

# **Komparace charakteristik drsnosti povrchů vzniklých pomocí klasických obráběcích technologií**

Jan Zlámal

---

Bakalářská práce

2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Jan Zlámal
Osobní číslo:	T19745
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Komparace charakteristik drsnosti povrchů vzniklých pomocí klasických obráběcích technologií

## Zásady pro vypracování

- statistické nalezení a stanovení diferencí mezi vyhodnocováním povrchů ve shodě s ISO 4287, ISO 4288 a dále ISO 25 178.
- Provedení průzkumové analýzy obrobených povrchů s využitím bezkontaktního profilometru.
- Statistické vyhodnocení povrchových komparací naměřených dat dle odpovídajících softwarů.

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

**Seznam doporučené literatury:**

1. ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1999.
2. ČSN EN ISO 4288. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. 1999.
3. ČSN EN ISO 25178-2. Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 2012.
4. MELOUN, Milan. Kompendium statistického zpracování dat: metody a řešení úlohy včetně CD. Praha: Academia, 2002, 764 s. ISBN 80-200-1008-4

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

Datum zadání bakalářské práce: **3. ledna 2022**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

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

L.S.

**prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 24. února 2022

## PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

### Prohlašuji,

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

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá hodnocením kvality povrchu po obrábění vodním paprskem. V teoretické části jsou popsány metody obrábění, normy ČSN EN ISO 4287, ČSN EN ISO 4288 a chyby měření a měřících přístrojů. Praktická část se zabývá vyhodnocováním jakosti povrchů obrobků po obrábění vodním paprskem. Data byly získány za použití drsnoměru Taylor Hobson a vyhodnoceny pomocí programu Minitab.

Klíčová slova: drsnost povrchu, obrábění, vodní paprsek

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the evaluation of surface quality after waterjet machining. In the theoretical part, the machining methods, the standards EN ISO 4287, EN ISO 4288 and the measurement errors as well as the measuring instruments are described. The practical part deals with the evaluation of the surface quality of workpieces after waterjet machining. The data were collected using a Taylor Hobson roughness tester and evaluated using Minitab software.

Keywords: surface roughness, machining, waterjet

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce paní Ing. Mileně Kubišové, Ph.D. za její obětavý přístup, cenné připomínky, rady a čas strávený nad touto prací. Dále mé velké díky patří rodině za podporu při studiu.

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

# OBSAH

ÚVOD.....	9
<b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>10</b>
<b>1 OBRÁBĚNÍ.....</b>	<b>11</b>
1.1 KONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ .....	12
1.1.1 Soustružení .....	12
1.1.2 Frézování.....	13
1.1.3 Vrtání.....	15
1.1.4 Vyvrtávání.....	15
1.1.5 Broušení .....	16
1.2 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ .....	17
1.2.1 Elektroerozivní obrábění (EDM) .....	18
1.2.2 Elektrochemické obrábění.....	19
1.2.3 Vodní paprsek .....	19
1.2.4 Laserové obrábění .....	20
1.2.5 Plazmové obrábění .....	21
<b>2 DRSNOST POVRCHU .....</b>	<b>22</b>
2.1 KONTROLA DRSNOSTI.....	22
2.2 OBECNÉ TERMÍNY .....	22
2.3 MĚŘENÍ PARAMETRŮ DRSNOSTI .....	23
2.4 STATISTICKÁ MĚŘENÍ .....	23
2.5 VÝPOČET NEJISTOTY MĚŘENÍ .....	24
2.5.1 Nejistota typu A – standardní výpočet nejistoty .....	24
2.5.2 Nejistota typu B – standardní výpočet nejistoty.....	25
2.6 CHYBY MĚŘÍCÍCH PŘÍSTROJŮ.....	25
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>27</b>

<b>3</b>	<b>CÍL PRÁCE .....</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>VSTUPNÍ PARAMETRY .....</b>	<b>29</b>
4.1	ŘEZNÉ PODMÍNKY .....	29
<b>5</b>	<b>MĚŘICÍ PŘÍSTROJ .....</b>	<b>30</b>
<b>6</b>	<b>VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....</b>	<b>31</b>
6.1	1. VZOREK.....	31
6.2	2. VZOREK.....	33
6.3	3. VZOREK.....	35
6.4	4. VZOREK.....	37
<b>7</b>	<b>VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....</b>	<b>39</b>
7.1	SOUHRN NAMĚŘENÝCH PARAMETRŮ RZ.....	39
7.2	SOUHRN NAMĚŘENÝCH PARAMETRŮ RA .....	39
7.3	ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	40
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>41</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>42</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>44</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>45</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>47</b>



## ÚVOD

Obrábění je výroba materiálů do požadovaného tvaru a velikosti. Obvykle se obrábění týká zpracování kovů, ale lze jej použít i pro výrobu dřeva, plastů, keramiky, kamene a dalších materiálů. Pokud máte hrubé materiály, které chcete vytvarovat do určitého tvaru pro konkrétní účel, použijete obrábění k tomu, abyste z těchto surovin vytvořili hotový výrobek. Příkladem obráběných výrobků jsou matice a šrouby, automobilové díly, příruby, vrtáky, destičky a mnoho dalších nástrojů a předmětů souvisejících s nejrůznějšími průmyslovými odvětvími.

Drsnost povrchu hraje velmi důležitou roli při určování toho, jak výrobek reaguje s okolím. Povrchová úprava výrobku vypovídá o výkonnosti jeho součástí. Rovněž úroveň drsnosti může ovlivnit účinnost výrobku, to závisí na způsobu použití takového výrobku. Konstrukteři a výrobci musí neustále udržovat povrchovou úpravu. Pomáhá to vytvářet konzistentní procesy a spolehlivé výrobky. Měření povrchu také pomáhá udržovat kontrolu výroby, je proto velmi užitečné, kdykoli je třeba provést povrchové inženýrství.

Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí. První teoretická část se zabývá obráběním, základním rozdělení a jsou v ní popsány jednotlivé metody obrábění. V neposlední řadě je v teoretické části popsána drsnost povrchu, jakožto kvalitativní parametr dané metody obrábění.

Praktická část je věnována zkoumání jakosti povrchu vzorků obroběných metodou vodního paprsku. Jednotlivé vzorky mají jiný vstupní parametr. A na samotném závěru je zpracována statistika a následné vyhodnocení jakosti povrchu materiálu vzorků.

# **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 OBRÁBĚNÍ

Obrábění je proces, při kterém se z kovového nebo nekovového surového materiálu (obrobku) vytvoří díl (výrobek) nebo se zlepší tolerance a povrchová úprava dříve vytvarovaného obrobku odebráním části surového materiálu. Může se jednat o mechanicky (soustružení, vrtání, frézování, broušení, obrábění vodním paprskem, obrábění ultrazvukem atd.), chemicky (chemické obrábění, elektrochemické obrábění atd.), elektricky (elektroerozivní obrábění) nebo tepelně (obrábění laserem, obrábění elektronovým paprskem atd.). Řezání kovů je proces, při kterém se přebytečný materiál odstraňuje tvrdším nástrojem, mechanickým procesem rozsáhlé plastické deformace nebo řízeného lomu. Řezání kovů je podle této definice podmnožinou obrábění. V širším slova smyslu definuje norma DIN 69651 obráběcí stroje jako "stroje opatřené zdrojem energie, z větší části nepřenosné, které se používají k různým druhům obrábění, jako jsou například výrobní postupy za pomoci fyzikálních, chemických nebo jiných procesů. [1]

Obráběcí stroje navzájem spojují působící nástroj a obrobek takovým způsobem, že po definovaných relativních pohybech mezi nimi vzniká geometricky definovatelný tvar obrobku, který (hotová součástka) vznikne na konci výrobního procesu." Podle této definice je obráběcí stroj výrobním nástrojem, který je ve formě stroje. Může provádět jeden nebo kombinaci procesů, jako je řezání, odlévání, tváření nebo spojování. Na opačné straně se běžně používá termín obráběcí stroj k označení hardwarového systému (zařízení), který provádí pouze obrábění. Obrábění je páteří technologií pro velké množství výrobních systémů. Může se používat buď v primárním výrobním procesu, nebo tvořit důležitou součást přípravy nástrojů pro jiné procesy, jako je tváření nebo lisování. Obrábění a obráběcí stroje jsou důležité oproti jiným výrobním procesům, protože obrábění je velmi přesné. [2]

Lze jím vytvářet geometrické konfigurace, tolerance a povrchové úpravy, které jsou často nedosažitelné jinými technikami (např. odléváním, tvářením nebo spojováním). Například obecně dosažitelný aritmetický průměr drsnost povrchu je 10-20  $\mu\text{m}$  při odlévání do písku, 2-5  $\mu\text{m}$  při tlakovém lití, 5-10  $\mu\text{m}$  při odlévání pod tlakem, 0,5-1  $\mu\text{m}$  při soustružení. Při přesném obrábění (superfinišování, lapování, diamantové soustružení atd.) může být 0,01  $\mu\text{m}$  nebo lepší. Dosažitelná rozměrová přesnost při odlévání je 0,8-2 % v závislosti na koeficientu tepelné roztažnosti. Při tváření kovů je to 0,05-0,3 % v závislosti na mezi kluzu a pevnosti tuhosti; při obrábění může být nekonečně přesná, protože přesnost rozměrů je nezávislá na velikosti obrobku.

Obrábění je velmi flexibilní. Při obrábění je tvar konečného výrobku naprogramovaný, proto lze na stejném stroji vyrobit mnoho různých součástí a obrábět lze téměř libovolný tvar. Skutečnost, že výrobek je vytvářen dráhou, nikoli tvarem nástroje, činí tento proces extrémně flexibilním, agilním a ekonomicky výhodným pro výrobu prototypů a malých sérií. Řezné nástroje lze sériově vyrábět ve standardizovaných tvarech. Naopak procesy odlévání, lisování a tváření vyžadují jeden vyhrazený nástroj pro každý výrobek, což je činí mnohem méně flexibilními. [1,3]

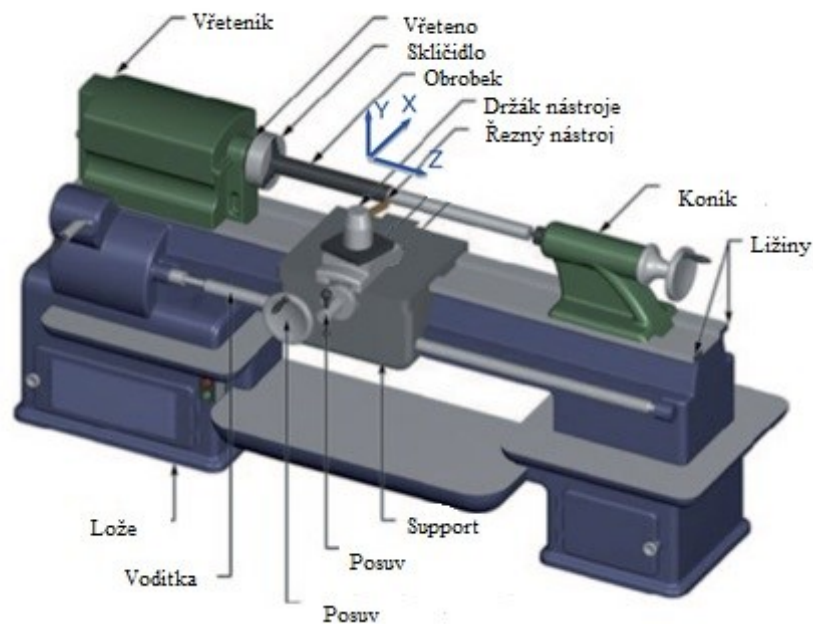
## **1.1 Konvenční metody obrábění**

- Soustružení
- Frézování
- Vrtání
- Vyvrtávání
- Broušení
- Hoblování

### **1.1.1 Soustružení**

Jeden z nejčastěji používaných obráběcích procesů, soustružení, je definován jako ubírací proces, při kterém je z rotujícího obrobku odebírán dodatečný materiál ve formě třísky pomocí jednobodového řezného nástroje.

