

Statistické hodnocení jakosti řezu získaného pomocí technologie vodního paprsku

Bc. Jan Kuzma

Diplomová práce
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Jan Kuzma
Osobní číslo:	T21443
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Řízení jakosti
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Statistické hodnocení jakosti řezu získaného pomocí technologie vodního paprsku.

Zásady pro vypracování

1. Vypracování rešerše na zadané téma.
2. Proměření vyrobených vzorků s využitím 3D techniky scanování.
3. Nalezení vhodných statistických metodik pro popis technického povrchu po aplikované technologii

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

Seznam doporučené literatury:

PATA, Vladimír a Milena KUBIŠOVÁ. *Statistické metody hodnocení jakosti strojírenských povrchů*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická, 2018. ISBN 978-80-7454-740-9.

FRIEDRICH, Václav, Pavel HRADECKÝ, Šárka MICHALCOVÁ a Marek POMP. *Vybrané statistické metody*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2018. ISBN 978-80-248-4108-3.

MOURALOVÁ, Kateřina. *Analýza vlivu vstupních faktorů na jakost povrchu a efektivitu technologie elektroerozivního drátového řezání pro různé kovové materiály a jejich tepelná zpracování: Analysis of the influence of input factors on surface quality and efficiency of wire electrical discharge machining for different metal materials and their heat treatment : zkrácená verze habilitační práce v oboru Strojírenská technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2018. ISBN 978-80-214-5641-9.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Dr. Ing. Vladimír Pata**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2023**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 7. února 2023

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 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:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá statistickým postupem hodnocení heterogenního a homogenního povrchu. K získání dat pro statistické hodnocení bylo zhotoveno 20 vzorků s různými rychlostmi řezu. Pro jejich zhotovení byla použita technologie řezání vodním paprskem. Práce popisuje postup měření, úpravu dat, rozhodnutí, zda je povrch homogenní či heterogenní a následné sestavení a porovnání regresních analýz.

Klíčová slova: abrazivní vodní paprsek, struktura povrchu, homogenní a heterogenní povrch, regresní analýza

ABSTRACT

The diploma thesis deals with a statistical procedure for the evaluation of heterogeneous and homogeneous surfaces. To obtain data for statistical evaluation, 20 samples with different cutting speeds were taken. Water jet cutting technology was used to fabricate them. The thesis describes the measurement procedure, the data processing, the decision whether the surface is homogeneous or heterogeneous and the subsequent construction and comparison of regression analyses.

Keywords: abrasive waterjet, surface structure, homogeneous and heterogeneous surface, regression analysis

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce prof. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za čas, který mi věnoval, cenné rady a pomoc, kterou mi poskytl během vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za podporu během celého studia.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ	12
1.1 ROZDĚLENÍ NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ	12
1.1.1 Dělení podle hlavního zdroje energie	12
1.1.2 Dělení podle přítomnosti nástroje	13
1.1.3 Dělení podle převládajícího druhu úběru materiálu	13
1.2 MECHANICKÉ METODY ÚBĚRU MATERIÁLU	14
1.2.1 Obrábění ultrazvukem	14
1.2.2 Obrábění vodním paprskem	14
1.2.3 Obrábění proudem brusiva	15
1.3 CHEMICKÉ METODY ÚBĚRU MATERIÁLU	15
1.3.1 Chemické obrábění.....	15
1.3.2 Fotochemické obrábění	16
1.4 ELEKTRICKÉ – ELEKTROCHEMICKÉ METODY ÚBĚRU MATERIÁLU	16
1.4.1 Elektrochemické obrábění.....	16
1.4.2 Elektrochemické broušení	16
1.5 ELEKTROTEPELNÉ – TEPELNÉ METODY ÚBĚRU MATERIÁLU	17
1.5.1 Elektroerozivní obrábění	17
1.5.2 Obrábění paprskem elektronů	17
1.5.3 Obrábění paprskem iontů	17
1.5.4 Obrábění paprskem plazmy.....	18
1.5.5 Obrábění laserem	18
2 OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPSREM	19
2.1 HISTORIE VYUŽITÍ VODNÍHO PAPSREM	19
2.2 PRINCIP METODY	20
2.2.1 Popis zařízení pro vodní paprsek	20
2.3 POPIS TECHNOLOGIÍ VODNÍCH PAPSREMŮ	22
2.3.1 Technologie WJM – Water Jet Machining	22
2.3.2 Technologie AWJM – Abrasive Water Jet Machining	22
2.3.3 Technologie AWSJ – Abrasive Water Slurry Jet.....	23
2.3.4 Technologie IJM – Ice Jet Machining.....	24
2.4 VLASTNOSTI TECHNOLOGIÍ VODNÍHO PAPSREM	25
2.4.1 Výhody technologie vodního paprsku	25
2.4.2 Nevýhody technologie vodního paprsku.....	25
2.5 KVALITA ŘEZU	25
2.5.1 Oblasti řezu	26
2.5.2 Hodnocení řezu	28

2.6	VYUŽITÍ VODNÍHO PAPRSKU	28
2.6.1	Oblasti využití vodního paprsku	29
2.6.2	Řezání	29
2.6.3	Soustružení	30
2.6.4	Frézování	30
2.6.5	Vrtání	31
2.6.6	Gravírování	31
3	STRUKTURA POVRCHU	32
3.1	STRUKTURA POVRCHU DLE NOREM	32
3.1.1	ČSN EN ISO 21920-2	32
3.1.2	ČSN EN ISO 25178-2	36
3.2	METODY MĚŘENÍ	37
3.2.1	Dotykový způsob měření	37
3.2.2	Bezdotykový (optický) způsob měření	37
3.3	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ DAT	38
3.3.1	Vypočítané hodnoty	38
3.3.2	Metodika EDA	39
3.3.3	Testování normality	41
3.3.4	Testy odlehlých hodnot	42
3.3.5	Teorie hypotéz	42
3.3.6	Lineární regrese	43
II	PRAKTICKÁ ČÁST	45
4	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	46
5	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	47
6	POSTUP MĚŘENÍ	48
6.1	TALYSURF CLI 500	48
6.2	PŘÍPRAVA A PARAMETRY MĚŘENÍ	48
6.3	ÚPRAVA NAMĚŘENÝCH DAT	49
6.3.1	Vyrovnání povrchu	50
6.3.2	Odstranění tvaru	50
6.3.3	Export dat	51
7	VYHODNOCENÍ DAT	52
7.1	EDA	52
7.2	OVĚŘENÍ HOMOSKEDASTICITY A HETEROGENITY POVRCHU	55
7.3	REGRESNÍ ANALÝZA	58
7.3.1	Regresní analýza u rychlosti řezu 176 mm/min	60
7.3.2	Regresní analýza u rychlosti řezu 224 mm/min	63
7.3.3	Regresní analýza u rychlosti řezu 272 mm/min	66
7.3.4	Regresní analýza u rychlosti řezu 320 mm/min	69
8	INTERPETACE VÝSLEDKŮ	72

ZÁVĚR	73
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	74
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	79
SEZNAM OBRÁZKŮ	81
SEZNAM TABULEK.....	83
SEZNAM PŘÍLOH.....	84

ÚVOD

V přírodě dokáže vodní proud svým pohybem měnit a přetvářet celou škálu materiálů, o což se lidská společnost snaží již od nepaměti. Inspirací v přírodě vznikla metoda obrábění vodním paprskem, která je oblíbená díky své všestrannosti a možnostem využití. Vodní proud o vysokém tlaku fokusovaný do úzkého paprsku je univerzální řezný nástroj, použitelný na téměř všechny materiály.

Vodní paprsek se řadí mezi nekonvenční technologie, jelikož nevyužívá standartní řezný nástroj. Na obráběný materiál nepůsobí žádné řezné síly, takže nedochází k deformaci. Vodní paprsek se využívá tam, kde nelze použít obrábění klasickým řezným nástrojem ať už z hlediska technického nebo ekonomického a své využití našel téměř v jakémkoli průmyslu.

Další část diplomové práce se zabývá strukturou a statistickým vyhodnocením povrchu. Struktura povrchu je popsána dle aktuálně platných norem, včetně popisu základních parametrů profilu. Existují dvě metody, jak povrch měřit, a to dotykovým měřidlem nebo bezdotykovým (optickým) měřidlem. Je zde popsán obecný postup vyhodnocení struktury povrchu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ

Nekonvenční technologie obrábění představují metody, které se liší od klasického třískového obrábění tím, že pro úběr materiálu nepoužívají mechanickou práci, ale využívají různé fyzikální principy (například mechanické, chemické, elektrochemické tepelné). Název nekonvenční technologie se začal používat u metod vyvinutých po roce 1940. Většina metod byla vyvinuta a určena k řešení speciálních úloh v kosmickém a leteckém průmyslu. Dnes jsou však metody nekonvenčních technologií využívány v mnoha průmyslových odvětvích. Technicky náročné vynálezy posledních desítek let (letadla, kosmické rakety, počítače) vytvořily širokou škálu nových a těžkoobrobitelných materiálů. Nevýhody těchto materiálů při obrábění vznikají z jejich vysoké tvrdosti, křehkosti a jejich tepelných vlastností. [1]

1.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Nekonvenční technologie dělíme: [1]

- Podle hlavního zdroje energie
- Podle přítomnosti nástroje jako geometrického tělesa
- Podle mechanismu úběru materiálu

1.1.1 Dělení podle hlavního zdroje energie

Dělení podle druhu použité energie je nejvíc rozšířené a používané. Třídí jednotlivé technologie do hlavních skupin podle energie, která je zdrojem úběru materiálu na: [1]

- Mechanické procesy:
 - Obrábění ultrazvukem (USM)
 - Obrábění vodním paprskem (WJM/AWJM)
 - Obrábění proudem brusiva (AJM/AFM)
- Chemické procesy
 - Chemické obrábění (CM)
 - Fotochemické obrábění (PCM)
- Elektrické – Elektrochemické procesy
 - Elektrochemické obrábění (ECM)

Elektrochemické broušení (ECG)

- Elektrotepelné – Tepelné procesy

Elektroerozivní obrábění (EDM)

Obrábění paprskem elektronů (EBM)

Obrábění paprskem iontů (IBM)

Obrábění paprskem plazmy (PJM)

Obrábění laserem (LBM)

1.1.2 Dělení podle přítomnosti nástroje

Hlavní příčinou úběru materiálu je všeobecně nástroj. U nekonvenčních technologií není nástroj přítomný jako geometrické těleso, ale například jako laserový paprsek nebo paprsek elektronů. Tuhé geometrické těleso slouží k zabezpečení geometrie vytvářeného tvaru dutiny nebo otvoru. Nástroj jako podporné těleso se využívá v: [1]

- Ultrazvukovém obrábění (USM)
- Elektrochemickém obrábění (ECM)
- Elektrojiskrovém obrábění (EDM)

1.1.3 Dělení podle převládajícího druhu úběru materiálu

Dělení podle převládajícího mechanismu úběru materiálu rozlišuje: [1]

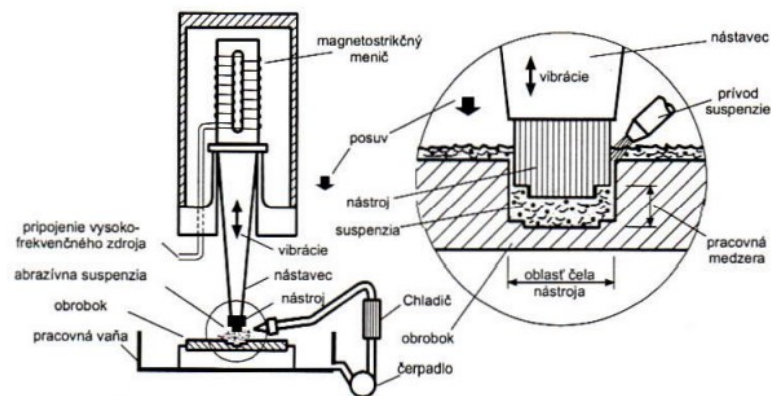
- Procesy s převládajícím brusným účinkem – obrábění ultrazvukem (USM), obrábění proudem brusiva (AJM, AFM)
- Procesy s erozivním účinkem – obrábění vodním paprskem (WJM, AWJM)
- Procesy chemického rozpouštění materiálu – chemické obrábění (CM) fotochemické obrábění (PCM)

1.2 Mechanické metody úběru materiálu

Mechanismus úběru materiálu je charakterizovaný procesem mikro vylamování a mikro vyštěpování částic z materiálu následkem nárazu drobných částic brusiva na povrch. [1]

1.2.1 Obrábění ultrazvukem

Ultrazvukové obrábění (USM) se používá k obrábění elektricky vodivých a nekovových materiálů. Princip USM je založený na brusném účinku suspenze kapaliny a jemného brusiva proudící mezi obrobkem a nástrojem. Vibrace způsobují, že brusné částice narážejí na obráběný povrch, což vede k úběru materiálu. Nástroj vibruje kolem své osy s vysokou frekvencí, obvykle vyšší než 20 kHz. Jako brusný materiál, který koluje mezi nástrojem a obrobkem, se používá karbid křemíku nebo karbid bóru. Použití této metody je vhodné u tvrdých a křehkých materiálů například keramiky, křemíku, polodrahokamů nebo skla. [1,2]



Obrázek 1 Princip obrábění ultrazvukem [1]

1.2.2 Obrábění vodním paprskem

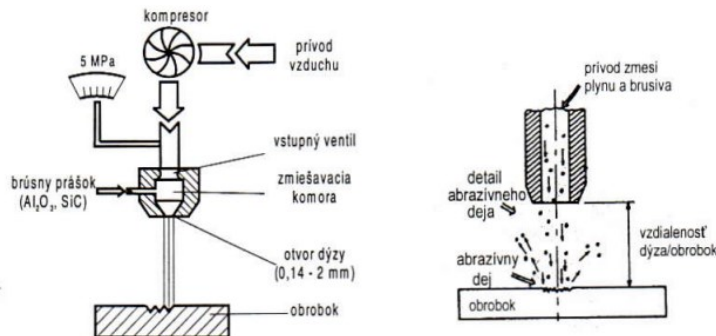
Při obrábění vodním paprskem využíváme úzkého proudu vody. Proud vody, který vystupuje z úzké trysky (do 0,3 mm) pod vysokým tlakem, dopadá s vysokou dopadovou rychlostí a vysokou měrnou kinetickou energií. Rozeznáváme dvě základní metody podle použitého pracovního média: [1,3]

- WJM – čistý vodní paprsek (Water Jet Machining)
- AWJM – abrazivní vodní paprsek (Abrasive Water Jet Machining)

Technologie vodního paprsku se využívá k obrábění kovových i nekovových materiálů například ocelí, slitin titanu, kompozitů a gumy. Tato metoda bude dále podrobněji rozebrána. [1]

1.2.3 Obrábění proudem brusiva

Obrábění proudem brusiva (AJM) spočívá v tryskání abrazivních částic nesených proudem vysokou rychlostí na obráběný povrch. Materiál je odstraňován abrazí při dopadu částic na povrch. Abrazivní paprsek se využívá k obrábění tvrdých a křehkých materiálů. Abrazivní proud lze využít po úpravách v systému k různým typům operací, například k řezání tvrdých materiálů, k erozním zkouškám, otryskávání, čištění atd. [4,5]

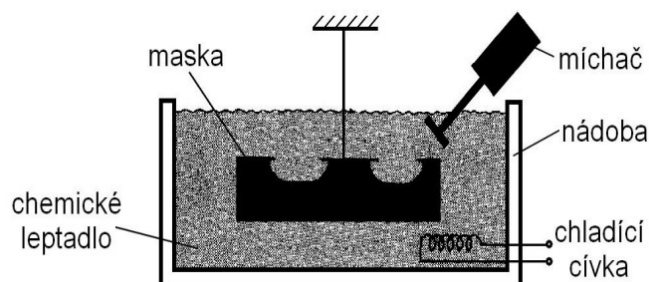


Obrázek 2 Princip a detail obrábění proudem brusiva [1]

1.3 Chemické metody úběru materiálu

1.3.1 Chemické obrábění

Chemické obrábění (CM) je řízené chemické rozpouštění obráběného materiálu silně kyselým nebo zásaditým chemickým činidlem. Materiál se odleptává po vrstvách o různých tloušťkách. Tam, kde nemá dojít k úběru materiálu, používáme speciální povlaky neboli masky. Výsledek procesu leptání je závislý na experimentálních zkušenostech a vyžaduje vysokou zkušenost obsluhy. Výsledný povrch značně závisí na tloušťce odleptané vrstvy. Tato metoda se používá k vytváření kapes a kontur nebo také k výrobě mikro součástek. [1,6]



Obrázek 3 Princip chemického obrábění [6]

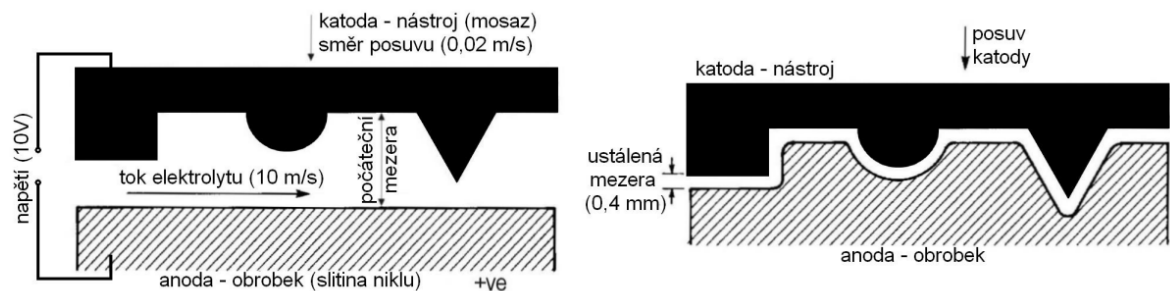
1.3.2 Fotochemické obrábění

Fotochemické obrábění (PCM) je metoda, při které se používají chemicky aktivní leptadla nanášená na kovový povrch prostřednictvím fotocitlivé rezistové šablony zvané fotorezist, která odstraňuje vybraný materiál z kovového povrchu. Tato metoda se taktéž označuje jako fotoleptání a je vhodná pro opracování tenkých plechů (0,013 mm – 2,032 mm). [7]

1.4 Elektrické – Elektrochemické metody úběru materiálu

1.4.1 Elektrochemické obrábění

Elektrochemické obrábění (ECM) se využívá pro elektricky vodivé materiály. Základem metody je elektrolýza. Při elektrolýze se materiál odebrává elektrochemickým rozpouštěním. Obrobek je anoda a nástroj katoda. Mezi nástrojem a obrobkem protéká elektrolyt. Obrábění probíhá bez opotřebení nástroje a díl je obráběn bez vyvolání zbytkového napětí. Výhodou této metody je, že rychlost úběru materiálu nezávisí na tvrdosti materiálu. Tato metoda se využívá v leteckém a automobilovém průmyslu. [1,8]



Obrázek 4 Princip elektrochemického obrábění [1]

1.4.2 Elektrochemické broušení

Elektrochemické broušení (ECG) je hybridní proces který kombinuje elektrochemické obrábění a konvenční broušení. Materiál je z obrobku odebrán díky elektrolytickému odstraňování (90–95 %) a zbytek se provádí mechanickým broušením (5–10 %). Při obrábění se používá nízké napětí a vysoký proud. [9,10]

1.5 Elektrotepelné – Tepelné metody úběru materiálu

1.5.1 Elektroerozivní obrábění

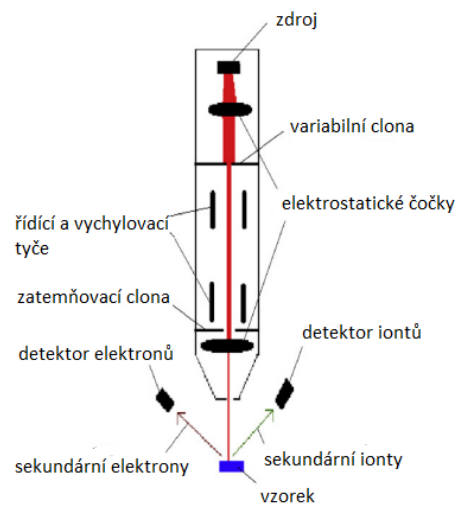
Elektroerozivní obrábění (EDM) je jedním z nejstarších nekonvenčních metod obrábění. Lze jím obrábět pouze elektricky vodivé materiály. Úběr materiálu spočívá v odstraňování materiálu ve formě úlomků pomocí série opakujících se elektrických výbojů mezi nástrojem (elektrodou) a obrobkem za přítomnosti dielektrické kapaliny (petrolej, destilovaná voda). Elektrická energie se mění na tepelnou prostřednictvím sérií elektrických výbojů. Tepelná energie vytváří mezi katodou a anodou plazmový kanál při teplotě v rozmezí 8 000 až 12 000 °C. Vlivem vysoké koncentrace energie materiál taje a odpařuje se. Elektroerozivní obrábění využíváme na hloubení a drátové řezání. [1,11,12]

1.5.2 Obrábění paprskem elektronů

Obrábí se svazkem elektronů. Podstatou zařízení je elektronové dělo, které poskytuje paprsku vysokou rychlost a zaostřuje jej na velmi malé místo (10 až 100 μm). Svazek paprsku při dopadu předá svoji kinetickou energii na povrch materiálu ve formě tepla, kde dochází k lokálnímu přehřátí, natavení a případně i k odpaření materiálu. Nevýhodou obrábění paprskem elektronů (EBM) je nutnost provádět ve vakuu, jinak by elektrony reagovaly se vzduchem a ztratily by tak svou energii a řeznou schopnost. [1,13]

1.5.3 Obrábění paprskem iontů

Při obrábění paprskem iontů (IBM) je proud nabitých atomů (iontů) inertního plynu (argonu) urychlován ve vakuu vysokými energiemi a směřován na obráběný materiál. Úběr materiálu dynamickým zpracováním se provádí vyražením atomů z povrchu obrobku elektroelastickou srážkou a zpětným rázem. Když atom narazí na shluk atomů v obrobku, odstraní z něj 0,1 až 10 atomů obrobku. Při této metodě se tvoří teplo a nevzniká mechanická deformace povrchové vrstvy. Tato technologie se využívá při čištění a hlazení povrchů. [14]



Obrázek 5 Schéma obrábění paprskem iontů [14]

1.5.4 Obrábění paprskem plazmy

Obrábění plazmovým paprskem (PJM) je technologie obrábění povrchu založená na chemickém leptání nebo nanášení za asistence atmosférického plazmatu. Materiál je odtavován a odpařován díky vysoké teplotě plazmatu (10 000 – 30 000 °C). Částice kovu se odpařují velmi rychle, takže teplo neproniká do větší hloubky pod obrobenu plochu. Zdroj plazmového paprsku je napájen inertními plyny jako je argon nebo hélium, které udržují stabilní výboj. Materiál se odstraňuje plazmou asistovaným čistě chemickým leptáním, proto nedochází k podpovrchovému poškození na rozdíl od abrazivních metod. Tato metoda se využívá při svařování, dělení materiálů anebo nanášení povlaků na bázi keramiky. [15]

1.5.5 Obrábění laserem

Úběr materiálu při obrábění laserem (LBM) je založen na vysokém tepelném toku generovaném laserovými paprsky, které taví a odpařují materiál obrobku v zaostřeném bodě. Odstraňování materiálu při obrábění laserem se skládá ze tří fází: tavení, odpařování a chemické degradace, která zahrnuje rozbití chemických vazeb a degradaci materiálu. Tepelná energie potřebná pro tavení a odpařování je získána absorpcí paprsku o vysoké hustotě, který je zaměřen pomocí čoček na obrobek. [16]

2 OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPERSEM

Obrábění vodním paprskem spadá do moderních metod dělení materiálů. Nejen že tato technologie má široké uplatnění ve strojírenství a stavebnictví, ale také i v potravinářství nebo v průmyslu chemickém. Rozlišujeme dvě hlavní metody obrábění. Obrábění pomocí čistého vodního paprsku WJM (Water Jet Machining) a obrábění pomocí vodního paprsku s přísadou jemného abraziva AWJM (Abrasive Water Jet Machining). [1]

2.1 Historie využití vodního paprsku

Technologie vodního paprsku má svůj původ v hydraulickém hornictví, kde se k rozbíjení půdy uplatňoval vysokorychlostní proud vody už v 19. století. Hydraulická těžba se používala při těžbě zlata v Kalifornii už od roku 1853. [17]

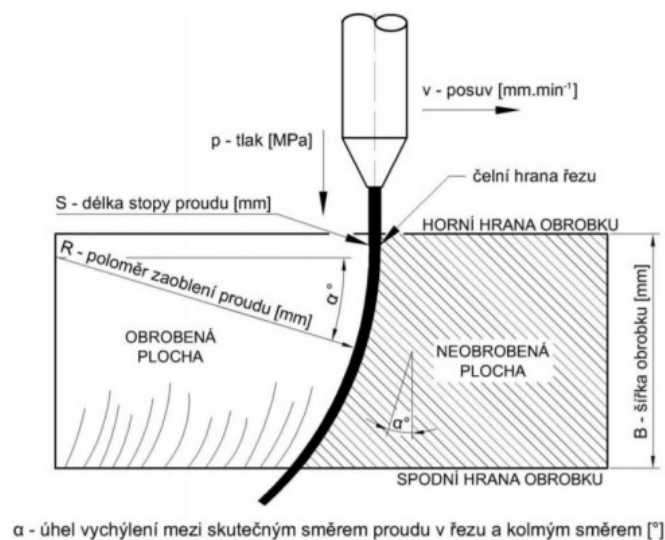
Moderní technologii vodního proudu lze datovat přímo k vývoji vysokotlakého čerpadla v šedesátých letech 20. století, kdy byly provedeny zkoušky řezání různých materiálů při tlaku proudu až 1000 MPa. Naopak studie mechanismu odstraňování materiálu při dopadu vodních kapek začaly už v 50. letech 20. století studiem dešťové eroze leteckých součástí. Vývoj vysokotlakého čerpadla a objasnění mechanismu odstraňování materiálů vodními kapkami přitáhl rostoucí zájem o využití vysokorychlostního vodního paprsku. V roce 1972 se uspořádalo první mezinárodní sympozium o technologii řezání vodním paprskem a toto sympozium se od svého založení koná každé dva roky. [3,17]

Hlavní oblastí výzkumu technologie řezání vodním paprskem v 70. letech 20. století bylo řezání čistým vodním paprskem a hloubení hornin a zemin spojené s důlním a stavebním inženýrstvím. V roce 1982 byly na 6. mezinárodním sympoziu předneseny první studie o řezání abrazivním vodním paprskem. Technologie abrazivního vodního paprsku se rychle rozšířila ve stavebnictví, výrobě a konstrukci díky vlastnosti řezat tvrdé materiály, jako jsou kovy, keramika, beton a horniny. [3,17,40]

V poslední době byla navržena řada inovativních technologií obrábění vodním paprskem. Například trysky na zkapalněný plyn, ultra vysokotlaká čerpadla, která realizují tlaky přesahující 600 MPa, a pětiosý systém obrábění vodním paprskem. Zaznamenáváme stálý pokrok a aplikace vodního paprsku se v různých průmyslových odvětvích stále rozšiřuje. [3,17]

2.2 Princip metody

Při obrábění vodním paprskem se materiál odebrává pomocí úzkého vodního paprsku, který dopadá s vysokou rychlostí a kinetickou energií na jednotku plochy. Mechanický účinek dopadu paprsku můžeme znásobit přidáním abraziva. Proud vody vnikáním do obrobku postupně ztrácí svou kinetickou energii a vychyluje se po zaoblené dráze, jejíž poloměr se mění s předcházející délkou oblouku, jak ukazuje Obrázek 6. Vychýlení a zpomalení paprsku je způsobeno třením mezi povrchem vodního paprsku a povrchem obráběného materiálu. [1]



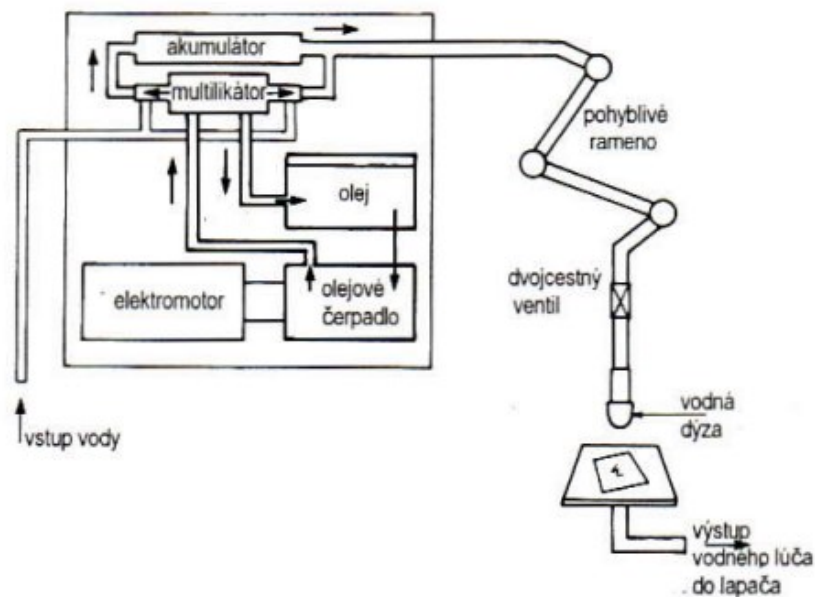
Obrázek 6 Schéma procesu obrábění vodním paprskem [1]

2.2.1 Popis zařízení pro vodní paprsek

Zařízení pro obrábění vodním paprskem je složeno z těchto částí: [1]

- Hydraulická jednotka slouží k vytvoření vysokého tlaku vodního proudu pomocí systému hydraulických pump.
- Multiplikátor je součástí hydraulické jednotky a používá se ke zvýšení tlaku na 380 MPa.
- Akumulátor je vysokotlaká nádoba, která tlumí rázy v kapalině vyvolané pulzací proudu. Udržuje v hydraulické jednotce konstantní tlak a průtok vody.
- Filtry čistí kapalinu a odstraňují nečistoty ve velikostech 1,2 až 0,5 μm , které by mohly poškodit trysku.

