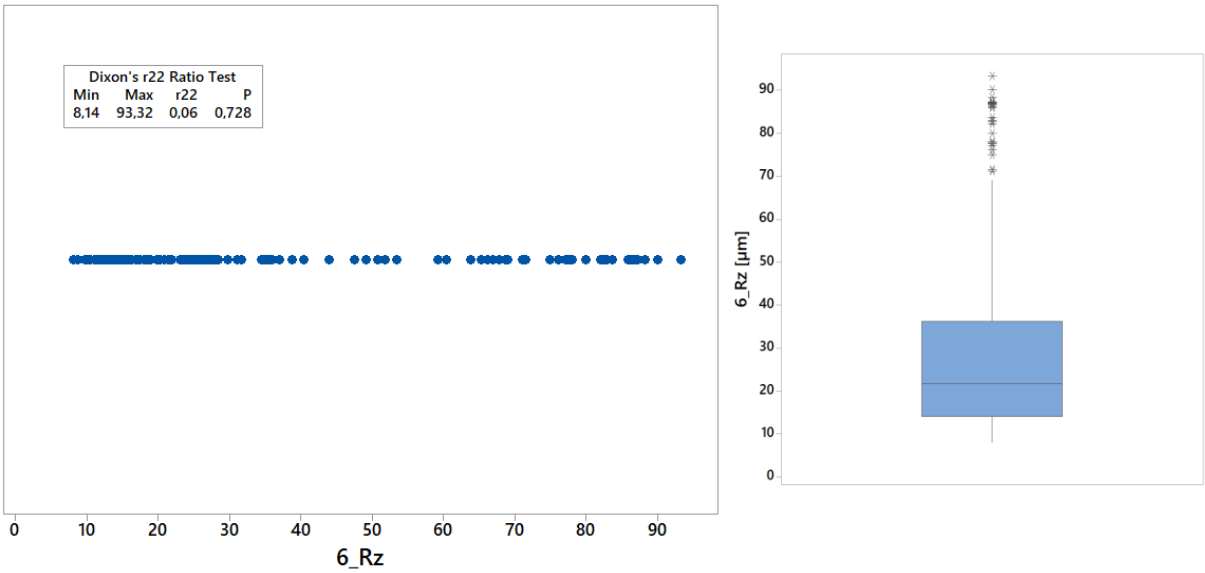
Pro testování odlehlých hodnot se proto použil Deanův–Dixonův test.



Obrázek 39 Testování odlehlých hodnot

Nulová hypotéza H_0 tvrdí, že největší hodnota z výběru není odlehlá a alternativní hypotéza H_a nulovou hypotézu popírá a tvrdí, že největší hodnota z výběru je odlehlá.

Ze získaných výsledku lze konstatovat, že hodnota P=0,891 je větší než hladina významnosti α=0,05. Nulovou hypotézu nezamítám a tvrdím, že data neobsahují odlehlé hodnoty.



Obrázek 40 Testování odlehlých hodnot

Parametr Rz vzorku č.6 také neobsahuje odlehlé hodnoty. P=0,728 > α=0,05. Nezamítám H_0 a tvrdím, že největší hodnota z výběru není odlehlá s pravděpodobností omylu 5 %.

Výsledky testování hodnot všech vzorků na odlehlé hodnoty jsou zpracovány v tabulce 4.

Tabulka 4 Testování odlehlých hodnot

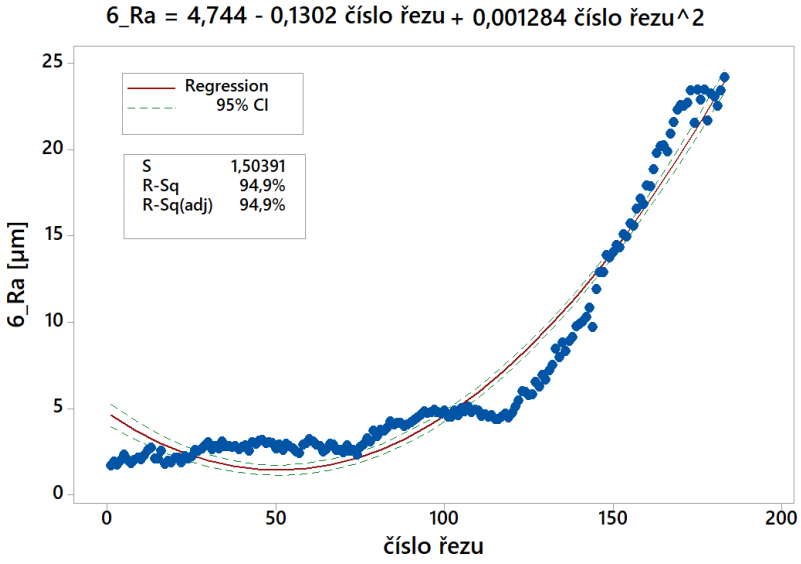
Parametr	P
1_Ra	0,957
2_Ra	0,871
3_Ra	0,187
4_Ra	0,994
5_Ra	0,778
6_Ra	0,891
7_Ra	0,557
8_Ra	0,963
9_Ra	0,972
10_Ra	0,989

Parametr	P
1_Rz	0,193
2_Rz	0,672
3_Rz	0,063
4_Rz	0,862
5_Rz	0,817
6_Rz	0,728
7_Rz	0,189
8_Rz	0,653
9_Rz	0,741
10_Rz	0,954

Všechny hodnoty P jsou větší než α (P>α=0,05). Nezamítám H_0 a konstatuji s pravděpodobností 95 %, že největší hodnoty z výběru nejsou odlehlé.

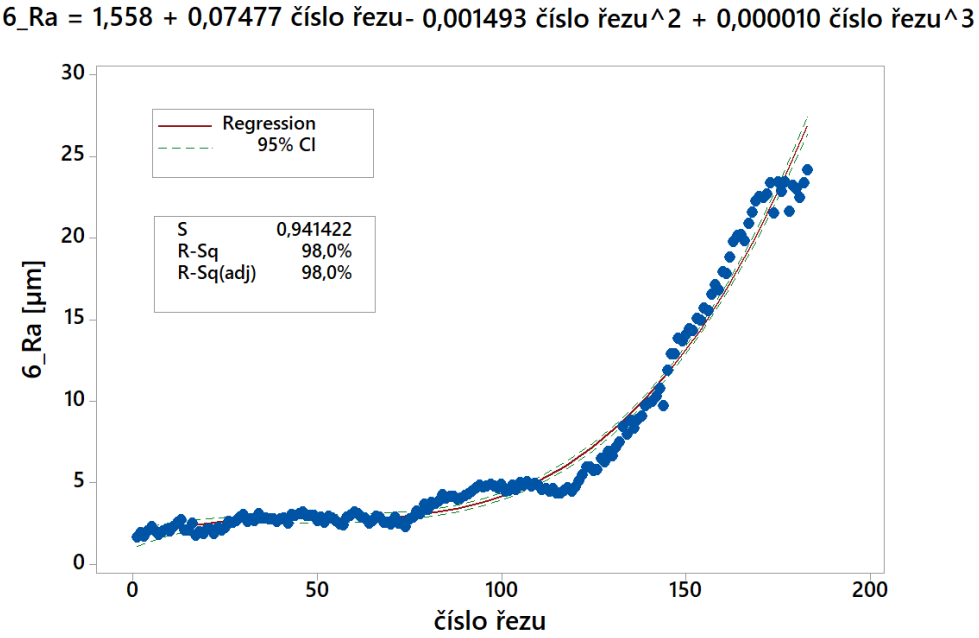
6.5 Lineární regrese

Pro popis primární a sekundární oblasti byla využita lineární regrese, konktrétně model kubický a kvadratický. Úkolem je najít funkci, která nejlépe proloží data regresní křivkou. Srovnání kvadratického a kubického modelu lineární regrese byl proveden využitím softwaru Minitab 17. Pro všechny provedené regrese platí hladina významnosti α=0,05 a metoda nejmenších čtverců.



Obrázek 41 Kvadratická regrese 6_Ra

Z grafu vyplívá, že směrodatná odchylka reziduí S =1,5µm a regresní rabat R-Sq =94,9 %. Tato hodnota vyjadřuje, jak moc použitá funkce charakterizuje data.



Obrázek 42 Kubická regrese 6_Ra

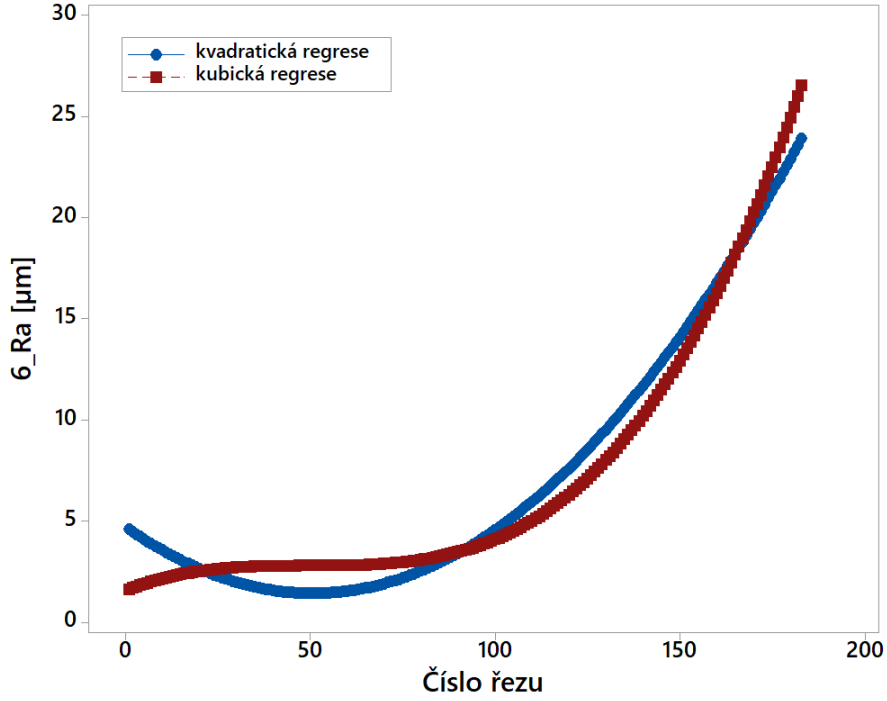
Kubická regrese je oproti kvadratické přesnější a funkce lépe charakterizuje vyhodnocovaná data. Zde je regresní rabat R-Sq =98 %.

Tabulka 5 Odhady parametrů 6_Ra

Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	1,4279	0,2732	Významný
Číslo řezu	0,08008	0,01296	Významný
Číslo řezu^2	-0,001551	0,0001649	Významný
Číslo řezu^3	$1{,}0247 \cdot 10^{-5}$	$5{,}9211 \cdot 10^{-7}$	Významný

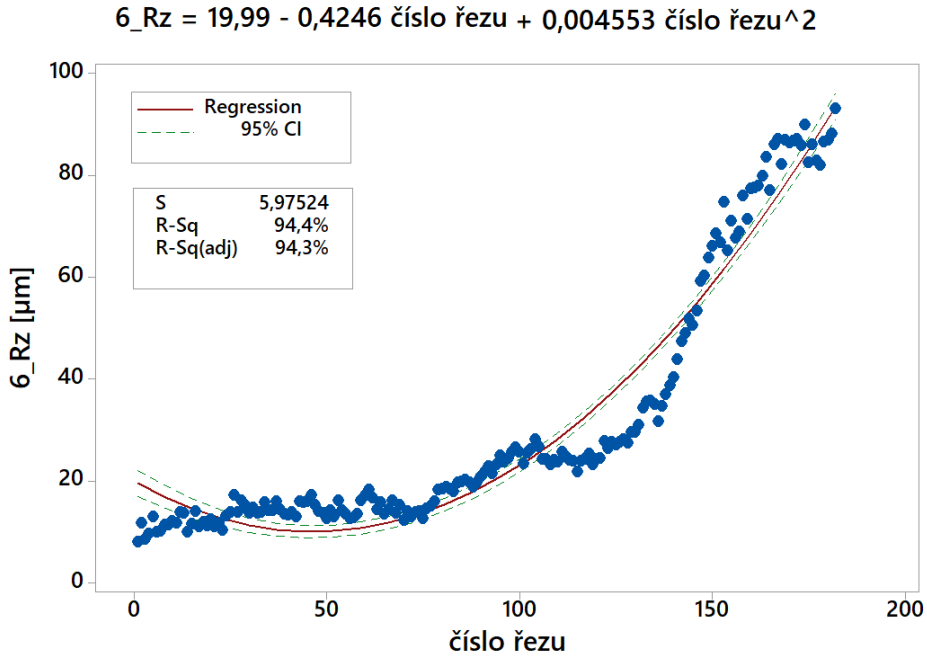
Odhady všech koeficientů jsou významné.