V soustružení ovlivňují řezné podmínky (například řezná rychlost, posuv, hloubka řezu, stav nástroje a materiál obrobku) účinnost obrábění a výkonnostní charakteristiky. Je třeba zvolit nejvhodnější nastavení obrábění, aby se zvýšila účinnost obrábění, nízké náklady na proces a vysoká kvalita výrobků. Čistší výroba se stala cílem v rámci současných výrobních odvětví. [4]



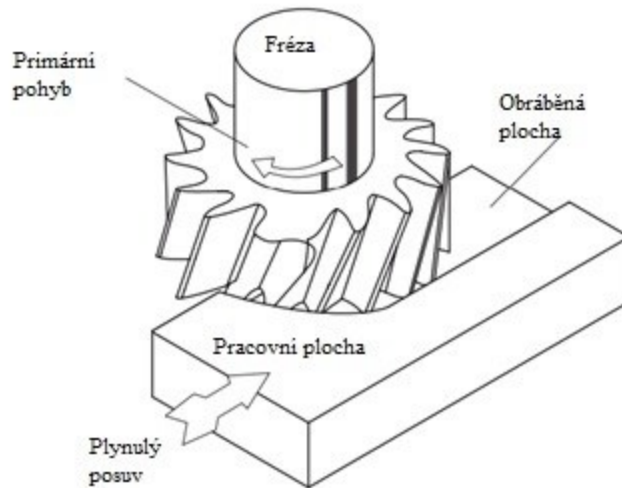
Obrázek 1 Soustruh [1]

Běžný soustruh se skládá z vodorovného lože nesoucího vřeteník, koníka a vozíku. Obrobek je na jednom konci upnut do sklíčidla upevněného na lůžku. na konci hlavního vřetena stroje a na druhém konci je podepřen středícím sklíčidlem. namontovaným v koníku. Koník může být upnut v různých polohách podél konstrukce lůžka, aby bylo možné umístit obrobky různých délek. Krátký obrobek potřebuje pouze být upnut sklíčidlem na jednom konci, protože má větší radiální tuhost. S velmi dlouhým obrobkem se často používá stabilní opěrka mezi hlavou a koníkem, aby se minimalizoval průhyb. Dalším složitějším typem je revolverový soustruh. Revolverový soustruh má čtyři strany, z nichž každá má nástroj. Během soustružení obsluha otáčí revolverem tak, aby bylo možné provést více operací v rámci jednoho nastavení. Revolver může být na boku, např. vnějšího průměru, nebo na konci obrobku pro práci s vnitřním průměrem. a nahradí tak koník. Primární pohyb, tedy otáčení obrobku, je zajištěn pohybem vřeteníku, řady ozubených kol pohánějících hlavní vřeteno. Hlavní vřeteno a ozubená kola jsou uloženy v hlavním vřeteníku. [1]

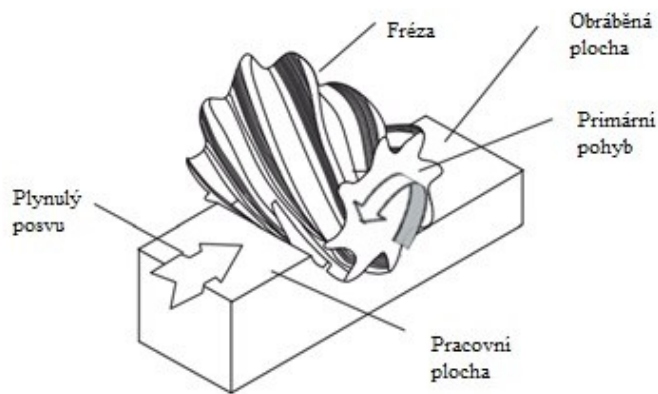
### 1.1.2 Frézování

Při frézování je obrobek v klidu a nástroj se otáčí. Při tomto obrábění rotující nástroj s několika řeznými hranami pracuje napříč obrobkem a vytváří rovinný obráběcí proces nebo rovný povrch. Směr posuvu je kolmý na osu otáčení nástroje. Zde existují dvě základní formy frézování, čelní (vertikální) frézování a obvodové (horizontální) frézování. Ve všech těchto případech se rychlost posuvu pohybuje v rozmezí. Frézka je obráběcí stroj, pro

frézování a obecně se dělí na horizontální nebo vertikální, a to v závislosti podle toho, jakým způsobem je vřeteno namontováno, na jakém typu se používají závěsy a co se musí se musí s obrobkem provést. U svislých strojů je obrobek upevněn na vodorovného stolu, a proto je stabilnější než na vodorovných strojích.



Obrázek 2 Čelní frézování [1]



Obrázek 3 Frézování obvodové [1]

Náklady na provoz mohou být nižší, protože na pohyb osy je zapotřebí méně energie na rovině stolu. Upevnění většího obrobku je jednodušší a je snazší dosáhnout přesnosti díky pevně namontovanému obrobku. Je to také lepší pro obrobky typu deska. U horizontálního stroje mohou být náklady na řezání vyšší, protože obrobek je připevněn ke svislému upínacímu přípravku. Odstraňování třísek je však snazší a obvykle je snazší pracovat na větších složitých dílech. Je zde také menší omezení svislé výšky obrobku.

Existují také "univerzální" stroje s hlavami, které lze otáčet, takže obrábění probíhá buď horizontálně, nebo vertikálně. To poskytuje univerzálnost stroje, ale zvyšuje náklady a je dalším zdrojem chyb v polohování hlavy. [1]

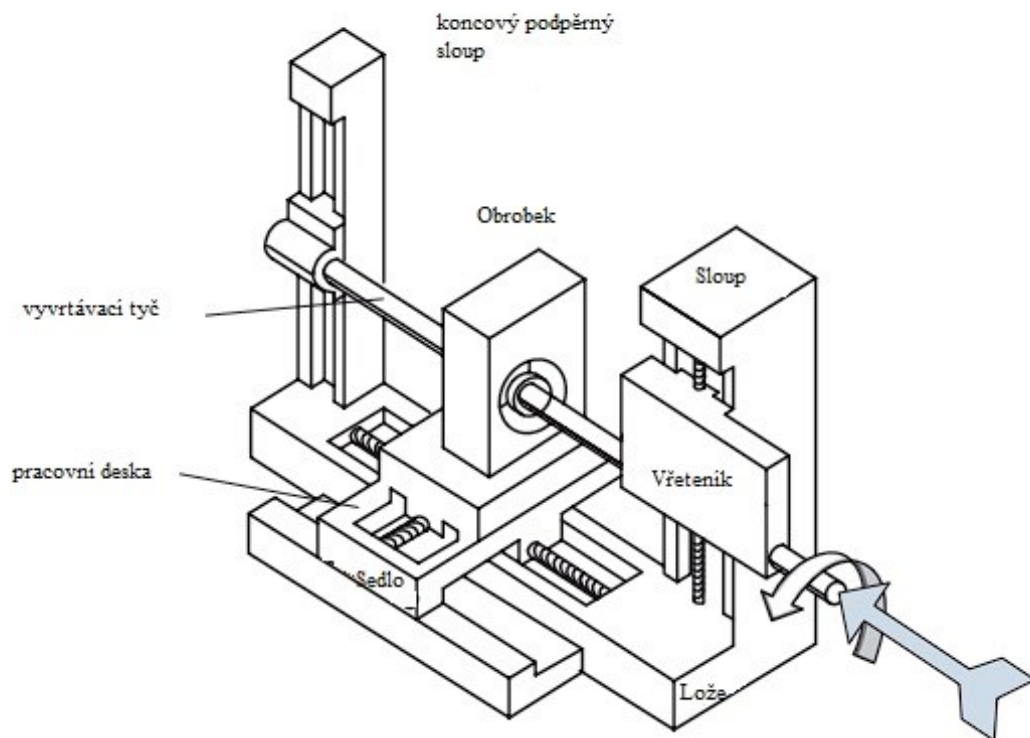
Nástroje pro frézovací operace mohou být také celistvé, s povlakem nebo bez povlaku, nebo mohou mít nástrojové destičky podél řezné hrany. Tyto destičky jsou často povlakované. Tyto povlakované nástroje jsou považovány za nezbytnost u většiny obrábění. Přispívají k celkové produktivitě procesu, zvyšují životnost nástroje a výrobní kvality obráběných kusů a také většího ubírání třísky. Kromě toho jsou povlakované nástroje také nutností při obrábění materiálů, které mají nízkou obrobiteľnosť. Vývoj nových a lepších strojů pro frézování doprovází také vývoj fréz. Od celistvých nástrojů s různou geometrií a více řeznými hranami až po nejnovější frézovací nástroje s povlakovanými destičkami a mazacími kanálky, které umožňují účinnější vedení maziva do řezné plochy a také zlepšují drsnost a obrobiteľnosť. [5]

### **1.1.3 Vrtání**

Při vrtání materiál obrobku odebírá mechanickými silami pomocí nástroje známého jako vrták. Otvory zhotovené vrtáním se často používají pro mechanické spojovací prvky, jako jsou šrouby nebo nýty. Vrtání je přípravným krokem pro procesy, jako je závitování, vyvrtávání nebo vystružování, a je to proces obrábění, který se nejčastěji používá u kompozitních materiálů. Bez ohledu na materiály a techniky jsou důležité parametry procesu, jako jsou otáčky vřetena a posuv, které významně ovlivňují efektivitu vrtání. Pokud jde o rychlost úběru materiálu, přítláčnou sílu a krouticí moment tak se ukázalo, že přítláčná síla a krouticí moment určují konečný výsledek vrtání. Kombinace vysoké přítláčné síly a krouticího moment mají za následek špatnou kvalitu otvoru a zhoršení životnosti nástroje. [6]

### **1.1.4 Vyvrtávání**

Tato metoda je nezbytná především pro těžké a nepravidelné obrobky, u kterých je vnitřní otvor, který musí být obroben. Hlavní vlastností stroje je, že obrobek zůstává během obrábění nehybný a všechny generující pohyby působí na nástroj. [1]



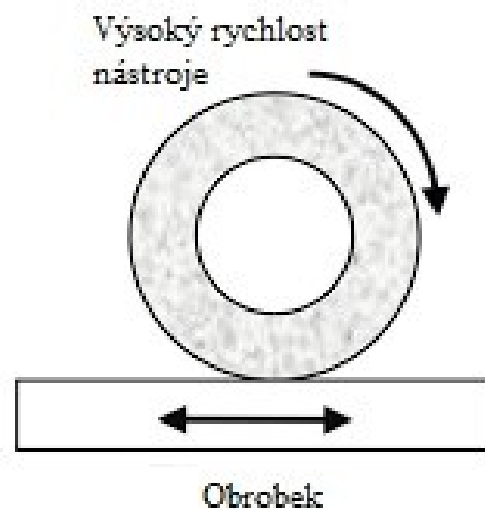
Obrázek 4 Vyvrtávačka [1]

### 1.1.5 Broušení

Broušení je termín používaný v moderní výrobní praxi pro obrábění pomocí vysokorychlostních brusných kotoučů, podložek a pásů. Brusné kotouče se vyrábějí v široké škále tvarů, velikostí a typů brusiva. Důležité typy kotoučů a brusiva jsou popsány v následujících kapitolách. Broušení je a abrazivní proces obrábění. Technologie abrazivního obrábění zahrnuje také leštění, lapování, honování a související procesy superfinišování. Některé oblasti technologie broušení se s touto rozšířenou škálou procesů překrývají. Rozdíl mezi broušením a ostatními procesy může být čistě kinematický, v některých případech zahrnující například velmi nízké rychlosti brusiva jako při lapování. Dva hlavní rozdíly mezi broušením a (soustružení, frézování a vrtání) jsou velikost vznikajících třísek a jejich množství potřebné síly/energie. Vzhledem k velkému počtu řezných hran při broušení jsou vzniklé třísky obvykle poměrně malé. Při broušení je obtížné odhadnout tloušťku nedeformované třísky, protože jednotlivá zrna v jsou nepravidelná. Jako orientační hodnota se uvádí tloušťka třísky 0,00025-0,025 mm. Menší zrna, vyšší řezná rychlost, nižší posuv



nebo rychlost posuvu a menší hloubka řezu, to vše má za následek menší tloušťku třísky. Broušení se také hojně používá k opracování tvrdých a křehkých materiálů, jako jsou nástrojové materiály, keramické součásti nebo sklo/optické výrobky. Důvodem je malá tloušťka vytvářené třísky, která omezuje míru poškození povrchu dílů způsobené křehkým lomem. [7]

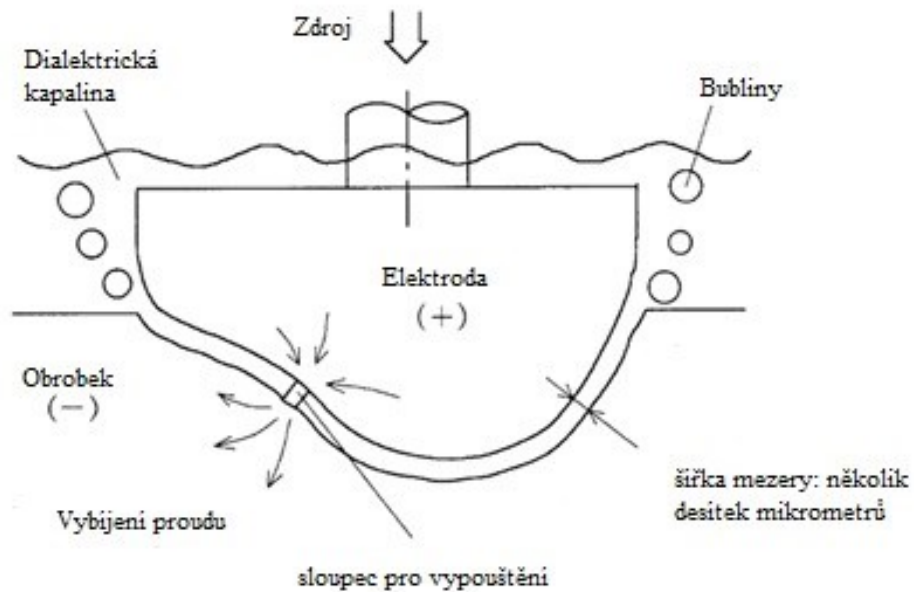


Obrázek 5 Broušení [7]

## 1.2 Nekonvenční metody obrábění

- Elektroerozivní obrábění
- Elektrochemické obrábění
- Vodní paprsek
- Laserové obrábění
- Plazmové obrábění

### 1.2.1 Elektroerozivní obrábění (EDM)



Obrázek 6 Princip EDM [9]

Pulzní obloukové výboje se generují pomocí šířky mezer mezi elektrodami v rozmezí mikrometrů až desítek mikrometrů v lázni s dielektrikem jako je olej nebo deionizovaná voda. Místo výboje je pro každý impuls pouze jedno, protože jakmile dojde k průrazu dielektrika v daném místě, teplota v oblouku stoupne až na 7000 K plazmatu. Protože se ionizace v plazmovém kanálu urychluje se zvyšující se teplotou, zvyšuje se elektrická vodivost, což má za následek koncentraci elektrického proudu v místě výboje. Takto vzniklé tepelné toky z obloukového sloupce přesahují  $10^9 \text{ W/m}^2$  na anodě a katodě, čímž se vytváří minutový výboj na obou površích v důsledku tavení a odpařování elektrody materiálů. Odstraněné materiály se ochladí a zpevní v dielektrické kapalině, přičemž se vytvoří kulovité částice úlomků, které jsou z mezery odplavovány dielektrickou kapalinou.

