

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

Bc. Rostislav Koutňák

---

Diplomová práce  
2021

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE** (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Bc. Rostislav Koutňák</b>
Osobní číslo:	<b>T19544</b>
Studijní program:	<b>N3909 Procesní inženýrství</b>
Studijní obor:	<b>Řízení jakosti</b>
Forma studia:	<b>Prezenční</b>
Téma práce:	<b>Komparace charakteristik drsnosti povrchů vzniklých pomocí nekonvenčních obráběcích technologií</b>

### **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 profiloměru.
- Statistické vyhodnocení povrchových komparací naměřených dat dle odpovídajících softwarů.

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

**Seznam doporučené literatury:**

- ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1999.
- ČSN EN ISO 4288. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. 1999.
- 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.
- MELOUN, Milan. Kompendium statistického zpracování dat: metody a řešené úlohy včetně CD. Praha: Academia, 2002, 764 s. ISBN 80-200-1008-4

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

Datum zadání diplomové práce: **5. ledna 2021**  
Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

## **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**

Tato diplomová práce se zabývá komparací charakteristik drsnosti povrchů, které vznikly pomocí nekonvenčních obráběcích technologií, konkrétně pomocí plazmy a laseru. Teoretická část práce se zabývá třemi tematickými okruhy. První kapitola popisuje metody snímání povrchů a normami, ve kterých je popsáno, jak se povrchy vyhodnocují. Druhá kapitola obsahuje normami danou terminologii povrchů a statistické metody pro vyhodnocení. Ve třetí části jsou popsány nekonvenční technologie a detailněji rozebrány technologie plazmy a laseru. Praktická část se zabývá porovnáním řezů laserem a plazmou na různě hlubokých řezech a také výrobou a vyhodnocením podobnosti otisků těchto povrchů.

Klíčová slova: nekonvenční technologie, měření povrchů, struktura povrchu, statistické hodnocení

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the comparison of surface roughness characteristics, which were created using unconventional machining technologies, specifically using plasma and laser. The theoretical part of the thesis deals with three thematic areas. The first chapter describes the methods of surface sensing and standards, which describe how surfaces are evaluated. The second chapter contains standard terminology of surfaces and statistical methods for evaluation. The third part describes unconventional technologies and analyzes plasma and laser technologies in more detail. The practical part deals with the comparison of laser and plasma sections on different depth sections, as well as the production and evaluation of the similarity of impressions of these surfaces.

Keywords: unconventional technologies, surface measurement, surface structure, statistical evaluation

Chtěl bych poděkoval vedoucí mé diplomové práce Ing. Mileně Kubišové, Ph.D. za skvělé vedení, vstřícnost, ochotu a spoustu cenných rad. Dále bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni za podporu při studiu a motivaci psaní této práce.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 METODY PRO SNÍMÁNÍ DRSNOSTÍ POVRCHŮ</b> .....	<b>11</b>
1.1 <b>JAKOST POVRCHU</b> .....	11
1.1.1    Normy pro hodnocení povrchů .....	11
1.2 <b>METODY SNÍMÁNÍ</b> .....	12
1.2.1    Kontaktní měřicí přístroje .....	12
1.2.2    Bezkontaktní (optické) měření .....	13
1.2.3    Využití otisků pro měření drsnosti .....	15
<b>2 ZPŮSOBY VYHODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHŮ</b> .....	<b>17</b>
2.1 <b>TERMINOLOGIE A POPIS POVRCHŮ</b> .....	17
2.1.1    Obecné termíny .....	17
2.1.2    Struktura povrchu .....	18
2.1.3    Parametry drsnosti povrchu.....	19
2.2 <b>STATISTICKÉ METODY VYHODNOCENÍ DAT</b> .....	22
2.2.1    Statistické soubory .....	22
2.2.3    Rozptyl a směrodatná odchylka .....	23
2.2.4    Medián.....	23
2.2.5    Kvantily.....	24
2.2.6    Grafické zpracování dat .....	24
2.2.7    Teorie hypotéz.....	26
<b>3 NEKONVENČNÍ OBRÁBĚCÍ TECHNOLOGIE</b> .....	<b>29</b>
3.1 <b>DEFINICE NEKONVENČNÍHO OBRÁBĚNÍ</b> .....	29
3.1.1    Využití nekonvenčních technologií.....	29
3.2 <b>DĚLENÍ NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ PODLE ZPŮSOBU ÚBĚRU MATERIÁLU</b> ....	30
3.2.1    Plazmová technologie .....	30
3.2.2    Laserový paprsek .....	32
3.2.3    Mechanické metody .....	35
3.2.4    Chemické a elektrochemické metody .....	36
3.2.5    Tepelné a elektrotepelné metody .....	37
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>38</b>
<b>4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE</b> .....	<b>39</b>
5.1 <b>OCELOVÉ VZORKY</b> .....	40
5.1.1    Laserový stroj.....	40
5.1.2    Plazmový stroj.....	41
5.2 <b>OTISKY VZORKŮ</b> .....	41
5.2.1    Výroba otisků.....	42
<b>6 MĚŘENÍ VZORKŮ</b> .....	<b>45</b>

6.1.1	Snímání povrchu .....	45
6.1.2	Značení vzorků.....	46
6.2	KVALITATIVNÍ HODNOCENÍ VZORKŮ .....	46
<b>7</b>	<b>STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ DAT.....</b>	<b>51</b>
7.1	EXPLORATORNÍ DATOVÁ ANALÝZA.....	51
7.1.1	EDA pro ocelové díly.....	51
7.1.2	EDA pro otisky .....	56
7.1.3	Test normality .....	58
7.1.4	Test odlehlých hodnot .....	59
7.2	TEST SHODY OTISKŮ S OCELOVÝMI VZORKY .....	60
7.2.1	F-test.....	60
7.2.2	T-test .....	62
7.2.3	Clusterová analýza .....	62
7.3	SROVNÁNÍ DRSNOSTI POVRCHU MEZI TECHNOLOGIEMI .....	63
7.3.1	Vyhodnocení parametru Ra u vstupní části paprsku.....	63
7.3.2	Vyhodnocení parametru Ra na výstupní části paprsku.....	65
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>68</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>77</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>79</b>