Porovnání obou funkcí lze spatřit na následujícím obrázku, ve kterém kubická regrese znázorněná červené lépe charakterizuje naměřené hodnoty.

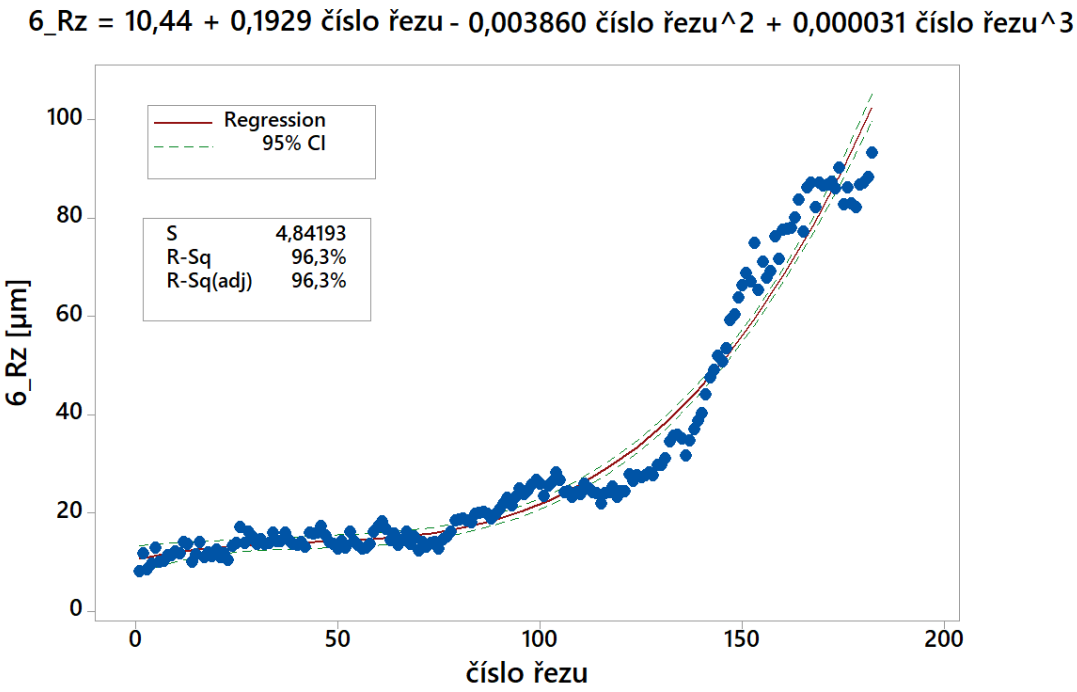


Obrázek 43 Porovnání kvadratické a kubické regrese

Kvadratická regrese byla následně provedena na 6_Rz.



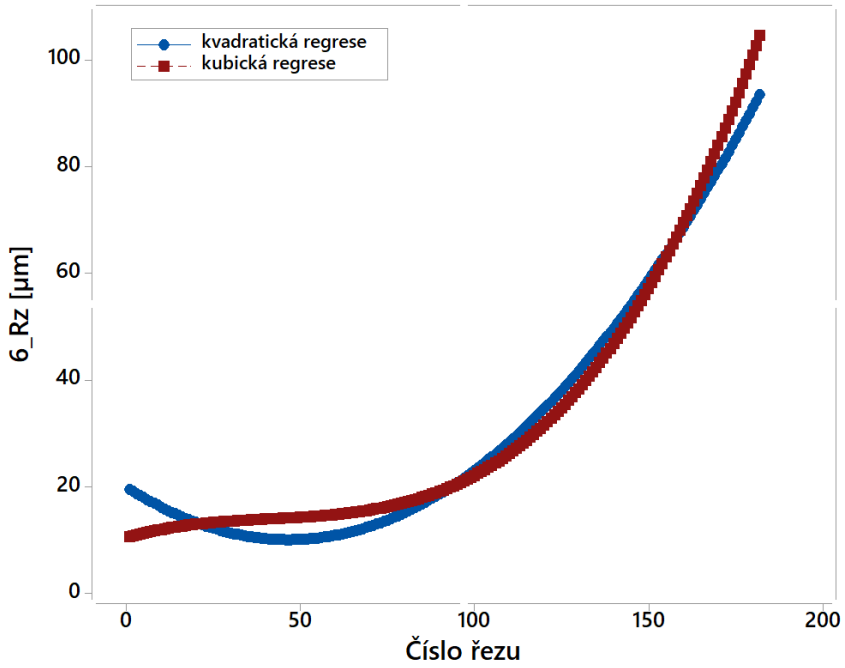
Obrázek 44 Kvadratická regrese 6_Rz



Obrázek 45 Kubická regrese 6_Rz

Tabulka 6 Odhady parametrů 6_Rz

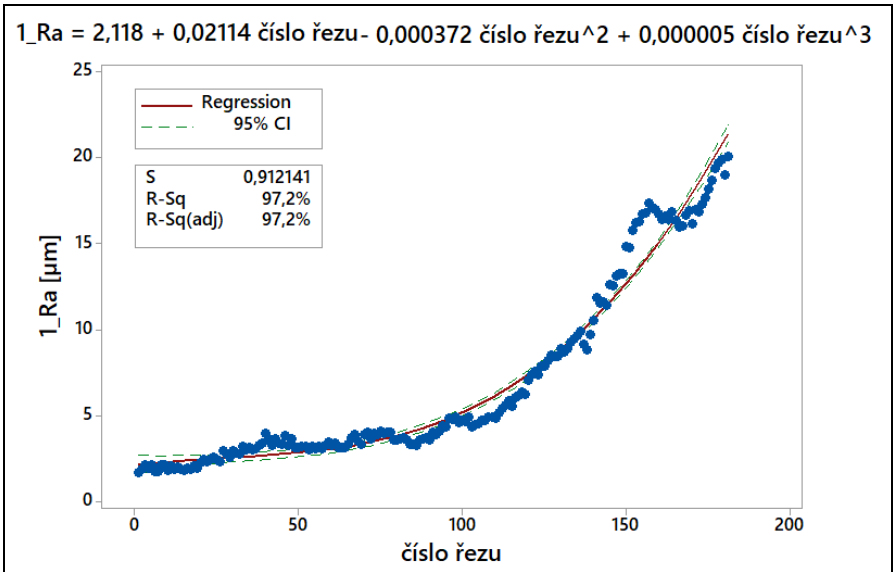
Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	9,5674	1,4156	Významný
Číslo řezu	0,2289	0,06754	Významný
Číslo řezu^2	-0,004255	0,0008637	Významný
Číslo řezu^3	$3{,}1909 \cdot 10^{-5}$	$3{,}1191 \cdot 10^{-6}$	Významný



Obrázek 46 Porovnání kvadratické a kubické regrese

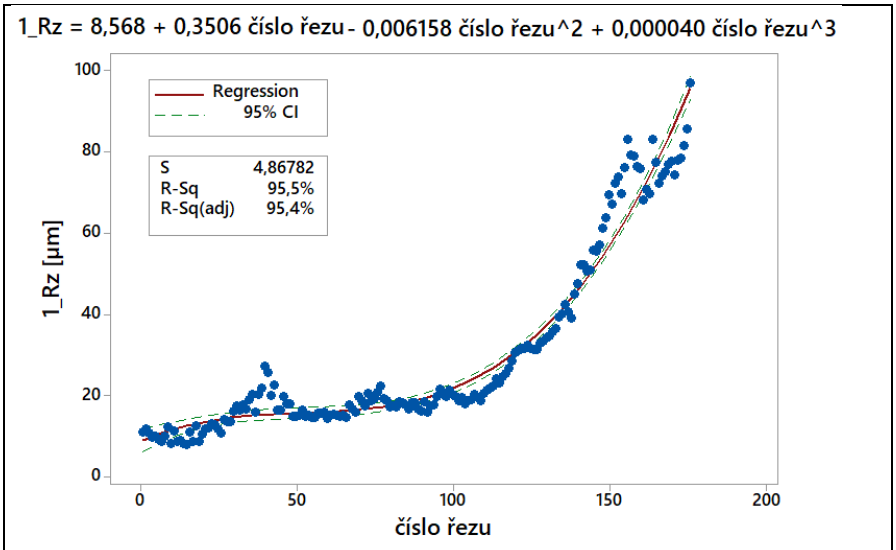
Regrese parametru Rz vzorku č. 6 vychází podobně jako u parametru Ra. Regresní rabat kvadratické rovnice vychází na 94,4 % a z regrese kubické vychází na 96,3 %. Znamená to, že kubická regrese parametru Ra i Rz lépe popisuje data, a proto jsou následující vzorky vyhodnocovány kubickou regresi.

Tabulka 7 Kubická regrese 1_Ra



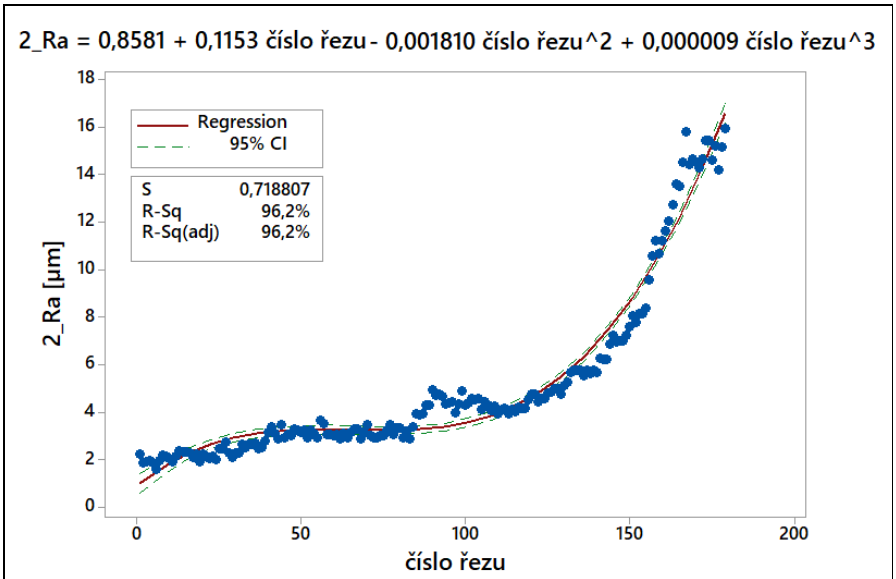
Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	1,9389	0,2679	Významný
Číslo řezu	0,02853	0,01285	Významný
Číslo řezu^2	-0,0004537	0,0001653	Významný
Číslo řezu^3	$4{,}9303 \cdot 10^{-6}$	$6{,}0011 \cdot 10^{-7}$	Významný

Tabulka 8 Kubická regrese 1_Rz



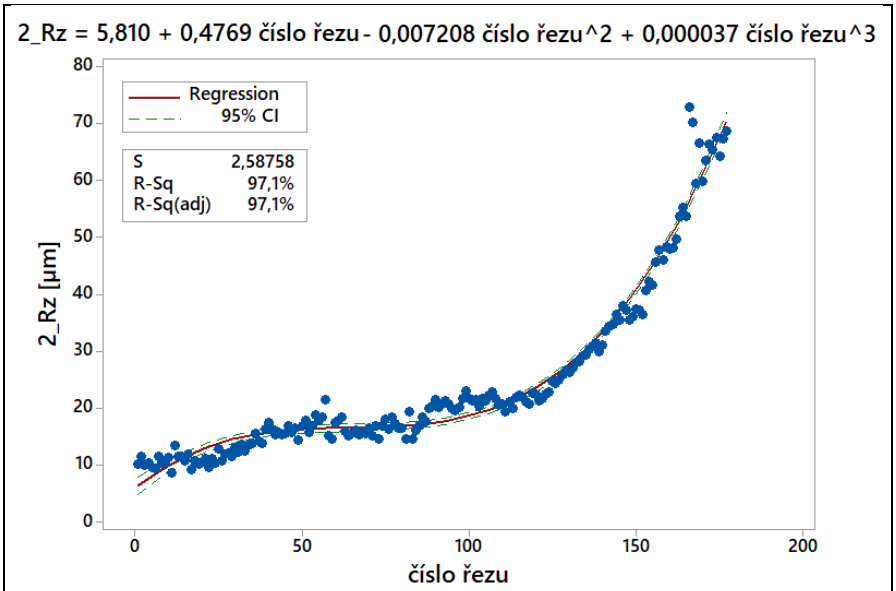
Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	1,9389	0,2679	Významný
Číslo řezu	0,02853	0,01285	Významný
Číslo řezu^2	-0,0004537	0,0001653	Významný
Číslo řezu^3	$4{,}9303 \cdot 10^{-6}$	$6{,}0011 \cdot 10^{-7}$	Významný