Protože elektroerozivní obrábění je tepelný proces, lze i tvrdé materiály, jako je kalená ocel a elektricky vodivá keramika obrábět. EDM umožňuje také obrábění složitých tvarů. Protože nástrojová elektroda se nemusí při úběru materiálu otáčet jako při frézování nebo broušení, mohou se otvory s ostrými rohy a nepravidelnými konturami obrábět bez obtíží. Reakční síly vznikající v EDM mezeře jsou zanedbatelné, což rovněž usnadňuje obrábění tenkých a pružných dílů, hlubokých drážek a otvorů a mikro obrobků, které se obtížně obrábějí frézováním. Obecně je přesnost obrábění elektroerozivním obráběním velmi vysoká, řádově v mikrometrech a dosažitelná drsnost povrchu je  $R_z 0,4 \mu\text{m}$ . Na druhou stranu rychlost úběru

materiálu při EDM je ve srovnání s jinými obráběcími procesy nízká. Proto se elektroerozivní obrábění přednostně používá při výrobě zápustek a forem, vrtání trysek palivových motorů a při výrobě leteckých motorů, kde se používají složité tvary z tvrdých materiálů a potřebují vysokou přesnost na obrábění. [8]

### **1.2.2 Elektrochemické obrábění**

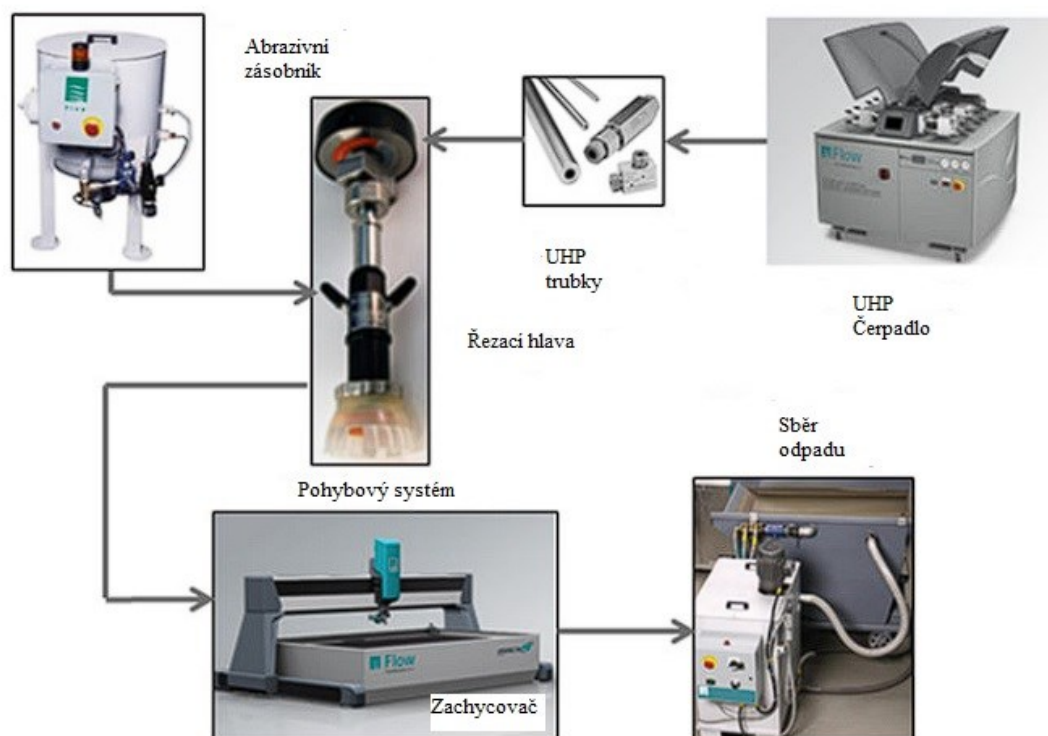
Elektrochemické obrábění (ECM) využívá elektrolytický proces k rozpouštění materiálu. Obrobek je anoda a nástrojová elektroda je katoda. Pomocí stejnosměrného proudu (DC) o vysoké intenzitě a nízkém napětí se obrobek v anodě rozpouští na kovové ionty a odstraňuje atom po atomu. Elektrolýza je chemický proces, při kterém elektrický proud prochází mezi dvěma železnými vodiči ponořenými do kapalného roztoku. Když se na oba vodiče nebo elektrody přiloží rozdíl elektrických potenciálů, dochází k rozpouštění železa. [9]

### **1.2.3 Vodní paprsek**

Vodní paprsek je metoda spočívající v řezání materiálu (nebo se vodní paprsek může používat k jeho čištění) pomocí tenkých vodních paprsků pod vysokým tlakem s přídavkem abrazivní suspenze, která se používá k řezání cílového materiálu pomocí eroze. Technika s využitím vysokotlaké vody k řezání materiálů byla poprvé patentována v roce 1968 výzkumníkem v USA, ale rychlý rozvoj metody řezání vodním paprskem začal až počátkem 80. let. Dnes se jedná o rychle se rozvíjející technologii, která se používá v průmyslu pro zpracování různých technických materiálů. Jedná se o nově se rozvíjející technologii, která má oproti ostatním nekonvenčním technikám řezání mnoho výhod. Proces řezání lze stručně popsat následovně. Voda přiváděná čerpadlem pod tlakem prochází sací tryskou a vstupuje do směšovací komory spolu s abrazivem. Poté je směs vody a abraziva vedena do směšovací trysky. Výsledkem je proud hydroabraziva, který má dostatečnou sílu, aby prořízl i ty nejtvrděší materiály. Vodní paprsek můžeme použít v mnoha oblastech moderního průmyslu, například v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu, stavebnictví, technice ochrany životního prostředí, chemickém procesním inženýrství a průmyslové údržbě. Typické stroje na řezání vodním paprskem mají pracovní prostor od několika čtverečních metrů až po stovky čtverečních metrů. V tuto chvíli jsou k dispozici vysokotlaká vodní čerpadla s tlakem od 200 MPa do 700 MPa. [10]

Níže je uveden seznam aplikací, ve kterých se vodní paprsky používají. Zatímco některé z těchto aplikací se dnes používají komerčně, jiné aplikace teprve vznikají:

- Řezání: Vodní paprsek se používá k řezání tvarů nebo dělení materiálů.
- Vrtání (prorážení): Tryska se používá k vrtání otvoru bez trepanace.
- Soustružení: Tryska se používá k vytvoření otáčivé plochy.
- Frézování: Tryska se používá k odebrání materiálu do určité hloubky.
- Fragmentace: Tryska se používá k fragmentaci obrobku.
- Asistence trysky: Tryska se používá k asistenci při jiných procesech úběru materiálu, jako je např. chlazení, mazání, odstraňování úlomků a vedení laserového paprsku.
- Modifikace povrchu: Tryska se používá k úpravě povrchu, například k čištění, odstraňování rzi a dalších nečistot, odstraňování nátěrů nebo leštění.
- Ostatní: Odstraňování ořepů, odlupování a výroba prášku. [11]



Obrázek 7 Schéma vodního paprsku [11]

#### 1.2.4 Laserové obrábění

Lasery jsou pokročilé technologické nástroje, které se běžně používají ve výzkumu a průmyslových procesech, jako je řezání, vrtání, svařování a texturování materiálů, a to především díky své jedinečné flexibilitě a vysoké opakovatelnosti. Toto znamená, že laserové systémy mohou zpracovávat téměř všechny typy materiálů se složitou geometrií

(3D díly), při vysokých rychlostech a se zanedbatelným rizikem znečištění materiálu, zatímco parametry zpracování jsou přesně kontrolovány. V závislosti na řezacím zařízení se provádí třemi způsoby: vypalováním, tavením nebo sublimací. Vytvoření laserového paprsku zpravidla zahrnuje stimulaci lasujícího materiálu elektrickými výboji nebo lampami v uzavřené nádobě. Paprsek se odráží dovnitř přes částečné zrcadlo, dokud nedosáhne dostatečné energie, aby unikl jako monochromatické koherentní světlo. Obecně má nejužší část zaostřeného paprsku průměr menší než 0,32 mm. S ohledem na tloušťku materiálu je samozřejmě možná šířka mezery až 0,10 mm. [8,9]

### **1.2.5 Plazmové obrábění**

Proces řezání plazmovým obloukem (PAC) odděluje kov pomocí zúženého oblouku, který roztaví omezenou část obrobku. Odstraňování roztaveného materiálu pomocí vysokorychlostního proudu ionizovaného plynu vycházejícího z oblouku zúženého otvoru. PAC se používá k řezání vodivého materiálu pomocí vysoko proudého oblouku. (proud v rozmezí ~30 až 1000 A), který dopadá mezi katodu (umístěnou v PAC hořáku) a obrobkem. Schopnost systému PAC řezat je založena na výkonu (až na úrovni megawattů), vysoce koncentrovaném, téměř sonickém proudu plazmatu, stejný proud vlivem aerodynamického odporu odstraňuje taveninu. Na rozdíl od laseru, který je schopen řezat jakýkoliv materiál, dokonce i elektricky nevodivý, dokáže plazma řezat pouze elektricky vodivé kovy. Při PAC se používají dva plyny-plazmový plyn a ochranný plyn. Plazmový plyn se používá k vytvoření proudového řezného paprsku, hlavního nástroje PAC. Druhy plazmového plynu závisí na typu řezaného kovu. V případě, že se jedná o vzduch nebo kyslík při řezání měkké oceli. Pro řezání nerezové oceli se používá směs argonu a vodíku a dusík v případě řezání hliníku. Ochranný plyn chrání hořák před horkým plynem.[8]

## 2 DRSNOST POVRCHU

### 2.1 Kontrola drsnosti

Drsnost povrchu je důležitá při řešení otázek, jako je tření, mazání, opotřebení, únava a koroze, a kontrola drsnosti povrchu je nezbytná pro požadovaný výkon mechanických součástí. Drsnost povrchu obráběných se tradičně měří pomocí dotykových profilometrů s vysokou spolehlivostí. Sonda s čidlem se pohybuje nahoru a dolů. Omezením měřicího přístroje je jeho neschopnost dosáhnout dna údolí povrchu kvůli poloměru hrotu.

V průběhu let se charakterizace a hodnocení textury strojírenského povrchu představuje náročný metrologický problém, který dosud zůstal otevřený, zejména v případech, kdy existují požadavky na vysokou přesnost a/nebo funkční výkon. Tato skutečnost se přičítá obvykle komplikované podobě povrchových textur a jejich potřebě získat uspokojivý popis v globálním měřítku i na různých úrovních. Tradičně se povrchová textura používala spíše jako ukazatel odchylky procesu v důsledku opotřebení nástroje, vibrační obráběcího stroje, poškozených prvků stroje, než jako měřítko účinnosti součásti; za standard se považoval stabilní technologický proces v kombinaci se specifikací aritmetického průměru  $R_a$  v průmyslové praxi za dostačující.