- Potrubí na rozvod vody se skládá z různých druhů normalizovaných potrubí a armatur s průměrem do 14 mm.
- Tryska je základní a nejdůležitější část zařízení, ovlivňuje kvalitu řezu i proudu. Materiál trysky se liší podle použité metody. Při obrábění čistým vodním paprskem využíváme rubín, safír nebo diamant. Při použití abraziva využíváme karbid wolframu, kubického nitridu nebo keramických materiálů. Životnost trysky závisí na kvalitě a upravenosti vody. Využívá se demineralizovaná a deionizovaná voda.
- Lapač vody slouží k zachycení energie vodního paprsku, zachytává třísky a tlumí hluk. Lapač musí být dostatečně hluboký, aby došlo k lámání proudu před dosáhnutím dna. Hloubka nádoby se doporučuje od 300 do 600 mm.



Obrázek 7 Uspořádání při obrábění vodním paprskem [1]

2.3 Popis technologií vodních paprsků

Vodní paprsky rozdělujeme do třech základních typů podle možnosti zařízení, konstrukce a použití:

- Kontinuální paprsek je charakteristický stálou energií a tlakem. Využívá se pro dělení materiálu.
- Pulzující paprsek používá opakované a krátkodobé impulzy, vznikají tlakové špičky. Využívá se pro lámání hornin, vrtání a řezání.
- Kavitační paprsek je paprsek kontinuální s obsahem kavitačních bublinek.

V praxi mají největší význam paprsky kontinuální. Technologie se můžou lišit použitou řeznou kapalinou, druhem abraziva a také využívanými tlaky. [17]

2.3.1 Technologie WJM – Water Jet Machining

Technologie čistého vodního paprsku je nejstarší technologií využívající kontinuální paprsek. Jako řezná kapalina se využívá voda o vysokém tlaku zbavená nežádoucích příměsí. Díky použití čisté vody je tato metoda bezprašná a ekologická. [1]

Pracovní tlak vody je 300-400 MPa, pro řezání kovů až 690 MPa. Rychlost paprsku se pohybuje od 600 do 900 m·s⁻¹. Vzdálenost mezi tryskou a obrobkem je od 2,5 do 6,35 mm. Šířka proudu vody se pohybuje v rozmezí 0,1-1,5 mm. Spotřeba vody je rozdílná podle parametrů stroje ale pro průměr trysky 0,127 mm se přibližně udává 26 l/hod. [1]

Technologie čistého vodního paprsku se používá na řezání kovů, papírů, látek, kůží, keramiky a podobně. Díky čistotě řezu se využívá i v potravinářství. Dále využíváme pro vysokotlaké čištění materiálů, odstraňování koroze a starých nátěrů. [18]

2.3.2 Technologie AWJM – Abrasive Water Jet Machining

Technologie abrazivního vodního paprsku s přímým přívodem abraziva využívá znásobení erozivního účinku úběru materiálu díky přidání abrazivních částic. Abrazivní částice jsou vedeny ze zásobníku do směšovače, kde jsou strhávány vysokotlakým vodním proudem. Díky tomu je tato technologie efektivnější a účinnější. Jako abrazivo se nejvíce využívá přírodní granát, minerální nebo křemičitý písek a oxid hlinitý. [19]

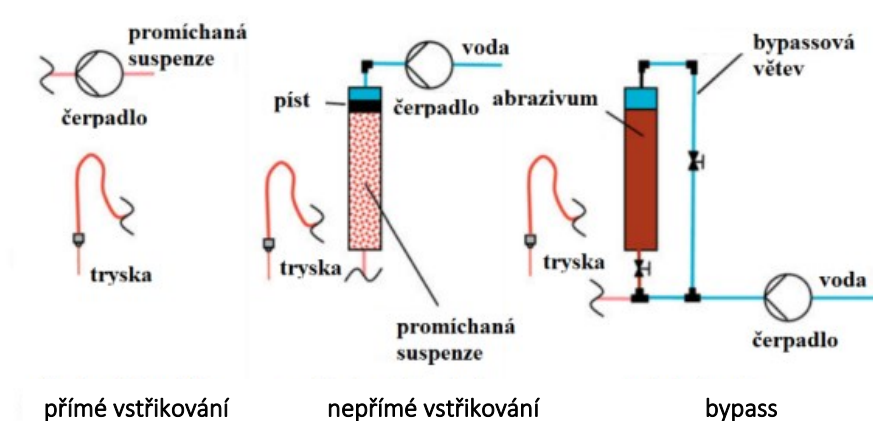
Používaný tlak vody je v rozmezí 60–400 MPa, průtok abraziva je zhruba 1–20 kg/min. Rychlost paprsku a vzdálenost mezi tryskou a obrobkem je stejná jako u metody WJM. Šířka proudu vody se udává v rozmezí 1,2–2,5 mm. [19]

Abrazivní vodní paprsek se využívá pro řezání velmi tvrdých a houževnatých materiálů. Využíváme pro obrábění kovů, nekovů, kompozitních materiálů, keramiky a slinutých karbidů až do tloušťky 250 mm. [19]

2.3.3 Technologie AWSJ – Abrasive Water Slurry Jet

Technologie abrazivního vodního paprsku využívá stlačenou suspenzi abraziva a vody k obrábění materiálu. Základní rozdíl mezi technologií AWJM a AWSJ je okamžik přidání abraziva. Abrazivní vodní suspenzní trysky (AWSJ) se vyznačují tím, že k smíchání abrazivního materiálu a vody dochází před tryskou. Během vývoje AWSJ existují tři různé typy příměsí vody a abraziva: [20,21]

- Při přímém vstřikování dochází k mísení suspenze při atmosférickém tlaku a odčerpání této suspenze přes trysku. Přestože je tato metoda jednoduchá, není příliš využívána z důvodu vysokého abrazivního opotřebení čerpadla.
- Při nepřímém vstřikování je přiváděna voda pod tlakem na píst, který pohání. Píst vytlačuje suspenzi z vysokotlaké nádoby a urychluje suspenzi v trysce. Kvůli vysokému opotřebení trysky, pístu a ventilů se tato metoda příliš nevyužívá.
- Třetí metoda využívá pro mísení kapaliny a abraziva obtoku (bypass). Část průtoku je vedena boční větví, kde dochází k mísení s abrazivem a následně dochází ke spojení s původním okruhem. Díky odtokové větvi je tato metoda méně citlivá na opotřebení. Lze také regulovat průtok abraziva v průběhu řezání.

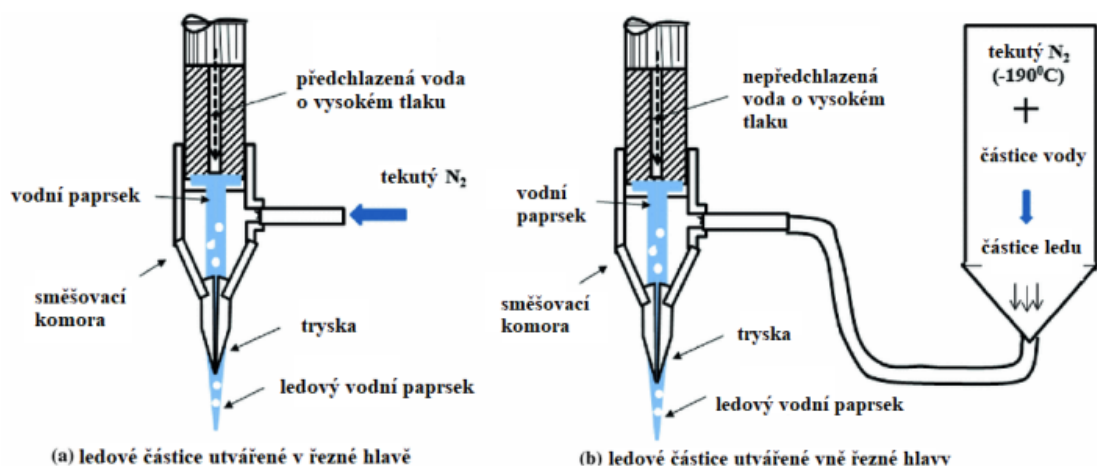


Obrázek 8 Metody tvorby paprsku AWSJ [21]

Dnešní komerční systémy dosahují pracovního tlaku až 200 MPa z původních 35 MPa. Současně se snížil průtok vody a abraziva, což umožňuje řezání s nižší spotřebou energie a abrazivního materiálu. Pro přesné řezání se udává průtok suspenze okolo 1-3 kg/min. Metoda AWSJ má vyšší účinnost než metoda AWJM a také umožňuje použít užší proud vody. [1,21]

2.3.4 Technologie IJM – Ice Jet Machining

Při obrábění pomocí ledového paprsku (IJM) se jako abrazivní částice používá ledová tříšť. Existují dvě metody obrábění. Při první metodě se ledové částice generují v proudě vody ve směšovací komoře, zatímco druhá metoda spočívá v samostatném generování ledových částic a následném vmíchání do proudu vody. Ledové zrna jsou nejčastěji z vody nebo CO₂. [20,22]



Obrázek 9 Tvorba vodního paprsku při metodě IJM [22]

Klíčovou vlastností ledu používaného jako brusivo je teplotní závislost na tvrdosti. Řízením teploty lze změnit tvrdost podle požadavků. Při teplotě -10 °C je Mohsova tvrdost 2. Při teplotě -80 °C je tvrdost podle Mohse 6. Při této technologii se částice ledu rozpouštějí a snadno vytékají z obrobenej součásti, což je vhodné pro potravinářský, lékařský, automobilový a kosmický průmysl, kde je potřeba eliminovat jakoukoli kontaminaci v průběhu obrábění. Aplikace pro tuto technologii je v oblasti čištění povrchu, odstraňování ořepů a povlaků, avšak není příliš rozšířena kvůli relativně vysokým nákladům za udržování nízké teploty v systému. [20,22,40]

2.4 Vlastnosti technologií vodního paprsku

Technologie vodního paprsku má široké uplatnění díky celé řadě výhod, které tato technologie obnáší. Avšak má i několik nevýhod, které její použití ztěžují nebo až znemožňují. [1]

2.4.1 Výhody technologie vodního paprsku

Technologie vodního paprsku nám umožňuje řezat a dělit téměř všechny konstrukční materiály. Vodní paprsek je charakteristický vysokou energetickou účinností a studeným řezem, který umožňuje řezat materiály s nízkým odvodem tepla jako jsou například plasty, sendvičové kompozity anebo materiály citlivé na oxidaci jako například titan, nikl, kobalt a jejich slitiny. Technologie je bezprašná, neuvolňuje žádné plyny ani látky z obrobků do ovzduší. Umožňuje recyklaci rezné kapaliny i abraziva. Můžeme začít řezat na jakémkoli místě bez nutnosti předvrtání otvorů i geometricky složitější tvary bez potřeby upnutí součástí. Dosahujeme dobré kvality řezu s minimální ztrátou materiálu prořezem a bez otřepů. Řezné hrany není nutno dále upravovat. [1,18]

2.4.2 Nevýhody technologie vodního paprsku

Mezi nevýhody technologie vodního paprsku můžeme řadit vznik koroze povrchu nebo hlučný provoz. U širších materiálů dochází vlivem výběhu paprsku z materiálu k deformaci. U nasákavých materiálů je nutné vysoušení. Tato technologie není vhodná pro hromadnou výrobu kvůli vysokým nárokům na údržbu. [1,18]

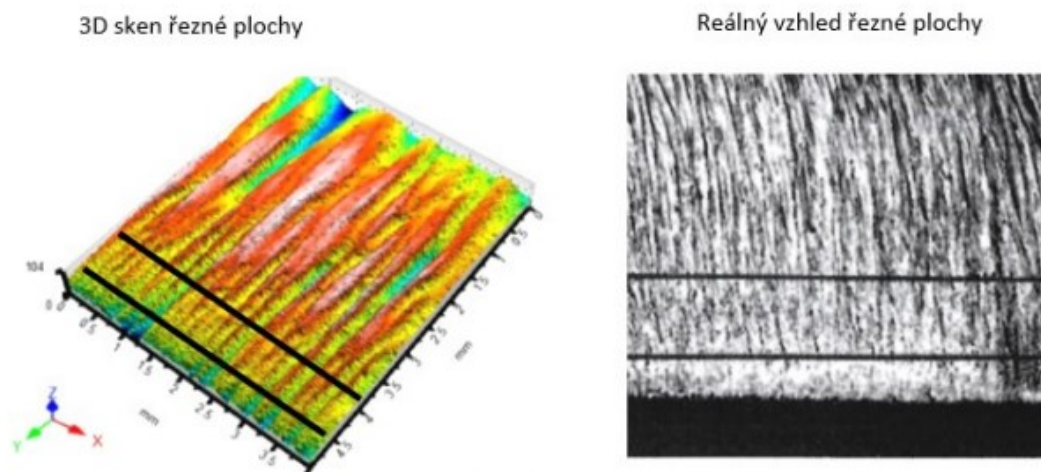
2.5 Kvalita řezu

Kvalita řezu je ovlivněna těmito parametry, které mají vliv i na úběr materiálu: [1,23]

- Průměr trysky
- Tlak vody
- Vzdálenost mezi tryskou a obrobkem
- Rychlost proudění
- Použité abrazivo
- Úhel sklonu vodního paprsku

2.5.1 Oblasti řezu

Teorie řezáním abrazivním vodním paprskem říká, že paprsek proniká do materiálu, ztrácí postupně svou kinetickou energii a vychyluje se. Tím vznikají dvě zóny, které mají odlišnou drsnost povrchu, horní hladká oblast a spodní rýhovaná oblast. Avšak při detailnějším průzkumu povrchu je možno nalézt oblasti primární, sekundární a terciální. Primární a sekundární oblast spadá do horní hladké zóny a oblast terciální do spodní rýhované zóny. [1,42]

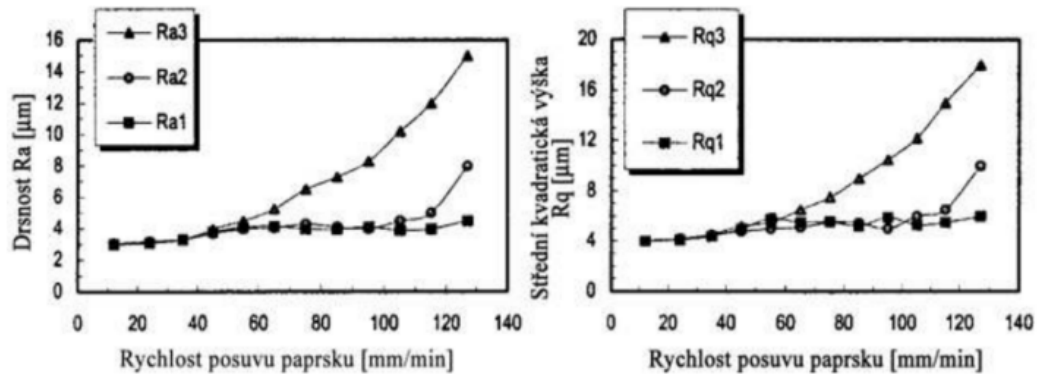


Obrázek 10 Zóny povrchu [42]

Hladká zóna se nachází v místě vstupu vodního paprsku do materiálu a pokračuje až do určité hloubky pod povrchem. Při působení vodního paprsku dochází v této zóně k řeznému opotřebení a paprsek se téměř nevychyluje. Hladkou zónu lze popsat jako homogenní oblast s náhodným profilem a mírně izotropní strukturou, to znamená ve všech místech vykazuje téměř stejné vlastnosti. Parametr drsnosti R_a a parametr střední kvadratické hodnoty drsnosti R_q jsou v hladké zóně téměř nezávislé na řezné rychlosti a hloubce řezu. [1,34]

V důsledku ohybu paprsku vzniká drsná rýhovaná zóna, která se nachází pod hladkou oblastí. Při úběru materiálu převažuje deformační opotřebení. Vodní paprsek kvůli tření s povrchem ztrácí svou kinetickou energii a ohýbá se (deflexe paprsku). Původně kolmý proud vody se opožďuje. Poloha místa, ve kterém paprsek vstupuje do materiálu, je odlišná od polohy, při které paprsek z řezu vychází. Tento jev se nazývá retardace paprsku, anglicky jet lag. Parametr drsnosti R_a a parametr střední kvadratické hodnoty drsnosti R_q jsou v drsné rýhované zóně závislé na řezné rychlosti a hloubce řezu. [1,34]

Vliv řezné rychlosti na parametr drsnosti Ra a parametr kvadratické odchylky Rq ukazuje Obrázek 11. S menší řeznou rychlostí, a tedy s nižší rychlostí posuvu se zvětšuje oblast hladké zóny a vyskytuje se i ve větších hloubkách obrobeneho povrchu. Pokud řezná rychlost dosahuje vyšších hodnot, kvalitativní parametry řezu se zhoršují. [1]



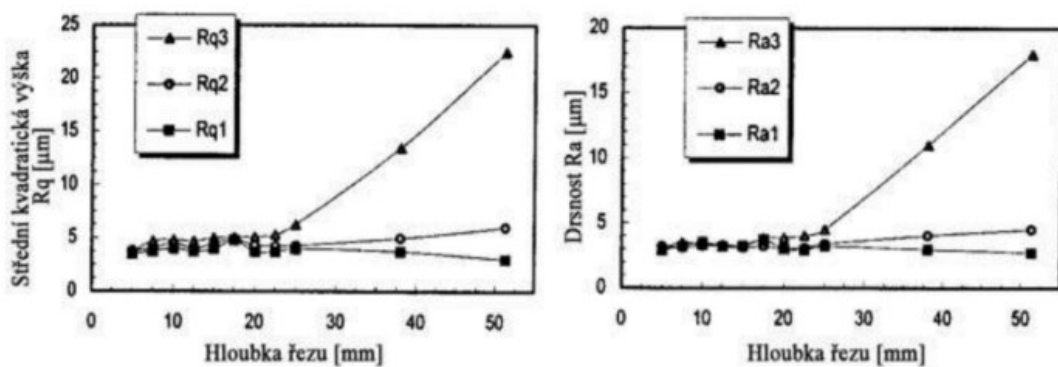
Ra₁ a Rq₁ – parametry charakterizující horní část řezu

Ra₂ a Rq₂ – parametry charakterizující střední část řezu

Ra₃ a Rq₃ – parametry charakterizující dolní část řezu

Obrázek 11 Závislost parametrů na rychlosti posuvu [1]

Obdobná závislost platí i mezi hloubkou řezu a parametrem drsnosti Ra a Rq. Při obrábění do malé hloubky nedochází ke kvalitativnímu zhoršení povrchu řezu. Se zvyšováním hloubky řezu dochází k rozšiřování oblasti rýhované zóny a drsnost povrchu lineárně roste. [1]



Ra₁ a Rq₁ – parametry charakterizující horní část řezu

Ra₂ a Rq₂ – parametry charakterizující střední část řezu

Ra₃ a Rq₃ – parametry charakterizující dolní část řezu

Obrázek 12 Závislost parametrů na hloubce řezu [1]

2.5.2 Hodnocení řezu

Pro obrábění pomocí technologie vodního paprsku nejsou dosud stanovené normy pro kontrolu a určení kvality povrchu. Existuje však několik metodik měření, technická schémata a konstrukce měřicí aparatury, jak v provozních podmínkách řídit kvalitu obráběných výrobků vodním paprskem. Žádná z těchto metodik nebyla standardizována ani přijata do běžné praxe. [23]

Nejznámějším způsobem je rozdělení do pěti kategorií Q1 až Q5, kde kategorie Q5 označuje řez nejlepší, kdežto kategorie Q1 označuje řez nejhorší kvality. Podle tohoto způsobu je obráběný povrch posuzován s etalonem, kde povrch etalonu spadá do jedné z kategorií Q1 až Q5. Kvalita součásti se hodnotí na základě tabulek měření celé série. V tabulce 1 můžeme vidět orientační hodnoty povrchu jednotlivých kategorií. Hodnoty jsou pouze orientační z toho důvodu, že se liší podle typu obráběného materiálu. [23]

Tabulka 1 Stupně kvality řezu [41]

Stupeň kvality	Základní charakteristika	Drsnost Ra [μm]	
		Kontura	
		Horní	Spodní
Q5	Nejlepší řez	Pod 3,2	Cca 3,2
Q4	Kvalitní řez	Cca 3,2	Cca 6,3
Q3	Střední řez	Cca 4,0	Do 12,5
Q2	Hrubý řez	Cca 4,0	Do 25
Q1	Dělicí řez	4,0-6,3	Do 40

2.6 Využití vodního paprsku

Technologie vodního paprsku je hojně používanou strojírenskou technologií, která našla uplatnění nejen v dělení nerostných surovin, ale také v celé řadě průmyslových odvětví. Vodní paprsek využíváme při řezání titanu, hliníku, skla, kompozitů, keramiky nebo betonu. Dále můžeme paprsek využít při soustružení, frézování, vrtání a řezání závitů především pro těžkoobrobitelné materiály. [1,3,40]

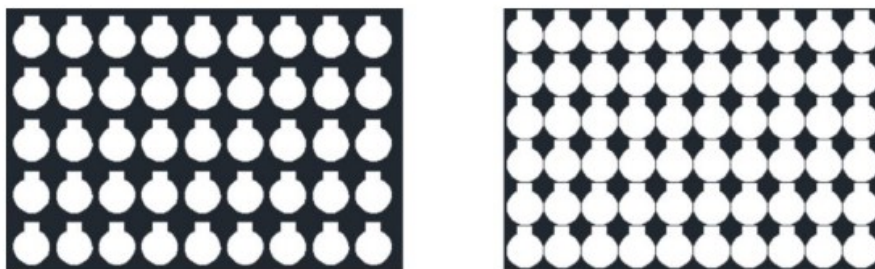
2.6.1 Oblasti využití vodního paprsku

Vodní paprsek našel využití téměř v každém průmyslovém odvětví: [1,3]

- Chemický průmysl – dělení výbušných látek.
- Elektrotechnický průmysl – dělení a řezání keramiky, skla, permanentních magnetů.
- Potravinářský průmysl – řezání ovoce a zeleniny, čokolády, sýrů.
- Strojírenský průmysl – řezání titanu, wolframu, kompozitů, výroba lopatek a komponentů do turbín.
- Gumárenský průmysl – řezání gumy, plastů, kevlaru.
- Stavební průmysl – řezání keramiky, dlaždic, polystyrénu, betonu.
- Sklářský průmysl – řezání, vrtání skla až do hloubky 200 mm.
- Jaderný průmysl – dekontaminace a odstraňování ochranných vrstev v zařízení pro jaderné elektrárny, čištění usazenin.