Tabulka 9 Kubická regrese 2_Ra



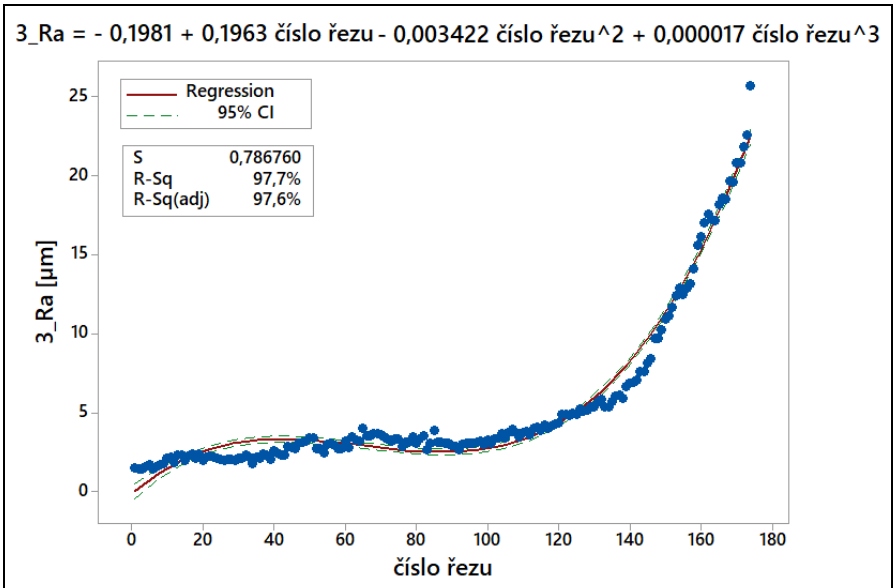
Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	0,7849	0,2101	Významný
Číslo řezu	0,1183	0,01019	Významný
Číslo řezu^2	-0,001845	0,0001325	Významný
Číslo řezu^3	$9{,}3665 \cdot 10^{-6}$	$4{,}8664 \cdot 10^{-7}$	Významný

Tabulka 10 Kubická regrese 2_Rz



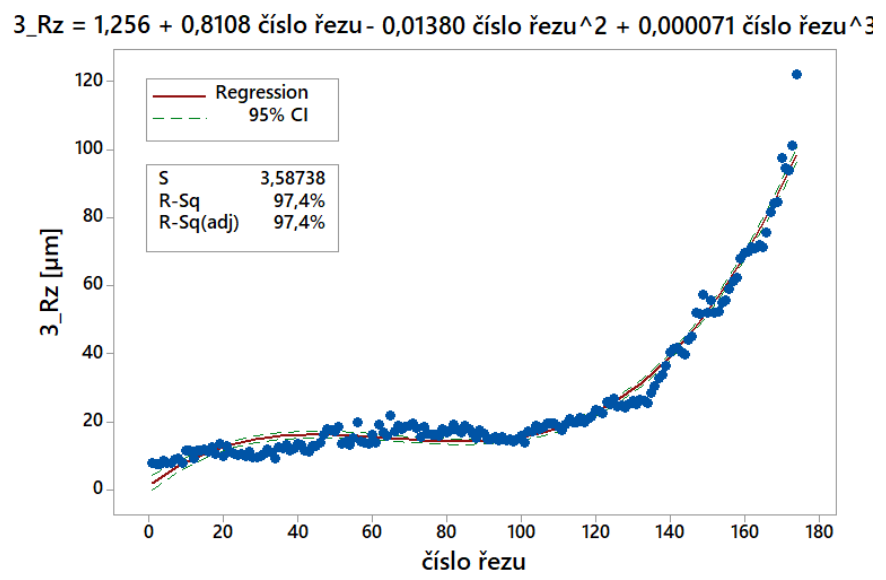
Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	5,3096	0,7676	Významný
Číslo řezu	0,4981	0,03766	Významný
Číslo řezu^2	-0,007447	0,0004952	Významný
Číslo řezu^3	$3{,}7949 \cdot 10^{-5}$	$1{,}8389 \cdot 10^{-6}$	Významný

Tabulka 11 Kubická regrese 3_Ra



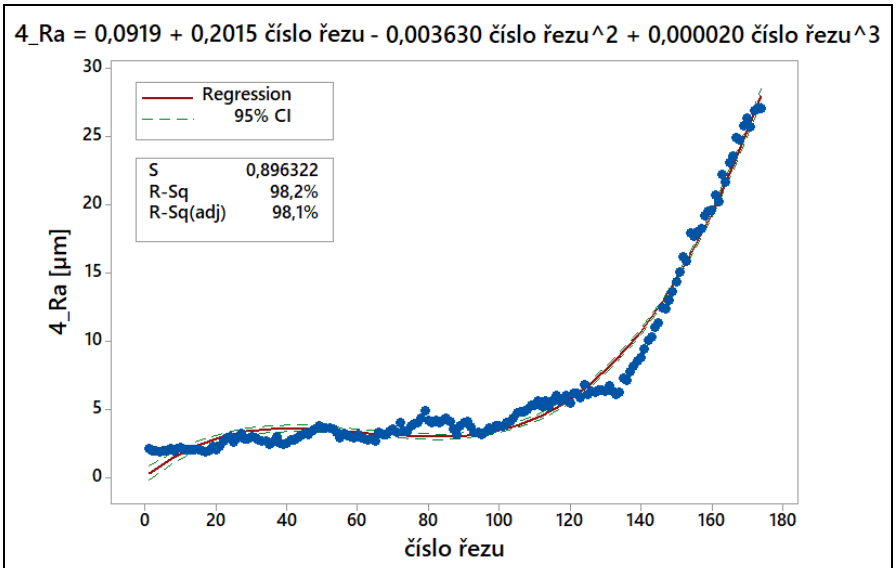
Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	-0,1808	0,2322	Nevýznamný
Číslo řezu	0,1956	0,01159	Významný
Číslo řezu^2	-0,003413	0,0001551	Významný
Číslo řezu^3	$1{,}7476 \cdot 10^{-5}$	$5{,}8572 \cdot 10^{-7}$	Významný

Tabulka 12 Kubická regrese 3_Rz



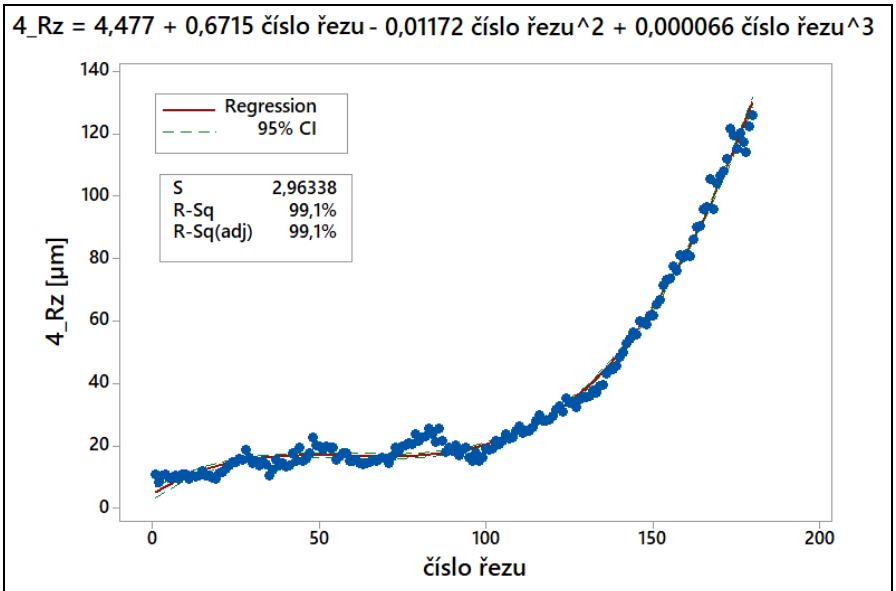
Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	1,6880	0,9050	Nevýznamný
Číslo řezu	0,7677	0,04544	Významný
Číslo řezu^2	-0,0130	0,0006113	Významný
Číslo řezu^3	$6{,}7400 \cdot 10^{-5}$	$2{,}3223 \cdot 10^{-6}$	Významný

Tabulka 13 Kubická regrese 4_Ra



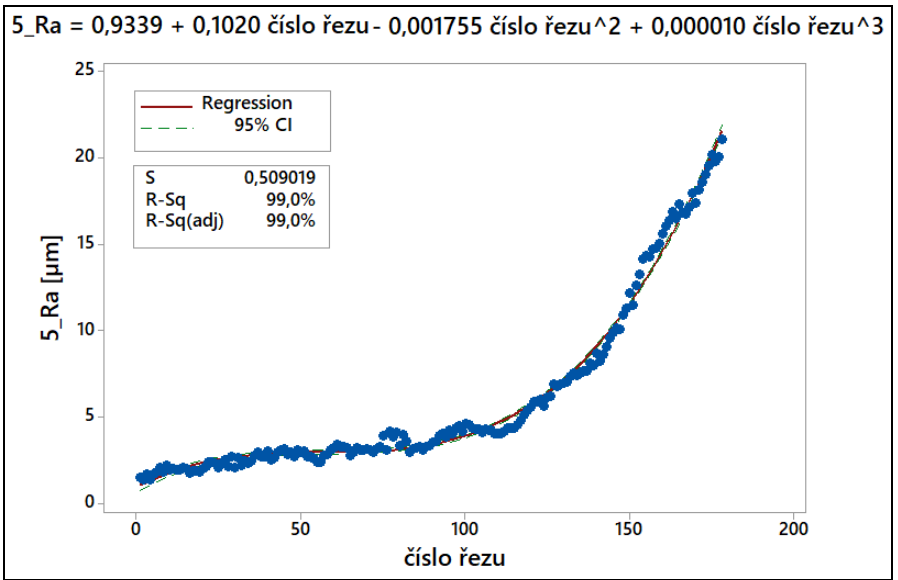
Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	0,08388	0,2645	Nevýznamný
Číslo řezu	0,2018	0,01320	Významný
Číslo řezu^2	-0,003634	0,0001766	Významný
Číslo řezu^3	$1{,}9519 \cdot 10^{-5}$	$6{,}6719 \cdot 10^{-7}$	Významný

Tabulka 14 Kubická regrese 4_Rz



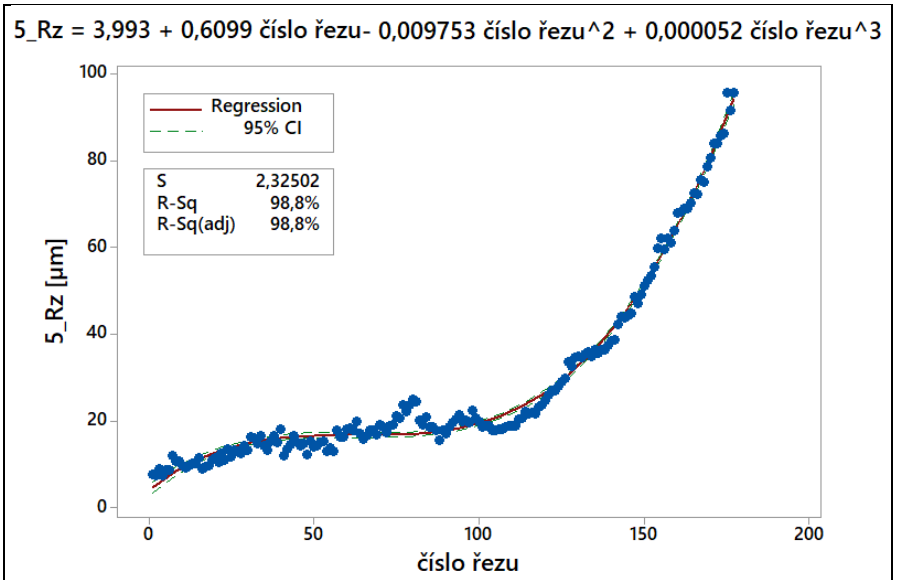
Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	4,0969	0,8658	Významný
Číslo řezu	0,6873	0,04177	Významný
Číslo řezu^2	-0,01189	0,0005401	Významný
Číslo řezu^3	$6{,}6512 \cdot 10^{-5}$	$1{,}9720 \cdot 10^{-6}$	Významný