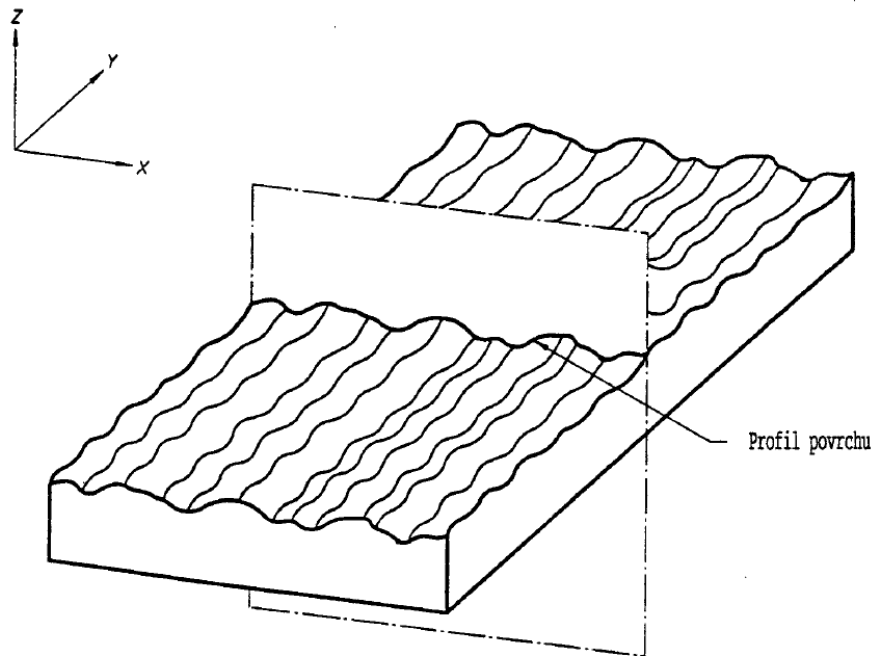
Pokud vidíme u některé plochy rozdílnou strukturu plochy již při vizuální zkoušce, hodnoty parametrů, které jsou určeny pro každou jednotlivou plochu, budou pro porovnání s požadavky specifikovanými na výkresu, nebo ve výrobní dokumentaci použity odděleně.

Struktura jednotlivých výrobků po obrábění se může zdát jako homogenní, nebo mohou mít plochy zcela odlišnou strukturu. To může být zjištěno vizuální zkouškou povrchu. V situacích, kdy se struktura povrchu jeví jako homogenní, hodnoty parametrů určené z celého povrchu se budou porovnávat s předpisy na výkresu. [12,13]

### 2.2 Obecné termíny

- Filtr profilu – filtr dělicí profily na dlouhovlnné a krátkovlnné prvky.
- $\lambda_s$  filtr profilu – filtr určuje rozmezí mezi drsností a krátkými prvky vln na povrchu.
- $\lambda_c$  filtr profilu – filtr určuje rozmezí prvků vln a drsnosti.
- $\lambda_f$  filtr profilu – filtr určuje rozmezí mezi vlnitostí a dlouhými prvky vln na povrchu.
- Souřadnicový systém – měřítko struktury povrchu.

- Skutečný povrch – hladina omezující těleso a odtrhující ho od okolního prostředí.
- Profil povrchu – profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny.
- Základní profil – základní profil je základ pro vyhodnocení parametru základního profilu.
- Profil drsnosti – profil se odvozuje ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru profilu  $\lambda_c$ . [13]



Obrázek 8 – Profil povrchu

### 2.3 Měření parametrů drsnosti

Pokud není určen směr měření, obrobek je nastaven tak, že směr řezu odpovídá největším hodnotám parametrů drsnosti ( $R_a$ ,  $R_z$ ). Směr je kolmý k povrchu. Pro izotropní povrchy se volí směr řezu libovolný. Měření provádíme tam, kde lze očekávat kritické hodnoty, které mohou být posouzeny vizuálním porovnáním. Rovnoměrné rozdělení povrchu vede k získání nezávislých výsledků. Pro určení je také potřeba zjistit, zda povrch je periodický nebo neperiodický. [14]

### 2.4 Statistická měření

Za účelem vyhodnocení zkušebních údajů z inspekčního postupu a určení, zda byla zavedena adekvátní řízení výrobního procesu, se používají statistická měření. Pokud metrologický

proces není ovlivněn systematickým, resp. náhodnými chybami, pak se má za to, že se proces chová běžně, jakákoli výroba a výstupní údaje výrobního procesu jsou platné. K definování toho, zda je výrobní/metrologický proces v pořádku, jsou zapotřebí pouze dva statisticky odvozené matematické výrazy, zdali se proces chová správně, a to jsou aritmetický průměr a jeho doprovodná hodnota. Směrodatná odchylka – spolu s jejich příslušnými hodnotami v grafu se aritmetický průměr vždy zkracuje na pouhý průměr, a to se označuje symbolem " $\bar{x}$ ". Tato hodnota " $\bar{x}$ " je průměrem všech hodnot " $x$ " a lze ji odvodit z následujícího výrazu (níže), ale viz také odvozený výraz " $\bar{x}$ ".[15]

$$\bar{x} = \frac{\sum(x_1 \dots x_n)}{n} \quad (1)$$

$$\text{Derivace } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

## 2.5 Výpočet nejistoty měření

Před výpočtem nejistoty měření je třeba nejprve zdroje jednoznačně identifikovat. Jakmile je tento úkol splněn, je možné odhadnout velikost nejistoty z každého zdroje. Nakonec je třeba každou z jednotlivých a přispívajících nejistot zkombinovat tak, aby se získal celkový údaj o celé nejistotě. Zde se k odhadu těchto nejistot používají dvě metody, které se označují jako buď nejistota typu A, nebo typu B a v mnoha případech se používá vyhodnocení nejistot obou typů, přičemž jejich identifikace se provádí podle následující klasifikace:

1. Nejistota typu A – jedná se o odhady nejistot pomocí statistických technik, obvykle z opakovaných měření.
2. Nejistota B – jedná se o odhady nejistoty získané z jakýchkoli relevantních informací, jako jsou kalibrační certifikáty, specifikace výrobce, publikované informace, minulé zkušenosti.

Je svádějíci se domnívat, že nejistoty typu A vznikají náhodnými procesy a že nejistoty typu B jsou důsledkem systematických faktorů, ale tato logika je poněkud odlišná.

### 2.5.1 Nejistota typu A – standardní výpočet nejistoty

Po získání série naměřených hodnot pro Nejistotu typu A, hodnota " $x$ " (střední hodnota) a k ní přiřazená hodnota " $s$ " (tj. odhadovaná směrodatná odchylka " $s$ "). Z této sady měření se



stanoví odhadovaná standardní nejistota ("u") střední hodnoty lze vypočítat z následujícího jednoduchého výrazu:

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

kde n = počet provedených měření.

### 2.5.2 Nejistota typu B – standardní výpočet nejistoty

Pokud jsou informace poněkud nedostatečné, obvykle pro odhady některých hodnot typu B, je možné stanovit horní a dolní hranici nejistoty. Pokud by bylo možné ukázat, že tyto meze mohou stejně tak spadat kamkoli mezi polohy rovnoměrné rozdělení nebo v tomto případě v obdélníkovém prostoru. V tomto druhém případě by standardní nejistota pro rovnoměrné rozdělení bude

$$u = \frac{a}{\sqrt{(3)}} \quad (5)$$

kde a = půlka šířky mezi horní a dolní mezí.

Pro kalibrační certifikát měřicího přístroje lze obvykle použít následující údaje a předpokládat, že jakákoli uvedená nejistota byla odvozena z normálně stanovené nejistoty, ačkoli není neobvyklé, že se takové údaje získají z rovnoměrného nebo obdélníkového rozdělení. [14]

## 2.6 Chyby měřících přístrojů

Kvalita měřících přístrojů a výsledků měření je vyjádřena pomocí odpovídajících nepřesností, tzv. chybových norem. Chyby měření mohou být způsobeny řadou faktorů.

O kvalitě měřících přístrojů a výsledcích měření svědčí odpovídající nepřesnosti, tzv. chybové etalony. Chyby měření mohou být způsobeny řadou faktorů. Chyby měření mohou být způsobeny mnoha faktory rozdělení chyb. Obecně lze chyby rozdělit do čtyř základních skupin podle jejich původu v měřícím řetězci:

- Chyby přístroje jsou způsobeny konstrukcí měřicího přístroje a souvisí s přesností přístroje. Mnoho závad je identifikováno výrobcem, ale jsou také garantovány výrobcem.

- Metodické chyby související s použitými metodami zjišťování výsledků měření, např. odečítání dat, organizace měření, eliminace vnějších vlivů a jiné.
- Teoretická chyba souvisí s použitým postupem měření. Jedná se především o principy měření, použité fyzikální modely měření, použité parametry, fyzikální konstanty a jiné.
- Chyby zpracování dat jsou chyby způsobené chybami numerických metod a použitím nevhodných statických vyhodnocení.

Chyby lze rozdělit do tří skupin podle jejich příčiny:

- Náhodná chyba, která při opakovaných měřeních náhodně kolísá co do velikosti i znaménka. Je nepředvídatelná a je popsána určitým rozdělením pravděpodobnosti. Je důsledkem mnoha příčin, které jsou obtížné odhalit nebo obtížně odstranit, ale mohou se minimálně omezit.
- Systematická chyba ovlivňuje výsledky měření předpověditelným stylem. Je to normální funkcí času nebo měřených rozměrů postupu. Obvykle mají stejné logo. Konstantní systematická chyba snižuje nebo navyšuje číselný výsledek všech měření o stejnou hodnotu. Navenek se většinou nevykazuje a lze na ní přijít pouze při porovnání výsledků s jinými zařízeními. Vyskytují se soustavné chyby s časovým trendem v důsledku stárnutí nebo opotřebením měřicích přístrojů. Systematická chyba měřicího zařízení se dělí na aditivní (chyba nastavení nuly) a multiplikativní (chyba citlivosti). Špatný typ a velikost chyby většinou garantuje výrobce.
- Hrubá chyba, nazývaná vybočující, resp. odlehlé hodnoty jsou způsobeny abnormálními zdroji, nepředvídatelným chybám měřicího zařízení, nesprávným záznamem hodnot. Díky nim se měření výrazně různí od ostatních hodnot.

Chyby se dále dělí na:

- Chyba ve výsledku měření jako nejistota hodnoty výsledku měření, např. charakterizovaná intervalem spolehlivosti.
- Chyba měřicího přístroje, resp. Proces měření jako jedna z charakteristik kvality měření znázorňuje obecně přípustnou odchylku od reálné hodnoty. [15]

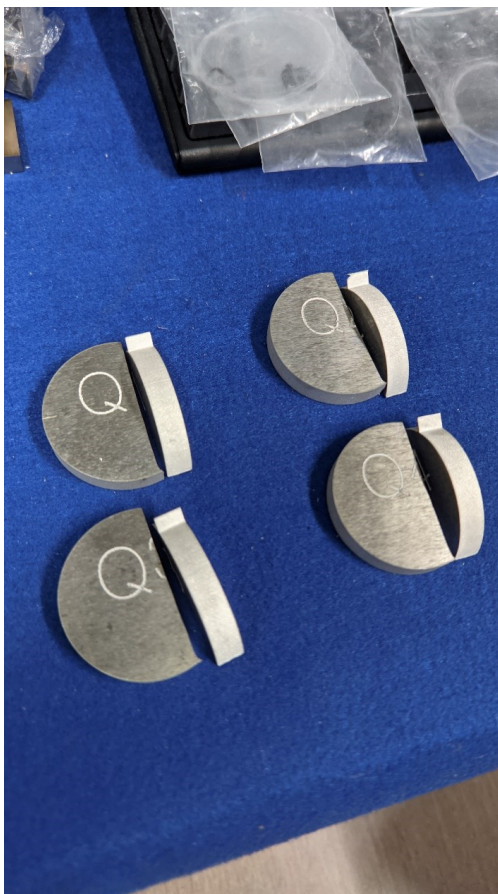
## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

### **3 CÍL PRÁCE**

Cílem této bakalářské práce je porovnání drsnosti materiálu měřených povrchů, které byly obráběny metodou vodního paprsku. Měřené vzorky byly zhotoveny z materiálu ASTM-B209. Obrobky byly přeříznuty a na obráběné ploše se provedlo měření drsnosti, u každého vzorku byl použit jiný vstupní tlak.

## 4 VSTUPNÍ PARAMETRY

K měření praktické části byly použity 4 obrobky obráběné vodním paprskem s příměsí abraziva. Jako abrazivum byl použit drcený granát s průmyslovým označením Garnet Mesh 80 a výstupní tryska vyrobená z karbidu wolframu měla průměr 0,3 mm. Obráběný materiál byl letecký hliník ASTM-B209, který se používá kvůli svému vysokému poměru pevnosti a hmotnosti například k výrobě leteckých armatur, součástí raket a k šnekovým převodům.