2.6.2 Řezání

Historicky první a základní využití vodního paprsku ve strojírenství bylo k řezání (dělení) materiálů. I v dnešní době se pro klasické dělení materiálů nejvíce využívá metod WJM a AWJM. U této metody získáme velmi přesný výrobek bez potřeby dodatečných úprav. Výsledná kvalita výrobku nezávisí na materiálu, ani na tvarové složitosti výrobku, nýbrž na procesních parametrech. V současné době můžeme řezat materiály jednovrstvé, dvouvrstvé a materiály se sendvičovou strukturou. Obrázek 13 ukazuje efektivnější využití materiálu při použití vodního paprsku v porovnání s konvenční metodou vystřihování. [24,40]



Obrázek 13 Využití polotovaru metodou vystřihování a metodou řezání [24]

2.6.3 Soustružení

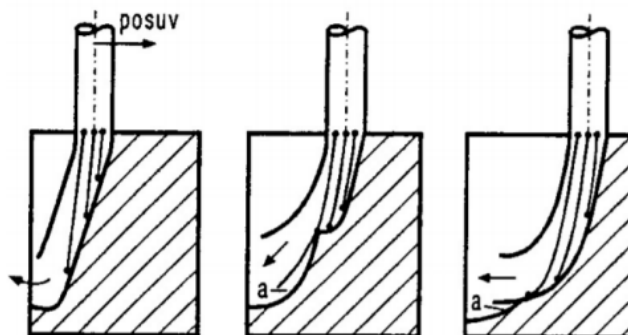
Vodní paprsek je v průmyslu běžně využíván i při soustružení. U obrábění klasických materiálů jako jsou oceli, není využití vodního paprsku při soustružení příliš hospodárné. Své využití najde technologie AWJM především při soustružení těžkoobrobitelných materiálů jako jsou slitiny titanu, keramické kompozity nebo lamináty. U obrábění slitin titanu je výběr klasických nástrojů velmi omezený, životnost a úběr materiálu je značně menší, než tomu je například u konstrukčních ocelí. Při použití vodního paprsku uvedené nedostatky zanikají. Výběrem vhodného abraziva a rezných podmínek je možné dosáhnout lepších výsledků oproti konvenčnímu soustružení u obrábění titanových slitin. Kvůli malým rezným silám je soustružení vodním paprskem méně náchylné na geometrické parametry obrobku, proto lze obrábět i dlouhé a tenké obrobky. [1,24,25]

U soustružení rotuje obrobek kolem své osy a abrazivní vodní paprsek se pohybuje ve směru osy. Úběr materiálu je zajištěn stejně jako u soustružení konvenční metodou radiálním posuvem vodního paprsku do požadované hloubky. Běžně se využívá jeden vodní paprsek, avšak je možné využít i speciální metodu, která využívá vodní paprsky dva. [1,40]

2.6.4 Frézování

Při frézování vodním paprskem nedochází k prořezání obrobku v celé jeho tloušťce, hloubka řezu je menší než celková tloušťka materiálu. Vodní paprsek opakovaně přebíhá po obráběné ploše a vytváří požadovaný tvar. Tato metoda je nejvíce používána u skla, ale také se využívá u tvarově složitých obrobků z kovových i nekovových materiálů. Technologie frézování vodním paprskem má velký potenciál při výrobě tvářecích nástrojů. [1,26]

Frézovací cyklus má tři fáze. V první fázi se začíná tvořit stopa řezu. Ve druhé fázi dochází ke stabilizaci stopy řezu a jsou viditelné jednotlivé stupně posuvu paprsku. Ve třetí fázi se vodní paprsek stále posouvá a dochází k vyrovnání stupňovitosti řezu. [1]



Obrázek 14 Fáze frézovacího cyklu [1]

2.6.5 Vrtání

Technologií vodního paprsku můžeme vrtat těžkoobrobitelné materiály jako je keramika, sklo nebo niklové slitiny. Vrtání niklových slitin se používá k výrobě plynových turbín. Vodní paprsek se používá pro různé metody vytváření otvorů ať už je to provrtávání, vyřezávání nebo frézování. Rozeznáváme několik způsobů vrtání otvorů, které jsou charakterizovány vzájemným pohybem paprsku a obrobku: [1]

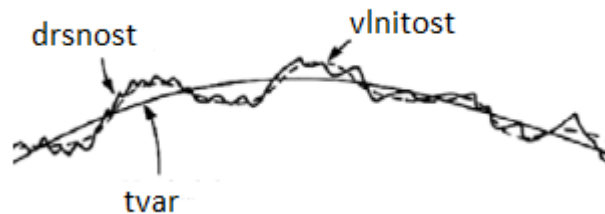
- Vrtání ustáleným proudem i obrobkem
- Vrtání rotujícím vodním paprskem
- Vrtání s vibrujícím vodním paprskem a stacionárním obrobkem

2.6.6 Gravírování

Při gravírování nedochází k prořezání celé tloušťky obrobku, stejně jako tomu je u frézování, ale pouze k odstranění povrchové vrstvy do požadované hloubky. Vodní paprsek do materiálu vytvaruje výsledný reliéf, který může být následně dobroušen. V oblasti gravírování začíná vodní paprsek konkurovat laserovému gravírování i konvenční metodě mechanického rytí, jelikož můžeme gravírovat prakticky všechny typy materiálů. Jediným omezením je případný vliv vlhkého prostředí na materiál. Na rozdíl od laseru lze gravírovat minerály, keramiku, ale i materiály hořlavé nebo tepelně citlivé. [26]

3 STRUKTURA POVRCHU

Drsnost povrchu je soubor nepravidelností, které vznikají při procesu výroby. Nerovnosti jsou způsobeny stopami po nástroji, mikrotrhlinami nebo nahromaděným materiálem na čele nástroje. [27]



Obrázek 15 Tvar drsnost a vlnitost [27]

Obrázek 15 popisuje základní parametry profilu, tvar, drsnost a vlnitost. Profil nerovností se rozkládá na složky jednotlivých parametrů geometrické nepřesnosti. Tvar a vlnitost se označuje jako makrogeometrie, drsnost povrchu jako mikrogeometrie. [27]

3.1 Struktura povrchu dle norem

3.1.1 ČSN EN ISO 21920-2

Geometrické specifikace produktu (GPS) – struktura povrchu: Profil – Část 2: termíny, definice a parametry struktury povrchu.

„Tato mezinárodní norma stanoví termíny, definice a parametry pro určování struktury povrchu (drsnosti, vlnitosti a základního profilu) profilovou metodou.“

Základní parametry:

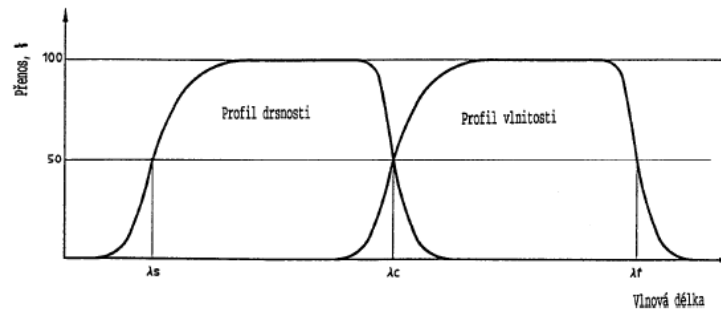
- Filtr profilu

„Filtr rozdělující profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky (ISO 11562).“

„ λ_s filtr profilu – Filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu.“

„ λ_c filtr profilu – Filtr definující rozhraní mezi složkami drsnosti a složkami vlnitosti.“

„ λ_f filtr profilu – Filtr definující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu.“



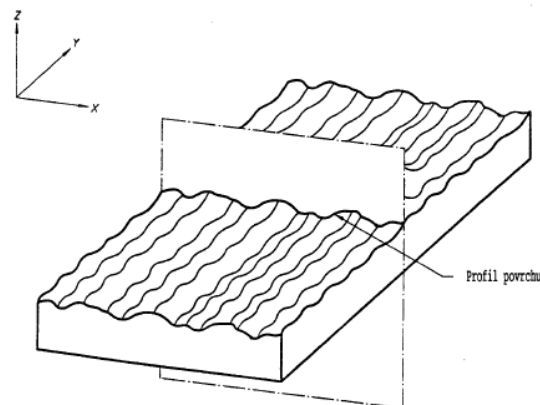
Obrázek 16 Charakteristika drsnosti a vlnitosti [28]

- **Skutečný povrch**

„Povrch omezující těleso a oddělující ho od okolního prostředí.“

- **Profil povrchu**

„Profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny.“



Obrázek 17 Profil povrchu [28]

- **Profil drsnosti**

„Profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím λ_c filtru. Profil je úmyslně pozměněn.“

- **Profil vlnitosti**

„Profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu λ_f a filtru profilu λ_c na základní profil, potlačující dlouhovlnné složky filtrem profilu λ_f a krátkovlnné složky filtrem profilu λ_c . Profil je záměrně pozměněn.“

- **Názvy geometrických parametrů**

„**P-parametr** – Parametr vypočítaný ze základního profilu.“

„**W-parametr** – Parametr vypočítaný z profilu vlnitosti.“

„**R-parametr** – Parametr vypočítaný z profilu drsnosti.“

„**Výstupek profilu (profile peak)** – Z povrchu ven směřující část posuzovaného profilu.“

„**Prohlubeň profilu (profile valley)** – Dovnitř směřující část posuzovaného profilu.“

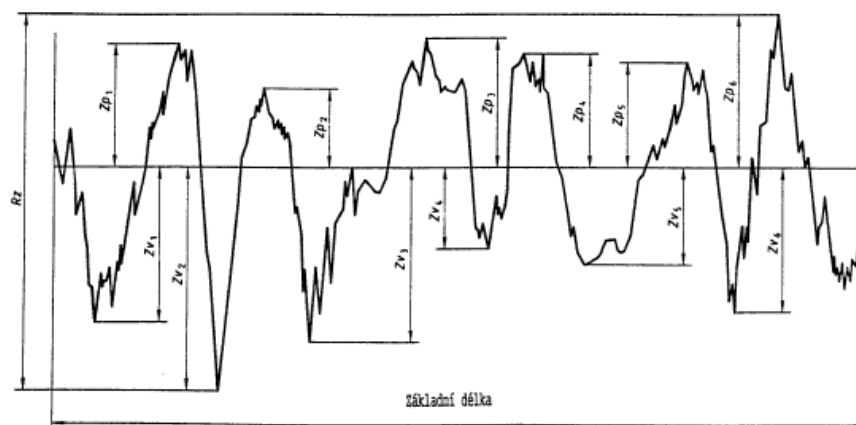
„**Prvek profilu (profil element)** – Výstupek profilu a přilehlá prohlubeň.“

- **Výškové parametry (výstupky a prohlubně)**

„**Největší výška výstupku profilu R_p** – Výška Z_p nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky.“

„**Největší hloubka prohlubně profilu R_v** – Hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky.“

„**Největší výška profilu R_z** – Součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky.“



Obrázek 18 Největší výška profilu R_z [28]

- **Výškové parametry (průměrné hodnoty pořadnic)**

„**Průměrná výška prvků profilu R_c** – Průměrná hodnota výšek Z_t prvků profilu v rozsahu základní délky.“

$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{ti} \quad (1)$$

„**Celková výška profilu R_t** – Součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky.“

„**Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného povrchu R_a** – Aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.“

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (2)$$

„**Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu R_q** – Kvadratický průměr pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.“

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |Z^2(x)| dx} \quad (3)$$

„**Šikmost posuzovaného profilu R_{sk}** – Podíl průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty R_q v rozsahu základní délky.“

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left[\frac{1}{l^3} \int_0^l |Z^3(x)| dx \right] \quad (4)$$

„**Špičatost posuzovaného profilu R_{ku}** – Podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty R_q v rozsahu základní délky.“

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \left[\frac{1}{l^4} \int_0^l |Z^4(x)| dx \right] \quad (5)$$

- **Délkové parametry**

„**Průměrná šířka prvků profilu RS_m** – Aritmetický průměr šířek X_s prvků profilu v rozsahu základní délky.“

$$RS_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{s_i} \quad (6)$$

3.1.2 ČSN EN ISO 25178-2

„Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 2: termíny, definice a parametry textury povrchu.“

„Tato mezinárodní norma stanoví pravidla pro porovnávání měřených hodnot s tolerančními mezemi stanovenými pro parametry struktury povrchu.“

Základní parametry:

- Výškové parametry

„Aritmetický průměr výšky S_a – Parametr aritmetického průměru výšky je průměrem absolutních hodnot souřadnic plochy omezené měřítkem.“

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (7)$$

Střední kvadratická výška S_q

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A |z^2(x, y)| dx dy} \quad (8)$$

Šikmost S_{sk}

$$S_{sk} = \frac{1}{AS_q^3} \iint_A z^3(x, y) dx dy \quad (9)$$

Špičatost S_{ku}

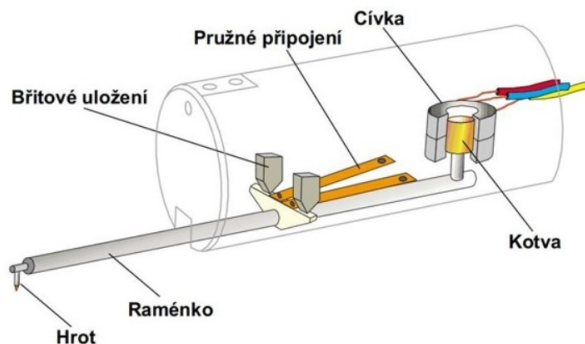
$$S_{ku} = \frac{1}{AS_q^4} \iint_A z^4(x, y) dx dy \quad (10)$$

3.2 Metody měření

Rozeznáváme dvě základní metody měření povrchů. Drsnost povrchu můžeme měřit kontaktně a bezkontaktně (opticky). Každá z metod má své výhody a nevýhody pro různé použití. [29]

3.2.1 Dotykový způsob měření

Při dotykovém způsobu měření drsnosti využíváme přístroj vybavený speciálním hrotem. Ten je veden konstantní rychlostí po povrchu měřeného materiálu. Pohyb hrotu je snímán pomocí snímače, který naměřené souřadnice převádí pomocí softwaru na určité parametry drsnosti. [29]



Obrázek 19 Schéma přístroje pro dotykové měření povrchu [30]

Dotykové metody mají ve strojírenském prostředí tu výhodu, že mají větší toleranci vůči znečištění. Snímací hrot je schopný odsunout nečistoty, prach a nevadí mu ani olejová vrstva, takže výsledky zůstávají nezkriveny. Tento způsob měření nejčastěji využíváme v kontrolních procesech, kde je důležitější rychlost procesu než absolutní přesnost měření. Snímací hrot je náchylný k rozšiřování výstupků a zmenšování šířky prohlubní, což ovlivňuje data. Ovlivněná data z měření lze korigovat softwarem. [29,30]

Existuje mnoho povrchů, které nejde vůbec měřit dotykovou metodou. Například nové konstrukční materiály nebo moderní tzv. technické povrchy, jako jsou například sestavy mikro rozměrných čoček nebo součástky paměťových zařízení. Použití snímacího hrotu také není možné u velkých rozměrových rozdílů profilu. [29,30]

3.2.2 Bezdotykový (optický) způsob měření

Při měření bezdotykovým způsobem se využívá optických přístrojů vybavených CLA (Chromatic Length Aberration) nebo laserovými snímači. Rozlišitelnost snímačů CLA je v

μm , u laserových snímačů je to o řád níž. Princip CLA snímače je založen na rozkladu světla a jeho nasměrování na povrch. Světlo se rozloží na jednotlivé vlnové délky pomocí optiky a v každém bodě povrchu je zaostřena jen jedna z nich. Do přístroje se propouští jen zaostřené vlnové délky, které jsou dále přeměřovány na senzor. Senzor přiřadí každému bodu prostorovou polohu. Data jsou zpracována softwarem a dále vyhodnocena. [29,30]

Měření vyžaduje naprosto čistý povrch bez nečistot. Problémem bezdotykových měřících přístrojů je, že dochází k problému ztráty dat. Ke ztrátě dat dochází na hranách nebo v místech náhlých a rychlých změn tvaru profilu povrchu. Také záleží na odrazivosti kontrolovaného povrchu, kdy se světelný paprsek neodráží zpět do detektoru a data nejsou správně zaznamenána. Ztráty dat lze do určité míry korigovat softwarem, který tato data vyloučí, zpravidla s interpolací okolních dat. [29,30]

3.3 Statistické vyhodnocení dat

Základem statistiky je sběr, zpracování a vyhodnocování dat. V technické praxi nemáme možnost vyšetřit všechny údaje k analýze problému z důvodů časových, finančních nebo praktických. U destruktivních zkoušek jednoduše nemůžeme zničit všechny výrobky. Často se výzkumy opírají o relativně malou část (výběr) z relativních dat (základní soubor). Ve statistice se používají postupy, pomocí kterých můžeme posuzovat chování populace. [31,32]

3.3.1 Vypočítané hodnoty

Bodový odhad aritmetického průměru představuje skutečný střed základního souboru.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (11)$$

Dolní kvartil rozděluje soubor tak, že 25 % hodnot je menších a 75 % hodnot je větších nebo rovno.

Medián rozděluje soubor na dvě stejně velké části. Kde 50 % hodnot je menších a 50 % hodnot je větších. Výhoda mediánu je, že není zatížen extrémními hodnotami.

Horní kvartil rozděluje soubor tak, že 75 % hodnot je menších a 25 % hodnot je větších nebo rovno.

Rozptyl charakterizuje proměnlivost hodnot náhodné veličiny kolem střední hodnoty.

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (12)$$

Směrodatná odchylka je definována jako odmocnina z rozptylu. V podstatě se jedná o průměrnou odchylku od průměru.

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (13)$$

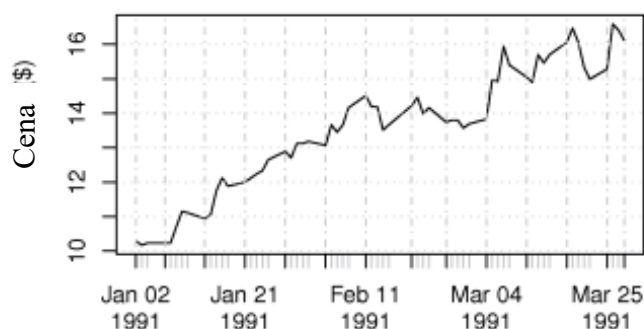
Variační koeficient udává, kolik procent průměru představuje směrodatná odchylka. Variační koeficient se využívá pro vzájemné srovnání variability dvou a více souborů hodnot, které se mezi sebou v řádech podstatně liší. [31,32,34]

$$V = \frac{s \times 100}{\bar{x}} [\%] \quad (14)$$

3.3.2 Metodika EDA

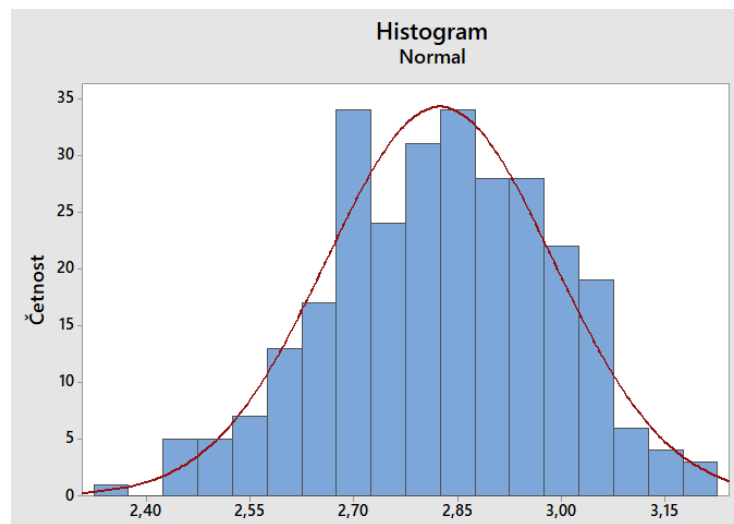
Metodika EDA vychází z anglického názvu Exploratory data analysis, česky průzkumná datová analýza. Člověk si může zvolit libovolný postup analýzy dat, přičemž primárním cílem je podívat se na data a přemýšlet o nich z mnoha úhlů pohledu. Nejčastější metodou této analýzy je graf časové řady, histogram nebo box-plotový diagram. [35]

Graf časové řady ukazuje jednu proměnou v závislosti na čase. Na vodorovné ose je zobrazen čas a na svislé ose je zobrazena proměnná. Využívá se zejména pro dlouhé sekvence dat. U těchto grafů si převážně všímáme sinusoid, velkých píků a propadlin, odlehlých dat a případně šumu dat. [36]



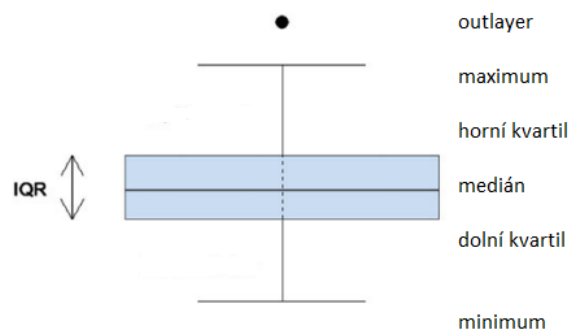
Obrázek 20 Graf časové řady [36]

Histogram patří k nejužitečnějším technikám EDA a umožňuje získat přehled o datech včetně centrální tendence, rozložení, rozptylu a odlehlých hodnot. Histogramy jsou sloupcové grafy, kde každý sloupec představuje četnost nebo podíl případů pro určitý rozsah hodnot. Rozsah údajů pro každý sloupec se nazývá bin. Histogramy poskytují okamžitou představu o tvaru rozdělení dat (symetrické, zkreslené, odlehlé hodnoty). Histogramy umožňují ověřit, že operace s daty proběhla úspěšně a nedošlo k žádné chybě. Například u logaritmické transformace je zajímavé vykreslit histogram před operací a po ní. [37]



Obrázek 21 Histogram

Box-plotové diagramy neboli krabicové grafy jsou zajímavé pro zobrazení informací o centrální tendenci, symetrii, zkreslení, ale mohou skrývat některé aspekty dat jako je například multimodalita. Boxploty se opírají o robustní statistiky jako je medián a mezikvartilové rozpětí (IQR). [37]



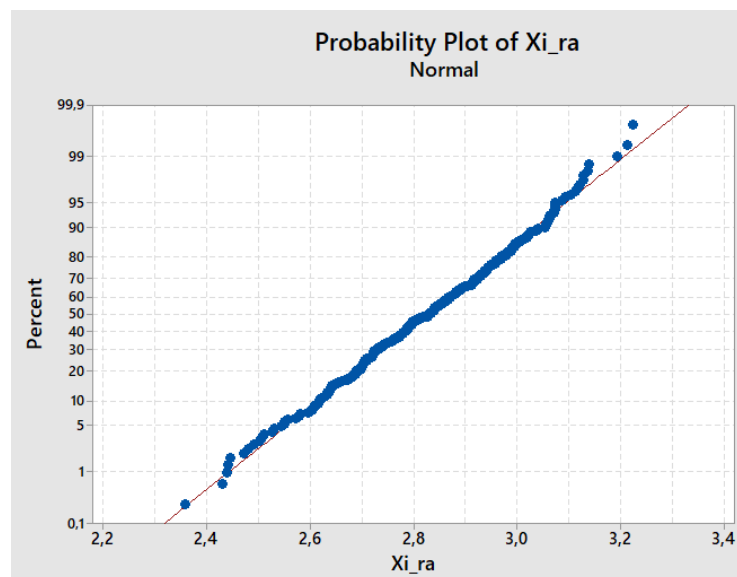
Obrázek 22 Boxplotový diagram [37]

Pravděpodobnostní grafy jsou grafickým testem pro posouzení, zda se data řídí určitým rozdělením. Nejčastěji se používají k testování normality souboru dat. Tyto grafy se také používají ke zkoumání reziduí v modelech, které se opírají o předpoklad normality reziduí jako například ANOVA nebo regresní analýza. [37]

3.3.3 Testování normality

Aby bylo možné data dále hodnotit je potřeba otestovat, zda mají normální rozdělení či nikoli. Data nejjednodušeji otestujeme sestavením histogramu. Hodnoty sledované veličiny jsou nanášeny na vodorovnou osu x a na svislou osu y nanášíme četnost. Pokud má soubor dat normální rozdělení, měl by histogram připomínat Gaussovu křivku. [33,38]

Q-Q graf znamená graf kvantil – kvantil. V softwaru minitab se na ose x zobrazují naměřené hodnoty sledované veličiny, osa y zobrazuje pozorovaný kvantil. Čím blíže jsou body přímce, tím více odpovídají normálnímu rozdělení. [33]



Obrázek 23 Q-Q graf

Centrální limitní teorém slouží k ověření podmínky normality a říká, že když provedeme mnoho náhodných výběrů, tak se jejich rozdělení výběrových parametrů průměru bude blížit normálnímu rozdělení a celkový průměr z těchto průměrů se bude podobat skutečnému průměru v populaci. Nezávisle na tom, jak jsou hodnoty v populaci rozloženy. Rozdělení střední hodnoty výběrového souboru bude vždy normální, ať je rozložení základního souboru jakékoli. [38]

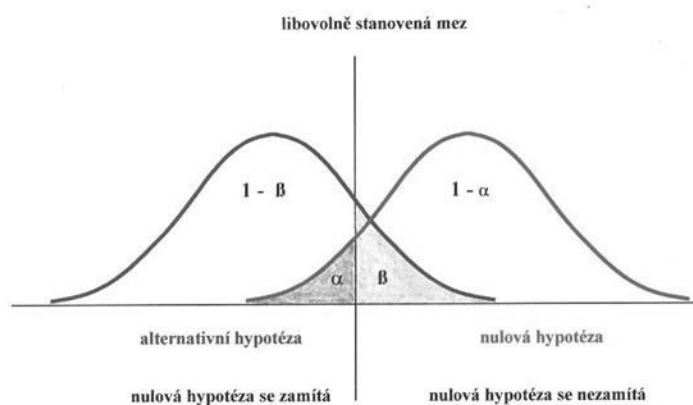
3.3.4 Testy odlehlých hodnot

Odlehlá hodnota neboli outlier je bod vzdálený od jiných pozorování. Odlehlá hodnota se vyskytuje náhodně v jakékoli distribuci dat. Může se jednat o chybu měření nebo o hodnotu odlehlou. Testy odlehlých hodnot se používají pro odhalení a následné posouzení, zda je tato hodnota chybou hrubou a je nutno ji vyloučit nebo se jedná pouze o outlier a v souboru zůstává. Pro data s normálním rozdělením se používá Grubbsův test, kdežto pro data s jiným než normálním rozdělením Dixonův Q test. [38]

3.3.5 Teorie hypotéz

Teorie hypotéz funguje na principu předložení nulové hypotézy, která platí, dokud není vyvrácena hypotézou alternativní. Nulovou hypotézu H_0 nazýváme předpoklad sledované náhodné veličiny, o které má test rozhodnout, zda se zamítne nebo nezamítne. Při zamítnutí H_0 platí hypotéza alternativní H_a . Platnost statistické hypotézy se nedá prokázat, pouze lze rozhodnout, jestli danou hypotézu zamítneme a dopustíme se nejvýše chyby hladiny významnosti α , nebo hypotézu nezamítneme. [31,32,33]

Při testování hypotéz mohou vzniknout dvě chyby. Pokud zamítneme nulovou hypotézu i přes její správnost, dopouštíme se chyby prvního druhu. Naopak pokud nezamítneme nulovou hypotézu, která neplatí, dopouštíme se chyby druhého druhu. Minimalizovat chybu prvního a druhého druhu zároveň není možné. Při zmenšování chyby prvního druhu dochází ke zvětšování chyby druhého druhu a naopak. Z tohoto důvodu je zde požadavek, aby pravděpodobnost chyby prvního druhu byl maximálně roven hladině významnosti ($\alpha \leq 0,1$). Hladina významnosti nám udává maximální pravděpodobnost chyby prvního druhu. Nejčastěji se volí $\alpha = 0,05$ nebo $\alpha = 0,01$. Pravděpodobnost chyby druhého druhu se označuje