Tabulka 15 Kubická regrese 5_Ra



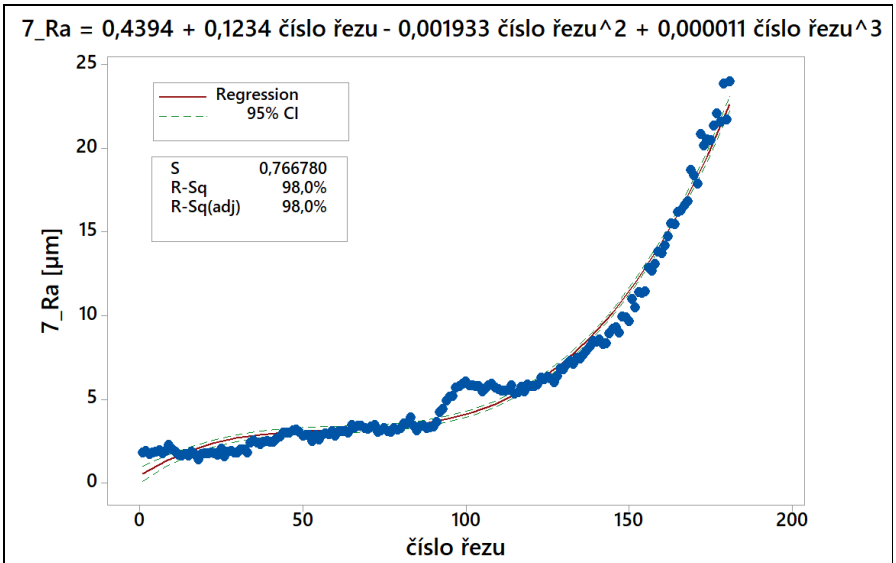
Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	0,8539	0,1499	Významný
Číslo řezu	0,1053	0,007315	Významný
Číslo řezu^2	-0,001793	9,5649	Významný
Číslo řezu^3	1,0437·10^{-5}	3,5317·10^{-7}	Významný

Tabulka 16 Kubická regrese 5_Rz



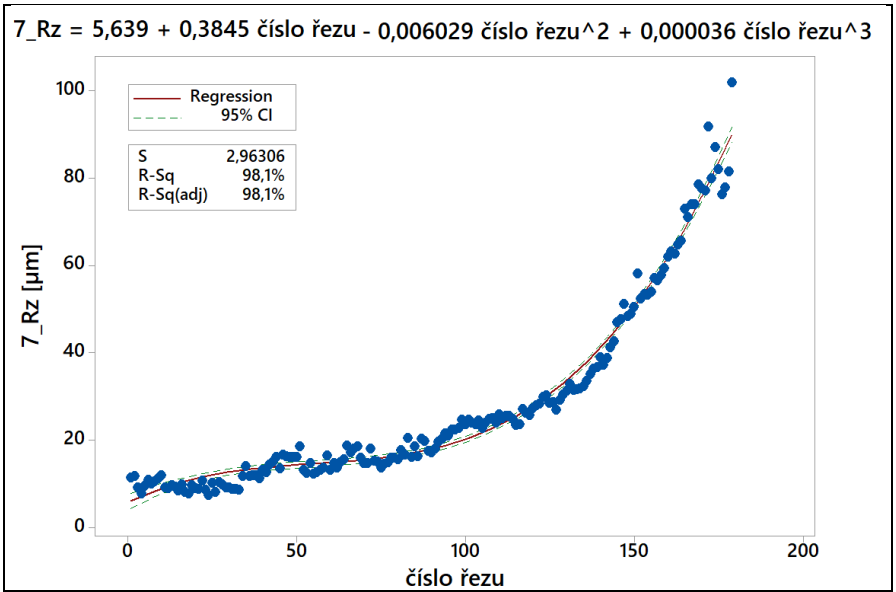
Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	0,8408	0,1502	Významný
Číslo řezu	0,1065	0,007368	Významný
Číslo řezu^2	-0,001812	9,6883	Významný
Číslo řezu^3	1,0520·10^{-5}	3,5974·10^{-7}	Významný

Tabulka 17 Kubická regrese 7_Ra



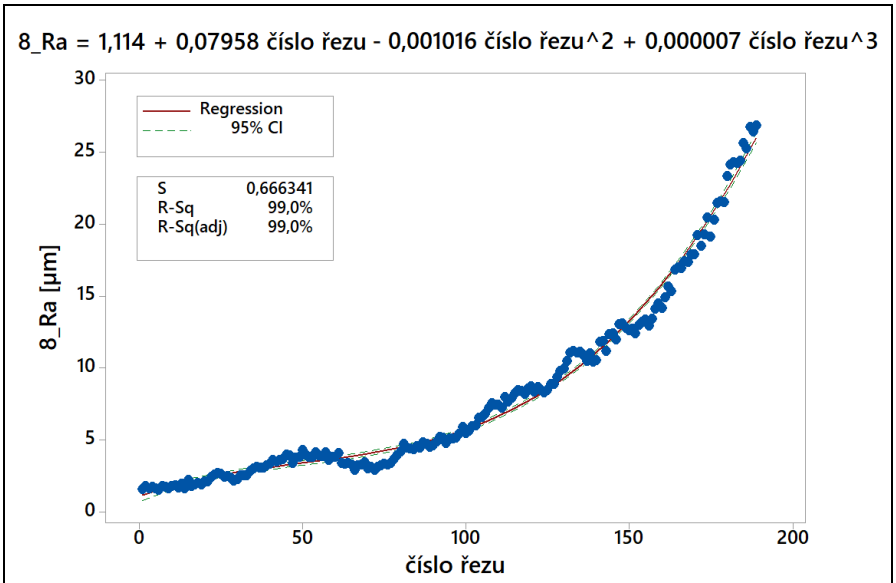
Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	0,4023	0,2223	Nevýznamný
Číslo řezu	0,1249	0,01067	Významný
Číslo řezu^2	-0,001950	0,0001371	Významný
Číslo řezu^3	$1{,}0718 \cdot 10^{-5}$	$4{,}9801 \cdot 10^{-7}$	Významný

Tabulka 18 Kubická regrese 7_Rz



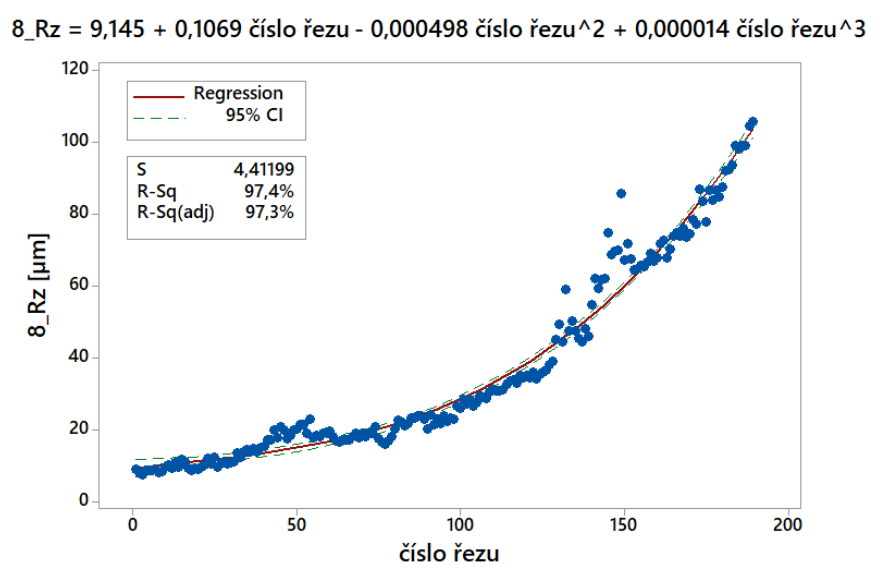
Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	5,1577	0,8710	Významný
Číslo řezu	0,4046	0,04257	Významný
Číslo řezu^2	-0,006253	0,0005494	Významný
Číslo řezu^3	$3{,}7109 \cdot 10^{-5}$	$2{,}0174 \cdot 10^{-6}$	Významný

Tabulka 19 Kubická regrese 8_Ra



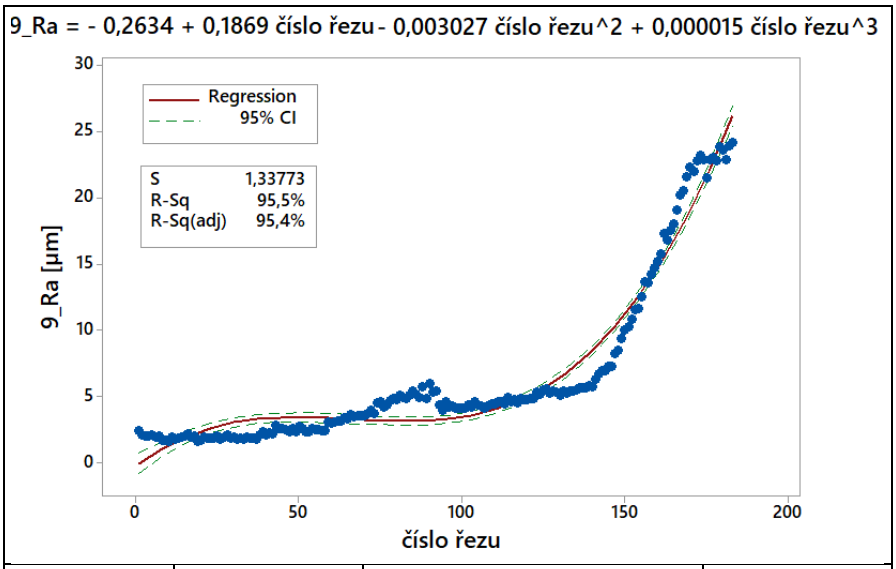
Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	1,0236	0,1904	Významný
Číslo řezu	0,08315	0,008748	Významný
Číslo řezu^2	-0,001054	0,0001077	Významný
Číslo řezu^3	6,9554·10^{-6}	3,7458·10^{-7}	Významný

Tabulka 20 Kubická regrese 8_Rz



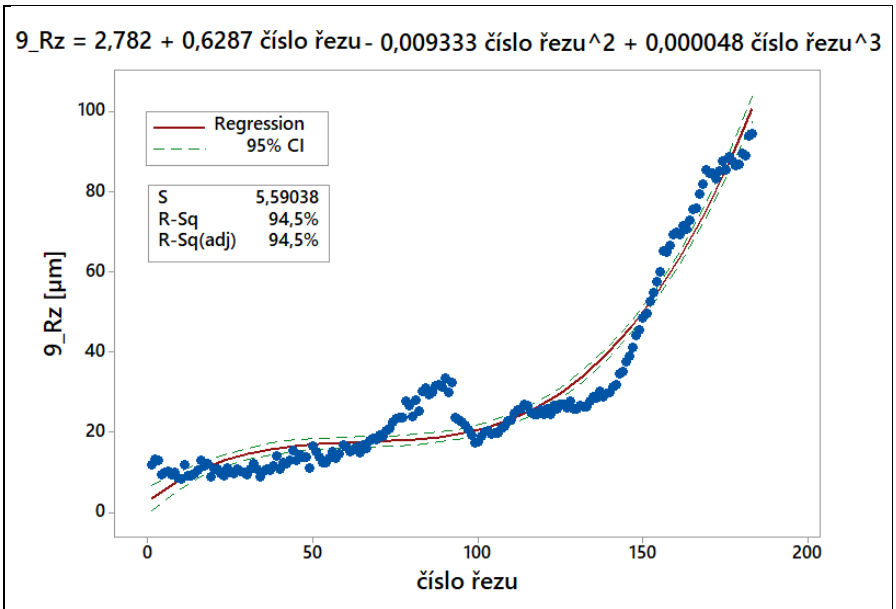
Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	8,4041	1,2654	Významný
Číslo řezu	0,1362	0,05813	Významný
Číslo řezu^2	-0,0008073	0,0007158	Nevýznamný
Číslo řezu^3	1,4615·10^{-5}	2,4893·10^{-6}	Významný