Obrázek 9 Měřené vzorky

### 4.1 Řezné podmínky

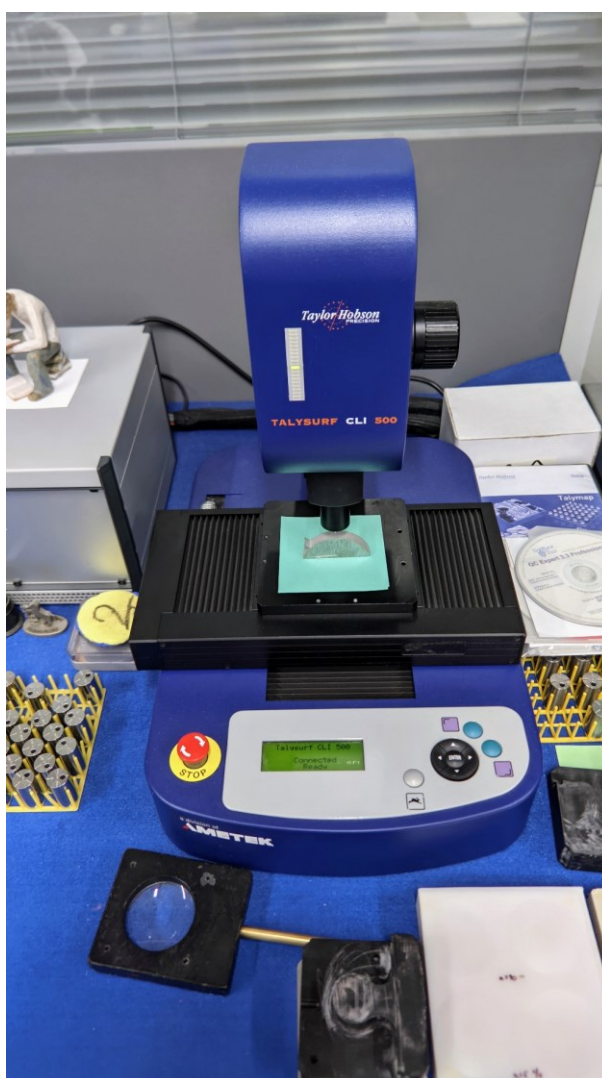
Pro obrábění vodním paprskem u vzorků byl postupně přidáván tlak na trysce po 20 MPa ze začátečních 240 MPa. Abrazivo se ponechalo u všech vzorků stejné.

Tabulka 1 Vstupní parametry vodního abraziva

Vzorek	Tlak v trysce [MPa]	Abrazivo
Q1	240	Garnet Mesh 80
Q2	260	Garnet Mesh 80
Q3	280	Garnet Mesh 80
Q4	300	Garnet Mesh 80

## 5 MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ

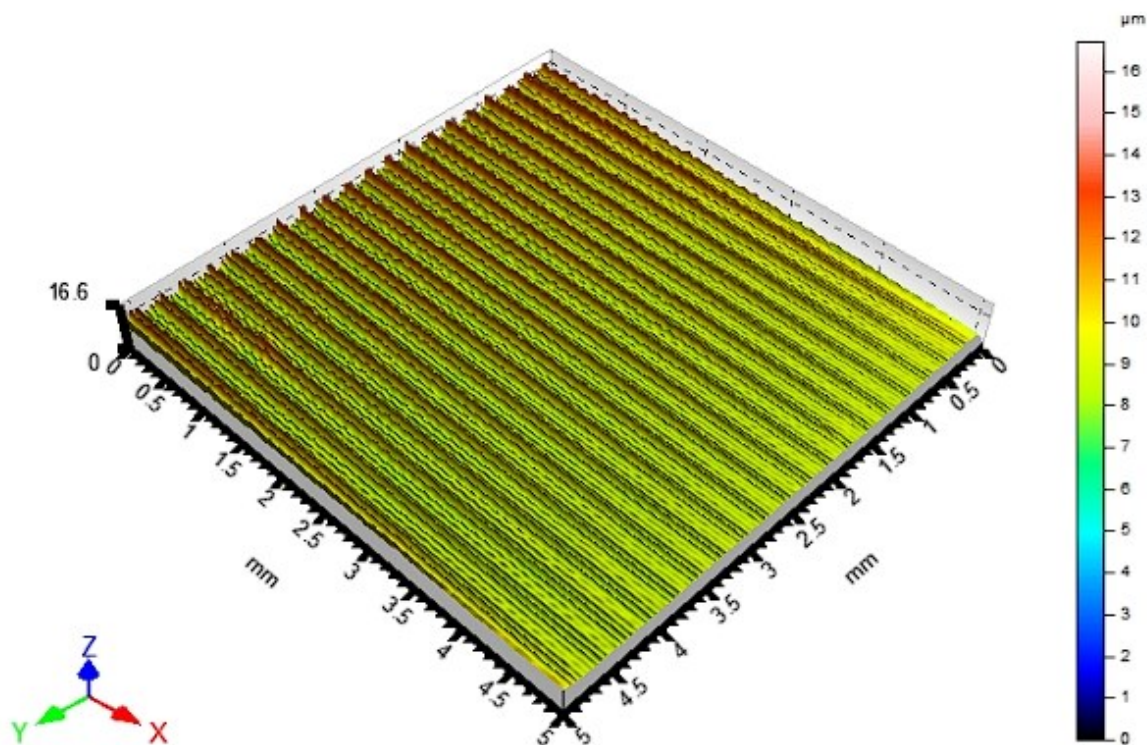
Systémy Talysurf CLI poskytují 3D profilování povrchu a mechanické a analytické funkce pro 2D měření. Modely CLI 2000, 1000 a 500 nabízejí měřicí rozsah 200, 100 a 50 mm. Pro splnění požadavků uživatelů jsou k dispozici jednotky pro měření chromatické délkové aberace, laserové triangulační měřidlo a indukční měřidlo. Systémy Talysurf CLI jsou vhodné pro procesy, které vyžadují přesnou kontrolu tvaru, textury nebo mikrostruktury povrchu. [18]



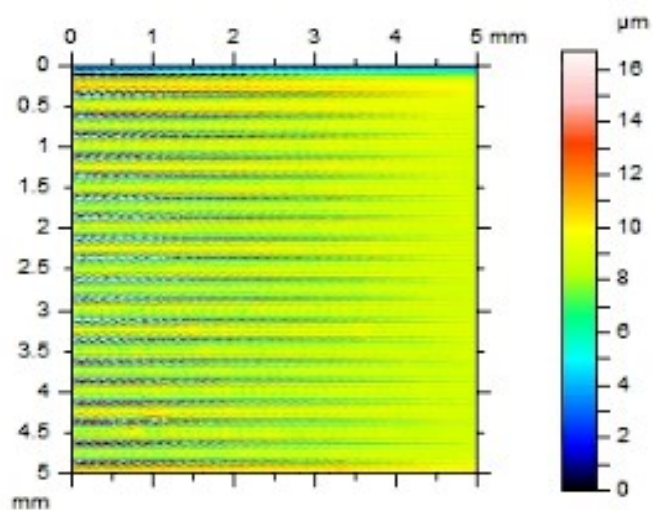
Obrázek 10 měřicí přístroj Taylorsurf CLI 500

## 6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

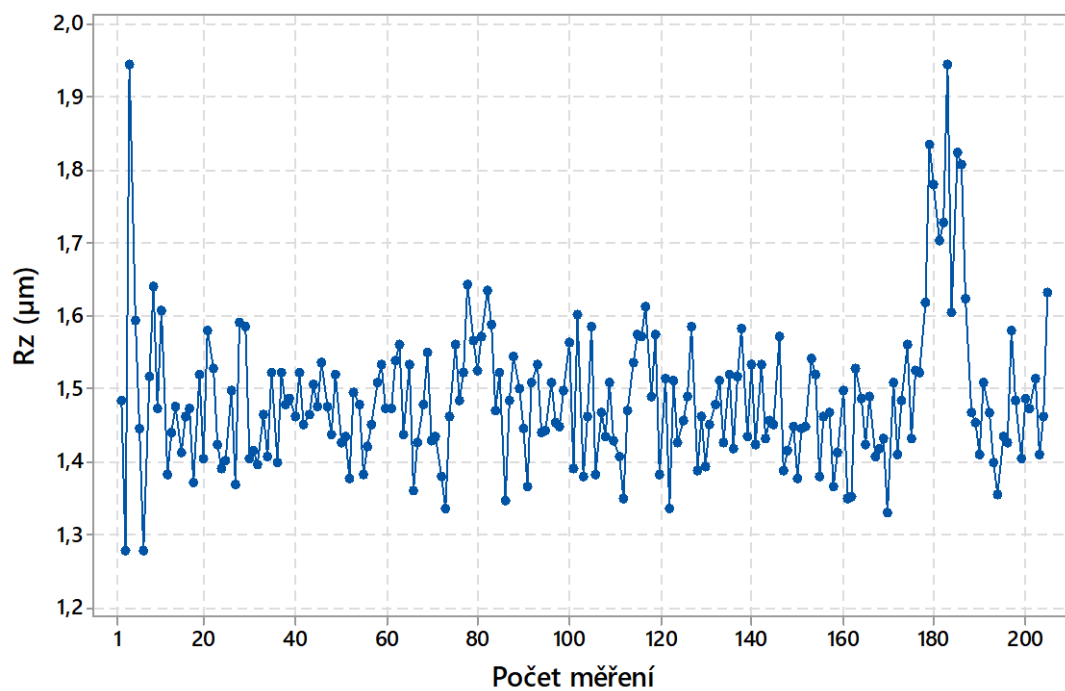
### 6.1 1. Vzorek



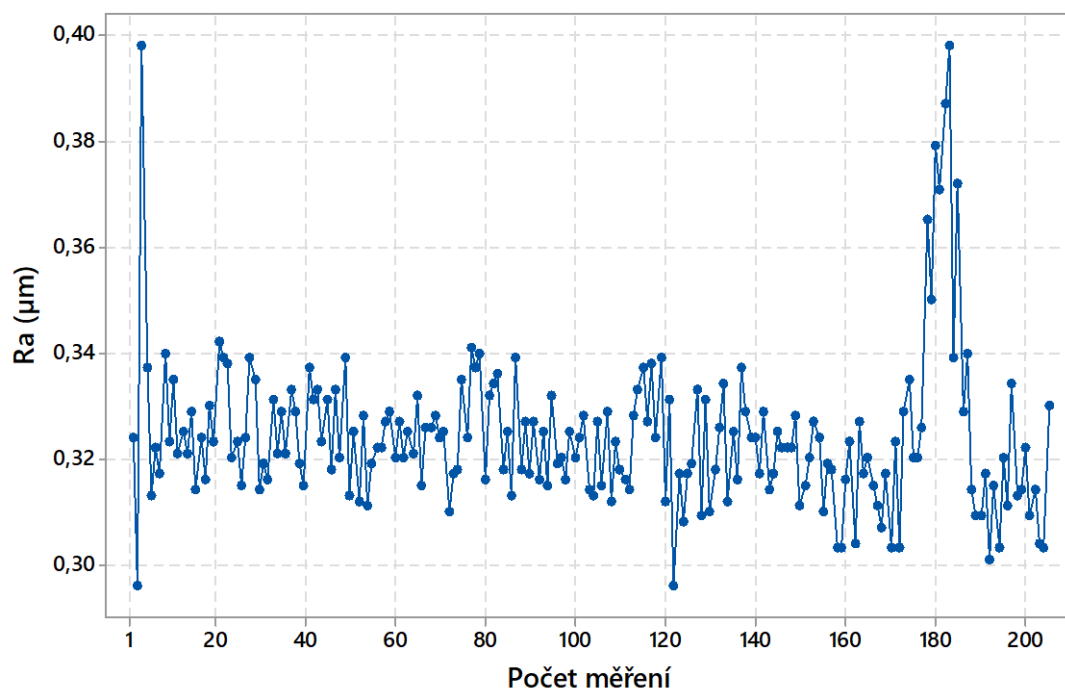
Obrázek 11 Měřené pole 1. vzorku



Obrázek 12 Odstraněná vlnitost 1. vzorku (zůstává drsnost)