## ÚVOD

Lidstvo se, co se týče technologie, neustále vyvíjí. Snaží se vytvářet materiály odolnější a pevnější, to vše podle toho, kde bude daný materiál využit. S vytvořením takových materiálů však přišlo jedno úskalí. Jak takový materiál zpracovat? Jak obrábět materiál, který je stejně tvrdý, ne-li tvrdší než nástroj? Pro tento účel vznikly nekonvenční obráběcí technologie. Tyto technologie nevyužívají řezné účinky a neodebírají třísku jako konvenční technologie. Místo toho využívají různých druhů energie jako je tepelná či elektrická nebo chemických jevů, které dokáží tvrdé materiály narušit a tvarovat. Tyto technologie dokáží opracovat materiál od hrubého řezu až po úběry materiálu v řádech tisícín milimetru.

Z těchto mnoha metod jsou dvě, které pro úběr materiálu využívají právě tepelnou energii. Těmi jsou technologie řezání pomocí plazmy a laserového paprsku. Za pomoci vysokých teplot jsou schopny roztavit i odpařit kov. I tyto dvě metody však mají svá úskalí. Jsou omezeny hloubkou řezu, neboť s narůstající tloušťkou již tyto paprsky nemusí dosahovat dostatečného výkonu pro kvalitní čistý řez. Namísto čistého řezu může tedy dojít pouze k protavení a v tomto místě může být řez deformován a nedosahovat požadované kvality řezaného povrchu. A právě tímto tématem se zabývá tato diplomová práce. Porovnáním základního parametru drsnosti Ra mezi těmito technologiemi v závislosti na tom, jakou tloušťku materiálu řezaly.

Obrábění tvrdých materiálů však není jediným úskalím, se kterým se můžeme při výrobě setkat. Vyrábí-li se atypické či velmi rozměrné díly, může se stát, že změřit kvalitu jejich povrchu nebude možné, nepůjdou totiž umístit pod snímač. A to je druhý problém, kterým se tato práce zabývá, replikací porovnávaných povrchů a následným vyhodnocením, zda je povrch těchto vzorků vypovídající a zda jeho struktura odpovídá té, která je na originálním výrobku.

Zjištění všech požadovaných podobností a porovnávání však není možné docílit pouze prohlížením vzorků a změřením parametrů. Skutečná analýza probíhá pomocí statistiky. Pro spoustu lidí je statistika pouze směs čísel a koláčových grafů. Koláčový graf s výřezem však není to, co se pro zjištění požadovaných výsledků využije. Naopak za pomoci statistických analýz a metodik budou data vyhodnocována, aby bylo zjištěno, zda jsou rozdíly měřených hodnot vzniklé pouze náhodou, či zda jsou zde skutečně statisticky významné rozdíly.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 METODY PRO SNÍMÁNÍ DRSNOSTÍ POVRCHŮ

Ve výrobě se snaží každý o efektivní a ekonomickou výrobu, ale zároveň dodržení optimální kvality. Vyvážení těchto hodnot začíná již při návrhu výrobku, pro který vznikne výkres, kde je navržen tak, aby spolehlivě dostal svému účelu. Přejde-li však tento návrh do výroby, vyrobít jej přesně je prakticky nemožné. Rozměry výrobku, geometrie, drsnost povrchu, to vše se v praxi odchyluje od stanovené hodnoty. Různé výrobní procesy zanechávají na výrobcích své stopy a účelem snímání drsnosti je zjistit, zda je i přes to povrch dostatečně kvalitní pro svůj účel.

## 1.1 Jakost povrchu

Jakost povrchů je jedním z aspektů důležitých u většiny výrobků. Zvolení dostatečné jakosti povrchu může zvýšit životnost, zlepšit vlastnosti a tím zvýšit spolehlivost a ovlivňuje i vzhled výrobků. Nevhodnou volbou jakosti povrchu a může být zhoršena funkčnost, náklady na provoz i životnost stroje či výrobku.

### 1.1.1 Normy pro hodnocení povrchů

Ačkoliv je každý povrch jiný, způsoby, které povrch definují, musí být všude stejné. Značení, způsoby měření, vyhodnocování, to vše bylo popsáno v normách, které mají celosvětový dosah. Normy používané v Česku (ČSN ISO) jsou přepisem norem evropských (EN ISO). Základními normami používanými v oblasti měření a hodnocení jakosti povrchu jsou:

- **ČSN ISO 4287**

Jedná se o mezinárodní normu schválenou roku 1998. Je normou Geometrických požadavků na výrobky. Můžeme zde nalézt termíny, definice a parametry, které slouží k určení struktury povrchu, a to za pomoci profilové metody. Parametry struktury povrchu se rozumí základní profil, vlnitost a drsnost. [1]

- **ČSN ISO 4288**

Tato norma navazuje na předchozí a normu ČSN ISO 4287 a slouží ke stanovení pravidel porovnávání hodnot měřených s tolerančními mezemi zmíněnými právě v normě 4287. Dále specifikuje pravidla pro výběr vlnových délek pro parametry profilu. [2]

- ČSN ISO 25178

V této normě jsou popsány pojmy, parametry a terminologie pro plošné povrchové textury. [3]

## 1.2 Metody snímání

V technické praxi je možné hodnotit povrch dvěma způsoby:

- Kvalitativní – tento způsob využívá především lidských smyslů. Využívá zrak, hmat, případně optické pomůcky jako lupu či mikroskop a hodnocení probíhá porovnáním s vzorovými plochami. Nevýhodou této metody je její ovlivnění pozorovacími schopnostmi člověka. Při využití světelného mikroskopu je možné rozlišovat rozdíl asi 1  $\mu\text{m}$ . U této metody je třeba dodržování několika zásad. Je nutné, aby povrch srovnávacího etalonu byl vyroben stejnou technologií, měl stejný tvarový povrch, stejný materiál. [4] [5]
- Kvantitativní – Tato metoda využívá číselných a grafických vyjádření drsnosti. K tomuto snímání se využívají profiloměry, které s vysokou rozlišitelností převádí naměřenou hodnotu přes software do výpočetního zařízení, kde je možno následně z profilu rozlišit tvar, vlnitost i drsnost. [8]

### 1.2.1 Kontaktní měřicí přístroje

Kontaktními metodami se rozumí takové, kde měřicí nástroj přichází do styku s měřenou plochou. Hrot měřicího nástroje se pohybuje konstantní rychlostí po přímce, přičemž se může pohybovat hrot či výrobek. Rychlost musí být volena tak, aby věrně sledoval veškeré nerovnosti povrchu. Snímaná dráha zahrnuje rozběh, měřenou délku a doběh. Rozběh a doběh jsou části dráhy, které se nevyhodnocují z důvodu vůle při rozběhu a zastavení pohybu. Hrot kopírující povrch výrobku generuje mechanický signál, který je následně díky principu elektromagnetické indukce převeden na signál elektrický. Ten se následně zpracuje a je vyjádřen jako číselná hodnota. [6]

Mechanicko-elektrické snímače mohou mít dvě různá provedení:

- Snímače absolutní – v tomto případě se povrchu dotýká pouze hrot a měření probíhá určením rozdílu mezi tvarem, drsností a vlnitostí vůči geometricky

přesné trajektorie pohybu hrotu. Tyto snímače mají vysokou citlivost na otřesy, které mohou zkreslit měření.

- Snímače relativní – Tento snímač je pomocí jedné nebo dvou patek veden po měřené ploše. Pomocí měřicího hrotu je určen relativní rozdíl mezi plochou hrotu a kontrolovaným bodem profilu povrchu. Při využití této varianty opadá nutnost rovnoběžného vyrovnání měřené plochy s osou snímače. [5]

### 1.2.2 Bezkontaktní (optické) měření

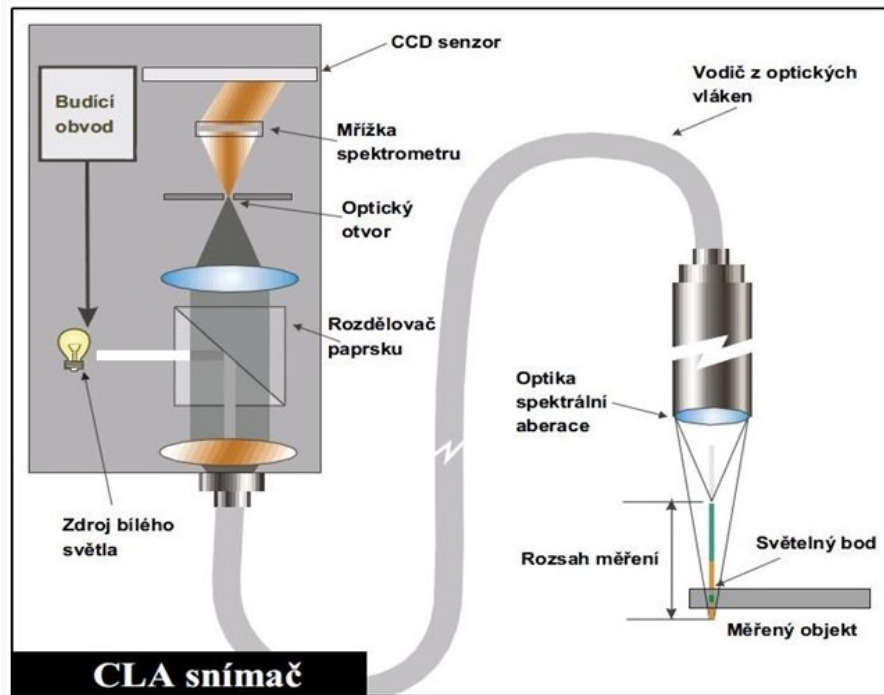
Optické neboli bezkontaktní nepřicházejí do přímého kontaktu s povrchem. Místo měřicího hrotu využívají zaostření paprsku světla na bod na měřeném povrchu. To nese nevýhodu menší tolerance vůči znečištění, neboť nečistoty, kryté byl hrot schopen odtlačit, jsou zde brány jako součást povrchu. Tyhle metody pracují na principu odrazení záření od měřeného povrchu, přičemž tohle záření má rozdílné vlnové délky, které se využívají k charakterizaci povrchu. Dopadnou-li paprsky na povrch, rozptýlí se v různých úhlech a následně detektor tyto odražené paprsky analyzuje. [7]

Výhodou této metody je, že zde není nutnost korekce dat, která byla potřeba u kontaktního způsobu a byla zapříčiněna geometrií hrotu. Velikost a tvar hrotu mohl zapříčinit rozšíření výstupků či špatné snímání hloubky prohlubní, přičemž tyto data následně ovlivňují vyhodnocení šikmosti profilu. Další výhodou optických senzorů je například měření poddajných povrchů, které paprsek nijak nenaruší. [7]

Zásadní nevýhoda však spočívá v měření míst s výraznější změnou tvaru či hran. To může způsobit špatné odrazení či rozostření paprsku, takže data nebudou naměřena nebo mohou být zkreslena. Ztráta dat může být zapříčiněna i vysokou či nízkou odrazivostí snímaného povrchu. [7]