Tabulka 21 Kubická regrese 9_Ra



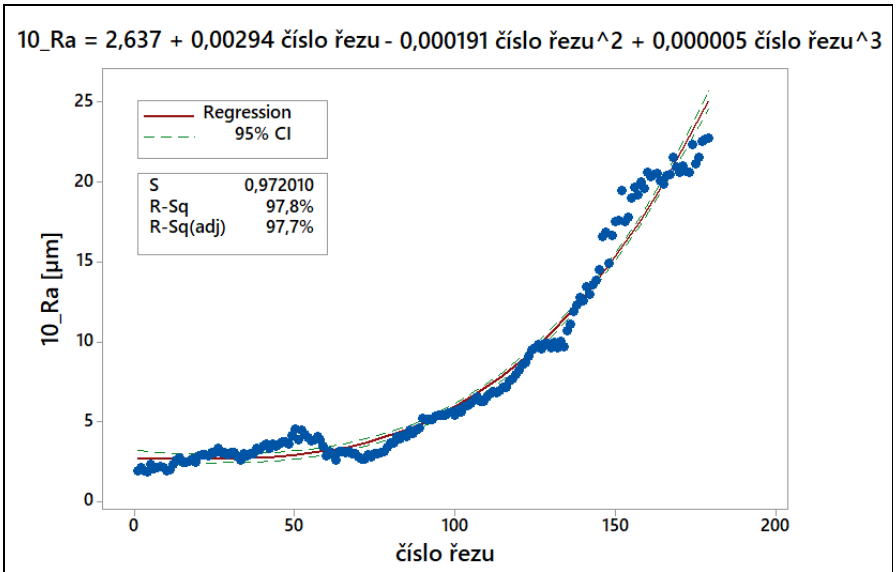
Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	-0,2414	0,3855	Nevýznamný
Číslo řezu	0,1860	0,01829	Významný
Číslo řezu^2	-0,003017	0,0002327	Významný
Číslo řezu^3	1,5242·10^{-5}	8,3562·10^{-7}	Významný

Tabulka 22 Kubická regrese 9_Rz



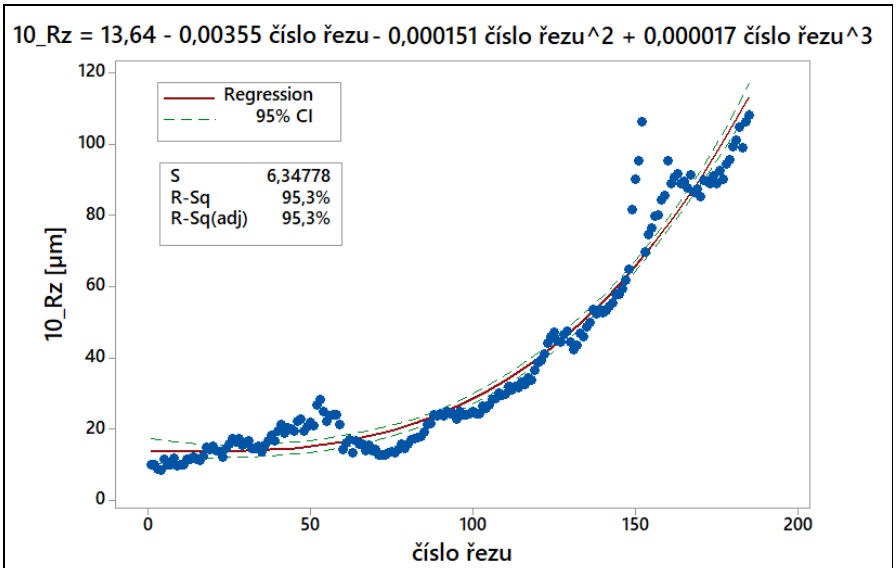
Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	2,5497	1,6121	Nevýznamný
Číslo řezu	0,6382	0,07649	Významný
Číslo řezu^2	-0,009437	0,0009728	Významný
Číslo řezu^3	4,8565·10^{-5}	3,49939·10^{-6}	Významný

Tabulka 23 Kubická regrese 10_Ra



Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	2,4179	0,2884	Významný
Číslo řezu	0,01234	0,01399	Nevýznamný
Číslo řezu^2	0,0002960	0,000182	Nevýznamný
Číslo řezu^3	5,2354·10^{-6}	6,6811·10^{-7}	Významný

Tabulka 24 Kubická regrese 10_Rz



Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	12,5108	1,8410	Významný
Číslo řezu	0,0420	0,08641	Nevýznamný
Číslo řezu^2	-0,0006423	0,001087	Nevýznamný
Číslo řezu^3	1,8180·10^{-5}	3,8621·10^{-6}	Významný

Odhady proměnných kubické regrese jsou u parametrů 1_Ra, 1_Rz, 2_Ra, 2_Rz, 4_Rz, 5_Ra, 5_Rz, 6_Ra, 6_Rz, 7_Rz a 8_Ra významné, zatímco u parametrů 3_Ra, 3_Rz, 4_Ra, 7_Ra, 8_Rz, 9_Ra, 9_Rz, 10_Ra a 10_Rz je 1 nebo více proměnných nevýznamných.

Ke zlepšení modelu by bylo zapotřebí vyřadit vlivné hodnoty nebo změnit polynom na vyšší stupeň.

Všechny modely dle Fisher-Snedecorova testu lze považovat za významné, neboť hodnota testovacího kritéria F překročila kritickou hodnotu kvantilu.

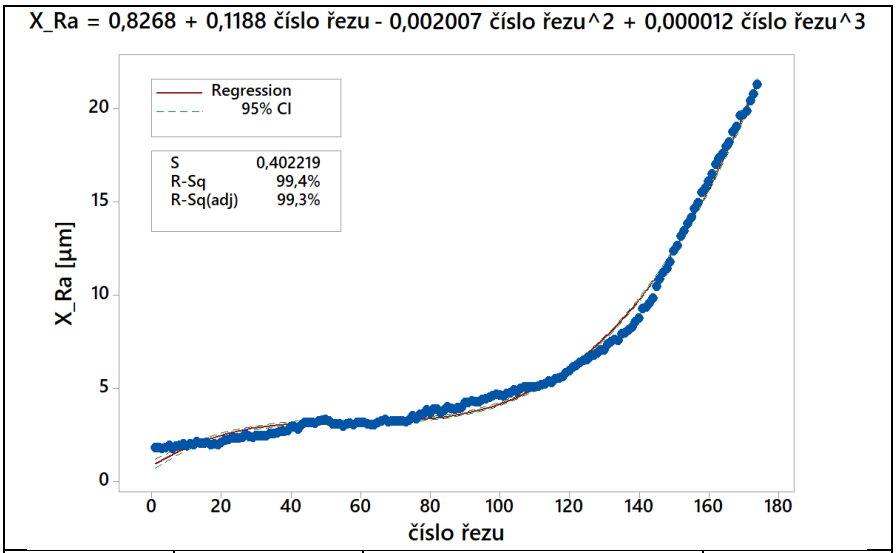
6.6 Vizualizace parametru Ra a Rz

Hodnoty parametru Ra a Rz byly ze všech vzorků zprůměrovány, jak ukazuje obrázek 47. Následně se provedla kubická regrese.

1	1_Ra	2_Ra	3_Ra	4_Ra	5_Ra	6_Ra	7_Ra	8_Ra	9_Ra	10_Ra	X Ra
2	1,688	2,215	1,475	2,114	1,494	1,715	1,818	1,598	2,441	1,905	1,846
3	1,848	1,870	1,410	1,901	1,389	1,946	1,944	1,825	2,060	2,112	1,831
4	2,111	1,913	1,399	1,955	1,664	1,752	1,749	1,628	2,040	1,911	1,812
5	1,903	1,963	1,570	1,893	1,390	2,056	1,839	1,753	2,028	1,863	1,826
6	2,128	1,847	1,674	1,932	1,688	2,360	1,880	1,668	2,070	2,334	1,958
7	1,753	1,589	1,458	1,943	1,799	2,047	1,971	1,540	1,973	2,039	1,811
8	1,731	1,962	1,559	2,120	2,052	1,848	1,808	1,821	1,984	2,166	1,905
9	2,094	2,190	1,690	1,936	1,820	2,046	1,937	1,744	1,708	2,183	1,935
10	2,120	2,121	1,795	2,127	2,204	2,173	2,303	1,627	1,726	2,127	2,032
11	1,821	2,025	2,084	2,182	1,965	2,093	2,002	1,800	1,581	1,963	1,952
12	2,075	1,925	2,167	2,037	1,982	2,309	1,862	1,861	1,972	2,000	2,019
13	1,868	2,132	1,854	2,020	1,962	2,612	1,715	1,685	1,797	2,302	1,995
14	1,987	2,371	2,321	2,039	1,967	2,747	1,647	2,000	1,855	2,574	2,151
15	1,864	2,299	2,302	2,024	2,077	2,146	1,727	1,678	1,942	2,756	2,082
16	1,833	2,344	1,992	1,998	1,985	2,140	1,675	2,240	2,020	2,442	2,067
17	1,963	2,297	2,206	1,918	1,736	2,557	1,880	1,832	2,202	2,448	2,104
18	1,892	2,089	2,361	1,892	1,904	1,810	1,688	1,942	1,935	2,523	2,004
19	2,087	2,222	2,106	1,946	1,899	2,013	1,423	2,009	1,998	2,654	2,036
20	1,922	1,932	2,406	2,220	1,846	1,905	1,724	1,900	1,608	2,447	1,991

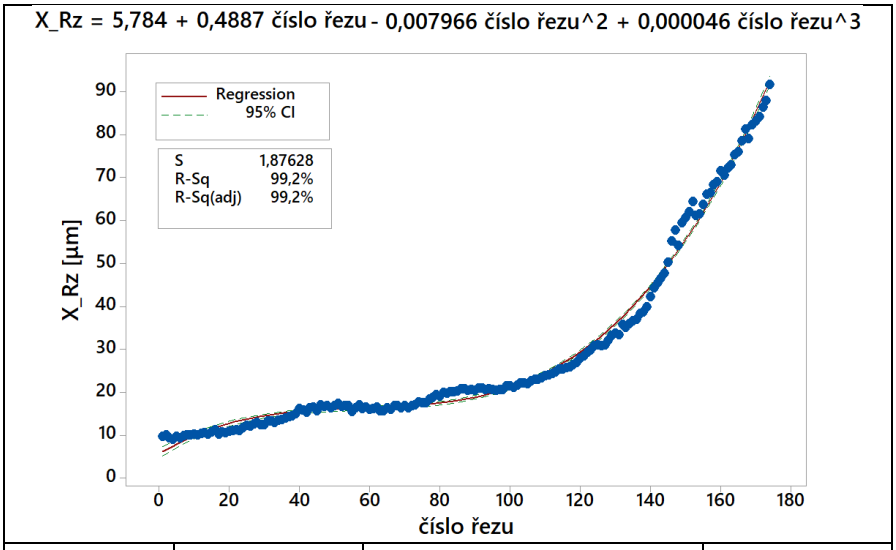
Obrázek 47 Výpočet X_Ra

Tabulka 25 Kubická regrese X_Ra



Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	0,7544	0,1200	Významný
Číslo řezu	0,1219	0,005992	Významný
Číslo řezu^2	-0,0020429	$8{,}0155 \cdot 10^{-5}$	Významný
Číslo řezu^3	$1{,}16377 \cdot 10^{-5}$	$3{,}02764 \cdot 10^{-7}$	Významný