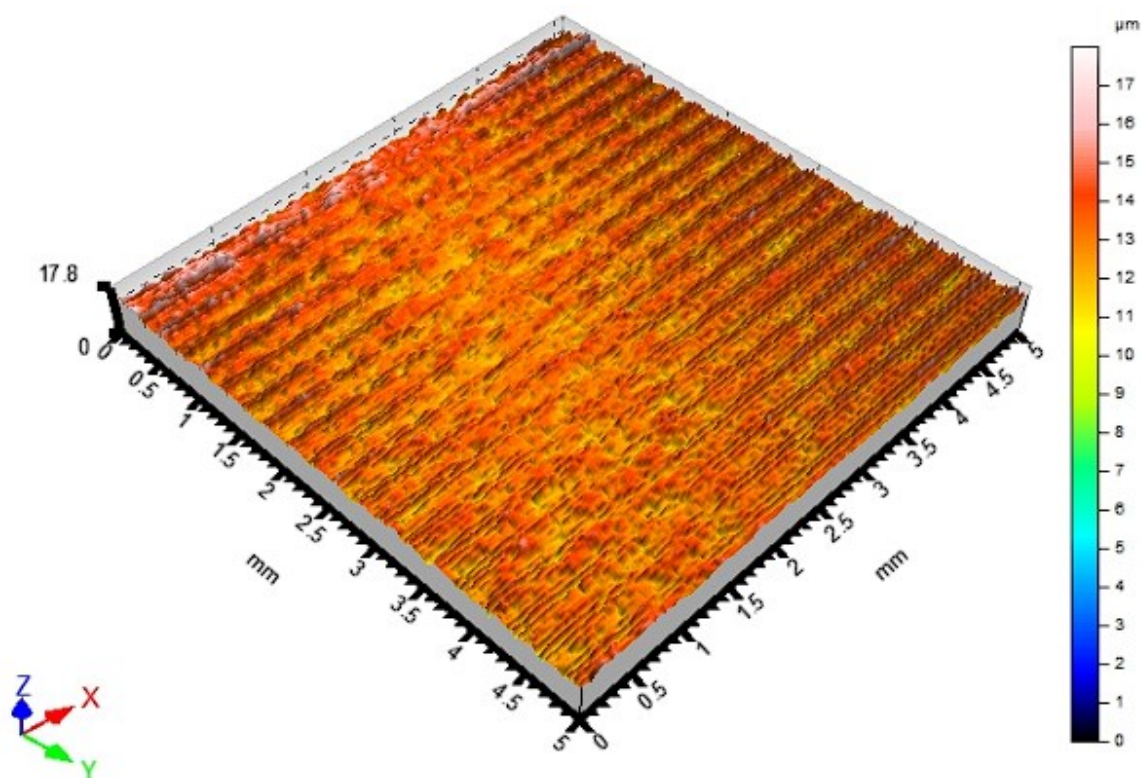
Obrázek 13 Hodnoty Rz 1.vzorku



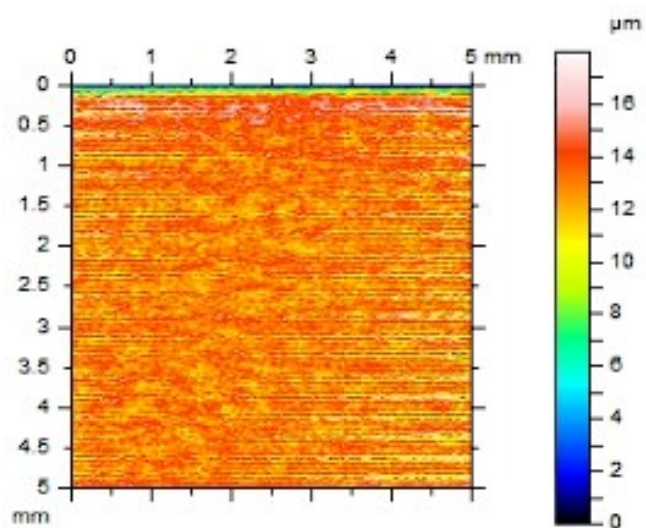
Obrázek 14 Hodnoty Ra 1.vzorku



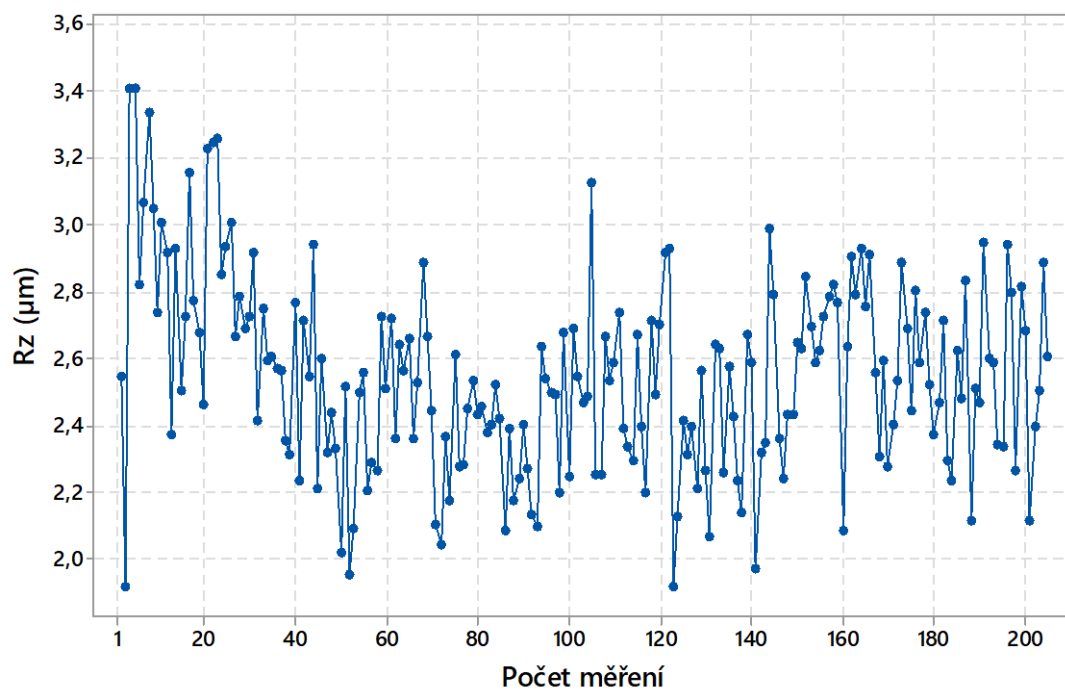
## 6.2 2. Vzorek



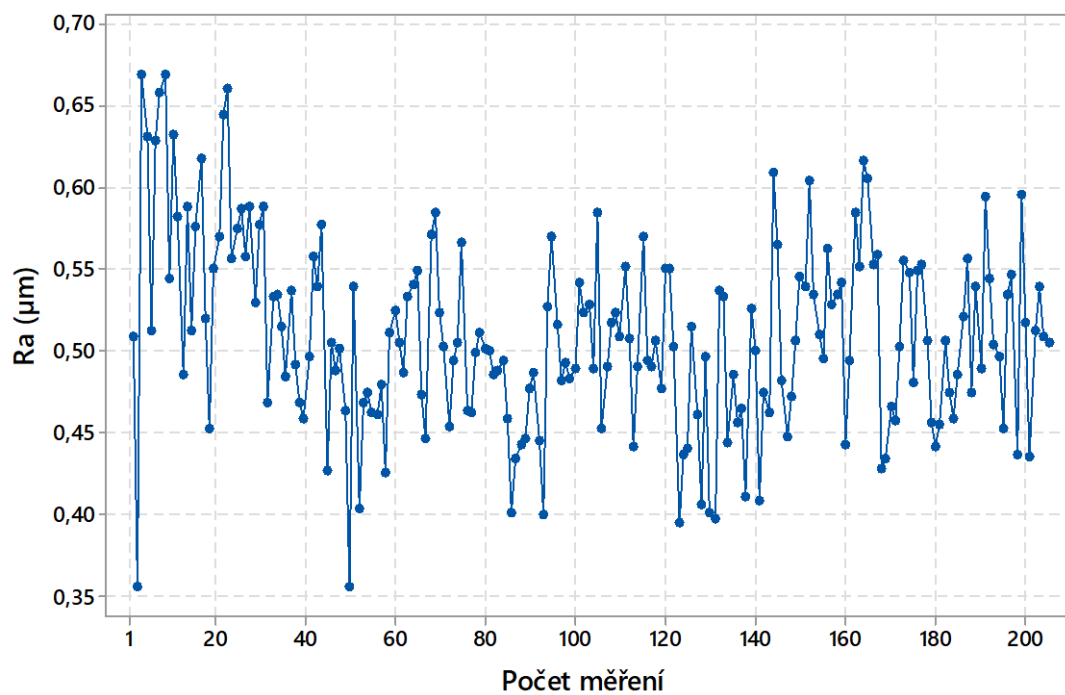
Obrázek 15 Měřené pole 2. vzorku



Obrázek 16 Odstraněná vlnitost 2. vzorku (zůstává drsnost)