Obrázek 24 Vztah mezi chybou 1. a 2. druhu [32]

jako β . Spolehlivost testu označuje číslo $1-\alpha$, síla testu se označuje jako číslo $1-\beta$. Všechny možné výsledky testování jsou uvedeny v Tabulka 2. [31,32,33]

Tabulka 2 Přehled možných výsledků testů [32]

		Výsledek testu	
		Platí H_0	Platí H_a
Skutečnost	Platí H_0	Správné rozhodnutí, pravděpodobnost $1-\alpha$ (spolehlivost testu)	Chyba I. druhu, pravděpodobnost α (hladina významnosti)
	Platí H_a	Chyba II. druhu, pravděpodobnost β	Správné rozhodnutí, pravděpodobnost $1-\beta$ (síla testu)

3.3.6 Lineární regrese

Regresní analýza je statistická metoda, která se využívá v situacích, kdy zkoumáme závislost jedné proměnné na jedné nebo více proměnných. Regresní analýza je nástroj, který pomáhá sestavit vhodný model. Podle počtu proměnných rozlišujeme jednoduchou regresi a regresi mnohonásobnou. Hodnoty naměřené, nebo předem určené nazýváme nezávisle proměnná a hodnoty náhodné nazýváme závislou proměnnou. Nejčastěji se v regresi zkoumá regresní přímka. Při lineární regresi se předpokládá, že existuje vztah mezi dvěma proměnnými. Důležitým krokem je stanovení, která proměnná je nezávisle proměnná a která je závisle proměnná. Prohození těchto proměnných vede ke zkresleným výsledkům. Lineární vztah je definován pomocí přímky:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + e \quad (15)$$

Kvadratická regrese spadá do polynommické regrese, kdy je stupeň polynomu roven dvěma. Soubor hodnot je proložen kvadratickou funkcí (parabolou).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + e \quad (16)$$

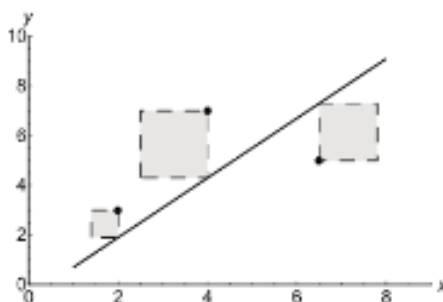
U **kubické regrese** se jedná o třetí stupeň polynomu.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + e \quad (17)$$

Kde y je nezávisle proměnná, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ jsou regresní koeficienty, x je nezávisle proměnná a e je náhodná chyba. Důležitou věcí je, aby výsledná regrese nejlépe popisovala zkoumaný soubor dat. Je tedy potřeba správně zvolit koeficienty β . [39]

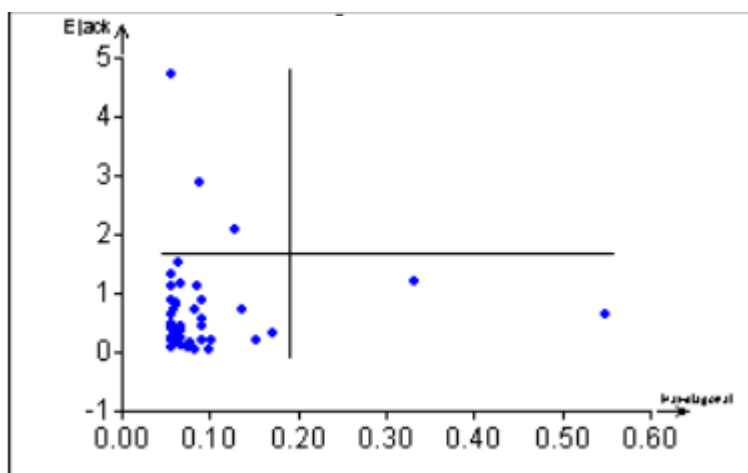
Významnost proměnných popisuje „p“ hodnota. Pokud je „p“ hodnota vyšší než 0,05 pak je proměnná nevýznamná a nemá žádný vliv na závislou proměnnou. „p“ hodnota neukazuje sílu vlivu, ale pouze významnost, či nevýznamnost nezávislé proměnné. [44]

Metoda nejmenších čtverců je nejpoužívanější postup pro odhad parametrů regresního modelu. Data se prokládají tak, aby součet druhých mocnin odchylek od hodnot predikovaných byl co nejmenší. [39]



Obrázek 25 Metoda nejmenších čtverců [39]

Williamsův graf slouží k nalezení vlivných bodů. Je schopen indikovat odlehlé hodnoty a extrémny. Body, které se nachází v pravé části od svislé přímky jsou extrémny a v souboru hodnot je nevyklučujeme. Body nad vodorovnou přímkou jsou odlehlé hodnoty. [33, 43]



Obrázek 26 Williamsův graf [43]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

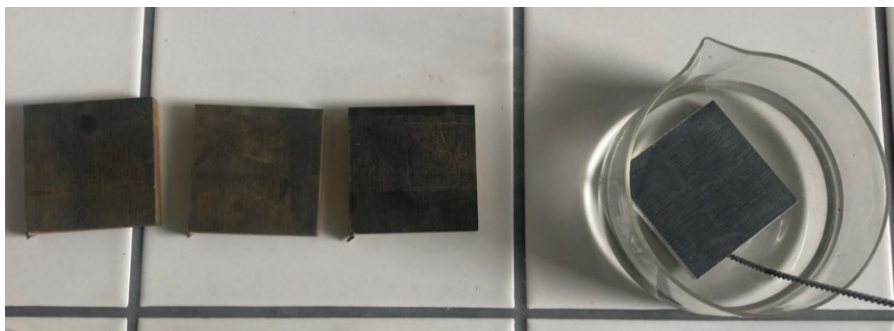
4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je navrhnout a ověřit statistické metody pro hodnocení jakosti řezu získaného pomocí technologie vodního paprsku s abrazivem pro parametry Ra, Rz, Rc a RSm. V technické praxi je obvyklé, že povrch vykazuje homogenitu, ale při změně parametrů přechází na heterogenní povrch. Cílem je vyšetření postupu hodnocení povrchu a navržení, jak hodnotit povrch homogenní a heterogenní. Dále zjistit, zda se ve výsledných hodnotách nevyskytuje jakýsi trend, který by mohl být dále zkoumán.

5 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Ke statistickému hodnocení jakosti řezu bylo potřeba získat dostatečné množství dat. K získání dat bylo použito dvaceti vzorků rozdělených do čtyř skupin po pěti kusech podle použité rychlosti řezu. Vzorky čtvercového výřezu o délce strany 50 mm a tloušťce 8 mm byly zhotoveny použitím abrazivního vodního paprsku. Materiál zkušebních vzorků byl dle ISO EN 1.0060, dle ČSN 11 600. Aby se zkušební vzorky nepropadly roštem stroje, nebyly „dořezány“ po celém svém obvodu a bylo potřeba je po vyřezání vyklepnout. Pracovní tlak vody byl nastaven na 4000 MPa u všech vzorků. Rychlost na ústí trysky byla 2 Mach, což odpovídá zhruba 680 m/s. Rychlost řezu byla u první sady vzorků 320 mm/min (100 %). U dalších sad byla rychlost snížena procentuálně o 15 % rychlosti řezu. U druhé sady vzorků byla rychlost řezu 272 mm/min (85 %), u třetí 224 mm/min (70 %) a u poslední sady 176 mm/min (55 %). Různé řezné podmínky zajišťují rozdílné jakosti povrchu. Lze předpokládat, že se snižující se řeznou rychlostí roste kvalita obráběného povrchu.

Po obrábění vodním paprskem vznikla na povrchu vzorků koroze, proto byly všechny vzorky před měřením ponořeny do odrezovacího roztoku značky BALtech po dobu 5 minut. Po vytažení z odrezovacího roztoku byly vzorky očištěny od zbývající koroze jemným kartáčem, aby nedošlo k znehodnocení řezu. Následně byly vzorky vysušeny, naimpregnovány a popsány, aby nedošlo k jejich záměně.



Obrázek 27 Odrezování vzorků

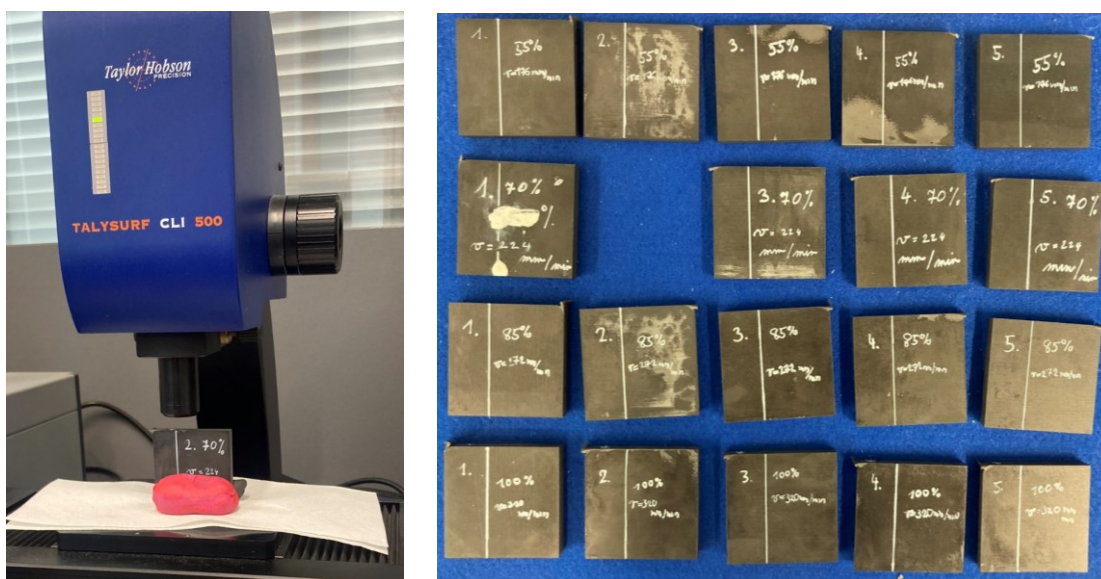
6 POSTUP MĚŘENÍ

6.1 Talysurf CLI 500

Pro získání kvalitních dat pro hodnocení jakosti povrchu byl zvolen měřicí přístroj Talysurf CLI 500 od výrobce Taylor Hobson. Jedná se o 3D bezkontaktní drsnoměr vybavený systémem CLI, který umožňuje měření struktury povrchu ve třech osách. Talysurf CLI 500 je nejmenší verzi tohoto přístroje. Přístroj spojuje 2D a 3D měření do jednoho zařízení. Tento přístroj je vhodný pro měření součástek menších rozměrů. Celkové rozměry stroje jsou 500 x 310 x 450 mm. Maximální velikost vzorku, který lze upnout je 50 x 50 x 50 mm a maximální nosnost přístroje je uvedena 10 kg. Lze dosáhnout osového rozlišení až 0,5 μm .

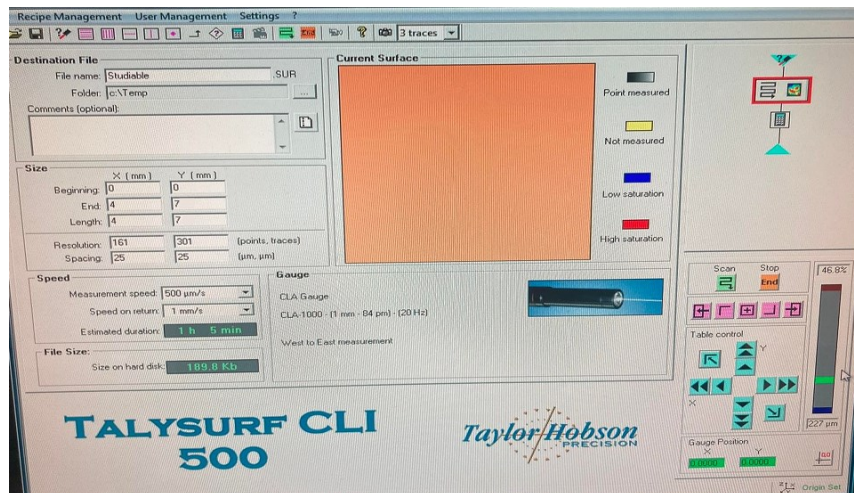
6.2 Příprava a parametry měření

Zkušební vzorky je potřeba postavit na pracovní desku přístroje, aby bylo možné nasnímat plochu řezu. Zkušební vzorky byly uloženy na podložce, v našem případě podloženy kusem papíru, aby nedošlo k poškození zařízení. Kvůli případné ztrátě stability byly vzorky uchyceny pomocí modelovací hmoty. Po upnutí vzorku byl spuštěn přístroj a software Talymap GOLD. Před začátkem měření je nutno přístroj zkalibrovat kvůli případným chybám. Po kalibraci následuje nastavení odrazivosti, ta by neměla přesáhnout hranici 70 % a také by neměla být nižší než 40 %.



Obrázek 28 Obrázek měření a měřené vzorky

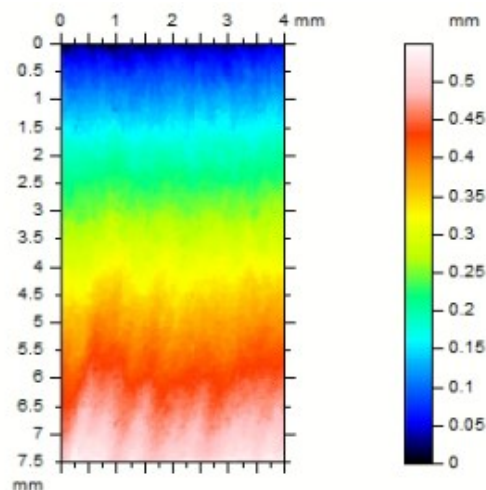
Jakmile je přístroj připraven, můžeme nastavit parametry měření. Aby byly dodrženy podmínky opakovatelnosti a reprodukovatelnosti bylo potřeba dodržet stejné parametry měření. Velikost měřené plochy byla zvolena 4 x 7 mm a měření probíhalo ve směru, který byl podélný s osou x. Vzdálenost měřených bodů byla stanovena na 25 μm . Po nastavení rychlosti měření a rychlosti návratu snímače software Talymap GOLD vypočítá dobu trvání měření, která byla v tomto případě hodinu a pět minut. Tímto způsobem byl změřen každý vzorek.



Obrázek 29 Parametry měření

6.3 Úprava naměřených dat

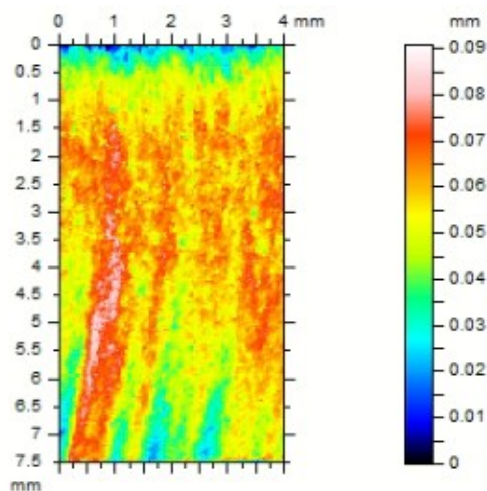
Data získaná z měření byla zaznamenána do softwaru Talymap GOLD. Nasnímaná data je potřeba upravit v několika důležitých krocích tak, aby bylo možné je dále statisticky vyhodnotit. Po doměření součásti se nám v softwaru objeví neupravený scan nasnímaného povrchu, který ukazuje Obrázek 30.



Obrázek 30 Hrubě nasnímaná data

6.3.1 Vyrovnání povrchu

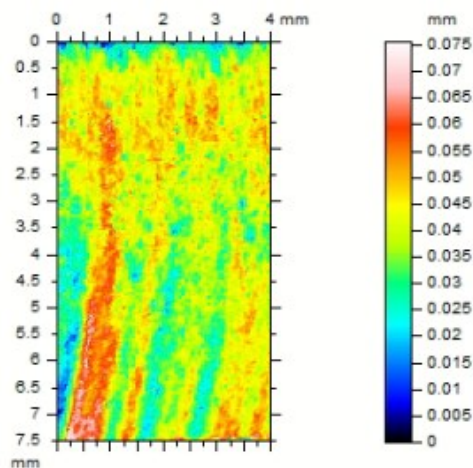
Prvním krokem, který provádíme při úpravě dat je takzvaně vyrovnání povrchu, protože není zajištěna rovina při měření. Vyrovnání povrchu nalezneme v záložce „Operators“ kde vybereme funkci „Leveling...“. Tato funkce otevře dialogové okno, kde vybereme metodu „Least Square Plane“, která funguje pomocí metody nejmenších čtverců. Dále vybereme metodu „by Subtraction“, protože je rychlá a přesná, pokud je vzorek skloněný o malý úhel. Potvrzením dialogového okna získáme scan s vyrovnaným povrchem.



Obrázek 31 Vyrovnaná data (Leveling)

6.3.2 Odstranění tvaru

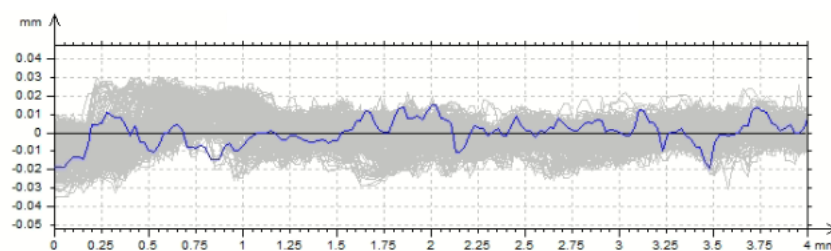
Po vyrovnání povrchu je možné zobrazit reálný povrch i s válcovým zakřivením. Toto zakřivení (tvar povrchu) je nežádoucí, a proto jej odstraníme. Odstranění tvaru najdeme v záložce „Operators“ kde volíme funkci „Form removal...“. Na nově vzniklém scanu zůstávají jen složky drsnosti a vlnitosti.



Obrázek 32 Odstranění tvaru

6.3.3 Export dat

Závěrečným krokem je získání potřebných hodnot zkoumaného profilu. V záložce „Operators“ volíme funkci „convert into a series of profiles“. Tato funkce nám umožňuje rozřezat nascanovaný povrch. Dialogové okno nám ukazuje, že nasnímaný povrch má 281 profilů. Z první nabídky volíme směr rozřezání profilů. Volíme „extract west – east profiles“, což nám rozdělí povrch ve směru osy y ve směru východ – západ. Dále volíme „extract all available profiles“, kde tato volba vybere všech 281 profilů. Výsledkem je graf znázorňující rozřezání povrchu ve vybraném směru.



Obrázek 33 Graf rozřezání profilů

Pomocí funkce „Parameters Table“, kterou najdeme v záložce „Studies“, si necháme zobrazit tabulku s parametry nasnímaného povrchu. Tabulku můžeme dále upravovat, aby zobrazovala pouze námi chtěné parametry povrchu.

Parametry povrchu vybrané k dalšímu zpracování:

- R_a – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [μm]
- R_z – největší výška profilu [μm]
- R_c – průměrná výška prvků profilu [μm]
- R_{Sm} – průměrná šířka prvků profilu [μm]

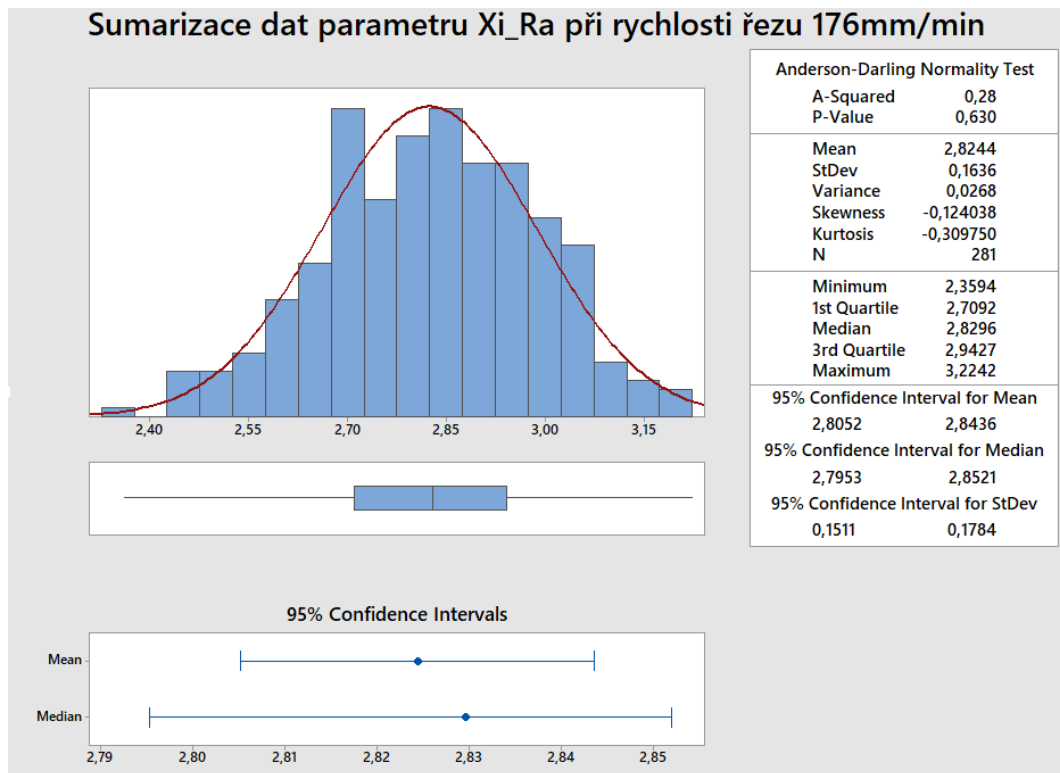
Výsledkem upravených dat dle předchozích kroků byla tabulka zvolených parametrů, která obsahovala 281 hodnot popisující profil u každé veličiny. Tabulka byla sestavena u všech dvaceti vzorků rozdělených do čtyř kategorií podle řezné rychlosti. Značnou komplikací bylo, že software Talymap GOLD nedovoluje uložit výsledky v jakémkoli statistickém programu třetích stran. Veškerá data bylo nutné zkopírovat do poznámkového bloku a přenést na jiný počítač, aniž by došlo k chybě či záměně hodnot při kopírování. Také bylo třeba nahradit desetinou čárku za tečku, jelikož vybrané statistické programy jsou optimalizovány na metrický systém.

7 VYHODNOCENÍ DAT

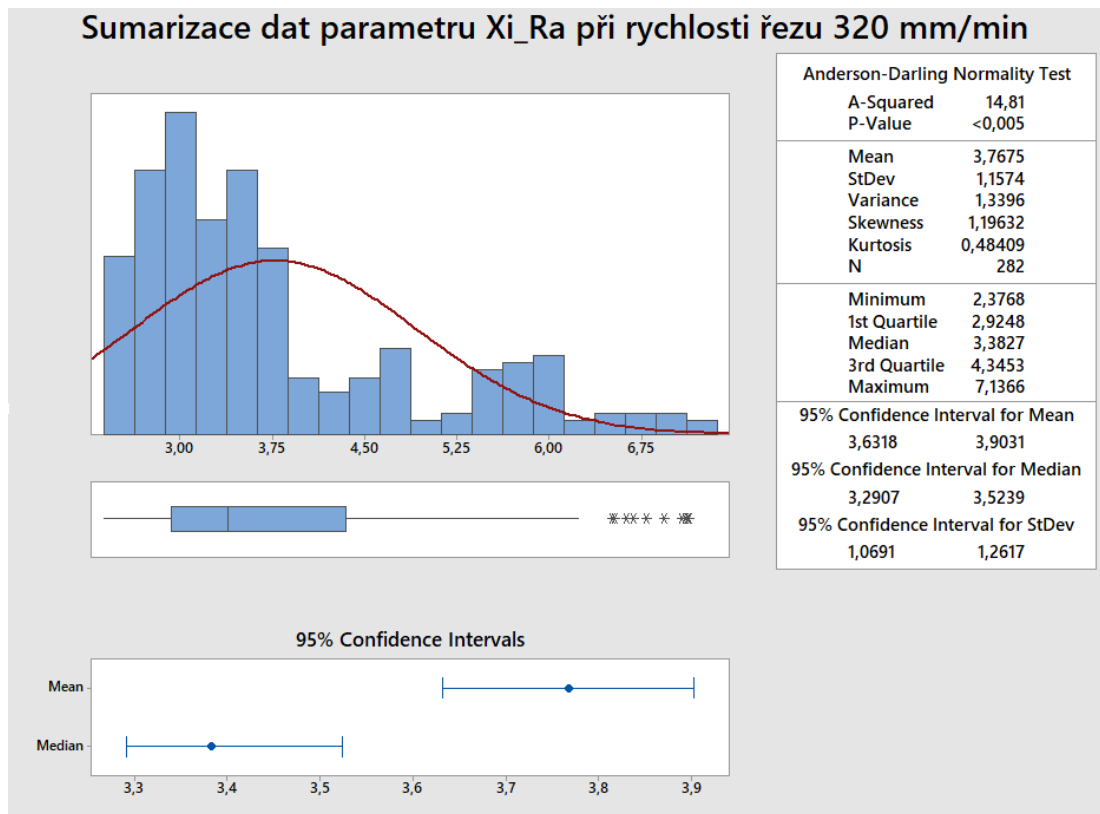
Po změření a překopírování všech naměřených hodnot do statistických softwarů Minitab a QC Expert bylo provedeno statistické hodnocení dat.

7.1 EDA

Jako první byla provedena exploratorní datová analýza. Pomocí sumarizace dat byl proveden test, jestli mají data normální rozdělení či nikoli. Dále byla data přezkoumána, zda se v nich nenachází outliers. Pokud ano, je důležité je vyšetřit a posoudit, jestli se jedná o hrubou chybu, kterou ze souboru dat vyloučíme nebo se jedná pouze o odlehlou hodnotu, kterou v souboru necháme.



Obrázek 34 Sumarizace dat parametru Ra při rychlosti řezu 176 mm/min



Obrázek 35 Sumarizace dat parametru Ra při rychlosti řezu 320 mm/min

Sumarizace byla provedena u všech parametrů i všech rychlostí řezu. Podle Anderson-Darlingova testu normality a hodnoty „p“ vyšší než 0,05 vyšlo, že každý parametr při rychlosti 176 mm/min má normální rozdělení. Kdežto u všech ostatních parametrů i rychlostí řezu vyšla „p“ hodnota nižší než 0,05, což znamená, že data nemají normální rozdělení. Tím je porušen centrální limitní teorém, který říká, že rozdělení výběrového souboru se blíží k normálnímu rozdělení bez ohledu na to, jaké je rozdělení průměrované veličiny. Tudíž by zkoumaná data měla mít normální rozdělení. Zde vzniká otázka, o jaký povrch se vlastně jedná, jestli homogenní nebo heterogenní. Tato otázka bude zodpovězena v následující kapitole.