### Chromatic Length Abberation CLA

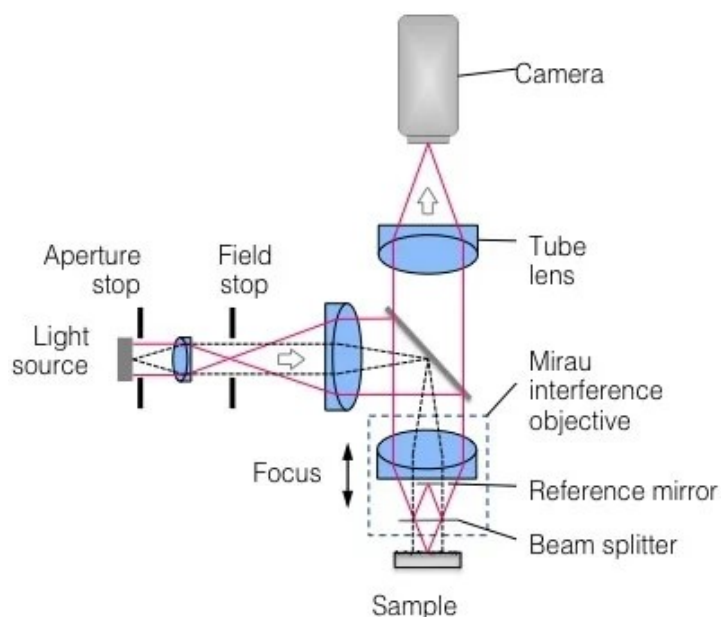
Tento snímač rozkládá bílé světlo a pomocí optických skel ji směřuje na měřený povrch. Toto světlo je díky optice rozloženo na různé vlnové délky, přičemž každý bod na měřeném povrchu je zaostřen na jinou vlnovou délku. Na snímači se nachází otvor, který propouští odražené světlo, jež je zaostřené na určitou vlnovou délku. Následně je pomocí spektrometru toto světlo vychýleno na maticový senzor, který přiřazuje prostorovou polohu každému bodu. Tyto data počítač následně zpracuje a vyhodnotí. [11] [8]



Obrázek 1. schéma CLA snímače [15]

### Coherence scanning interferometry CSI

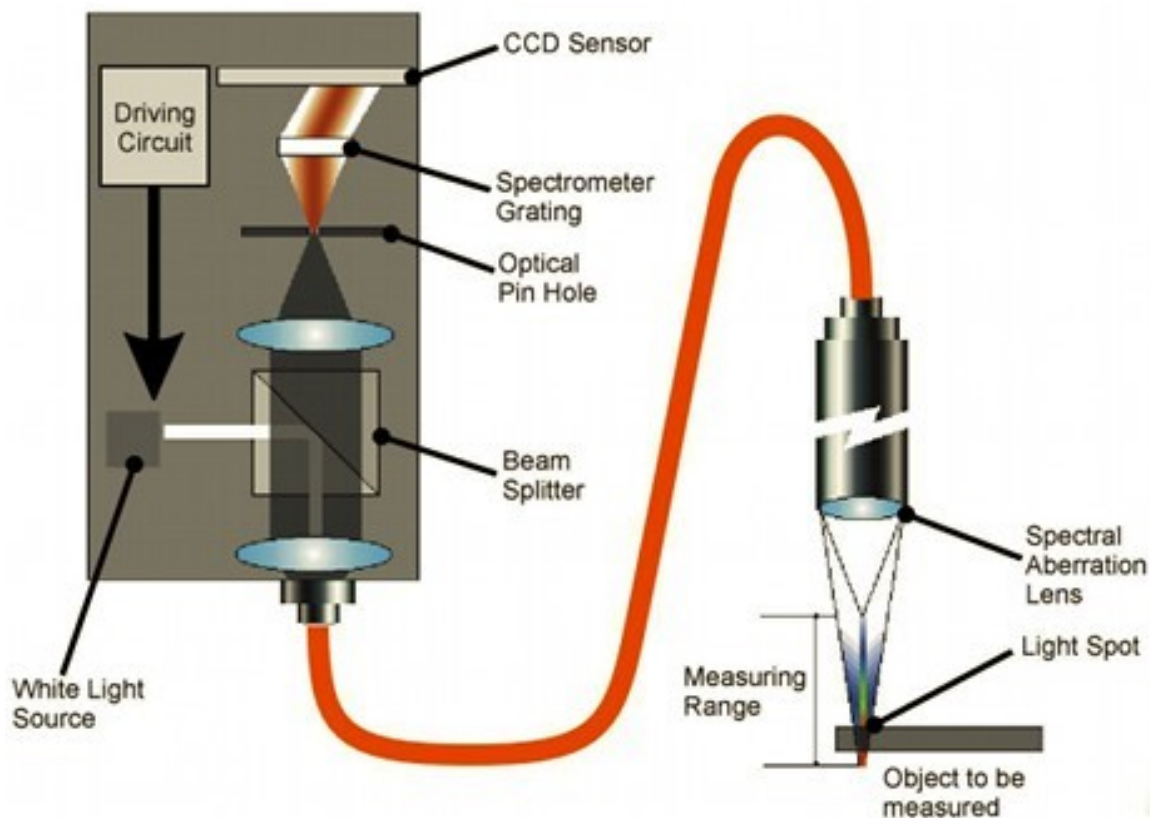
U této technologie se světlo rozkládá na dva paprsky, přičemž jeden směřuje na referenční povrch a druhý na měřený povrch. Následně jsou tyto dva paprsky odrazeny a kombinovány na detektoru a vzájemně ovlivněny, čímž se vytvoří kontrastní vzor světlých a tmavých míst. Tento interferenční vzor představuje topografii testovaného povrchu. [30]