Tabulka 26 Kubická regrese X_Rz



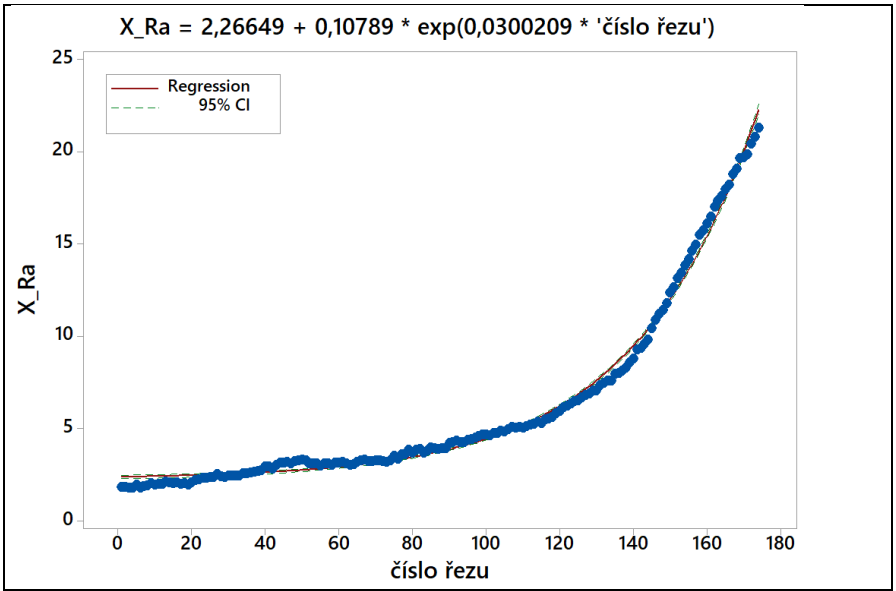
Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	5,2774	0,5677	Významný
Číslo řezu	0,5105	0,02834	Významný
Číslo řezu^2	-0,008216	0,00037905	Významný
Číslo řezu^3	$4{,}6916 \cdot 10^{-5}$	$1{,}43176 \cdot 10^{-6}$	Významný

Polynom 3. stupně X_Ra je vyhovující a regresní rabat vychází na 99,4 % a 99,2 % pro X_Rz.

Nyní proložíme data nelineární regresí využitím asymptotického konvexního modelu a následně model porovnáme s polynomem 3. stupně.

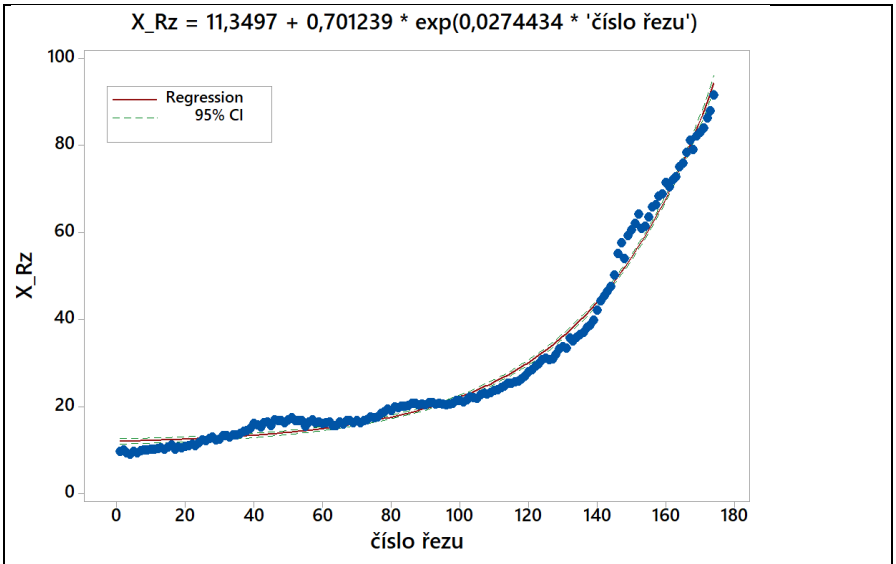
Rovnice modelu: X_Ra = Theta1 - Theta2 · $^{(-\text{Theta3} * \text{číslo řezu})}$

Tabulka 27 Asymptotický konvexní model X_Ra

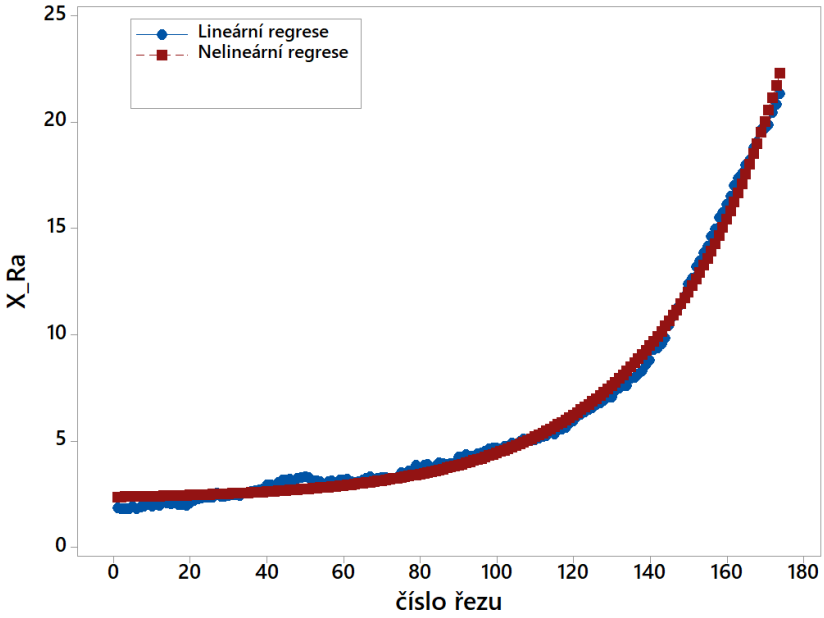


Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Theta1	2,2665	0,05542	Významný
Theta2	-0,10789	0,0075741	Významný
Theta3	-0,03002	0,0004178	Významný

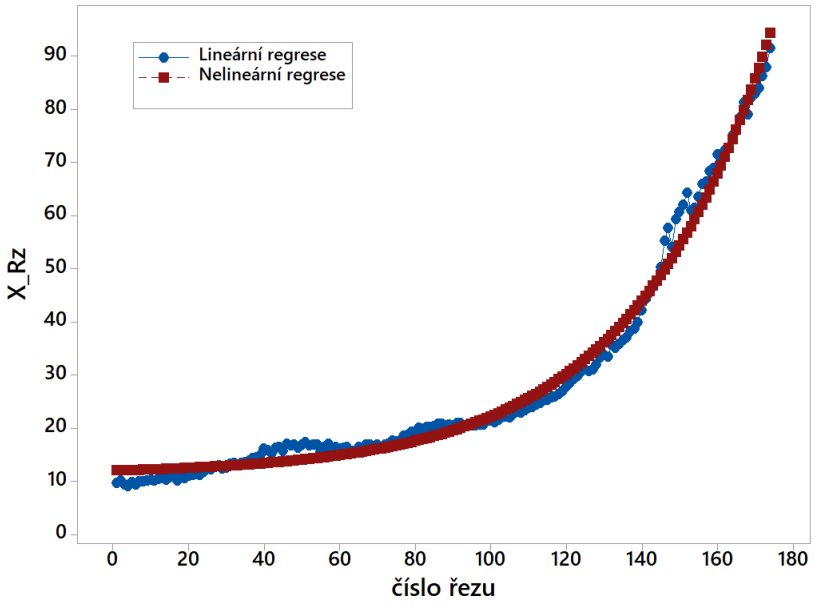
Tabulka 28 Asymptotický konvexní model X_Rz



Proměnná	Odhad	Směrodatná odchylka	Závěr
Theta1	11,3497	0,3625	Významný
Theta2	-0,7012	0,06643	Významný
Theta3	-0,0274	0,000562	Významný



Obrázek 48 Porovnání lineární a nelineární regrese X_Ra

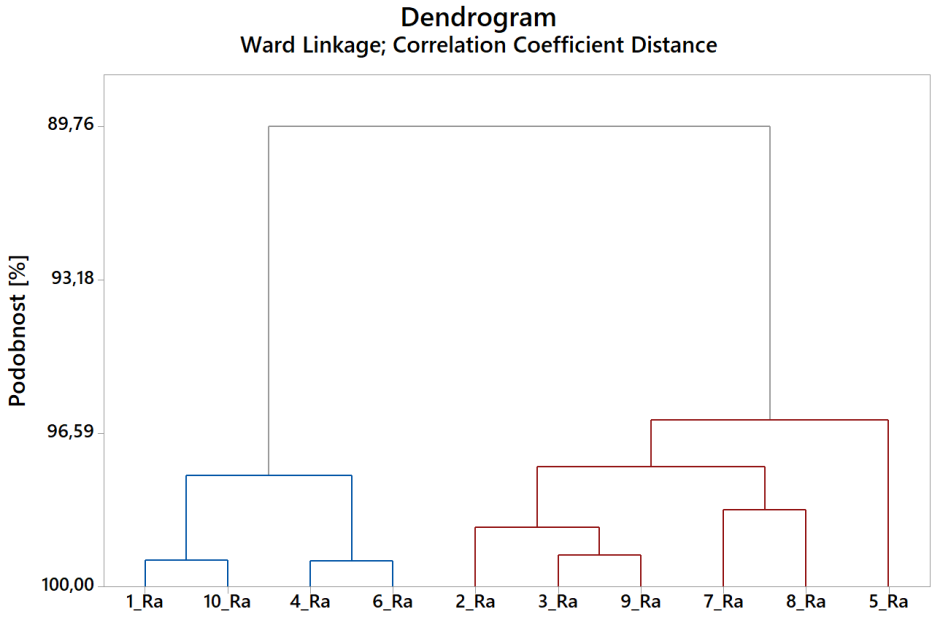


Obrázek 49 Porovnání lineární a nelineární regrese X_Rz

U kubické regrese lze zpozorovat nevhodný popis pro prvních 15 řezů. Porovnáním nelineární regrese s kubickou lineární regresi nacházející se na obrázku 48 a 49 lze zpozorovat, že daný problém byl odstraněn.

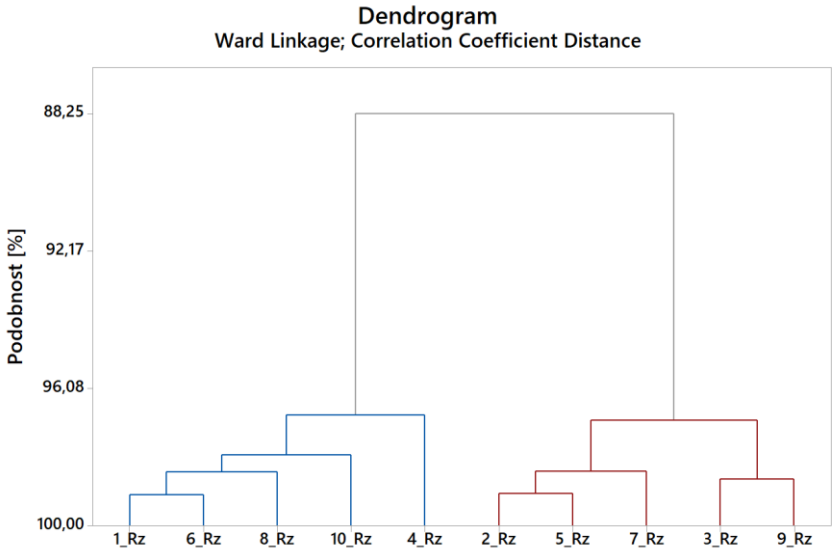
6.7 Dendogramy

Podobnost jednotlivých vzorků mezi sebou znázorňuje dendogram. Pro porovnání jsou zde zobrazeny dendogramy parametru Ra a Rz, které zahrnují všechny 3 oblasti povrchu tedy primární, sekundární, terciální a dendogramy složené z oblasti primární a sekundární, které byly použity na lineární a nelineární regresi.