Tabulka 3 Hodnoty „p“ Anderson-Darlingova testu

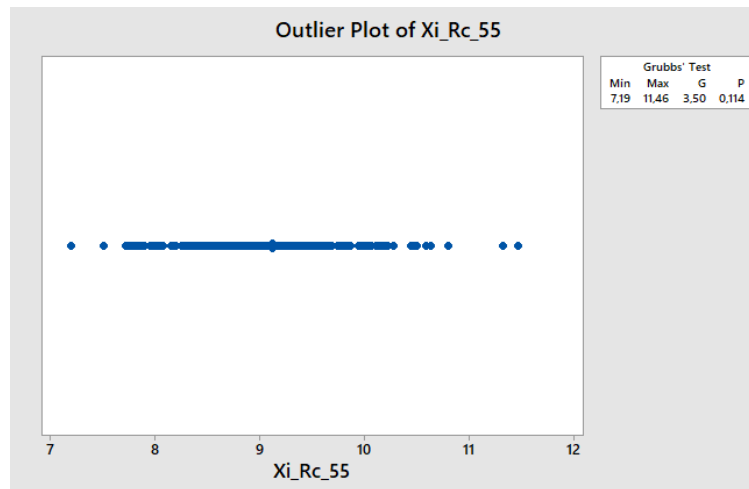
Rychlost řezu	Parametr			
	Ra	Rz	Rc	RSm
176 mm/min	0,630	0,574	0,896	0,308

Dalším testem, který byl proveden je outlier test, který nám pomůže k posouzení, zda se jedná o odlehlou hodnotu nebo hrubou chybu. U dat s normálním rozdělením byl použit Grubbsův test a u dat s jiným, než normálním rozdělením byl použit Dixonův Q test. Byla sestavena následovná hypotéza:

H_0 : Ra, Rz, Rc, RSm_{max,min} = extrém

H_1 : Ra, Rz, Rc, RSm_{max,min} = hrubá chyba

$1-\alpha = 95 \%$

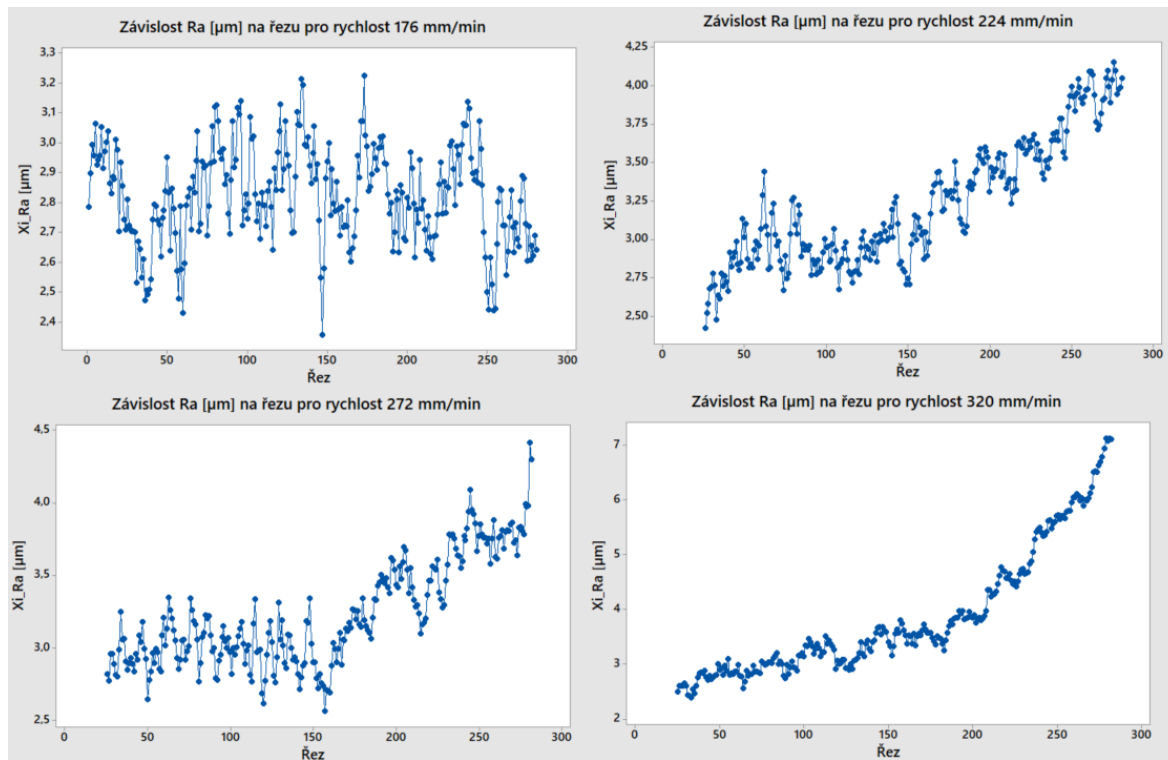


Obrázek 36 Grubbsův test odlehlých hodnot

Na základě výsledků Grubbsova a Dixonova Q testu odlehlých hodnot pro všechny parametry a rychlosti řezu je „p“ hodnota vyšší než 0,05. Takže nezamítáme H_0 a tvrdíme, že se zde nenachází hrubé chyby s pravděpodobností $1-\alpha = 95 \%$.

7.2 Ověření homoskedasticity a heterogenity povrchu

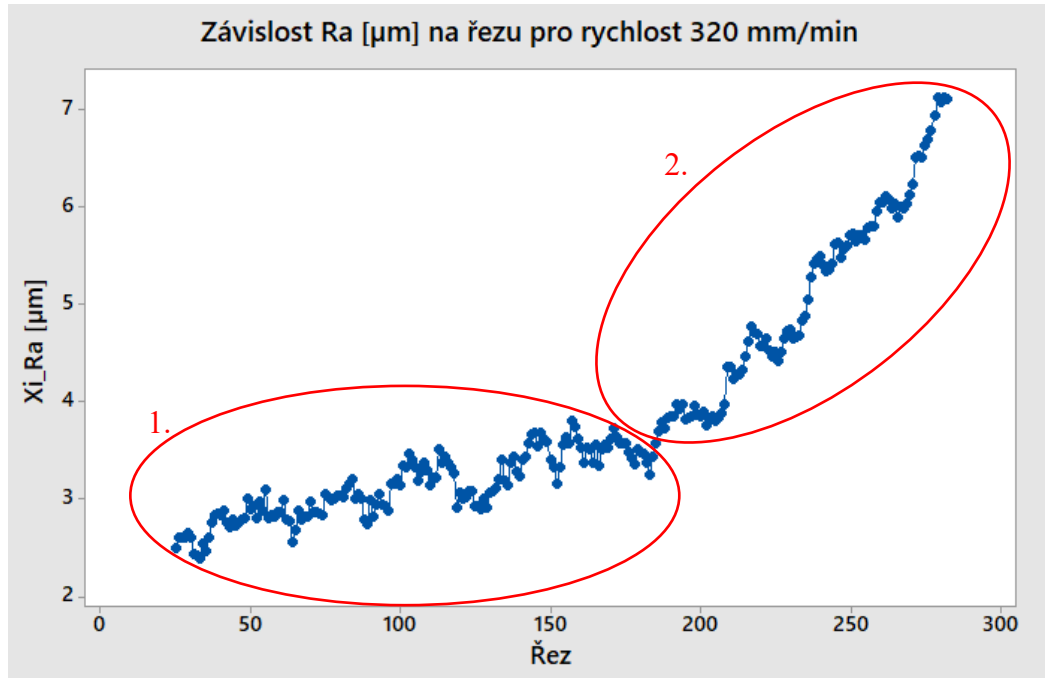
Při pohledu na 3D scany můžeme tvrdit, že máme dva druhy povrchů, proto byl narušen centrální limitní teorém. Abychom si však byli jistí, musíme to dokázat analýzou, která nám určí, zda je povrch homogenní či heterogenní. U heterogenního povrchu můžeme také určit, na kolik oblastí se povrch rozkládá.



Obrázek 37 Závislost Ra na řezu

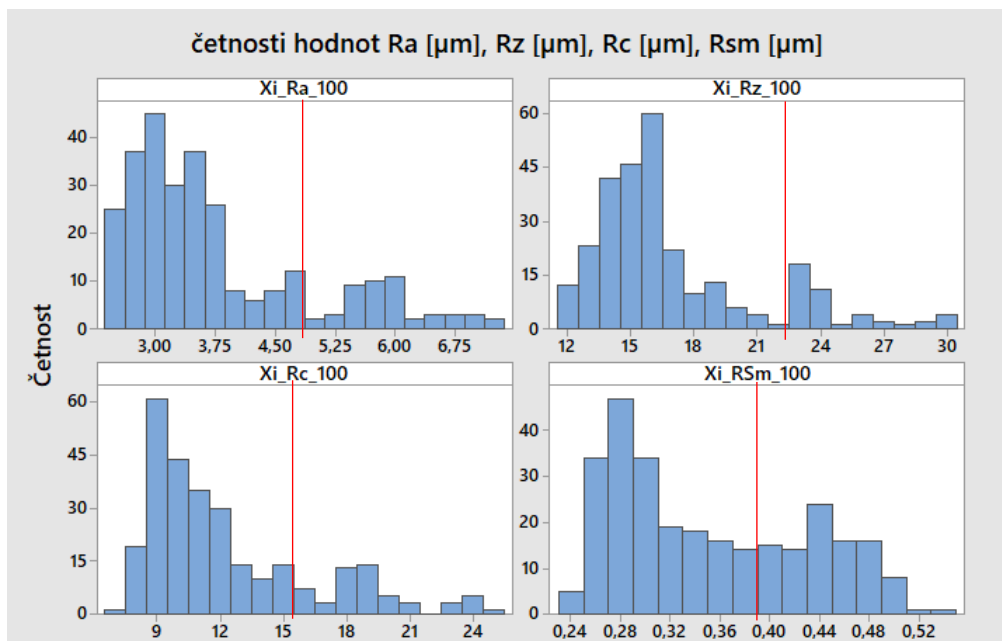
U vzorků, kde byla použita nejnižší rychlost řezu a to 176 mm/min je patrné, že zde nedochází k nárůstu drsnosti Ra na jednotlivém řezu, z čehož vyplývá teorie, že je tento povrch homogenní. U rychlostí 224, 272 a 320 mm/min k nárůstu dochází, což je dobrým důkazem heterogenního povrchu.

Lze si povšimnout, že průběh hodnot u rychlostí 224, 272 a 320 mm/min se pomyslně spojuje na dvě části. Obrázek 38 nám tyto oblasti ukazuje, mělo by se jednat o primární a sekundární oblast řezu.



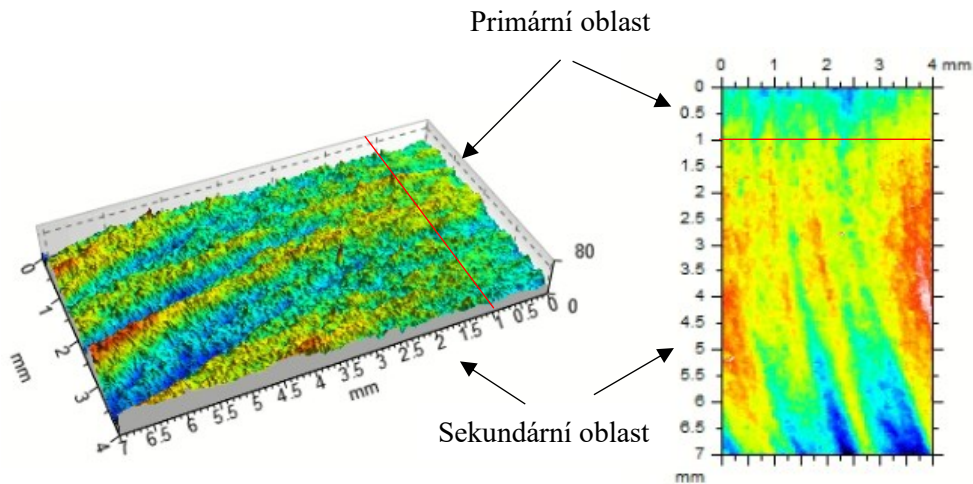
Obrázek 38 Závislost Ra na Řezu s oblastí řezu

Pomocí histogramu zjistíme, zda je heterogenní povrch rozdělen na dvě pomyslné části či nikoli. Všechny parametry u jednotlivých řezů srovnáme a zjistíme skutečný počet oblastí.



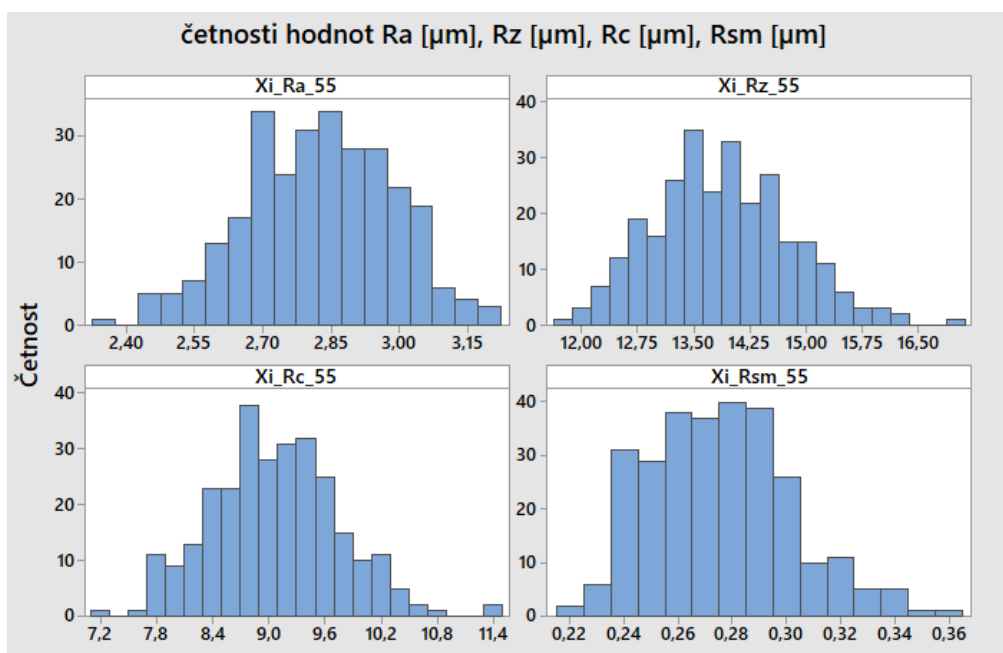
Obrázek 39 Grafy četností měřených parametrů u rychlosti řezu 320 mm/min

Na grafech doplněných o červené čáry můžeme vidět výskyt dvou Gaussovských rozdělání, které tyto čáry rozdělují. Podle počtu Gaussovských rozdělání můžeme určit počet oblastí, na které můžeme tento povrch rozdělit. U parametru RSm je výsledek zjevný na první pohled. Ostatní parametry už tak zjevné nejsou. Můžeme s jistotou konstatovat, že u povrchu vzorků s rychlostí řezu 320 mm/min se jedná o heterogenní povrch se dvěma oblastmi řezu, a to primární a sekundární.



Obrázek 40 Drsnost vzorku u rychlosti řezu 320 mm/min

Měřené parametry u rychlosti posuvu 176 mm/min nevykazují známky toho, že by zde byl výskyt dvou Gaussovských rozdělání. Jelikož je zde patrná jen jedna gausiána, nachází se zde jen primární oblast řezu, a proto můžeme prohlásit, že tento povrch vzorků je homogenní.



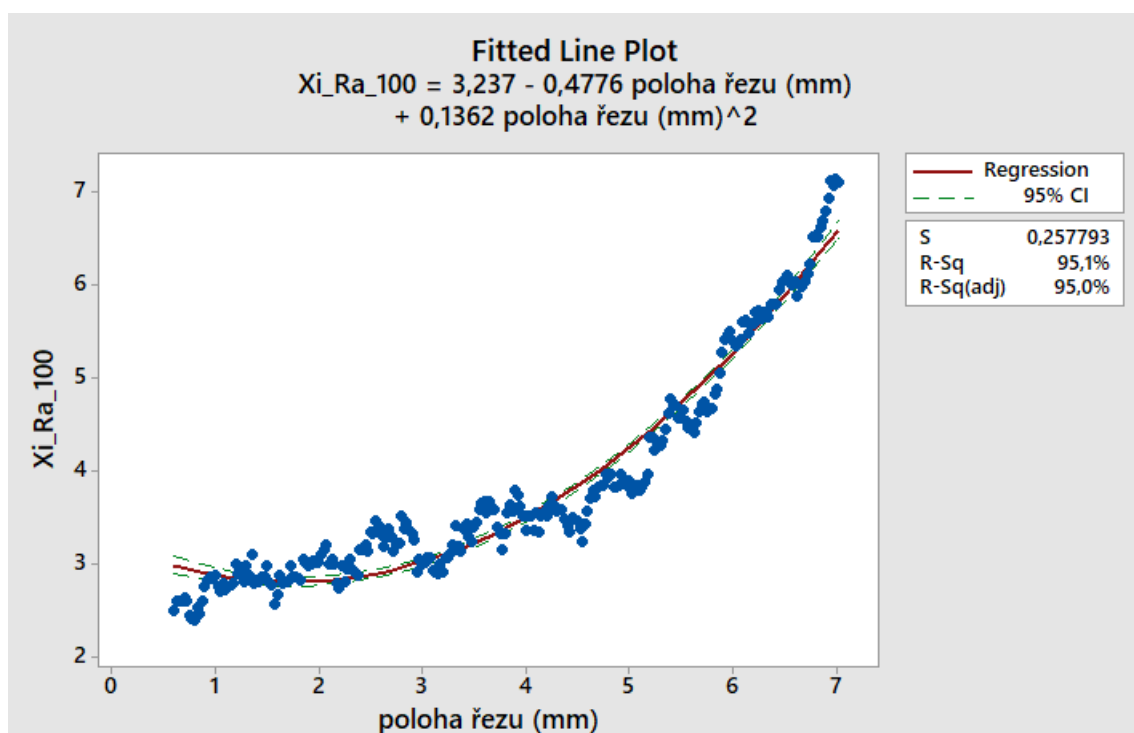
Obrázek 41 Grafy četností měřených parametrů u rychlosti řezu 176 mm/min

7.3 Regresní analýza

Regresní analýza nám pomůže pochopit vztah mezi závislou a nezávislou proměnnou, jak se budou měnit hodnoty závislé proměnné v souvislosti s proměnnou nezávislou. Cílem regresní analýzy je nalezení nejvhodnější matematické rovnice a regresního modelu, který bude nejpřesněji popisovat zkoumaný soubor dat.

Při vyhodnocení regresní analýzy byla zvolena poloha řezu jako nezávislá proměnná a měřený parametr (R_a , R_z , R_c , R_{Sm}) jako závislá proměnná. Konfidenční úroveň byla zvolena $1-\alpha = 95\%$. Jako regresní model byl postupně zvolen model lineární, kvadratický a kubický.

Výsledkem v programu minitab je regresní model, který vykresluje závislost mezi proměnnými, ukazuje rovnici regrese, směrodatnou odchylku a hodnotu regresního rabatu. Regresní rabat v procentech vyjadřuje, jak vykreslená funkce charakterizuje vyhodnocená data.



Obrázek 42 Kvadratická legrese v programu Minitab pro rychlost řezu 320 mm/min

Pro potvrzení správnosti regresní analýzy využijeme možnosti programu QC Expert. Postup vyhodnocení je téměř totožný s programem Minitab, jediná odlišnost je možnost volby metody. V našem případě byla zvolena metoda nejmenších čtverců. Software QC Expert nejen vytvoří graf regresní křivky, ale vytvoří také protokol. V protokolu nalezneme

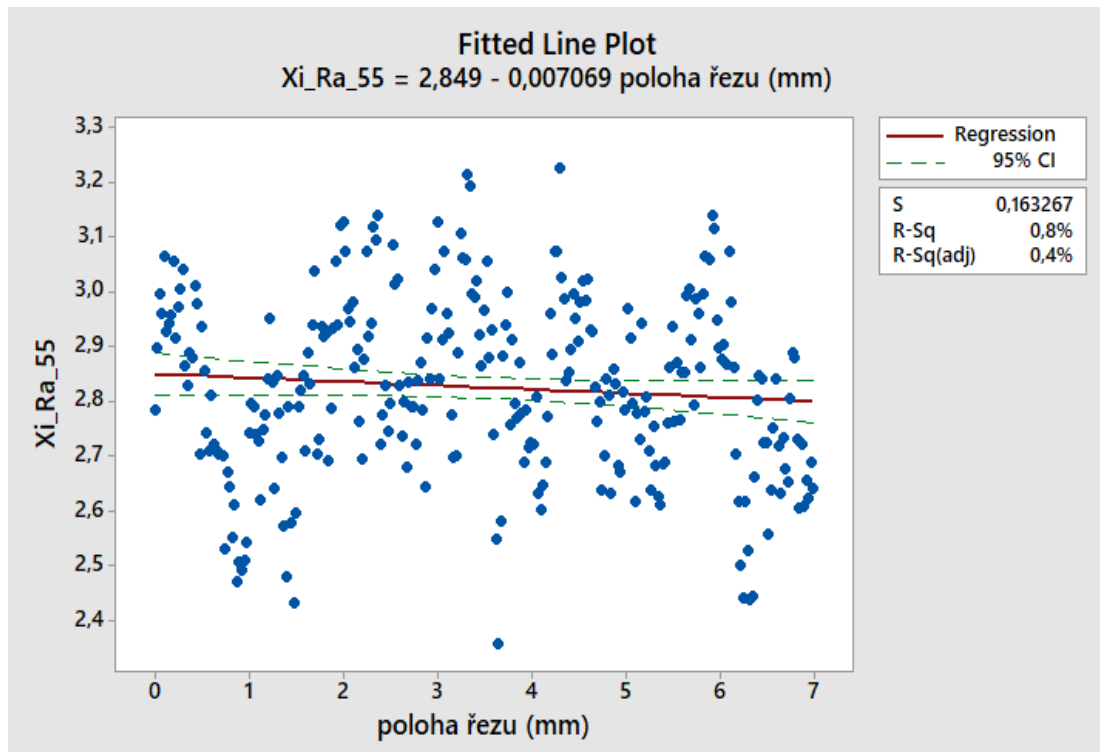
významnosti jednotlivých regresních parametrů spolu s hodnotou směrodatné odchylky. Pro rychlé ověření, zda je regrese správná, využíváme Sillenovo pravidlo, které říká, že odhad parametru by měl být větší než dvojnásobek jeho směrodatné odchylky. Obrázek 43 ukazuje, že jsou všechny parametry významné. To znamená, že vygenerovaný regresní model lze použít.

Závěr :	Model je významný		
Odhady parametrů			
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr
Abs	3,236582096	0,06796816262	Významný
poloha řezu	-0,4776168651	0,04039737349	Významný
poloha řezu ²	0,13618281	0,005176005374	Významný

Obrázek 43 Významnost parametrů QC Expert pro rychlost řezu 320 mm/min

Regresní analýza byla provedena pro všechny parametry při různých rychlostech řezu a následně byl vybrán nejvhodnější model. Výsledky jsou interpretovány níže pro parametr Ra.

7.3.1 Regresní analýza u rychlosti řezu 176 mm/min

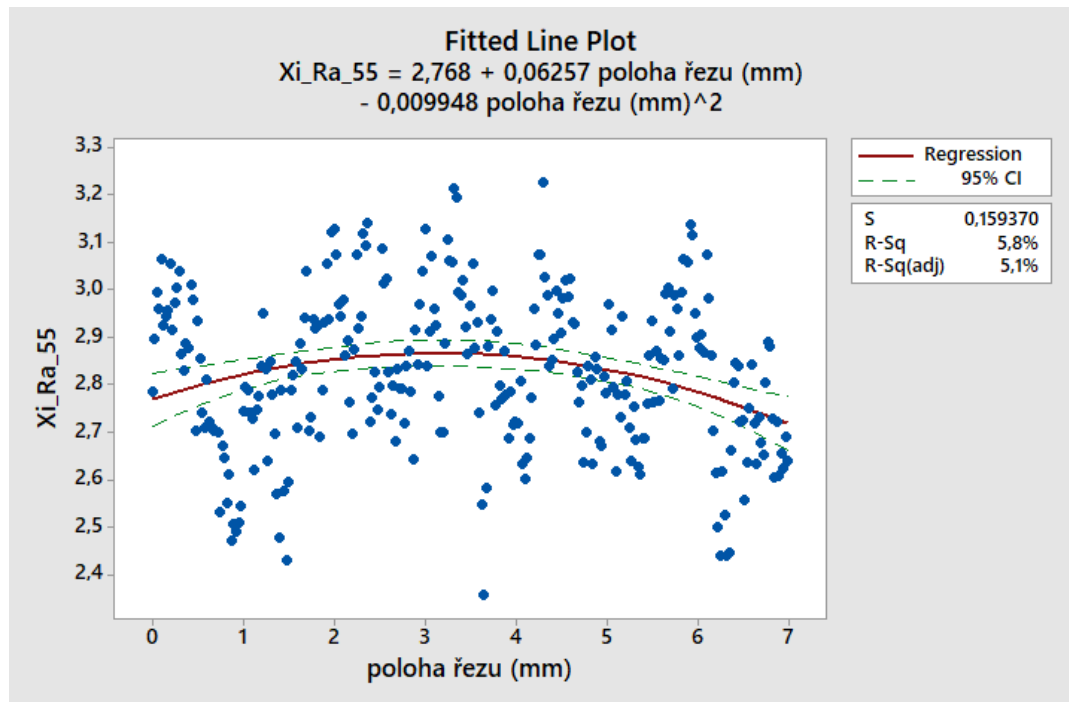


Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr
Abs	2,849158037	0,01942750459	Významný
poloha řezu	-0,007069251155	0,004802774439	Nevýznamný

Obrázek 44 Přímková regrese parametru Ra při rychlosti řezu 176 mm/min

U přímkové regrese vychází regresní rabat 0,8 %, to znamená, že zde není žádná závislost. Tuto teorii nám také potvrzuje protokol z programu QC Expert, kde vyšel druhý parametr nevýznamný. Model je tedy nevýznamný a žádná přímková regrese se zde nevyskytuje.