Obrázek 2. Schéma CSI snímače [31]

### Laserový snímač

Pro měření se využívá polovodičový laser, který se odráží od zkoumaného povrchu do optického systému, který následně tento paprsek zaostří na obrazovou matici. Obrazové prvky této matice jsou využity k přiřazení polohových souřadnic každého bodu. [15]



Obrázek 3. Schéma laserového snímače [32]

### 1.2.3 Využití otisků pro měření drsnosti

Měření povrchu může být v některých případech problematické. Velkorozměrové díly, nepřístupné plochy to vše může znemožnit zkoumání povrchu. V těchto případech se však nabízí možnost využití replik takových povrchů pomocí otiskovacích hmot. U těchto hmot jsou kladeny určité požadavky. Hmota by měla být schopna kopírovat reliéf v řádu mikrometrů, být dostatečně tuhá, aby nedošlo ke změně otisknutého reliéfu, tvárná při aplikaci a snadno separovatelná. [5]

Postupy pro aplikaci otiskovací hmoty se liší podle výrobců, některé se přímo přikládají na povrch, některé se nalévají do formy, u všech však platí nutnost počkat alespoň 10 minut pro ztuhnutí hmoty. [5]



## 2 ZPŮSOBY VYHODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHŮ

### 2.1 Terminologie a popis povrchů

#### 2.1.1 Obecné termíny

Obecné termíny popisují základní části měřeného profilu

##### **Filtry profilu**

Filtr profilu má zásadní roli v analýze struktury povrchu. Filtry oddělují strukturu podél osy  $x$ , která je vyjádřena jako vlnová délka nebo frekvence. [17]

Na základě krátkovlnných a dlouhovlnných složek odděluje drsnost od vlnitosti. Filtry se dělí na:

- $\lambda_s$  filtr profilu – definuje rozhraní mezi kratšími složkami vln na povrchu a drsností
- $\lambda_c$  filtr – definuje rozhraní mezi vlnitostí a drsností
- $\lambda_f$  filtr – definuje rozhraní mezi vlnitostí a dalšími složkami vyskytujícími se na povrchu. [17]

##### **Skutečný povrch**

Skutečným povrchem materiálu se rozumí hranice mezi materiálem a jeho okolím. Povrch určuje vzhled materiálu a je ovlivněn každou úpravou či úběrem materiálu. [1]

##### **Profil povrchu**

Celkové hodnocení povrchu je poměrně náročné, využívá se tedy spíše hodnocení v řezu, a to obvykle ve směru kolmo na směr obrábění. Profil povrchu je tedy průsečnice skutečného povrchu a řezné roviny. [1]

##### **Základní profil**

Jedná se o úplný profil po využití krátkovlnného filtru  $\lambda_s$ . [1]

##### **Profil drsnosti**

Odvozuje se ze základního profilu. K tomu je využito dlouhovlnných složek, tedy filtru profilu  $\lambda_c$ . [1]

### Profil vlnitosti

Získání tohoto profilu probíhá postupnou aplikací filtrů  $\lambda_f$  a  $\lambda_c$  na základní profil. Nejprve jsou pomocí filtru profilu  $\lambda_f$  potlačí dlouhovlnné složky a následně jsou potlačeny krátkovlnné složky filtrem profilu  $\lambda_c$ . [1]

### Základní délka – $l_p$ , $l_r$ , $l_w$

Jedná se o délku profilu ve směru osy X, její využití je k nalezení nerovností, které charakterizují vyhodnocovaný profil. V případě  $l_r$  a  $l_w$  se číselně rovnají filtrům  $\lambda_c$  či  $\lambda_f$ . Základní délka  $l_p$  se rovná vyhodnocované délce základního profilu. [1]

### Vyhodnocovaná délka - $l_n$

Slouží k vyhodnocení posuzovaného profilu, tato délka je měřena na ose X. [1]

#### 2.1.2 Struktura povrchu

Při měření povrchu obvykle získáme jejich grafické znázornění v podobě trojúhelníku nebo sinusoid. Tato struktura je utvořena nástrojem při úběru materiálu. Výchylinky a nesourodost povrchu je vytvořena chybami dráhy nástroje, vibracemi či dalšími faktory. [1]



Obrázek 4. Textura povrchu [33]

### Tvar

Jedná se o základní tvar určující plochu s vyloučením vlnitosti a drsnosti. Vzniká během obráběcího procesu a mohou jej ovlivnit špatné vodící plochy, teplo či nedostatečná tuhost.

[14]



Obrázek 5. Tvar povrchu [33]

### Vlnitost

Vlnitost je definována jako charakteristika vzniklá nedokonalým nástrojem stroje. Na rozdíl od drsnosti, která je při úběru materiálu vytvořena vysokoenergetickými procesy, vzniká nízkou energetickými procesy, kterými může být například chvění stroje. Dalším faktorem, ovlivňujícím vlnitost může být předešlá deformace obrobku. K oddělení drsnosti a vlnitosti z naměřeného vzorku se využívá vlnových délek. [13] [14]



Obrázek 6. Vlnitost povrchu [33]

### Drsnost

Na rozdíl od vlnitosti je drsnost neodmyslitelnou částí povrchu po úběru materiálu. Zahrnuje stopu po posuvu nástroje, která je velmi výrazná při soustružení i broušení. U konvenčních procesů se pohybuje v širokém rozměrovém rozsahu. U konvenčních technologií vznikají drsnější povrchy. Je znatelná u hoblování, kde je krok pojezdu i 20 mm. Mezi nejmenší u konvenčních technologií dosahuje lapování, kde jsou odstupy v řádech desetin mikrometru. Menších hodnot drsnosti dosahují nekonvenční technologie, kde technologie jako řezání iontovým paprskem, kde měřítko drsnosti dosahuje velikosti atomu. [18]