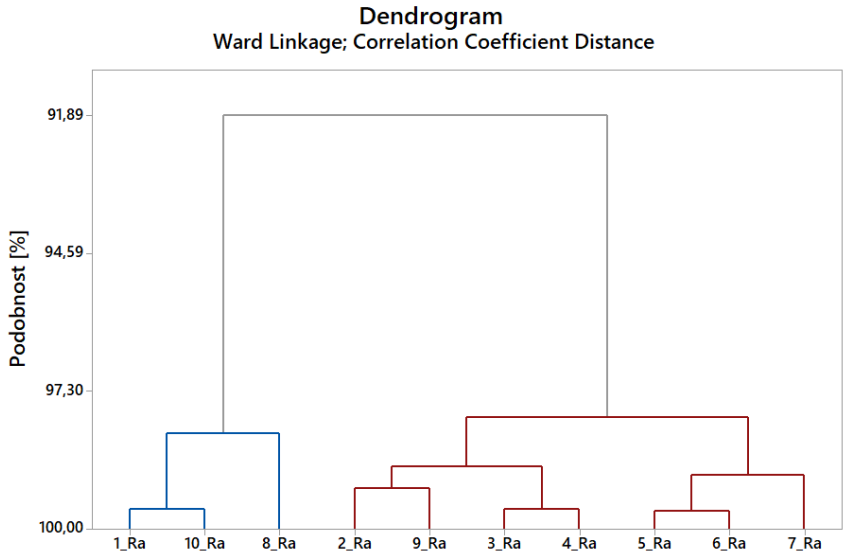
Obrázek 50 Dendogram parametru Ra (oblast primární, sekundární a terciální)

Z dendogramu vyplívá, že 1_Ra je podobný na 99,42 % s 10_Ra a tyto dva parametry jsou si podobné s dvojicí parametrů 4_Ra a 6_Ra na 97,54 %. Tyto 4 parametry vyznačené v grafu modře jsou si podobné z 89,76 % se skupinou parametrů označené červeně, do které patří parametry 2_Ra, 3_Ra, 5_Ra, 7_Ra, 8_Ra a 9_Ra.



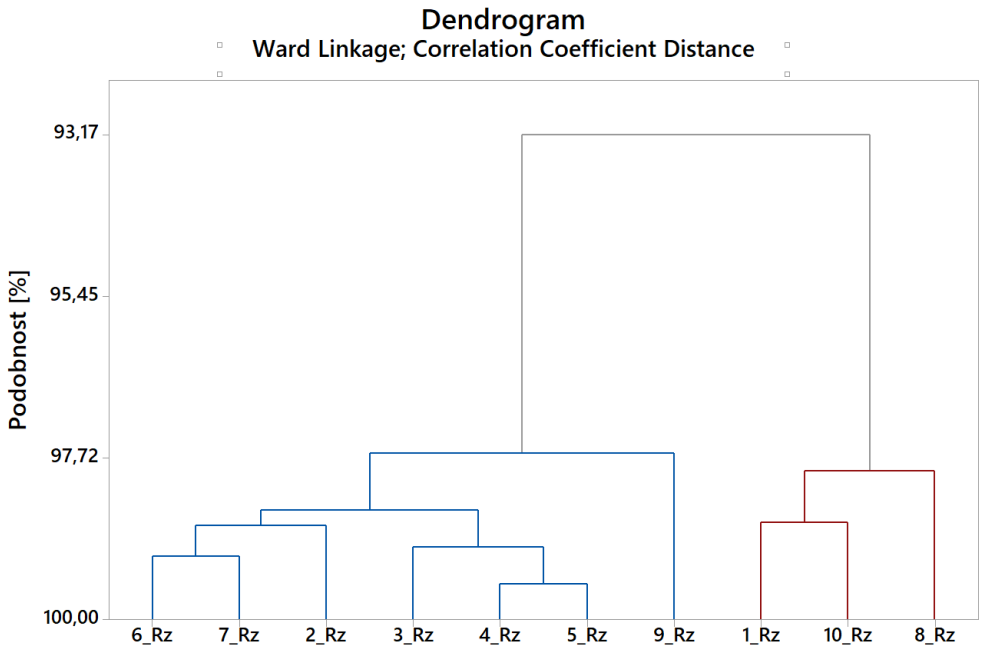
Obrázek 51 Dendogram parametru Rz (oblast primární, sekundární a terciální)

Dendogram parametru Rz znázorňuje rozdělení parametrů na 2 skupiny, vyjádřené barevně, které jsou si podobné na 88,25 %. Největší podobnost 99,13 % má parametr 1_Rz s 6_Rz a tyto parametry jsou si podobné na 98,47 % s parametrem 8_Rz.



Obrázek 52 Dendogram parametru Ra (oblast primární a sekundární)

Po odstranění terciální oblasti lze konstatovat, že parametr 1_Ra s 10_Ra si jsou podobné na 99,61 % a ty si jsou podobné na 98,13 % s 8_Ra. Zmiňované parametry patří do shluku označený modře, který je podobný červenému shluku na 91,89 %.



Obrázek 53 Dendogram parametru Rz (oblast primární a sekundární)

Z obrázku 53 vyplívá, že parametr 1_Rz je podobný na 98,63 % s 10_Rz a spolu s parametrem 8_Rz tvoří červený shluk, který je podobný na 93,17 % se shlukem modrým.

Odstraněním terciální oblasti, lze zpozorovat, že podobnost shluků dosáhla v obou případech nad hodnotu 90 %.

ZÁVĚR

V rámci diplomové práce se provedla podrobná analýza drsnosti povrchu vzorků z materiálu 1.4828, která byla získána řezáním laserem. S využitím bezkontaktního profiloměru Talysurf CLI 500 se změřila struktura povrchu a poté se vyhodnotily parametry Ra a Rz. Metodika EDA umožnila identifikovat základní charakteristiky a prostřednictvím vizualizace byla data rozdělena do 3 oblastí. Jedná se o oblast primární, sekundární a terciální.

Statistická analýza ukázala, že výsledná data nevykazují normální rozdělení, což bylo potvrzeno Anderson-Darlingovým testem. Pro vyhodnocení rozptylu byl využit boxplot, který ukázal, že hodnoty nacházející se od dolního kvartilu do mediánu vykazují nízký rozptyl a hodnoty od mediánu do horního kvartilu vysoký rozptyl.

Deanův Dixonův test odhalil, že data pocházející z primární a sekundární oblasti neobsahují odlehlé hodnoty. Terciální oblast byla vypuštěna z důvodu negativního vlivu na následnou regresi.

Pro popis dat regresní křivkou byla aplikována lineární regrese s kvadratickým a kubickým modelem. Zjistilo se, že kubický model lépe odpovídá charakteru dat než kvadratický model.

Následně se parametry Ra a Rz zprůměrovaly ze všech vzorků do jednoho grafu. Byl využit polynom 3. stupně a asymptotický konvexní model.

U kubické regrese lze zpozorovat nevhodný popis pro prvních 15 hodnot. Tento problém odstranila nelineární regrese, která je porovnaná s regresi lineární na obrázku 48 a 49.

Pomocí dendogramů se znázornila podobnost jednotlivých vzorků. Pro porovnání byly vytvořeny dendogramy pro všechny 3 oblasti a dendogramy pro oblast primární a sekundární. Odstraněním terciální oblasti, lze zpozorovat, že podobnost shluků dosáhla v obou případech nad hodnotu 90 %.

V závěru lze konstatovat, že provedená analýza poskytuje důležité poznatky o drsnosti povrchu materiálu 1.4828 řezaný laserem a umožňuje lepší porozumění jeho vlastnostem. Tyto poznatky mohou být využity pro optimalizaci výrobních procesů a zlepšení kvality výsledných produktů.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] PODULKA, Przemysław. Resolving Selected Problems in Surface Topography Analysis by Application of the Autocorrelation Function. Online. *Coatings*. 2023, roč. 13, č. 1. ISSN 2079-6412. doi:10.3390/coatings13010074. [cit. 2024-02-07].

[2] SONG, Guanghui; WANG, Yaojin a TAN, Daniel Q. A review of surface roughness impact on dielectric film properties. Online. *IET Nanodielectrics*. 2022, s. 1-23. ISSN 2514-3255. doi:10.1049/nde2.12026. [cit. 2024-02-27].

[3] MOLNÁR, Viktor. Minimization Method for 3D Surface Roughness Evaluation Area. Online. *Machines*. 2021. ISSN 2075-1702. doi:10.3390/machines9090192. [cit. 2024-02-07].

[4] HE, Baofeng; ZHENG, Haibo; DING, Siyuan; YANG, Ruizhao a SHI, Zhaoyao. A review of digital filtering in evaluation of surface roughness. Online. *Metrology and Measurement Systems*. 2021. ISSN 2300-1941. doi:10.24425/mms.2021.136606. [cit. 2024-02-07].

[5] PATIL, Shanta Hardas a KULKARNI, Rishikesh. Surface roughness measurement based on singular value decomposition of objective speckle pattern. *Optics and Lasers in Engineering*. 2022. ISSN 01438166. doi:10.1016/j.optlaseng.2021.106847. [cit. 2024-02-27].

[6] NAM, Na-Eun; SHIN, Seung-Ho; LIM, Jung-Hwa; SHIM, June-Sung a KIM, Jong-Eun. Effects of Artificial Tooth Brushing and Hydrothermal Aging on the Mechanical Properties and Color Stability of Dental 3D Printed and CAD/CAM Materials. Online. *Materials.* 2021. ISSN 1996-1944. doi:10.3390/ma14206207. [cit. 2024-02-27].

[7] SYBRIDGE TECHNOLOGIES. Measuring and Understanding Surface Finish. Online. 2021. Dostupné z: https://sybridge.com/measure-surface-finish/. [cit. 2024-02-28].

[8] LEE, Dong-Hyeok a CHO, Nahm-Gyoo. Assessment of surface profile data acquired by a stylus profilometer. Online. *Measurement Science and Technology*. 2012. ISSN 0957-0233. doi:10.1088/0957-0233/23/10/105601. [cit. 2024-02-28].

[9] *Technické normy* ČSN. Online. Dostupné z: https://www.technicke-normy-csn.cz/. [cit. 2024-02-27].

[10] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 21920-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Profil – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu.* 01.06.2023.

[11] GOSTIMIROVIĆ, Marin; RODIĆ, Dragan; SEKULIĆ, Milenko a ALEKSIĆ, Andjelko. An Experimental Analysis of Cutting Quality in Plasma Arc Machining. Online. *Advanced Technologies & Materials.* 2020. ISSN 2620147X. doi:10.24867/ATM-2020-1-001. [cit. 2024-02-07].

[12] ALSAADAWY, Muhammad; DEWIDAR, Montasser; SAID, Ahmed; MAHER, Ibrahem a SHEHABELDEEN, Taher A. A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals. Online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2024. doi:10.1007/s00170-023-12768-1. [cit. 2024-04-21].

[13] DAS, Partha Protim a CHAKRABORTY, Shankar. A comparative assessment of multicriteria parametric optimization methods for plasma arc cutting processes. Online. *Decision Analytics Journal*. 2023. ISSN 27726622. doi:10.1016/j.dajour.2023.100190. [cit. 2024-02-07].

[14] *Plasma Cutting: Everything You Need to Know.* Online. AXSOM, Tessa. 2023. Dostupné z: https://www.fictiv.com/articles/plasma-cutting-everything-you-need-to-know. [cit. 2024-02-07].

[15] HE, Yingyong; XIE, Honghu; GE, Yongjun; LIN, Yishan; YAO, Zhitong et al. Laser Cutting Technologies and Corresponding Pollution Control Strategy. Online. 2022. doi:10.3390/pr10040732. [cit. 2024-04-23].

[16] NARESH a KHATAK, Pankaj. Laser cutting technique: A literature review. Online. *Materials Today: Proceedings*. 2022. doi:10.1016/j.matpr.2021.08.250. [cit. 2024-04-21].

[17] LIU, Yanjie; ZHANG, Shijin; ZHAO, Yue a REN, Ziwei. Experiments on the kerf quality characteristic of mild steel while cutting with a high-power fiber laser. Online. *Optics & Laser Technology*. 2022. doi:10.1016/j.optlastec.2022.108332. [cit. 2024-04-21].

[18] *Princip vláknového - FIBER LASERU*. Online. Leonardo technology. Dostupné z: https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru. [cit. 2024-04-21].

[19] MISHRA, Prabhaker; PANDEY, ChandraMani; SINGH, Uttam; KESHRI, Amit a SABARETNAM, Mayilvaganan. Selection of appropriate statistical methods for data analysis. Online. *Annals of Cardiac Anaesthesia*. 2019. ISSN 0971-9784. doi:10.4103/aca.ACA_248_18. [cit. 2024-02-23].

[20] MELOUN, Milan; MILITKÝ, Jiří a KARLOVA, Univerzita. *Kompendium statistického zpracování dat*. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 9788024621968.