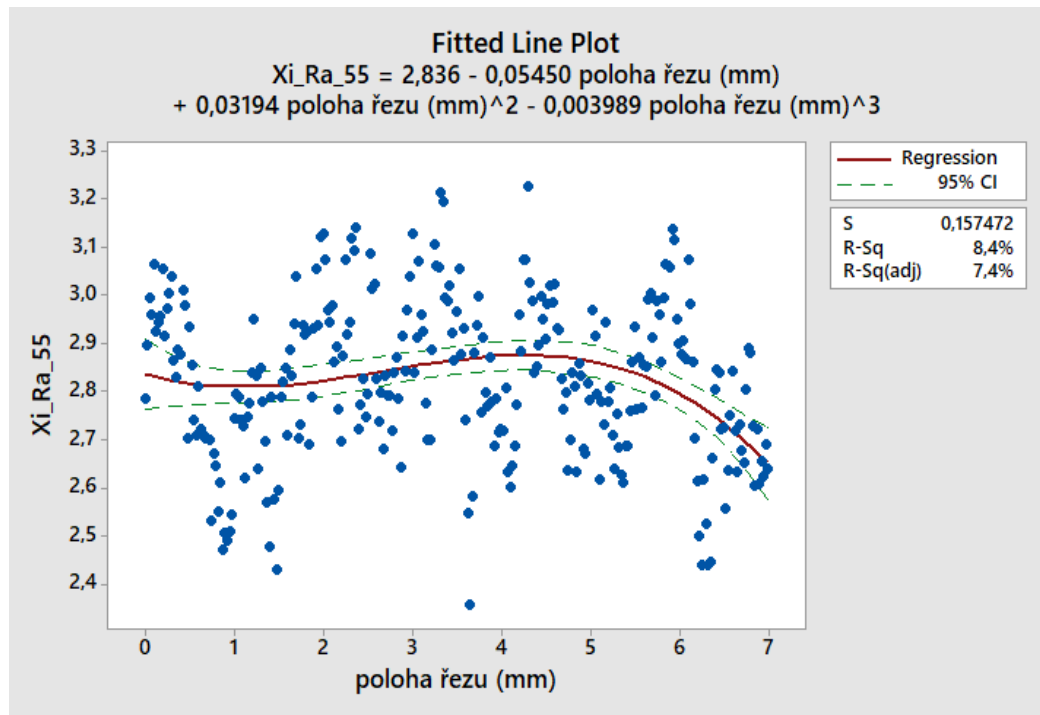
Závěr : Model je významný

Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr
Abs	2,768207209	0,02831976222	Významný
poloha řezu	0,06256587024	0,0186903852	Významný
poloha řezu ^2	-0,009947874485	0,002584695878	Významný

Obrázek 45 Kvadratická regrese parametru Ra při rychlosti řezu 176 mm/min

U kvadratické regrese vychází všechny parametry významné. Při použití Sillenaova pravidla nezamítáme významnost parametrů. Model je taktéž významný, ale vykreslená funkce charakterizuje data pouze z 5,8 % a proto tvrdíme, že se zde nevyskytuje kvadratická regrese.



Závěr :

Model je významný

Odhady parametrů

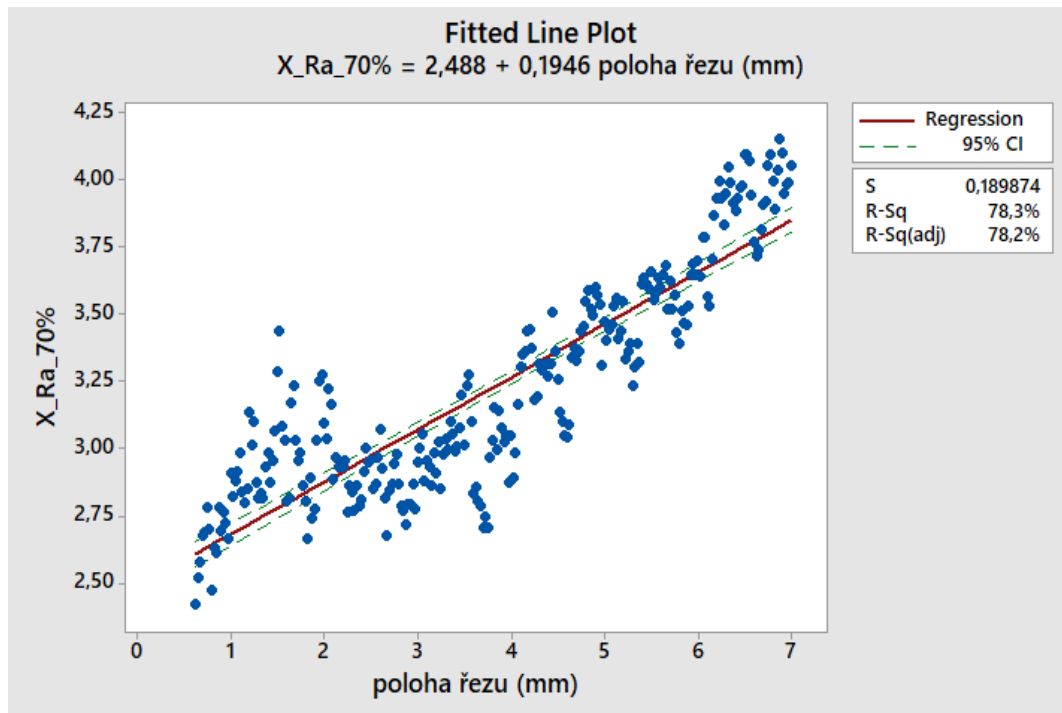
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr
Abs	2,835886377	0,03708013901	Významný
poloha řezu	-0,05450016621	0,04595662576	Nevýznamný
poloha řezu ^2	0,03193603887	0,01527140311	Významný
poloha řezu ^3	-0,00398894413	0,001433936596	Významný

Obrázek 46 Kubická regrese parametru Ra při rychlosti řezu 176 mm/min

Model kubické regrese vyšel významný, ale jeden z parametrů vyšel nevýznamně, proto nemůžeme uvažovat o tom, že použijeme kubickou regresi. Potvrzuje to i regresní rabat, který vyšel 8,4 %.

Při rychlosti řezu 176 mm/min u parametru Ra nevznikla téměř žádná sekundární oblast řezu, proto nebyla zamítnuta normalita. Podle výsledků byla lineární regrese v datech zamítnuta, takže je nutno hodnotit data statisticky.

7.3.2 Regresní analýza u rychlosti řezu 224 mm/min



Závěr :

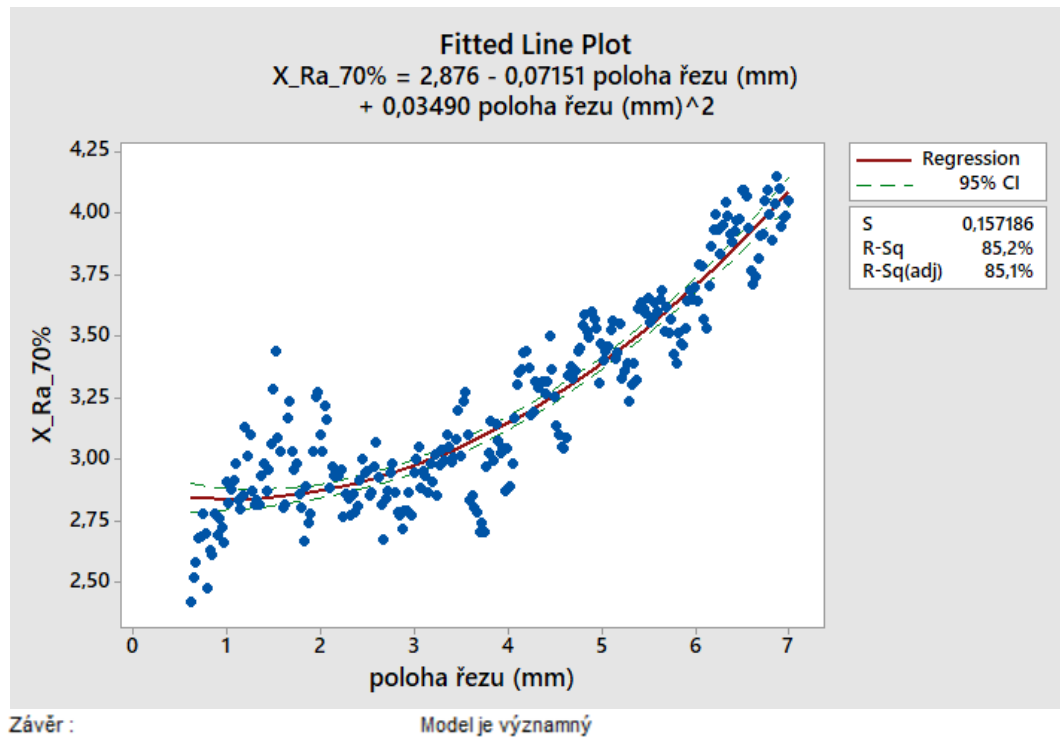
Model je významný

Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr
Abs	2,487810976	0,02721279099	Významný
poloha řezu	0,1946083915	0,006423323019	Významný

Obrázek 47 Přímková regrese parametru Ra při rychlosti řezu 224 mm/min

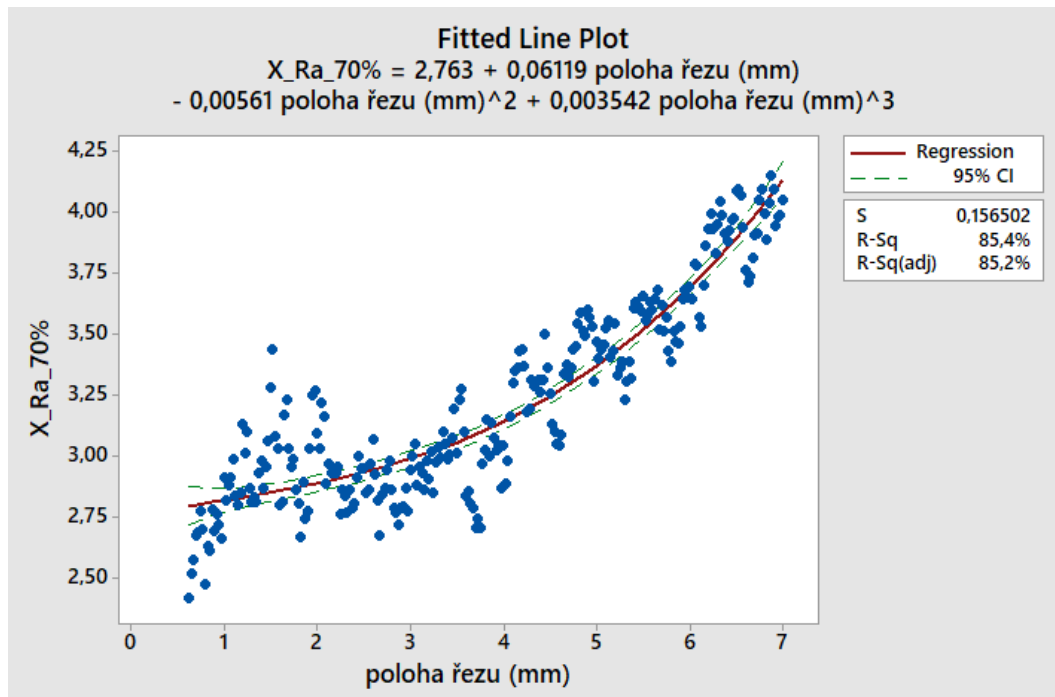
Model přímkové regresní analýzy vyšel významný, taktéž parametry nebyly zamítnuty a regresní rabat vyšel 78,3 %. Můžeme tvrdit, že je zde určitý trend mezi daty a regresi přímkovou nezamítáme.

**Odhady parametrů**

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr
Abs	2,875976353	0,04229016676	Významný
poloha řezu	-0,07151229374	0,02510692187	Významný
poloha řezu^2	0,03490107347	0,003218013095	Významný

Obrázek 48 Kvadratická regrese parametru Ra při rychlosti řezu 224 mm/min

U kvadratické regrese vyšel regresní rabat o něco lépe než u regrese přímkové a to 85,2 %. Všechny parametry jsou významné, stejně jako model, a proto kvadratickou regresí nezamítáme.



Závěr :

Model je významný

Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr
Abs	2,762650944	0,07591888479	Významný
poloha řezu	0,06118792834	0,07808239229	Nevýznamný
poloha řezu ²	-0,00561388704	0,02281092601	Nevýznamný
poloha řezu ³	0,00354229163	0,001974626445	Nevýznamný

Obrázek 49 Kubická regrese parametru Ra při rychlosti řezu 224 mm/min

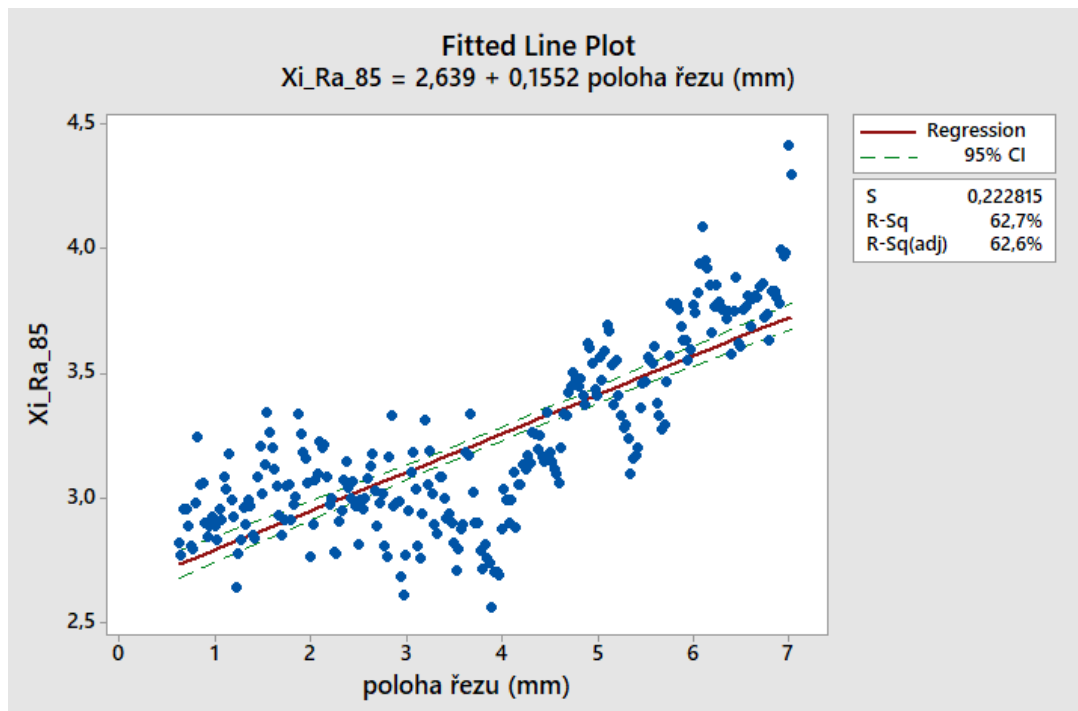
U kubické regrese sice vyšlo, že je model významný, ale tři její parametry jsou nevýznamné. Vykreslená funkce data charakterizuje s 85,4 % pravděpodobností, ale jelikož jsou tři regresní parametry nevýznamné, regresi v tomto případě zamítáme.

Při rychlosti řezu 224 mm/min u parametru Ra jsme nezamítli regresní analýzu přímkovou a kvadratickou. Kvadratická regrese vykazuje vyšší regresní rábat, a proto ji volím pro hodnocení dat. Křivka pro hodnocení dat:

$$Xi Ra_{70\%} = 2,876 - 0,07151 x + 0,03490 x^2 \quad (18)$$

Kde x je poloha řezu v milimetrech.

7.3.3 Regresní analýza u rychlosti řezu 272 mm/min



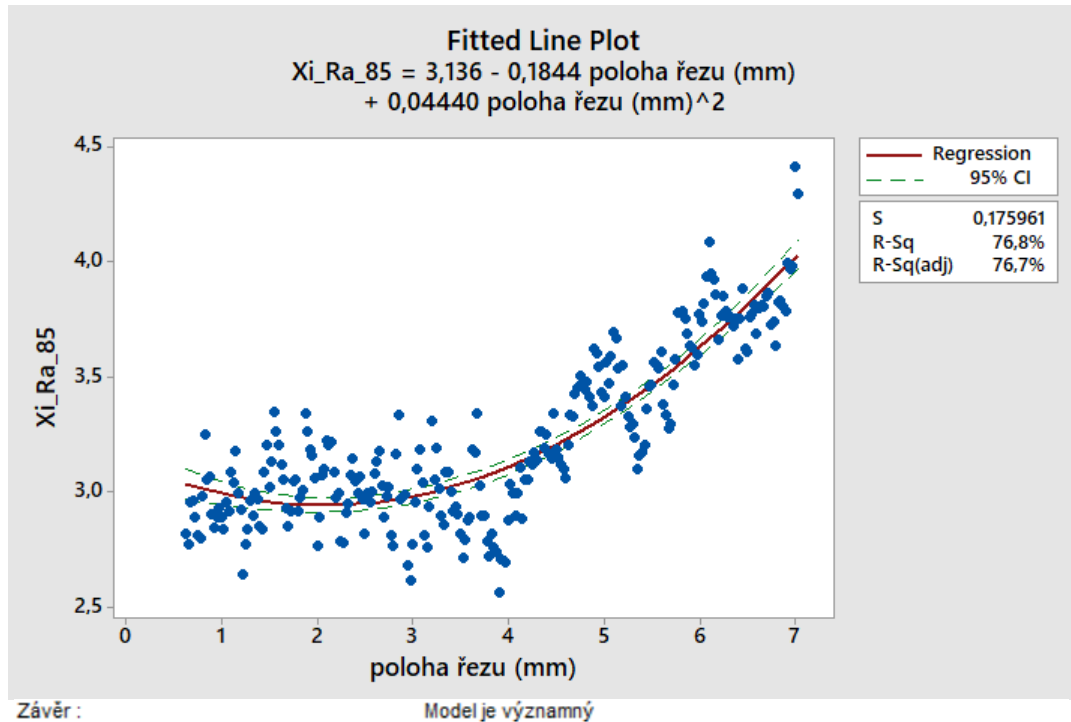
Závěr : Model je významný

Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr
Abs	2,638786954	0,03185549196	Významný
poloha řezu	0,1551945808	0,007493724624	Významný

Obrázek 50 Přímková regrese parametru Ra při rychlosti řezu 272 mm/min

Model přímkové regresní analýzy vyšel významný, stejně jako oba parametry. Regresní rabat je 62,7 %. Určitý trend v datech je, přímkovou regresní analýzu nezamítáme.

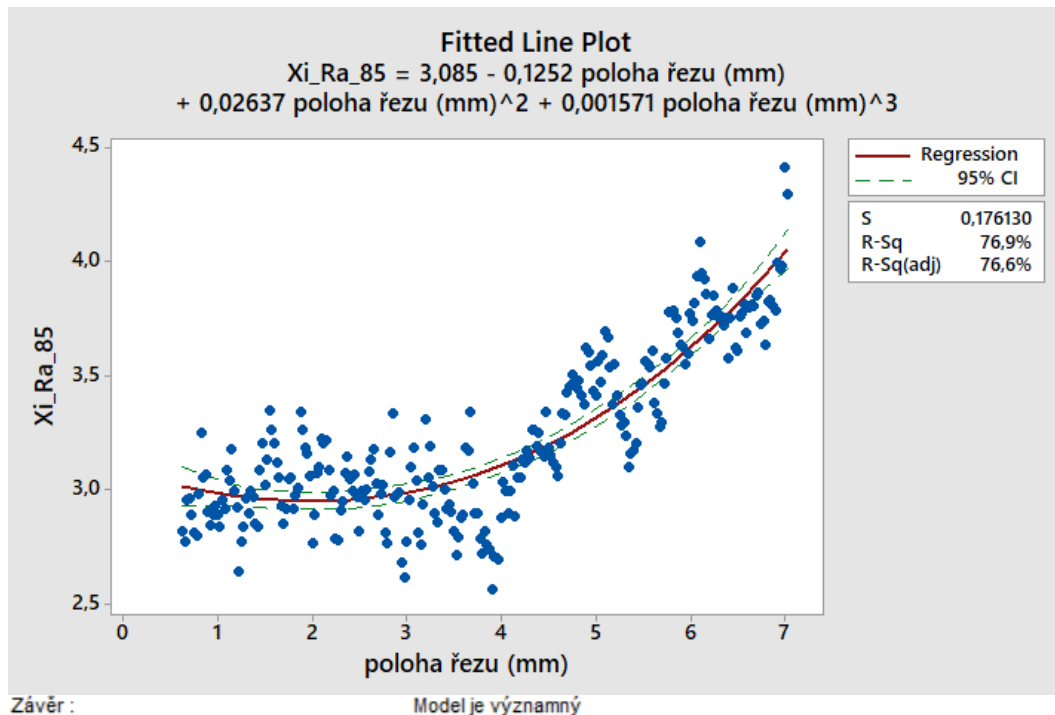


Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr
Abs	3,135613822	0,04718719698	Významný
poloha řezu	-0,1844402063	0,02792521257	Významný
poloha řezu^2	0,0443967042	0,003567443	Významný

Obrázek 51 Kvadratická regrese parametru Ra při rychlosti 272 mm/min

U kvadratické regrese vyšel regreseň rabat lépe než u regrese přímkové. Regreseň rabat je zde 76,8 %. Model je významný stejně jako parametry, takže nezamítáme regreseň analýzu a tvrdíme, že v datech je trend.

**Odhady parametrů**

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr
Abs	3,084919357	0,08507500945	Významný
poloha řezu	-0,1252305784	0,08724352697	Nevýznamný
poloha řezu ²	0,02637467555	0,02540725133	Nevýznamný
poloha řezu ³	0,001570547159	0,002192162599	Nevýznamný

Obrázek 52 Kubická regrese parametru Ra při rychlosti řezu 272 mm/min

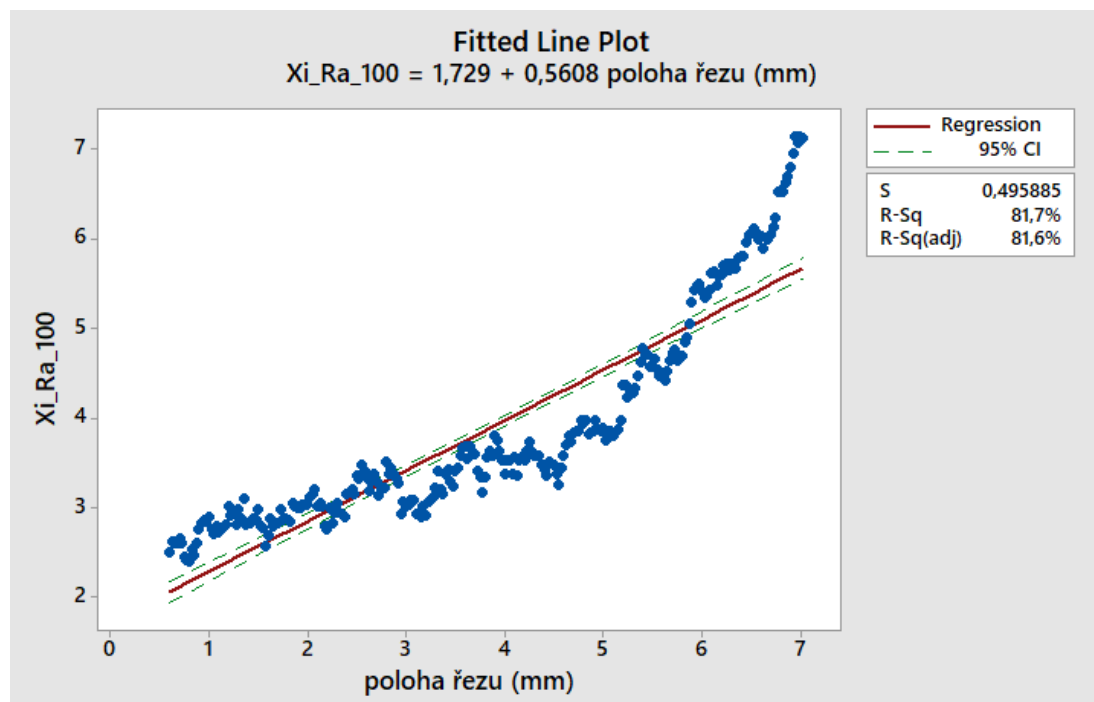
Model kubické regrese vyšel významný, ale tři parametry jsou nevýznamné. Regresní rabat zde vyšel o desetinu vyšší než u regrese kvadratické, ale kvůli nevýznamným parametrům kubickou regresi zamítáme.

Při rychlosti řezu 272 mm/min parametru Ra jsme nezamítli regresi kvadratickou a regresi přímkovou. Kvadratická regrese vykazuje vyšší regresní rabat, a proto ji volím pro hodnocení dat. Křivka pro hodnocení dat:

$$Xi Ra_{85\%} = 3,136 - 0,01844 x + 0,04440 x^2 \quad (19)$$

Kde x je poloha řezu v milimetrech.