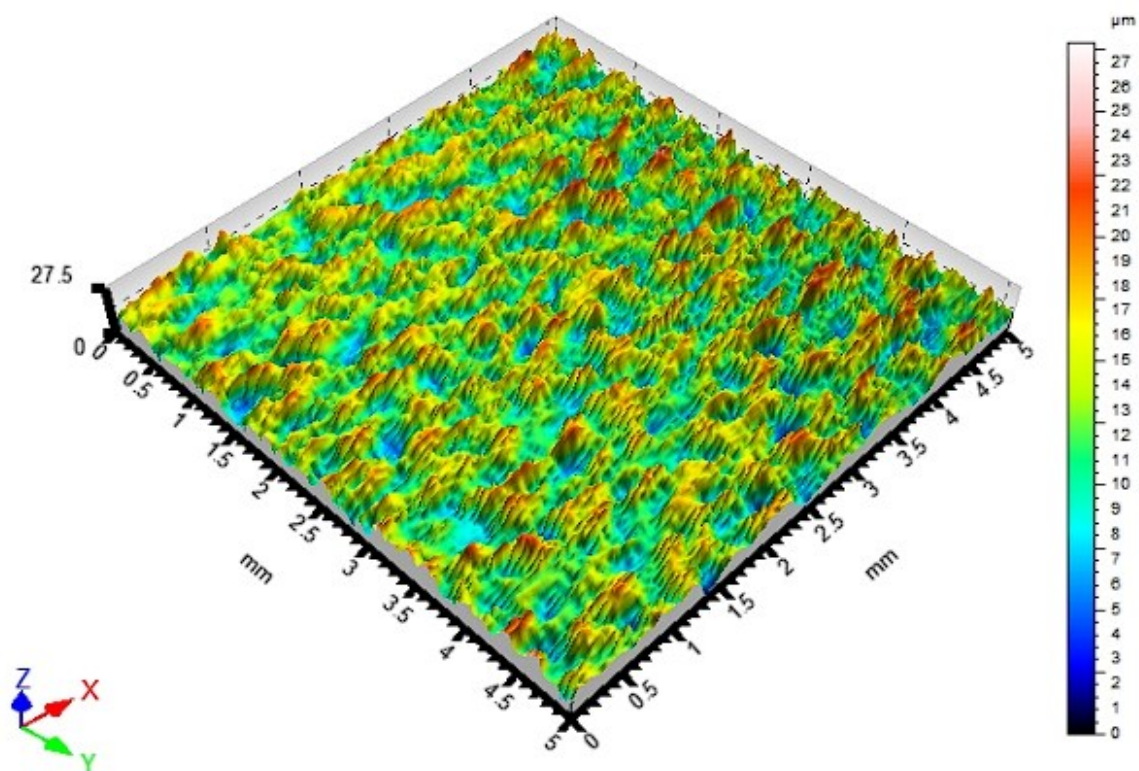


Obrázek 17 Hodnoty Rz 2.vzorku

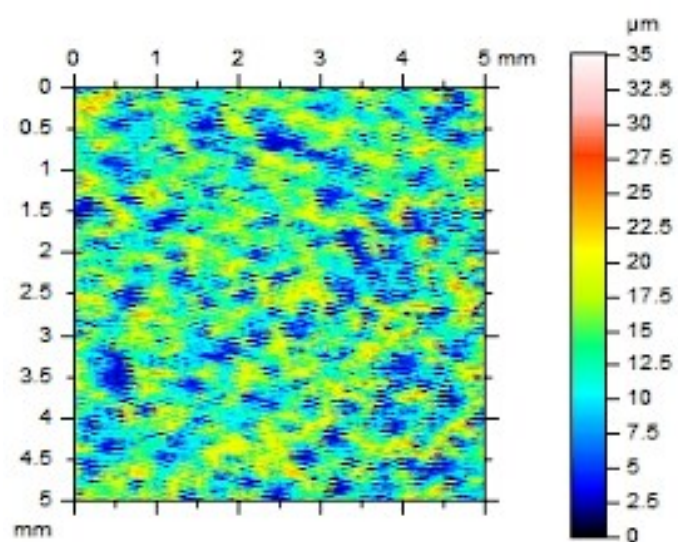


Obrázek 18 Hodnoty Ra 2.vzorku

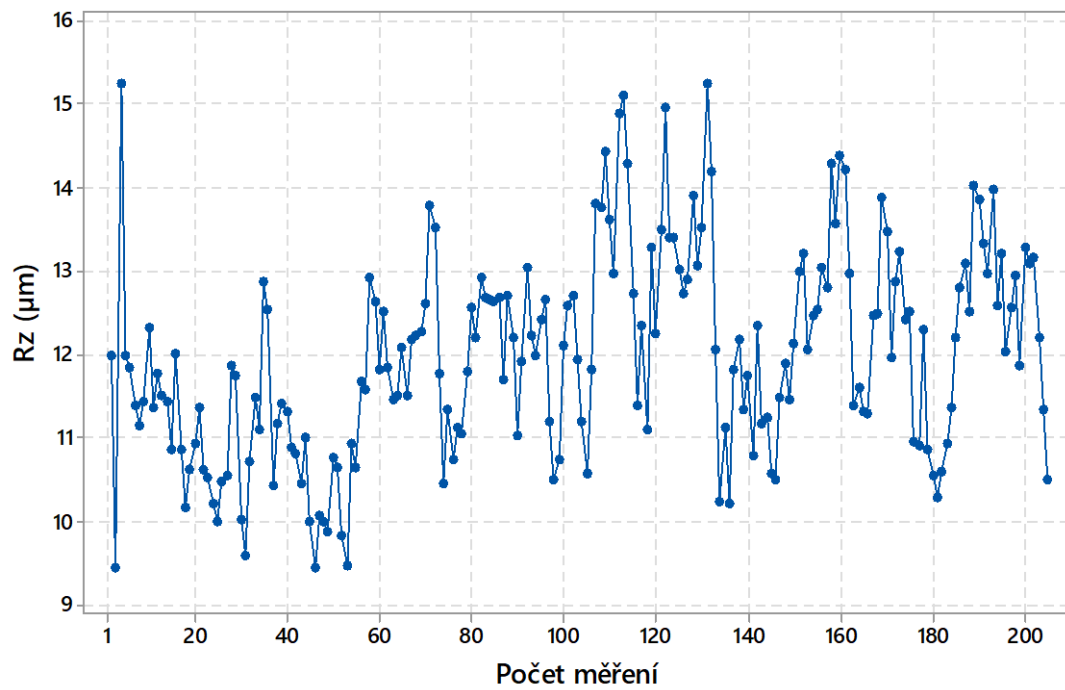
### 6.3 3. Vzorek



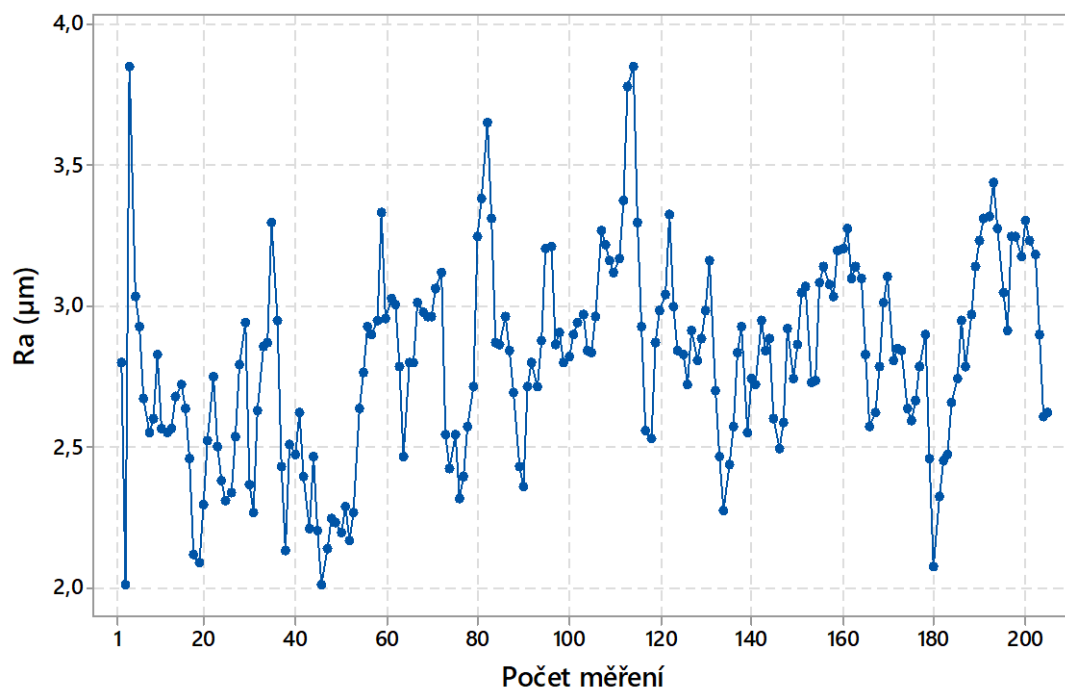
Obrázek 19 Měřené pole 3. vzorku



Obrázek 20 Odstraněná vlnitost 3. vzorku (zůstává drsnost)



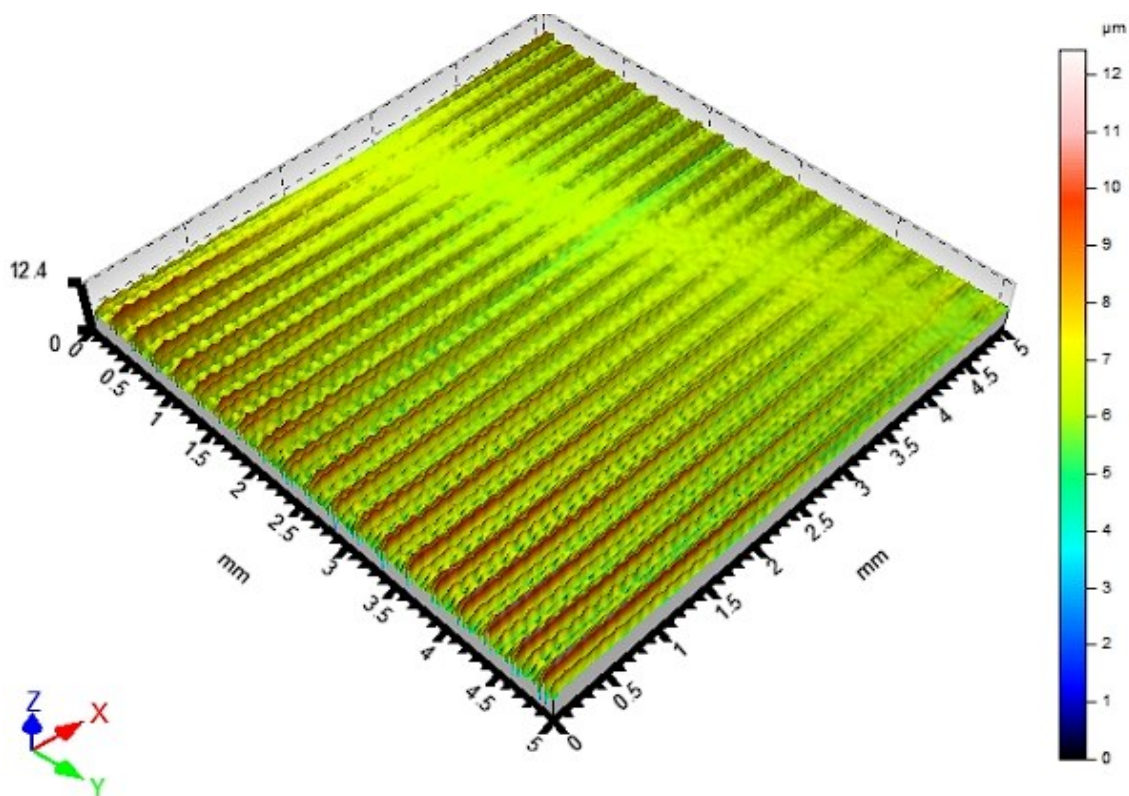
Obrázek 21 Hodnoty Rz 3.vzorku



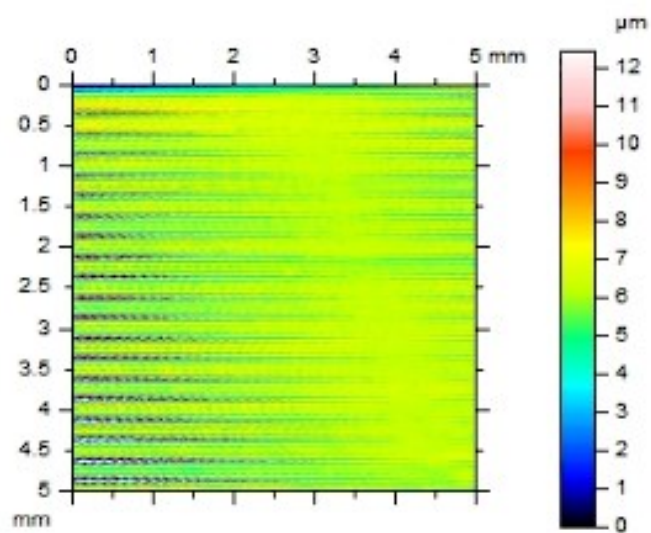
Obrázek 22 Hodnoty Ra 3.vzorku



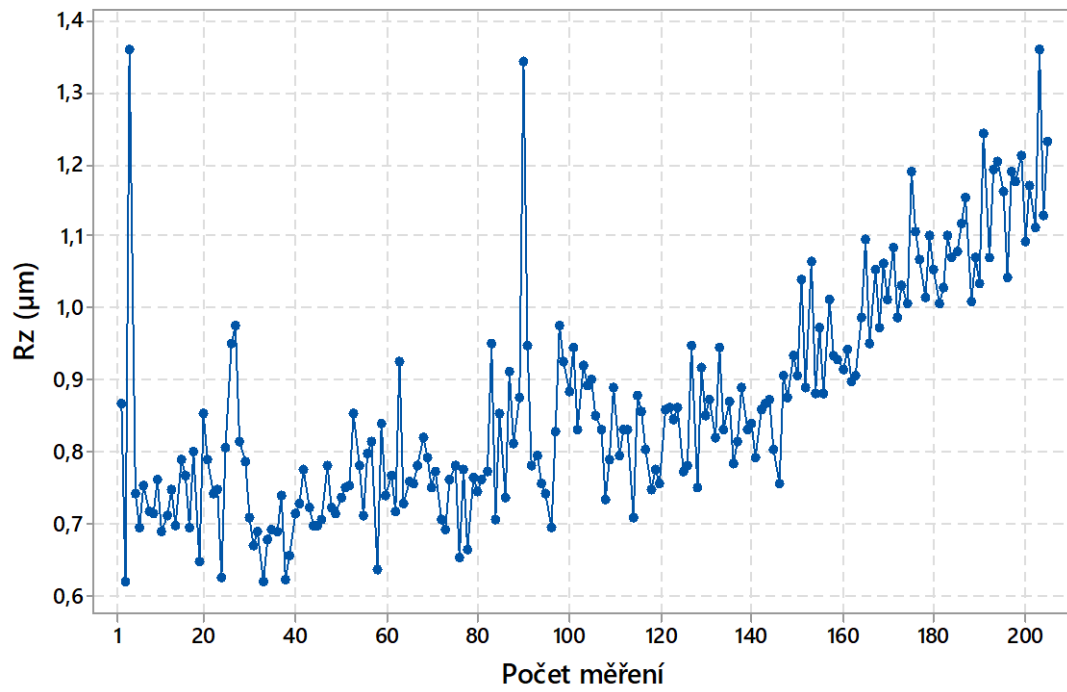
## 6.4 4. Vzorek



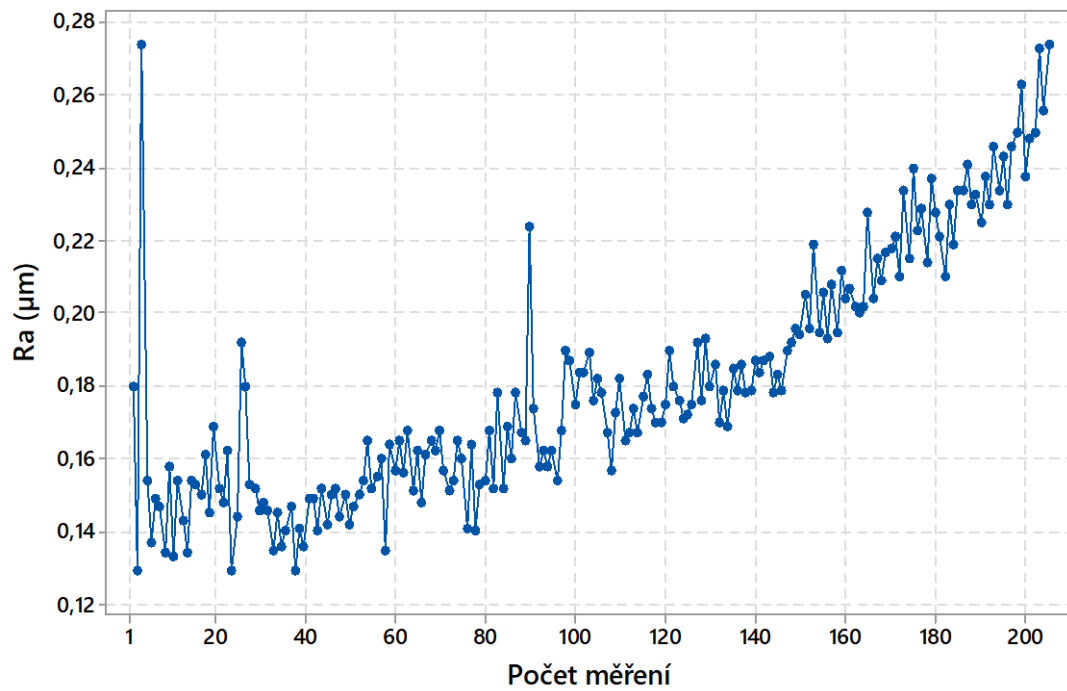
Obrázek 23 Měřené pole 4. vzorku



Obrázek 24 Odstraněná vlnitost 4. vzorku (zůstává drsnost)