Obrázek 7. Drsnost povrchu [33]

### 2.1.3 Parametry drsnosti povrchu

Každý povrch je kromě jeho struktury popsán i parametry, které určují jeho rozměrovou stránku. Získávají se pomocí šikmých či kolmých průřezů se skutečným profilem. Dle toho, z které části profilu jsou získávány, se označují:

- P-parametr – získává se výpočtem ze základního profilu
- W-parametr – získává se výpočtem z profilu drsnosti
- R-parametr – získává se výpočtem z profilu vlnitosti. [1]

#### Ra, Pa, Wa – Střední aritmetická úchylka profilu

Jedná se o aritmetický průměr neboli střední hodnotu zjišťovaného bodu profilu od střední čáry na měřené délce L získaný z výškových souřadnic  $Z(x)$ . Vzhledem k aspektu průměru nejde o zcela vypovídající hodnotu, neboť nereaguje citlivě na extrémní výšky a rýhy. Dva naprosto odlišné povrchy mohou dosáhnout stejné hodnoty. [1]

$$Ra, Wa, Pa = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (1)$$

#### Rp, Pp, Wp – nejvyšší výška výstupku profilu

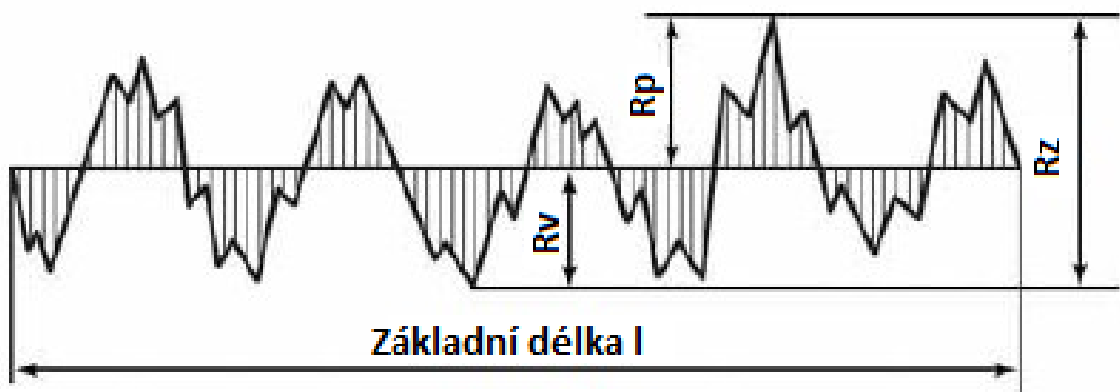
Nejvyšší výška profilu získaná na ose Z v rozsahu základní délky (viz obrázek 8.). [1]

**$R_v$ ,  $P_v$ ,  $W_v$  – největší hloubka prohlubně profilu**

Výška nejnižší prohlubně získaná na ose Z v rozsahu základní délky (viz obrázek 8.). [1]

 **$R_z$ ,  $P_z$ ,  $W_z$  – výška nerovností**

Tento parametr je vypočten jako součet nejnižší prohlubně  $Z_p$  a nejvyššího vrcholu  $Z_v$  na základní délce  $l$  (viz obrázek 8.). [1]

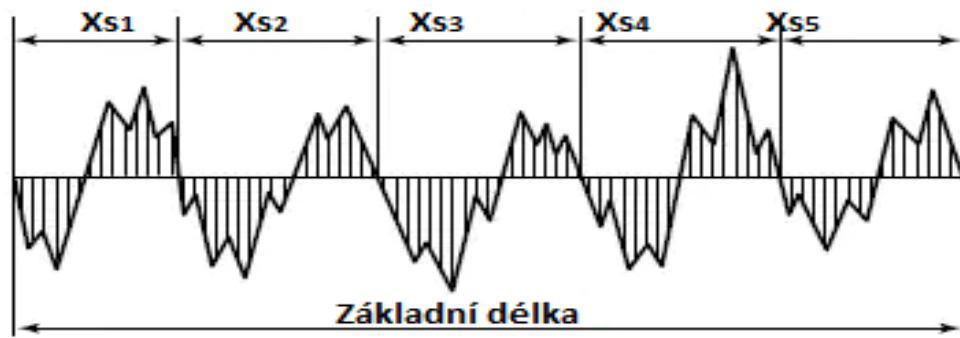


Obrázek 8. Výška nerovností profilu drsnosti [34]

 **$R_{Sm}$ ,  $P_{Sm}$ ,  $W_{Sm}$  – průměrná šřka prvků profilu**

Jedná se o aritmetický průměr šířek zjištěný z osy X v rozsahu základní délky (viz obrázek 9.). [1]

$$P_{Sm}, R_{Sm}, W_{Sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{Si} \quad (2)$$



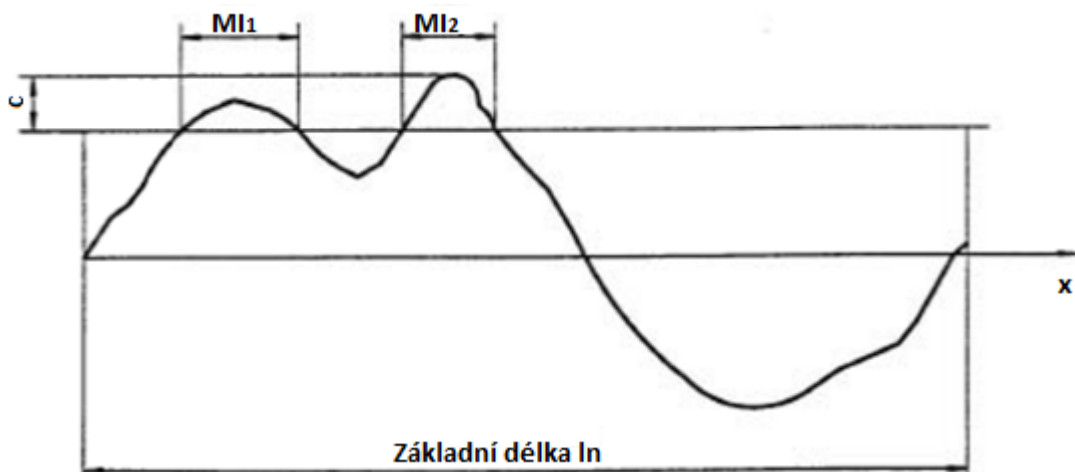
Obrázek 9. šířka prvků profilu [34]