[21] Stručný úvod do testování statistických hypotéz. In: . Dostupné z: https://ufmi.ft.utb.cz/texty/qprakt_stat/ps2.pdf. [cit. 2024-02-27].

[22] *Nonlinear regression techniques: Exploring the Complexity of Relationships*. Online. FasterCapita. 2024. Dostupné z: https://fastercapital.com/content/Nonlinear-regression-techniques--Exploring-the-Complexity-of-Relationships.html#Introduction-to-Nonlinear-Regression-Techniques. [cit. 2024-04-23].

[23] JARANTOW, Stephen W.; PISORS, Eileen D. a CHIU, Mark L. Introduction to the Use of Linear and Nonlinear Regression Analysis in Quantitative Biological Assays. Online. *Current Protocols*. 2023. ISSN 2691-1299. doi:10.1002/cpz1.801. [cit. 2024-02-28].

[24] BZOVSKY, Sofia; PHILLIPS, Mark R.; GUYMER, Robyn H.; WYKOFF, Charles C.; THABANE, Lehana et al. The clinician's guide to interpreting a regression analysis. Online. 2022. ISSN 0950-222X. doi:10.1038/s41433-022-01949-z. [cit. 2024-02-28].

[25] SUWADA, Krzysztof. *A Guide to Exploratory Data Analysis*: *Discovering the Hidden Ge(r)ms with EDA*. Online. 2023. Dostupné z: https://nexocode.com/blog/posts/guide-to-exploratory-data-analysis-eda/. [cit. 2024-02-18].

[26] MIRZAL, Andri. Statistical Analysis of Clustering Performances of NMF, Spectral Clustering, and K-means. Online. *2020 2nd International Conference on Computer and Information Sciences (ICCIS).* 2020. ISBN 978-1-7281-5467-1. doi:10.1109/ICCIS49240.2020.9257641. [cit. 2024-02-25].

[27] SARAH, Matilda. *A Comprehensive Guide to Cluster Analysis: Applications, Best Practices and Resources.* Online. Displayr. 2023. Dostupné z: https://www.displayr.com/understanding-cluster-analysis-a-comprehensive-guide/. [cit. 2024-02-25].

[28] MELOUN, Milan; MILITKÝ, Jiří a HILL, Martin. *Statistická analýza vícerozměrných dat v příkladech*. Praha: Academia, 2012. ISBN 9788020020710.

[29] FAISAL, M; ZAMZAMI, E M a SUTARMAN. Comparative Analysis of Inter-Centroid K-Means Performance using Euclidean Distance, Canberra Distance and Manhattan Distance. Online. *Journal of Physics: Conference Series.* 2020. ISSN 1742-6588. doi:10.1088/1742-6596/1566/1/012112. [cit. 2024-02-25].

[30] *K-Means Data Clustering*. Online. In: Medium. 2017. Dostupné z: https://towardsdatascience.com/k-means-data-clustering-bce3335d2203. [cit. 2024-02-28].

[31] PATEL, Sachin P. a UPADHYAY, S.H. Euclidean distance based feature ranking and subset selection for bearing fault diagnosis. Online. *Expert Systems with Applications.* 2020. ISSN 09574174. doi:10.1016/j.eswa.2020.113400. [cit. 2024-02-25].

[32] SUN, Yongjian; LI, Shaohui; WANG, Yaling a WANG, Xiaohong. Fault diagnosis of rolling bearing based on empirical mode decomposition and improved manhattan distance in symmetrized dot pattern image. Online. *Mechanical Systems and Signal Processing.* 2021. ISSN 08883270. doi:10.1016/j.ymssp.2021.107817. [cit. 2024-02-25].

[33] *Exploratory Data Analysis.* Online. U.S. Environmental Protection Agency. 2023. Dostupné z: https://www.epa.gov/caddis-vol4/exploratory-data-analysis. [cit. 2024-02-18].

[34] GARG, Shaddy; MITRA, Subrata; YU, Tong; GADHIA, Yash a KASHETTIWAR, Arjun. Reinforced Approximate Exploratory Data Analysis. Online. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence.* 2023. ISSN 2374-3468. doi:10.1609/aaai.v37i6.25929. [cit. 2024-02-21].

[35] UZHGA-REBROV, Oleg a GRABUSTS, Peter. Comparative Evaluation of Four Methods for Exploratory Data Analysis. Online. 2021. doi:10.1109/ITMS52826.2021.9615347.. [cit. 2024-02-21].

[36] *Complete Exploratory Data Analysis: Step by step guide for Data Analyst.* Online. MULKAR, Ankush. 2023. Dostupné z: https://ankushmulkar.medium.com/complete-exploratory-data-analysis-step-by-step-guide-for-data-analyst-34a07156217a. [cit. 2024-02-11].

[37] *Exploratory Data Analysis: Everything you need to know.* Online. NGUYEN, Harry. ECHVIFY. 2023. Dostupné z: https://techvify-software.com/exploratory-data-analysis/. [cit. 2024-02-22].

[38] HULLMAN, Jessica a GELMAN, Andrew. Designing for Interactive Exploratory Data Analysis Requires Theories of Graphical Inference. Online. *Harvard Data Science Review.* 2021. doi:10.1162/99608f92.3ab8a587. [cit. 2024-02-11].

[39] BAILLIE, Mark; LE CESSIE, Saskia; SCHMIDT, Carsten Oliver; LUSA, Lara a HUEBNER, Marianne. Ten simple rules for initial data analysis. Online. *PLOS Computational Biology.* 2022. doi:10.1371/journal.pcbi.1009819. [cit. 2024-02-11].

[40] *Taylor - Hobson. Talysurf CLI 500 Operator's Handbook.* England, 2002.

[41] *Materiálové listy X15CrNiSi20-12*. Online. In: BOLZANO. Dostupné z: https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-zaruvzdornych/materialove-listy/x15crnisi20-12-austeniticke. [cit. 2024-02-28].

[42] *Žáruvzdorná, austenitická chromniklová ocel s křemíkem.* Online. In: HECO. Dostupné z: https://www.heco.de/cms/fileadmin/heco/Seiten/Wissenswertes/Werkstoffe/CZ/14828_CZ.pdf. [cit. 2024-02-28].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a0, a1, a2	Regresní koeficienty
CDA	Konfirmační analýzy dat
CLU	Shluková analýza
CO_2	Oxid uhličitý
EDA	Explorativní analýza dat
H_0	Nulová hypotéza
Ha	Alternativní hypotéz
HAZ	Tepelně ovlivněná zóna
IDA	Počáteční analýza dat
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
PAC	Řezání plazmovým obloukem
R^2	Koeficient determinace
Ra	Střední aritmetická výška
R-Sq	Regresní rabat
Rzx	Maximální výška úseku
S	Směrodatná odchylka reziduí
x_0	Pohyblivá poloha pravé hranice uvažovaného úseku
X	Soubor hodnot x uvažovaného úseku v pohyblivé poloze x_0
α	Hladina významnosti
$\Delta z\ (x_0)$	Maximální hodnota rozdílu mezi nejvyšší hodnotou pořadnice a nejnižší hodnotou pořadnice v uvažovaném úseku v pohyblivé poloze x_0
μ	Střední hodnota základního souboru
σ^2	Rozptyl

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Tvar, vlnitost a drsnost [6] 11
Obrázek 2 Stylusový profilometr [8] 12
Obrázek 3 Čára profilu [10] 13
Obrázek 4 Mechanický profil [10] 14
Obrázek 5 Definice primárního povrchu a profilu primárního povrchu [10] 15
Obrázek 6 Vztahy mezi S-filtrem, L-filtrem a F-operací [10] 16
Obrázek 7 Měřící postup pro určení P-profilu, W-profilu a R-profilu [10] 16
Obrázek 8 Maximální výška úseku [10] 17
Obrázek 9 Řezání laserem. [16] 19
Obrázek 10 Poloha ohniska [17] 20
Obrázek 11 Změna zúžení paprsku vlivem velikosti zaostření [17] 21
Obrázek 12 Vychýlení laserového paprsku [17] 21
Obrázek 13 CO_2 laser [16] 23
Obrázek 14 Princip vláknového laseru [18] 23
Obrázek 15 Řezné plochy AISI 304 získaných pomocí CO_2 a vláknového laseru [16] 24
Obrázek 16 Testování statistických hypotéz [21] 26
Obrázek 17 Lineární regrese [23] 27
Obrázek 18 Shlukovaná data [30] 30
Obrázek 19 Euklidovská vzdálenost mezi dvěma subjekty [31] 31
Obrázek 20 Manhattanská a euklidovská vzdálenost [32] 32
Obrázek 21 Histogram 34
Obrázek 22 Boxplot 34
Obrázek 23 Q-Q graf 35
Obrázek 24 Talysurf CLI 500 42
Obrázek 25 Vstupní část_10. vzorek 43
Obrázek 26 Zlom_10. vzorek 43
Obrázek 27 Výstupní část_10. vzorek 43
Obrázek 28 Hrubě nasnímaná data_10. vzorek 44
Obrázek 29 Vyrovnání povrchu_10. vzorek 44
Obrázek 30 Vypuštění tvaru_10. vzorek 44
Obrázek 31 Drsnost povrchu_10. vzorek 45
Obrázek 32 Grafické znázornění řezu povrchu 45
Obrázek 33 Naměřené hodnoty 46

Obrázek 34 Rozptylový graf parametru 6_Ra 47
Obrázek 35 Drsnost povrchu_6. vzorek 48
Obrázek 36 Grafický sumář 6_Ra 48
Obrázek 37 Boxplot parametru Ra 49
Obrázek 38 Boxplot parametru Rz 50
Obrázek 39 Testování odlehlých hodnot 52
Obrázek 40 Testování odlehlých hodnot 52
Obrázek 41 Kvadratická regrese 6_Ra 53
Obrázek 42 Kubická regrese 6_Ra 54
Obrázek 43 Porovnání kvadratické a kubické regrese 55
Obrázek 44 Kvadratická regrese 6_Rz 55
Obrázek 45 Kubická regrese 6_Rz 56
Obrázek 46 Porovnání kvadratické a kubické regrese 57
Obrázek 47 Výpočet X_Ra 67
Obrázek 48 Porovnání lineární a nelineární regrese X_Ra 70
Obrázek 49 Porovnání lineární a nelineární regrese X_Rz 70
Obrázek 50 Dendogram parametru Ra (oblast primární, sekundární a terciální) 71
Obrázek 51 Dendogram parametru Rz (oblast primární, sekundární a terciální) 72
Obrázek 52 Dendogram parametru Ra (oblast primární a sekundární) 72
Obrázek 53 Dendogram parametru Rz (oblast primární a sekundární) 73

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Technické parametry [40] 42
Tabulka 2 Hodnoty parametru Ra 50
Tabulka 3 Hodnoty parametru Rz 51
Tabulka 4 Testování odlehlých hodnot 53
Tabulka 5 Odhady parametrů 6_Ra 54
Tabulka 6 Odhady parametrů 6_Rz 56
Tabulka 7 Kubická regrese 1_Ra 58
Tabulka 8 Kubická regrese 1_Rz 58
Tabulka 9 Kubická regrese 2_Ra 59
Tabulka 10 Kubická regrese 2_Rz 59
Tabulka 11 Kubická regrese 3_Ra 60
Tabulka 12 Kubická regrese 3_Rz 60
Tabulka 13 Kubická regrese 4_Ra 61
Tabulka 14 Kubická regrese 4_Rz 61
Tabulka 15 Kubická regrese 5_Ra 62
Tabulka 16 Kubická regrese 5_Rz 62
Tabulka 17 Kubická regrese 7_Ra 63
Tabulka 18 Kubická regrese 7_Rz 63
Tabulka 19 Kubická regrese 8_Ra 64
Tabulka 20 Kubická regrese 8_Rz 64
Tabulka 21 Kubická regrese 9_Ra 65
Tabulka 22 Kubická regrese 9_Rz 65
Tabulka 23 Kubická regrese 10_Ra 66
Tabulka 24 Kubická regrese 10_Rz 66
Tabulka 25 Kubická regrese X_Ra 68
Tabulka 26 Kubická regrese X_Rz 68
Tabulka 27 Asymptotický konvexní model X_Ra 69
Tabulka 28 Asymptotický konvexní model X_Rz 69