Obrázek 25 Hodnoty Rz 4.vzorku



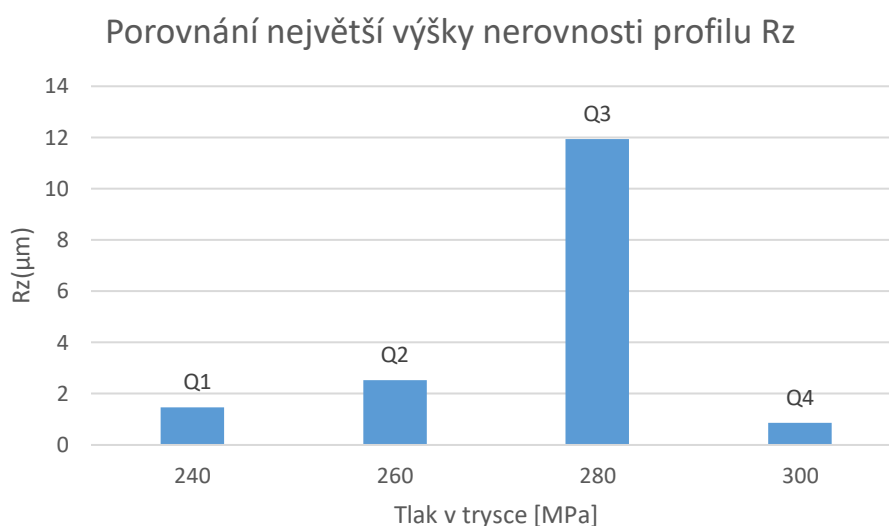
Obrázek 26 Hodnoty Ra 4.vzorku

## 7 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

### 7.1 Souhrn naměřených parametrů Rz

Tabulka 2 Porovnání největší výšky nerovnosti profilu Rz

Vzorky	$\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Medián [ $\mu\text{m}$ ]	Směr. Odchylka [ $\mu\text{m}$ ]
Q1	1,4781	1,4710	0,1394
Q2	2,5351	2,5350	0,3292
Q3	11,929	11,941	1,4430
Q4	0,8623	0,8290	0,1647

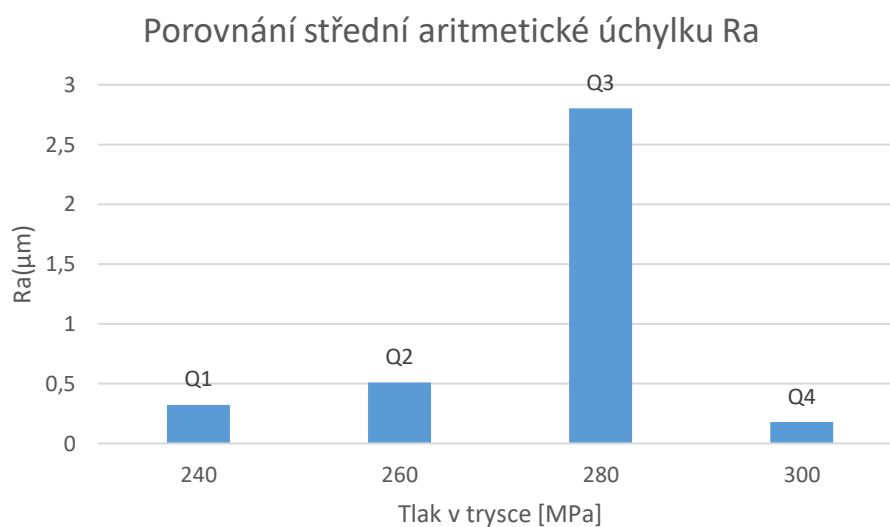


Obrázek 27 Průměrná hodnota Rz měřených vzorků

### 7.2 Souhrn naměřených parametrů Ra

Tabulka 3 Porovnání střední aritmetické úchylky Ra

Vzorek	$\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Medián [ $\mu\text{m}$ ]	Směr. Odchylka [ $\mu\text{m}$ ]
Q1	0,32414	0,32200	0,01465
Q2	0,50922	0,50500	0,05830
Q3	2,80280	2,82800	0,34830
Q4	0,18051	0,17400	0,03348



Obrázek 28 Průměrná hodnota Ra měřených vzorků

### 7.3 Zhodnocení měření

U vzorku Q3 bylo zpozorována mnohem větší hodnota Ra i Rz a také i směrodatná odchylka než u předešlých vzorků. Kolísání hodnot, které je největší právě u Q3 ukazuje na to, že zvolený řezný parametr je nejméně vhodný k řezání leteckého hliníku.

Nejmenší hodnoty Ra i Rz bylo dosaženo u vzorku Q4. Nejmenší směrodatné odchylky bylo dosaženo u Q1. Vhodné tlaky k dosažení nejmenší drsnosti jsou 220 MPa a 300 MPa.

Hodnota směrodatné odchylky ukazuje jak moc Ra a Rz je rozdělen rovnoměrně od střední hodnoty. Hodnota Rz je přibližně 4x větší než Ra, Rz se také odlišuje ve větším rozptylu hodnot.



## ZÁVĚR

První kapitola teoretické části bakalářské práce se zaměřovala na metody obrábění. Byly zde představeny základní principy konvenčních a nekonvenčních metod a jejich využití. Dále se v druhé kapitole se mluvilo o měření a hodnocení kvality povrchu, kde byly popsány chyby měření a chyby měřících přístrojů, také i normy, které vykládají problematiku měření a vyhodnocování drsnosti povrchu.

V praktické části byl popsán materiál ASTM-B209, ze kterého byly vyrobeny vzorky k měření a byly obrobeny metodou vodního paprsku. Měření probíhalo na měřícím přístroji Taylorsurf CLI 500 od společnosti Taylor Hobson. Vyhodnocení se odehrávalo v programu Minitab. Statisticky byly vyhodnoceny průměry, mediány a směrodatné odchylky, které jsem uvedl do tabulky. Pro veličinu Ra a Rz byly vytvořeny grafy Times Series Plot, který je jedním z typů grafů v daném programu.

Z grafů pro porovnání průměrných hodnot jasně vyplývá, že největší hodnota Ra i Rz byla u třetího vzorku Q3. Hodnota tlaku využita pro obrábění daného vzorku je nejméně vyhovující. Nejmenších hodnot Ra a Rz bylo dosaženo u čtvrtého vzorku Q4. Nejmenší odchylka od průměrné hodnoty Ra i Rz byla u prvního vzorku Q1.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LIANG, Steven a Albert J. SHIH, 2016. Analysis of Machining and Machine Tools [online]. Boston, MA: Springer US [cit. 2021-11-16]. ISBN 978-1-4899-7643-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4899-7645-1
- [2] JAIN, Ankit a Vivek BAJPAI, 2020. Introduction to high-speed machining (HSM). High Speed Machining [online]. Elsevier, s. 1-25 [cit. 2022-04-01]. ISBN 9780128150207. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-815020-7.00001-1
- [3] JCHINCHANIKAR, Satish a S.K. CHOUDHURY, 2015. Machining of hardened steel—Experimental investigations, performance modeling and cooling techniques: A review. International Journal of Machine Tools and Manufacture [online]. 89, 95-109 [cit. 2022-04-01]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2014.11.002
- [4] MARTOWIBOWO, Sigit Yoewono a Bivynka KEMALA DAMANIK, 2021. Optimization of Material Removal Rate and Surface Roughness of AISI 316L under Dry Turning Process using Genetic Algorithm. *Manufacturing Technology* [online]. 21(2), 373-380 [cit. 2021-10-17]. ISSN 12132489. Dostupné z: doi:10.21062/mft.2021.038
- [5] SOUSA, Vitor F. C. a Francisco J. G. SILVA, 2020. Recent Advances on Coated Milling Tool Technology—A Comprehensive Review. *Coatings* [online]. 10 [cit. 2021-10-31]. ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi:10.3390/coatings10030235
- [6] KRISHNARAJ, Vijayan, Redouane ZITOUNE a J. Paulo DAVIM, 2013. Drilling of Composites. KRISHNARAJ, Vijayan, Redouane ZITOUNE a J. Paulo DAVIM. Drilling of Polymer-Matrix Composites [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, s. 13-35 [cit. 2022-04-06]. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. ISBN 978-3-642-38344-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-38345-8\_2
- [7] ROWE, W. Brian, 2014. *Principles of Modern Grinding Technology* [online]. Second edition. London: Elsevier [cit. 2021-11-14]. ISBN 9780323242714. Dostupné z: doi:10.1016/C2013-0-06952-6
- [8] KUNIEDA, Masanori, 2015. Electrical Discharge Machining Processes. NEE, Andrew Y. C., ed. Handbook of Manufacturing Engineering and Technology [online]. London: Springer London, s. 1551-1580 [cit. 2021-11-17]. ISBN 978-1-4471-4669-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4471-4670-4\_71

- [9] JAIN, N.K. a S. PATHAK, 2017. 3.23 Electrochemical Processing and Surface Finish. Comprehensive Materials Finishing [online]. Elsevier, s. 358-380 [cit. 2021-11-17]. ISBN 9780128032497. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.09182-7
- [10] KRAJCARZ, Daniel, 2014. Comparison Metal Water Jet Cutting with Laser and Plasma Cutting. Procedia Engineering [online]. 69, 838-843 [cit. 2021-11-17]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2014.03.061 [10]
- [11] HASHISH, Mohamed. WaterJet Machining Process. NEE, Andrew Y. C., ed. Handbook of Manufacturing Engineering and Technology [online]. London: Springer London, 2015, 2015-9-30, s. 1651-1686 [cit. 2022-04-01]. ISBN 978-1-4471-4669-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4471-4670-4\_75
- [12] PETROPOULOS, Georgios P., Constantinos N. PANDAZARAS a J. Paulo DAVIM, 2010. Surface Texture Characterization and Evaluation Related to Machining. DAVIM, J. Paulo, ed. Surface Integrity in Machining [online]. London: Springer London, s. 37-66 [cit. 2022-02-14]. ISBN 978-1-84882-873-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-84882-874-2\_2
- [13] SMITH, Graham T., 2016. Machine Tool Metrology [online]. Cham: Springer International Publishing [cit. 2022-04-06]. ISBN 978-3-319-25107-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-25109-7
- [14] ČSN EN ISO 4288. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [15] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. Kompendium statistického zpracování dat: metody a řešené úlohy včetně CD. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-1008-4.
- [16] Surface Profiling Systems accommodate up to 4 gauging heads.. [online]. Copyright © 2022 Thomas Publishing Company. All Rights Reserved. See [cit. 24.04.2022]. Dostupné z: <https://news.thomasnet.com/fullstory/surface-profiling-systems-accommodate-up-to-4-gauging-heads-458521>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$\mu\text{m}$	mikrometr
mm	milimetr
EDM	Elektroerozivní obrábění
K	Kelvin
W/m <sup>2</sup>	Intenzita záření
Rz	Největší výška profilu
ECM	Elektrochemické obrábění
DC	Stejnoseměrný proud
MPa	Megapascal
PAC	Řezání plazmovým obloukem
A	Ampér
Ra	Střední aritmetická odchylka profilu
$\lambda_s$	Filtr profilu
$\lambda_f$	Filtr profilu
$\lambda_c$	Filtr profilu
$\bar{x}$	Aritmetický průměr
$s$	Odhadovaná směrodatná odchylka
$u$	Odhadovaná standardní nejistota
$n$	počet měření
$a$	půlka šířky mezi horní a dolní mezí.
3D	trojdimenzionální

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Soustruh .....	13
Obrázek 2 Čelní frézování .....	14
Obrázek 3 Frézování obvodové .....	14
Obrázek 4 Vyvrtávačka .....	16
Obrázek 5 Broušení .....	17
Obrázek 6 Princip EDM .....	18
Obrázek 7 Schéma vodního paprsku .....	20
Obrázek 8 – Profil povrchu.....	23
Obrázek 9 Měřené vzorky.....	29
Obrázek 10 měřicí přístroj Taylorsurf CLI 500.....	30
Obrázek 11 Měřené pole 1. vzorku.....	31
Obrázek 12 Odstraněná vlnitost 1. vzorku (zůstává drsnost) .....	31
Obrázek 13 Hodnoty Rz 1.vzorku .....	32
Obrázek 14 Hodnoty Ra 1.vzorku .....	32
Obrázek 15 Měřené pole 2. vzorku.....	33
Obrázek 16 Odstraněná vlnitost 2. vzorku (zůstává drsnost) .....	33
Obrázek 17 Hodnoty Rz 2.vzorku .....	34
Obrázek 18 Hodnoty Ra 2.vzorku .....	34
Obrázek 19 Měřené pole 3. vzorku.....	35
Obrázek 20 Odstraněná vlnitost 3. vzorku (zůstává drsnost) .....	35
Obrázek 21 Hodnoty Rz 3.vzorku .....	36
Obrázek 22 Hodnoty Ra 3.vzorku .....	36
Obrázek 23 Měřené pole 4. vzorku.....	37
Obrázek 24 Odstraněná vlnitost 4. vzorku (zůstává drsnost) .....	37
Obrázek 25 Hodnoty Rz 4.vzorku .....	38

Obrázek 26 Hodnoty Ra 4.vzorku .....	38
Obrázek 27 Průměrná hodnota Rz měřených vzorků .....	39
Obrázek 28 Průměrná hodnota Ra měřených vzorků .....	40

## **SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Vstupní parametry vodního abraziva.....	29
Tabulka 2 Porovnání největší výšky nerovnosti profilu Rz.....	39
Tabulka 3 Porovnání střední aritmetické úchylku Ra.....	39