7.3.4 Regresní analýza u rychlosti řezu 320 mm/min



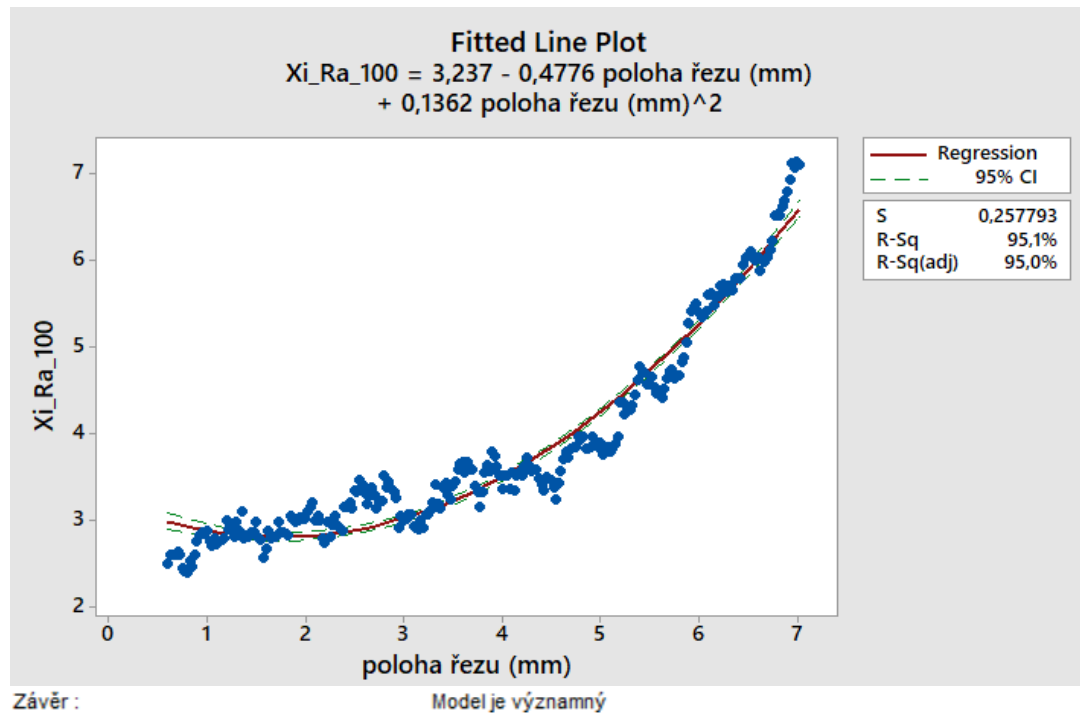
Závěr : Model je významný

Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr
Abs	1,729265361	0,07035020204	Významný
poloha řezu	0,5607770614	0,0165807901	Významný

Obrázek 53 Přímková regrese pro parametr Ra při rychlosti 320 mm/min

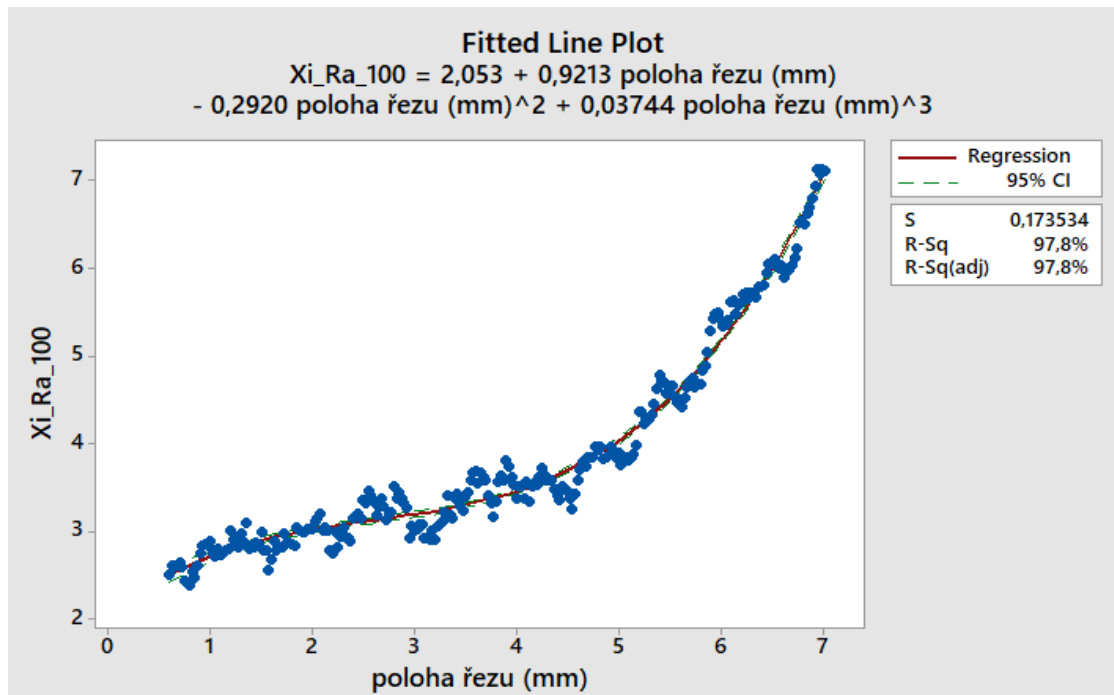
Model u přímkové regrese vyšel významný, stejně jako oba parametry. Regresní koeficient 81,7 % nám říká, že v datech je určitý trend a přímkovou regresi nezamítáme.

**Odhady parametrů**

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr
Abs	3,236582096	0,06796816262	Významný
poloha řezu	-0,4776168651	0,04039737349	Významný
poloha řezu^2	0,13618281	0,005176005374	Významný

Obrázek 54 Kvadratická regrese parametru Ra při rychlosti řezu 320 mm/min

U kvadratické regrese vyšel regresní rabat 95,1 %, což znamená, že vykreslená křivka téměř přesně popisuje hodnocená data. Všechny parametry vyšly významné a model je taktéž významný.



Závěr : Model je významný

Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr
Abs	2,052590549	0,08144761719	Významný
poloha řezu	0,9212970102	0,08413002116	Významný
poloha řezu ²	-0,2920238977	0,02461757967	Významný
poloha řezu ³	0,03743883783	0,002130689603	Významný

Obrázek 55 Kubická regrese parametru Ra při rychlosti řezu 320 mm/min

Model kubické regrese vyšel významný. Všechny parametry regrese vychází významné, a proto nezamítáme regresi kubickou. Toto tvrzení dokazuje i regresní rabat, který se téměř blíží 100 %. Jeho hodnota je 97,8 %.

Při rychlosti řezu 320 mm/min parametru Ra jsme nezamítli regresi přímkovou, kvadratickou a ani kubickou. Všechny parametry byly u regresí významné. Pro hodnocení dat volím regresi kubickou, kde vyšel regresní rabat nejvyšší a to 97,8 %. Křivka pro hodnocení dat:

$$Xi Ra_{100\%} = 2,053 + 0,9213x - 0,2920 x^2 + 0,03744 x^3 \quad (20)$$

Kde x je poloha řezu v milimetrech.

8 INTERPETACE VÝSLEDKŮ

U vzorků s rychlostí řezu 176 mm/min nevznikla významná sekundární oblast řezu, proto nebyla zamítnuta normalita. Regrese při této rychlosti řezu byla nevýznamná. V případě výkazu statisticky Gaussového rozdělení se jedná o povrch homogenní, z čehož plyne, že homogenní povrch se hodnotí statisticky.

U vzorků s rychlostí řezu 224, 272 a 320 mm/min byla normalita zamítnuta, proto došlo k vyšetření, zda se jedná o povrch homogenní nebo heterogenní. Při těchto rychlostech řezu byl vidět výskyt dvou Gaussovských rozdělení, což znamená, že se jedná o heterogenní povrch se dvěma oblastmi řezu. U heterogenních vzorků, kde bylo zamítnuto normální rozdělení jsou vidět drážky, jak vodní paprsek ztrácí svou energii, proto heterogenní povrch hodnotíme pomocí regresní křivky. Nejvhodnější regresní křivky jsou následující:

Rychlost řezu 224 mm/min

$$Xi Ra_{70\%} = 2,876 - 0,07151 x + 0,03490 x^2 \quad (18)$$

Rychlost řezu 272 mm/min

$$Xi Ra_{85\%} = 3,136 - 0,01844 x + 0,04440 x^2 \quad (19)$$

Rychlost řezu 320 mm/min

$$Xi Ra_{100\%} = 2,053 + 0,9213x - 0,2920 x^2 + 0,03744 x^3 \quad (20)$$

Kde x je poloha řezu v milimetrech.

Z naměřených dat a získaných výsledků plyne doporučení vyšetřit, zda se jedná o povrch homogenní či heterogenní vždy po změření povrchu. Ačkoliv se to může zdát časově náročné, díky tomuto určení je možné povrch popsat co nejlépe. Homogenní povrch se hodnotí statisticky, kdežto heterogenní povrch se hodnotí pomocí regresní křivky.

ZÁVĚR

V teoretické části diplomové práce bylo popsáno základní rozdělení nekonvenčních technologií podle druhu úběru materiálu. Následně bylo podrobně popsáno obrábění vodním paprskem z hlediska historie využití, principu metody, kvality řezu a možnostech použití. Závěr teoretické části se věnoval struktuře povrchu. Je zde popsána struktura povrchu podle platných norem ČSN EN ISO včetně popisu základních parametrů profilu. Dále je zde popsáno, jak se povrch měří a vyhodnocuje.

V praktické části diplomové práce byla popsána příprava vzorků, variace parametrů a technologický postup měření. Vzorky o rozměru 50 x 50 x 8 mm byly vyřezány technologií vodního paprsku s abrazivem. Aby bylo docíleno rozdílnosti jakosti povrchu, byla změněna rychlost řezu. U první sady vzorků byla použita rychlost řezu 320 mm/min, u druhé sady 272 mm/min, u třetí 224 mm/min a u poslední sady vzorků byla rychlost řezu 176 mm/min. Kvůli vzniklé korozi, byly vzorky před měřením ponořeny do odrezovacího roztoku a naimpregnovány. Následně byl zpracován metrologický postup a bylo provedeno měření na přístroji Talysurf CLI 500. Také byl popsán postup při úpravě naměřených dat ve statistických softwarech Minitab a QC Expert.

Na závěr bylo provedeno vyhodnocení naměřených dat parametrů Ra, Rz, Rc a RSm. Jako první byla data prozkoumána exploratorní datovou analýzou pro zjištění, zda mají data normální rozdělení a zda se v nich nevyskytuje hrubá chyba. U vzorků, které nemají normální rozdělení došlo k ověření, zda se jedná o homogenní nebo heterogenní povrch. U vzorků s rychlostí řezu 176 mm/min nevznikla významná sekundární oblast řezu, a proto nebyla zamítnuta normalita. U heterogenních vzorků, kde bylo zamítnuto normální rozdělení jsou vidět drážky, jak vodní paprsek ztrácel svou energii, proto heterogenní povrch hodnotíme pomocí regresní křivky. Následně byla použita regresní analýza přímková, kvadratická a kubická pro nalezení optimální funkce k popisu drsnosti povrchu na základě významnosti parametrů a regresního rabatu jednotlivých regresí.

U parametru Ra při rychlosti řezu 224 mm/min je nejvhodnější kvadratická regresní analýza s regresním rabatem 85,2 %. Při rychlosti řezu 272 mm/min je nejvhodnější také kvadratická regresní analýza s regresním rabatem 76,8 %. Při rychlosti řezu 320 mm/min je nejvhodnější model kubické regresní analýzy s regresním rabatem 97,8 %, který téměř dokonale popisuje data.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice: Viena, 2001. ISBN 80-7099-430-4.
- [2] KUMAR, Jatinder. *ULTRASONIC MACHINING—A COMPREHENSIVE REVIEW*. *Machining Science and technology*. 2013, 17(3), 325-379. Dostupné z: doi:10.1080/10910344.2013.806093
- [3] LIU, X., LIANG, Z., Wen, G. et al. *Waterjet machining and research developments: a review*. *Int J Adv Manuf Technol*. 2019, 102, 1257–1335 .Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3094>
- [4] MELENTIEV, Ruslan a Fengzhou FANG. *Recent advances and challenges of abrasive jet machining*. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2018, 22, 1-20. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.06.001>
- [5] HALDAR, Barun, Tina GHARA, Rasid ANSARI, Santanu DAS a P SAHA. *Abrasive jet system and its various applications in abrasive jet machining, erosion testing, shot-peening, and fast cleaning*. *Materials Today: Proceedings*. 2018, 5(2), 13061-13068. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.293> ..
- [6] ÇAKIR, O.; YARDIMEDEN, A.; ÖZBEN, T. *Chemical machining*. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2007, 28.8: 499-502.
- [7] VYAS, Jayvardhan, Likhith SAWANT, Shubhang TYAGI, Girish JOSHI, Samadhan DESHMUKH a Asha INGLE. *An overview on parametric study of photochemical machining process and its applications*. *Materials Today: Proceedings*. 2022, 51(1), 1055-1062. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.093>.
- [8] SKOCZYPIEC, S. *Research on ultrasonically assisted electrochemical machining process*. *Int J Adv Manuf Technol*. 2011, 52, 565–574 .Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2774-4>
- [9] QU, N.S., Q.L. ZHANG, X.L. FANG, E.K YE a D. ZHU. *Experimental Investigation on Electrochemical Grinding of Inconel 718*. *Procedia CIRP*. 2015, 35, 16-19. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.055>..
- [10] PURI, A.B., BANERJEE, S. *Multiple-response optimisation of electrochemical grinding characteristics through response surface methodology*. *Int J Adv Manuf*

- Technol. 2013 64, 715–725. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4065-8>
- [11] PANDEY, Anand; SINGH, Shankar. Current research trends in variants of Electrical Discharge Machining: A review. *International journal of Engineering science and Technology*, 2010, 2.6: 2172-2191.
- [12] KUMAR, Anil, Sachin MAHESHWARI, Chitra SHARMA a Naveen BERI. Research Developments in Additives Mixed Electrical Discharge Machining (AEDM): A State of Art Review. *Materials and Manufacturing Processes*. 2010, 25(10), 1166-1180. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1080/10426914.2010.502954](https://doi.org/10.1080/10426914.2010.502954).
- [13] MOARREFZADEH, Ali. Finite-Element simulation of electron beam machining (EBM) Process. *International Journal of Multidisciplinary Sciences And Engineering*, 2011, 2.
- [14] ALLEN, D.M., P. SHORE, R.W. EVANS, C. FANARA, W. O'BRIEN, S. MARSON a W. O'NEILL. Ion beam, focused ion beam, and plasma discharge machining. *CIRP Annals*. 2009, 58(2), 647-662. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.007](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.007).
- [15] ARNOLD, Thomas a Georg BOEHM. Plasma Jet Machining A novel technology for precision machining of optical elements. *Vakuum in Forschung und Praxis*. 2010, 22(4), 10-16. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1002/vipr.201000423](https://doi.org/10.1002/vipr.201000423).
- [16] PARANDOUSH, Pedram a Altab HOSSAIN. A review of modeling and simulation of laser beam machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2014, 85, 135-145. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.05.008](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.05.008).
- [17] SHIMIZU, Seiji. Tribology in water jet processes. *New tribological ways*, 2011, 153-164.
- [18] EL-HOFY, Hassan Abdel-Gawad. *Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes*. McGraw Hill Professional, 2005.
- [19] NATARAJAN, Yavaraj. Abrasive Water Jet Machining process: A state of art of review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020, 49, 271-322. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.030](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.030).

- [20] MELENTIEV, Ruslan a Fengzhou FANG. Recent advances and challenges of abrasive jet machining. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2018, 22, 1-20. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.06.001>..
- [21] LOUIS, H., PUDE, F., von Rad, C. et al. Abrasive Water Suspension Jet Technology Fundamentals, Application and Developments. 2007 *Weld World* 51, 11–16 . <https://doi.org/10.1007/BF03266595>.
- [22] GUPTA, K., Avvari, M., Mashamba, A., Mallaiiah, M.. Ice Jet Machining: A Sustainable Variant of Abrasive Water Jet Machining. In: Davim, J. (eds) *Sustainable Machining. Materials Forming, Machining and Tribology*. Springer, Cham. 2017 Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-319-51961-6_4
- [23] ZETKOVÁ JENÍČEK, Š., HRONEK, O., KOTĚŠOVEC, V., VRTÁČEK, J., ZETEK, M. Influences of cutting process parameters on the cutting quality when water jet cutting. In: *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*. Vídeň, Rakousko: DAAAM International Vienna, 2018. s. 1286-1292. ISBN 978-3-902734-20-4 , ISSN 1726-9679.
- [24] KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi - WJM*. Epos, 2001. ISBN 8080570914..
- [25] Soustružení abrazivním kapalinovým paprskem zvyšuje trvanlivost. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2023-03-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/soustruzeni-abrazivnim-kapalinovym-paprskem-zvysuje-trvanlivost>
- [26] Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2023-03-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologie-awj>
- [27] FADZIL, MH Ahmad, et al. Validation on 3D surface roughness algorithm for measuring roughness of psoriasis lesion. *International Journal of Biomedical and Biological Engineering*, 2010, 4.3: 82-87.
- [28] ČSN EN ISO 21920-2 (014457). *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Struktura povrchu: Profil - Část 2: Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. 2022.

- [29] Dotykové, nebo bezdotykové měření struktury povrchu?. MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2023-03-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/dotykovne-bezdotykovne-mereni-struktury-povrchu>
- [30] Měření drsnosti povrchu. ELUC [online]. [cit. 2023-03-07]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1103>
- [31] BUDÍKOVÁ, Marie, Maria KRÁLOVÁ a Bohumil MAROŠ. Průvodce základními statistickými metodami. Praha: Grada, 2010. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-3243-5.
- [32] NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KŘÍŽ. Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech. 3., rozšířené vydání. Praha: Grada Publishing, 2021. ISBN 978-80-271-3421-2.
- [33] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. Kompendium statistického zpracování dat: metody a řešené úlohy včetně CD. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-1008-4.
- [34] PATA, Vladimír a Milena KUBIŠOVÁ. Statistické metody hodnocení jakosti strojírenských povrchů. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická, 2018. ISBN 978-80-7454-740-9.
- [35] MORGENTHALER, Stephan. Exploratory data analysis. WIREs Computational Statistics. 2009, 1(1), 33-44. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/wics.2>.
- [36] DUNN, Kevin. Process improvement using data. Retrieved on, 2019, 11-2016.
- [37] KOMOROWSKI, Matthieu a Dominic MARSHALL. Exploratory Data Analysis. Secondary Analysis of Electronic Health Records. 2016, 185-203. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-319-43742-2_15.
- [38] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. Interaktivní statistická analýza dat. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2173-9.
- [39] HENDL, Jan. Základy matematiky, logiky a statistiky pro sociologii a ostatní společenské vědy v příkladech. Třetí, doplněné vydání. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2022. ISBN 978-80-246-5400-3.

- [40] KOVACEVIC, R a M HASHISH. State of the Art of Research and Development in Abrasive Waterjet Machining. ASME. J. Manuf. Sci. Eng. 1997, 776–785. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1115/1.2836824>
- [41] CHPS s.r.o. CHPS - dělíme, tváříme, kompletujeme [online]. Chomutov: Česká Republika [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://chps.cz/deleni-materialu/>
- [42] PATA, Vladimír. Moderní způsoby hodnocení drsnosti strojírenských povrchů na bázi matematické statistiky. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, [2019]. 62 s. ISBN 978-80-7454-829-1
- [43] TriloByte Statistical Software | TriloByte Home [online]. [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://www.trilobyte.cz/downloadfree/qcmanual/linreg.pdf>
- [44] JANÁČEK, Julius. Statistika jednoduše: průvodce světem statistiky. Praha: Grada Publishing, 2022. ISBN 978-80-271-1738-3.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

USM	UltraSonic Machining – Obrábění ultrazvukem
WJM	Water Jet Machining – Čistý vodní paprsek
AJM	Abrasive Jet Machining – Obrábění proudem brusiva
CM	Chemical Machining – Chemické obrábění
PCM	Photochemical Machining – Fotochemické obrábění
ECM	Electrochemical Machining – Elektrochemické obrábění
ECG	Electrochemical Grinding – Elektrochemické broušení
EDM	Electric Discharge Machining – Elektrojiskrové obrábění
EBM	Electron Beam Machining – Obrábění elektronovým paprskem
IBM	Ion Beam Machining – Obrábění iontovým paprskem
PJM	Plasma Jet Machining – Obrábění paprskem plazmy
LBM	Laser Beam Machining – Obrábění laserem
kHz	kilohertz
mm	milimetr
%	procento
°C	stupeň Celsia
μm	mikrometr
MPa	megapascal
m·s ⁻¹	metr za sekundu
l/hod	litr za hodinu
kg/min	kilogram za minutu
IJM	Ice Jet Machining – obrábění pomocí ledového paprsku
CO ₂	oxid uhličitý
Ra	průměrná aritmetická úchylka profilu
Rq	průměrná kvadratická úchylka profilu

GPS	Geometrical Product Specifications – Geometrické požadavky na výrobky
ISO	International Organization for Standardization – Mezinárodní organizace pro normalizaci
Rp	největší výška výstupku
Rv	největší hloubka prohlubně
Rz	největší výška profilu
Rc	průměrná výška profilu
Rt	celková výška profilu
Rsk	průměrná kvadratická úchylka profilu
Rku	špičatost posuzovaného profilu
RSm	průměrná šířka prvků profilu
ČSN	Česká soustava norem
EN	Evropská norma
Sa	aritmetický průměr výšky
Sq	střední kvadratická výška
CLA	Chromatic Length Aberration – Chromatická délková aberace
IQR	mezikvartilové rozpětí
α	alfa
β	beta
β_1, β_2	regresní koeficienty
y	nezávisle proměnná
x	závisle proměnná
e	hrubá chyba
3D	trojrozměrné zobrazení
H0	hypotéza nulová
H1	hypotéza alternativní

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Princip obrábění ultrazvukem [1].....	14
Obrázek 2 Princip a detail obrábění proudem brusiva [1]	15
Obrázek 3 Princip chemického obrábění [6]	15
Obrázek 4 Princip elektrochemického obrábění [1]	16
Obrázek 5 Schéma obrábění paprskem iontů [14].....	18
Obrázek 6 Schéma procesu obrábění vodním paprskem [1]	20
Obrázek 7 Uspořádání při obrábění vodním paprskem [1].....	21
Obrázek 8 Metody tvorby paprsku AWSJ [21]	23
Obrázek 9 Tvorba vodního paprsku při metodě IJM [22]	24
Obrázek 10 Zóny povrchu [42].....	26
Obrázek 11 Závislost parametrů na rychlosti posuvu [1]	27
Obrázek 12 Závislost parametrů na hloubce řezu [1]	27
Obrázek 13 Využití polotovaru metodou vystřihování a metodou řezání [24]	29
Obrázek 14 Fáze frézovacího cyklu [1].....	30
Obrázek 15 Tvar drsnost a vlnitost [27]	32
Obrázek 16 Charakteristika drsnosti a vlnitosti [28]	33
Obrázek 17 Profil povrchu [28]	33
Obrázek 18 Největší výška profilu Rz [28]	34
Obrázek 19 Schéma přístroje pro dotykové měření povrchu [30].....	37
Obrázek 20 Graf časové řady [36].....	39
Obrázek 21 Histogram	40
Obrázek 22 Boxplotový diagram [37]	40
Obrázek 23 Q-Q graf	41
Obrázek 24 Vztah mezi chybou 1. a 2. druhu [32]	42
Obrázek 25 Metoda nejmenších čtverců [39]	44
Obrázek 26 Williamsův graf [43]	44
Obrázek 27 Odrezování vzorků	47
Obrázek 28 Obrázek měření a měřené vzorky.....	48
Obrázek 29 Parametry měření	49
Obrázek 30 Hrubě nasnímaná data	49
Obrázek 31 Vyrovnaná data (Leveling).....	50
Obrázek 32 Odstranění tvaru	50
Obrázek 33 Graf rozřezání profilů.....	51
Obrázek 34 Sumarizace dat parametru Ra při rychlosti řezu 176 mm/min.....	52

Obrázek 35 Sumarizace dat parametru Ra při rychlosti řezu 320 mm/min.....	53
Obrázek 36 Grubbsův test odlehlých hodnot.....	54
Obrázek 37 Závislost Ra na řezu	55
Obrázek 38 Závislost Ra na Řezu s oblastí řezu.....	56
Obrázek 39 Grafy četností měřených parametrů u rychlosti řezu 320 mm/min.....	56
Obrázek 40 Drsnost vzorku u rychlosti řezu 320 mm/min.....	57
Obrázek 41 Grafy četností měřených parametrů u rychlosti řezu 176 mm/min.....	57
Obrázek 42 Kvadratická regrese v programu Minitab pro rychlost řezu 320 mm/min	58
Obrázek 43 Významnost parametrů QC Expert pro rychlost řezu 320 mm/min.....	59
Obrázek 44 Přímková regrese parametru Ra při rychlosti řezu 176 mm/min	60
Obrázek 45 Kvadratická regrese parametru Ra při rychlosti řezu 176 mm/min	61
Obrázek 46 Kubická regrese parametru Ra při rychlosti řezu 176 mm/min	62
Obrázek 47 Přímková regrese parametru Ra při rychlosti řezu 224 mm/min	63
Obrázek 48 Kvadratická regrese parametru Ra při rychlosti řezu 224 mm/min	64
Obrázek 49 Kubická regrese parametru Ra při rychlosti řezu 224 mm/min	65
Obrázek 50 Přímková regrese parametru Ra při rychlosti řezu 272 mm/min	66
Obrázek 51 Kvadratická regrese parametru Ra při rychlosti 272 mm/min	67
Obrázek 52 Kubická regrese parametru Ra při rychlosti řezu 272 mm/min	68
Obrázek 53 Přímková regrese pro parametr Ra při rychlosti 320 mm/min.....	69
Obrázek 54 Kvadratická regrese parametru Ra při rychlosti řezu 320 mm/min	70
Obrázek 55 Kubická regrese parametru Ra při rychlosti řezu 320 mm/min	71

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Stupně kvality řezu [41].....	28
Tabulka 2 Přehled možných výsledků testů [32].....	43
Tabulka 3 Hodnoty „p“ Anderson-Darlingova testu	53