### Rmr, Pmr, Wmr

Tento parametr určuje procentuální zaplnění materiálem na měřené délce v dané hloubce řezu. Je vyjádřen vztahem:

$$Pmr(c), Rmr(c), Wmr(c) = \frac{MI(c)}{ln} \quad (3)$$

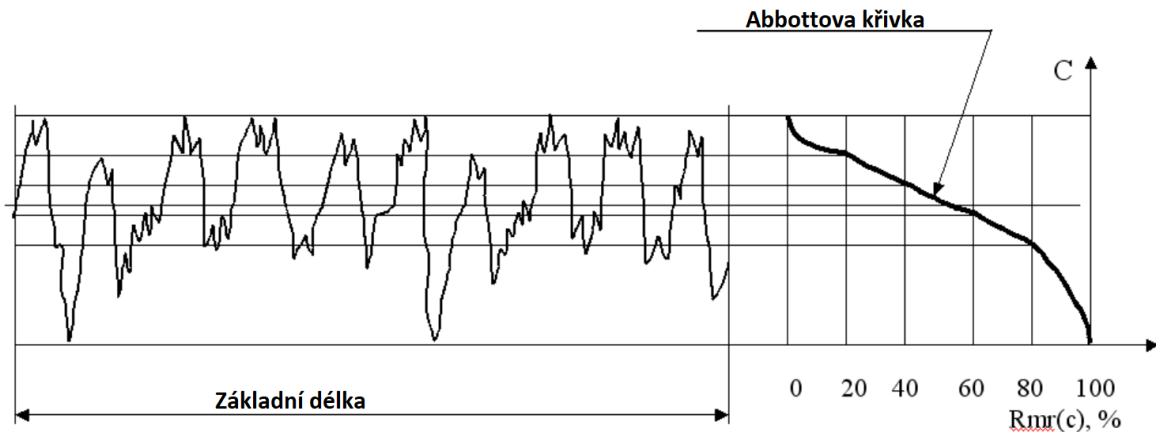
MI je délka elementů materiál, c daná úroveň a ln je vyhodnocovaná délka. [1]



Obrázek 10. Vyjádření parametru Rmr [1]

### Abbott-Firestoneova křivka

Jedná se o funkční křivku, které vyjadřuje zaplnění materiálu v závislosti na hloubce. Její vykreslení probíhá pomocí výpočetních zařízení. V praxi se využívá například pro stanovení opotřebení. [19]



Obrázek 11. Abbott-Firestoneova křivka [35]

## 2.2 Statistické metody vyhodnocení dat

Vyhodnocení dat je nejdůležitějším krokem při analýze, neboť data bez vyhodnocení jsou jen velká kupa čísel. Statistická analýza dokáže odhalit chyby, zjistit možný budoucí vývoj, odhalit podobnost, a to vše na základě měření či pozorování hromadných jevů.

### 2.2.1 Statistické soubory

Statistickým souborem se rozumí souhrn dat, která chceme prozkoumat. Tato data mohou mít jakýkoliv charakter. Tyto soubory se dělí na:

- Základní soubor – základní soubor je takový, který obsahuje veškerá data. Vzhledem k tomu, že získání veškerých dat je prakticky nemožný, v praxi se analyzuje pouze soubor výběrový, na jehož základě se odhadují vlastnosti základního souboru, přičemž pro optimální nezkrácená data by tento soubor měl být změřen v krátkém časovém intervalu. [20]
- Výběrový soubor – tento soubor obsahuje pouze určitý, z pravidla náhodný výběr dat, na kterých se následně provádí analýza za účelem zjištění vlastností souboru základního. Tento soubor by měl být zatížen pouze náhodnou chybou, aby byl odhad co nejpřesnější. [20]

### 2.2.2 Aritmetický průměr

Jedná se o základní momentovou míru polohy, která se využívá k charakterizaci centrální tendence dat. Jedná se o maximálně věrohodný odhad střední hodnoty normálního rozdělení.

Aritmetický průměr je vypočten vzorcem:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4)$$

Kde  $x_i$  jsou všechny prvky a  $n$  je počet těchto prvků. [20]

### 2.2.3 Rozptyl a směrodatná odchylka

Rozptyl je mírou variability. Jeho velikost je závislá na celé množině prvků výběru a charakterizuje rozptýlení hodnot kolem střední hodnoty. Rozptyl je vyjádřen vzorcem:

$$s_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (5)$$

[1]

Směrodatná odchylka se vypočítá jako druhá odmocnina rozptylu. Směrodatná odchylka musí být počítána z rozptylu kvůli jedné z vlastností aritmetického průměru, a to konkrétně té, že v případě normálního rozdělení a dostatečného množství dat, by se záporné a kladné odchylky vrušily. Využitím druhé mocniny, tedy čtvercových odchylek vzniknou pouze odchylky kladné, které se vrušit nemohou a vyjadřují tedy jako součet míru rozptýlení. [20]

[21]