SEZNAM PŘÍLOH

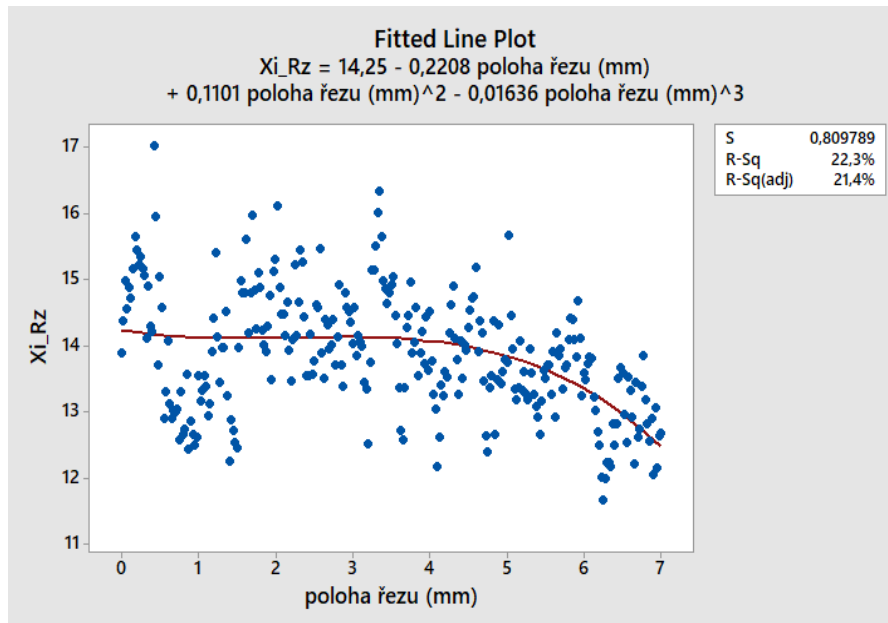
Příloha P I: Rychlost řezu 176 mm/min

Příloha P II: Rychlost řezu 224 mm/min

Příloha P III: Rychlost řezu 272 mm/min

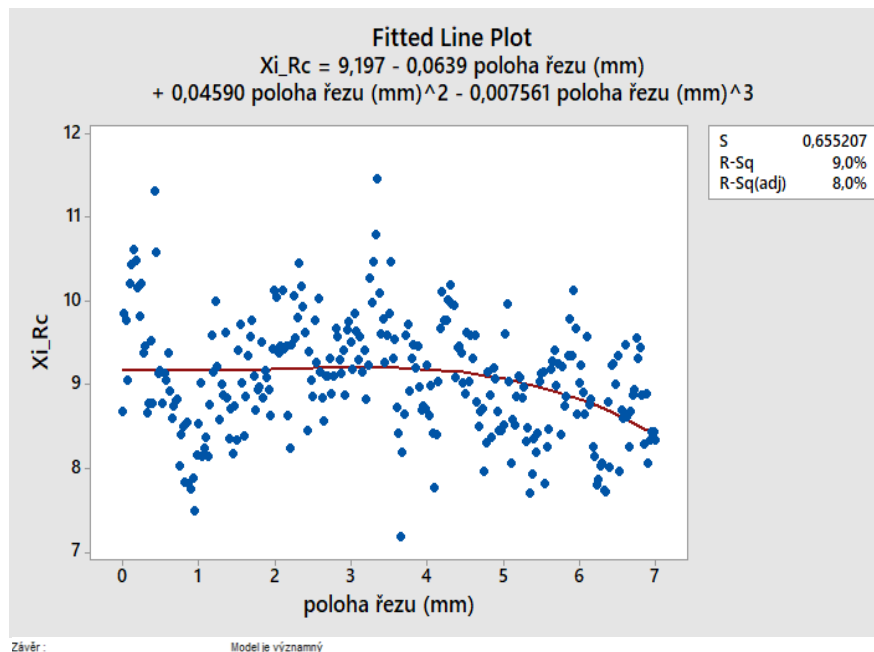
Příloha P IV: Rychlost řezu 320 mm/min

PŘÍLOHA P I: RYCHLOST ŘEZU 176 MM/MIN



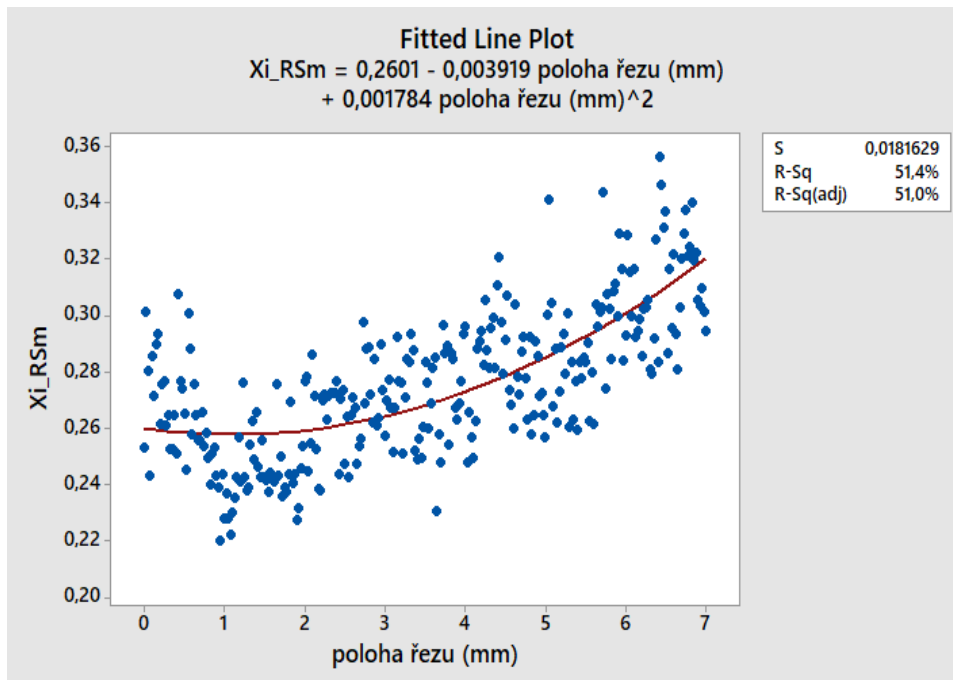
Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpodobnost	Spodní mez	Horní mez
Abs	14,25411022	0,1906814732	Významný	0	13,87874133	14,6294791
poloha řezu	-0,2208144278	0,2363280543	Nevýznamný	0,3509343017	-0,6860415749	0,2444127193
poloha řezu ^2	0,1100748184	0,07853189662	Nevýznamný	0,1621370514	-0,04452032832	0,2646699651
poloha řezu ^3	-0,01635577824	0,007373897455	Významný	0,02736161186	-0,03087177503	-0,001839781457



Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpodobnost	Spodní mez	Horní mez
Abs	9,196625924	0,1542819344	Významný	0	8,892911901	9,500339948
poloha řezu	-0,06394041332	0,1912149552	Nevýznamný	0,7383381504	-0,4403594905	0,3124786639
poloha řezu ^2	0,04589951008	0,06354079774	Nevýznamný	0,4706808357	-0,07918468337	0,1709837035
poloha řezu ^3	-0,007560523913	0,005966280542	Nevýznamný	0,2061449261	-0,01930553524	0,004184487419

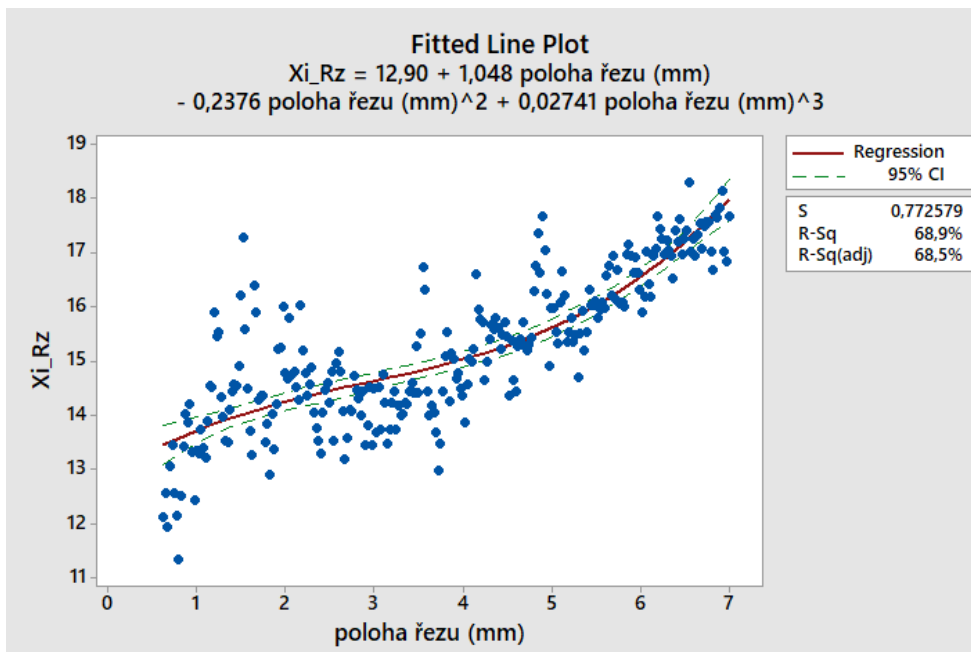


Závěr: Model je významný

Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr. Odch.	Závěr	Pravděpodobnost	Spodní mez	Horní mez
Abs	0,2600819175	0,003227516533	Významný	0	0,2537284415	0,2664353934
poloha řezu	-0,003919396547	0,002130085937	Nevýznamný	0,06683154841	-0,008112543083	0,0002737499893
poloha řezu ^2	0,001784069814	0,0002945698702	Významný	4,501051531E-009	0,001204199016	0,002363940611

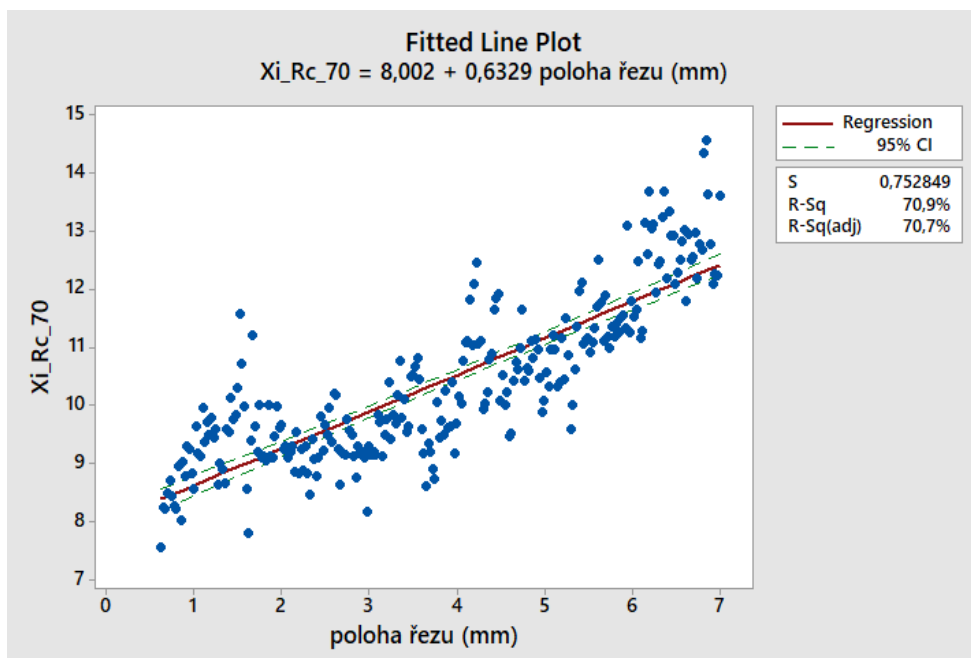
PŘÍLOHA P II: RYCHLOST ŘEZU 224 MM/MIN



Závěr: Model je významný

Odhady parametrů

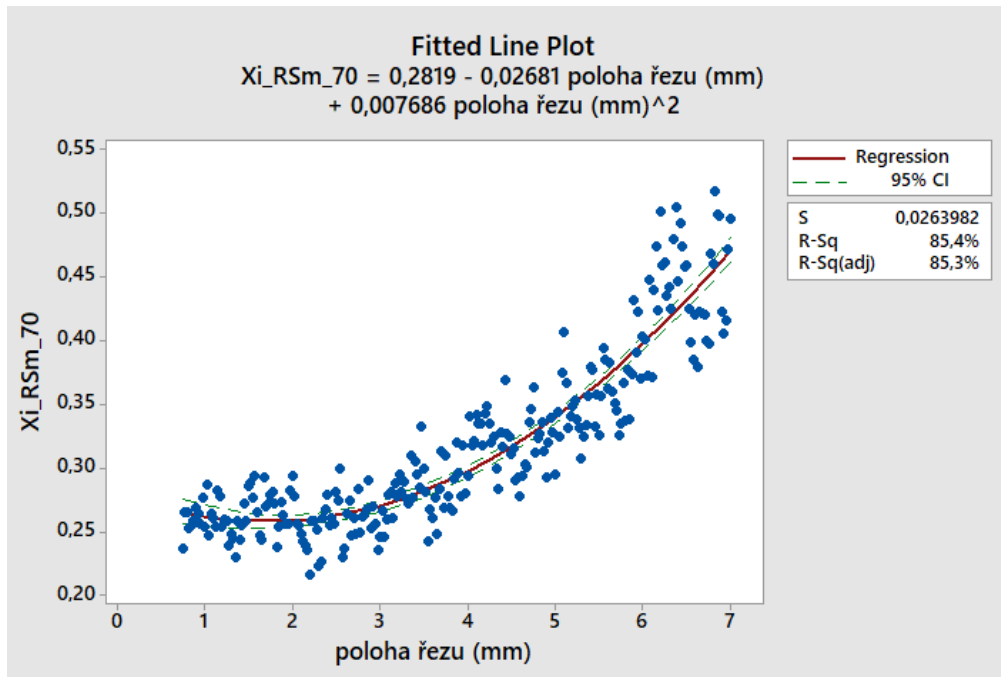
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpodobnost	Spodní mez	Horní mez
Abs	12,89679877	0,3747771401	Významný	0	12,15870429	13,63489328
poloha řezu	1,047807173	0,3854573965	Významný	0,007016484471	0,2886787551	1,80693559
poloha řezu ²	-0,2375898938	0,1126072075	Významný	0,03585308664	-0,4593610469	-0,01581874083
poloha řezu ³	0,02740925532	0,009747836179	Významný	0,005313574816	0,008211648737	0,04660686191



Závěr: Model je významný

Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpodobnost	Spodní mez	Horní mez
Abs	8,002120291	0,107898403	Významný	0	7,789630837	8,214609746
poloha řezu	0,6329434482	0,02546840183	Významný	0	0,5827873137	0,6830995826

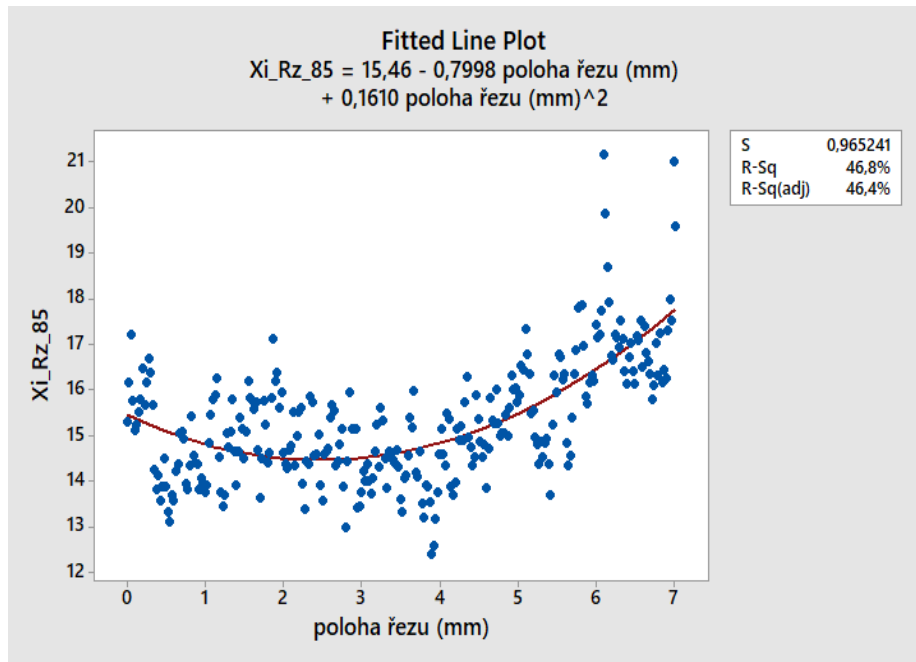


Závěr : Model je významný

Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr. Odch.	Závěr	Pravděpodobnost	Spodní mez	Horní mez
Abs	0,2819463325	0,007737402648	Významný	0	0,2667069326	0,2971857324
poloha řezu	-0,02680527194	0,004495240188	Významný	8,476363389E-009	-0,03565898757	-0,01795155631
poloha řezu^2	0,007686320754	0,0005677574734	Významný	0	0,006568079457	0,008804562051

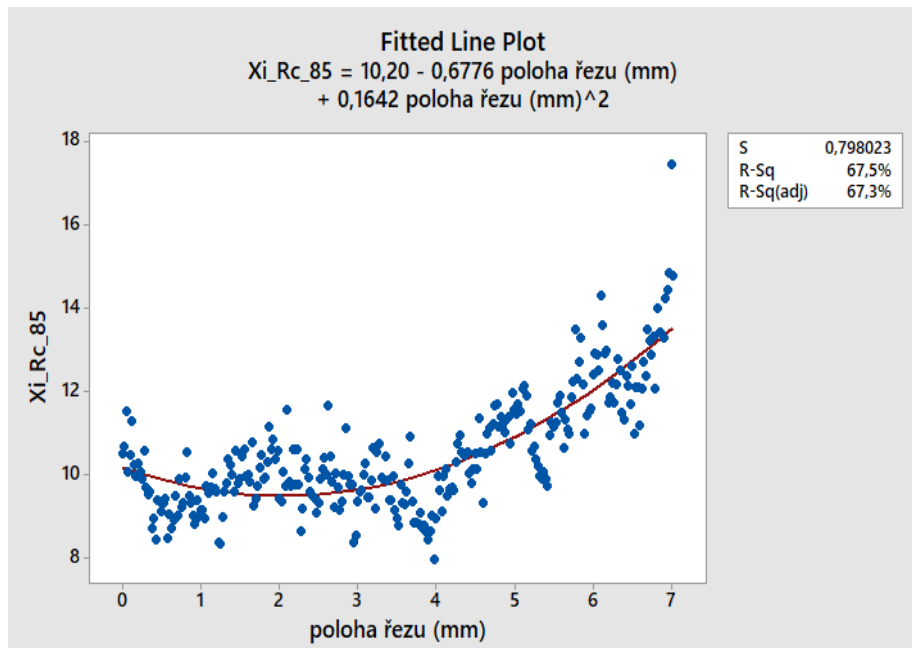
PŘÍLOHA P III: RYCHLOST ŘEZU 272 MM/MIN



Závěr : Model je významný

Odhady parametrů

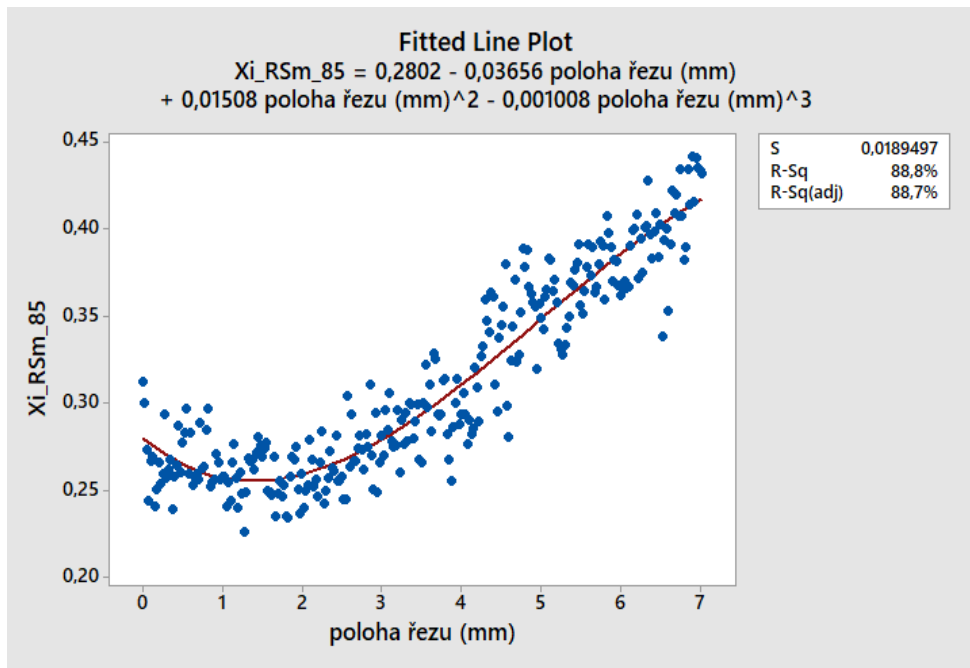
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpodobnost	Spodní mez	Horní mez
Abs	15,46231018	0,1712220522	Významný	0	15,12525904	15,79936133
poloha řezu	-0,7998024912	0,1126003424	Významný	1,017785858E-011	-1,021456617	-0,5781483651
poloha řezu^2	0,1610175973	0,01551611401	Významný	0	0,1304740784	0,1915611163



Závěr : Model je významný

Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpodobnost	Spodní mez	Horní mez
Abs	10,19812328	0,1415595351	Významný	0	9,919462895	10,47678367
poloha řezu	-0,6775575434	0,09309345334	Významný	3,447020447E-012	-0,8608122973	-0,4943027894
poloha řezu^2	0,1641817793	0,01282810162	Významný	0	0,1389296212	0,1894339375



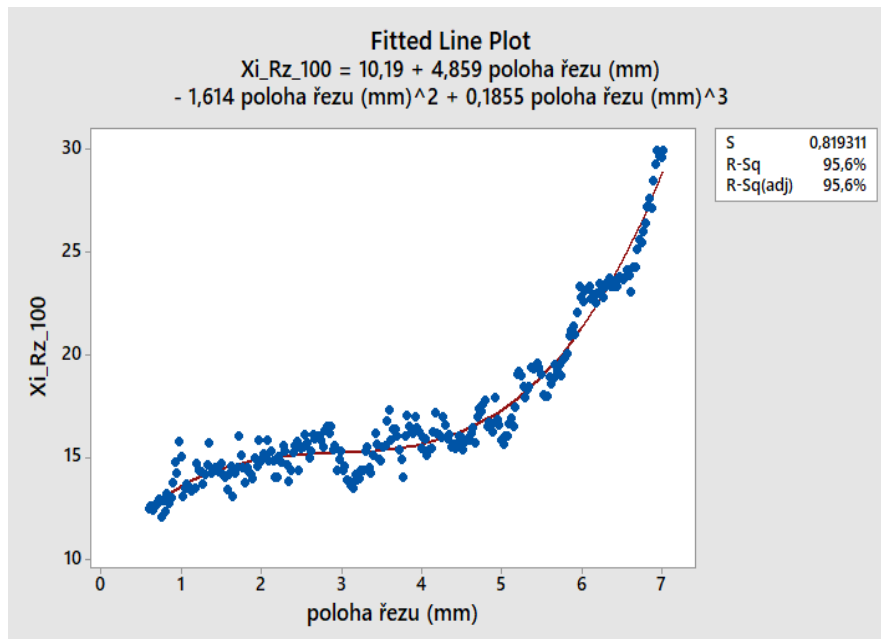
Závěr :

Model je významný

Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpodobnost	Spodní mez	Horní mez
Abs	0,2801855986	0,004454399133	Významný	0	0,2714169625	0,2889542346
poloha řezu	-0,03655908616	0,005501040859	Významný	1,587265874E-010	-0,04738807198	-0,02573010033
poloha řezu ²	0,01507729073	0,001821486043	Významný	5,329070518E-015	0,01149163357	0,01866294788
poloha řezu ³	-0,001008208369	0,0001704232	Významný	9,6754742E-009	-0,001343692229	-0,0006727245101

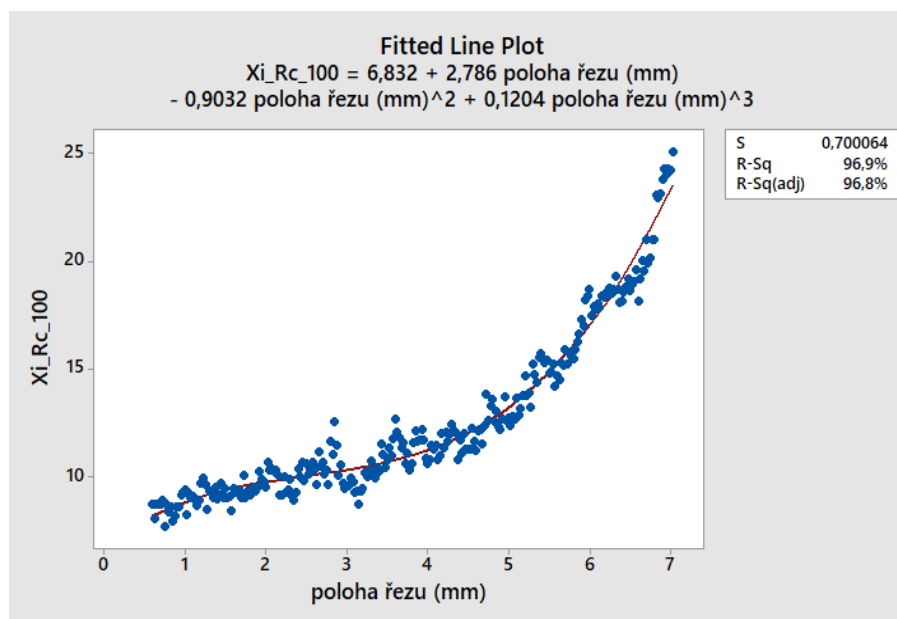
PŘÍLOHA P IV: RYCHLOST ŘEZU 320 MM/MIN



Závěr : Model je významný

Odhady parametrů

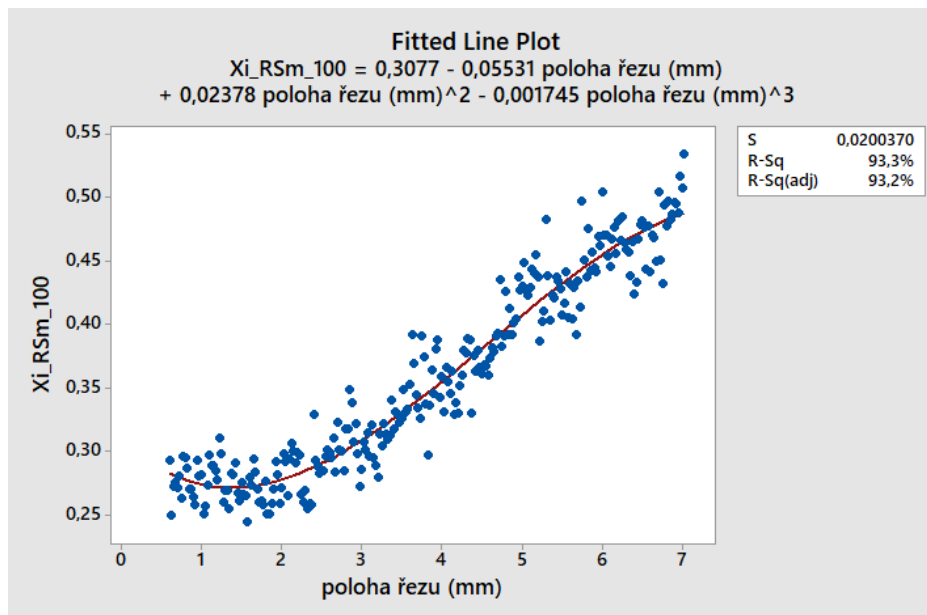
Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpodobnost	Spodní mez	Horní mez
Abs	10,18811414	0,3845408381	Významný	0	9,43081959	10,9454087
poloha řezu	4,858760885	0,3972053445	Významný	0	4,076525517	5,640996253
poloha řezu^2	-1,614406329	0,1162276447	Významný	0	-1,843298955	-1,385513703
poloha řezu^3	0,1854516989	0,01005968245	Významný	0	0,165640688	0,2052627098



Závěr : Model je významný

Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpodobnost	Spodní mez	Horní mez
Abs	6,831680919	0,3285728848	Významný	0	6,184806717	7,478755121
poloha řezu	2,785633739	0,339394137	Významný	1,132427485E-014	2,117248731	3,454018748
poloha řezu^2	-0,903244715	0,09931130517	Významný	0	-1,09882319	-0,7076662404
poloha řezu^3	0,1203540265	0,008595547095	Významný	0	0,1034264069	0,137281646



Závěr: Model je významný

Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpodobnost	Spodní mez	Horní mez
Abs	0,3077204236	0,009404289919	Významný	0	0,2892001083	0,3262407388
poloha řezu	-0,05530607492	0,009714011743	Významný	3,429224793E-008	-0,07443634006	-0,03617580979
poloha řezu^2	0,02377713277	0,002842450943	Významný	3,996802889E-015	0,018179359	0,02937490655
poloha řezu^3	-0,001745311139	0,0002460185263	Významný	1,291611262E-011	-0,002229807119	-0,00126081516