### 2.2.4 Medián

Medián vyjadřuje jakýsi střed mezi prvky a je robustním parametrem, tedy takovým, který není přímo ovlivněn velikostí dat. Jedná se tedy o hodnotu, u které je 50 % hodnot větších a 50 % hodnot menších. Medián se však získává různě na základě toho, zda soubor obsahuje lichý či sudý počet prvků. Je-li soubor lichý, mediánem se stává hodnota uprostřed souboru seřazeného dle velikosti. V případě souboru se sudým počtem prvků jsou v tomto středu dva prvky, v tomto případě je mediánem aritmetický průměr těchto prvků. [22]

### 2.2.5 Kvantily

Kvantily rozdělují soubor seřazený dle velikosti na dvě části, přičemž jedna obsahuje  $\alpha$  % prvků menších či stejných než tento kvantil a druhá polovina obsahuje  $1-\alpha$  % prvků rovných či větších než  $\alpha$  % kvantil. Kvantily se dále dělí podle toho, na kolik dílů je soubor rozdělen:

- Centil – dělení souboru po 1 %
- Decil – dělení souboru po 10 %
- Kvartil – dělení souboru po 25 %

Nejčastěji se využívá dělení na kvartily. Ty jsou celkem 3 a nazývají se:

- Dolní kvartil – odděluje čtvrtinu nejmenších hodnot
- Medián – odděluje horní a dolní polovinu hodnot
- Horní kvartil – odděluje spodních 75 % dat

Těchto kvantilových odhadů rozptýlení se následně využívá k výpočtu interkvartilového rozpětí, které ukazuje rozptýlení 50 % dat kolem mediánu, tedy 25 % menších a 25 % větších hodnot než medián. [20]

$$R = (\tilde{x}_{0,75} - \tilde{x}_{0,25}) \quad (6)$$

### 2.2.6 Grafické zpracování dat

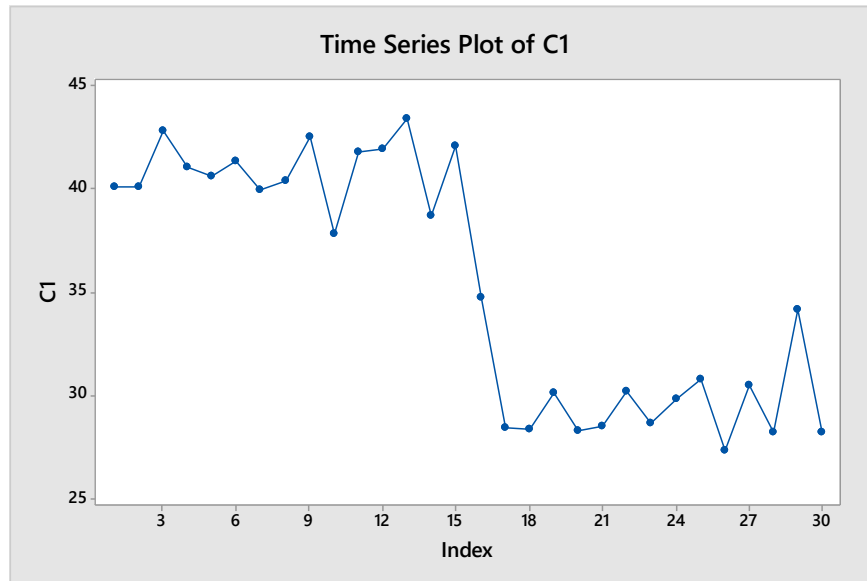
Data se graficky dají vyjádřit ve velkém množství variant. Pro zjištění základních vlastností dat jsou důležité následující grafy.

#### Diagram časové řady

Tento diagram zobrazuje vývoj dat v závislosti na čase, je tedy potřeba pracovat s neseřazenými daty. V ideálním případě by měl jeho průběh být stabilní, vyskytnou-li se zde znatelné výkyvy dat, může to znamenat ovlivnění pracovníkem či měřicím přístrojem.

[8]

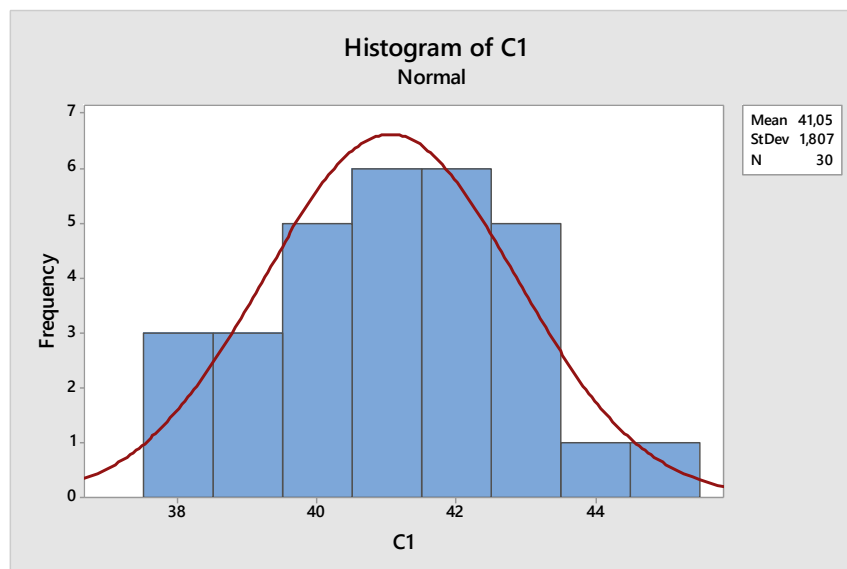




Obrázek 12. Graf časové řady

### Histogram

Tento graf znázorňuje rozdělení četnosti dle intervalů. Tyto intervaly jsou znázorněny sloupci, jejichž výška je ovlivněna četností hodnot spadajících do daného intervalu. Šířka intervalů může ovlivnit výsledný diagram. V případě souboru dat s normálním rozdělením ovlivněným pouze náhodnými chybami by měl být tento graf symetrický. [8] [41]

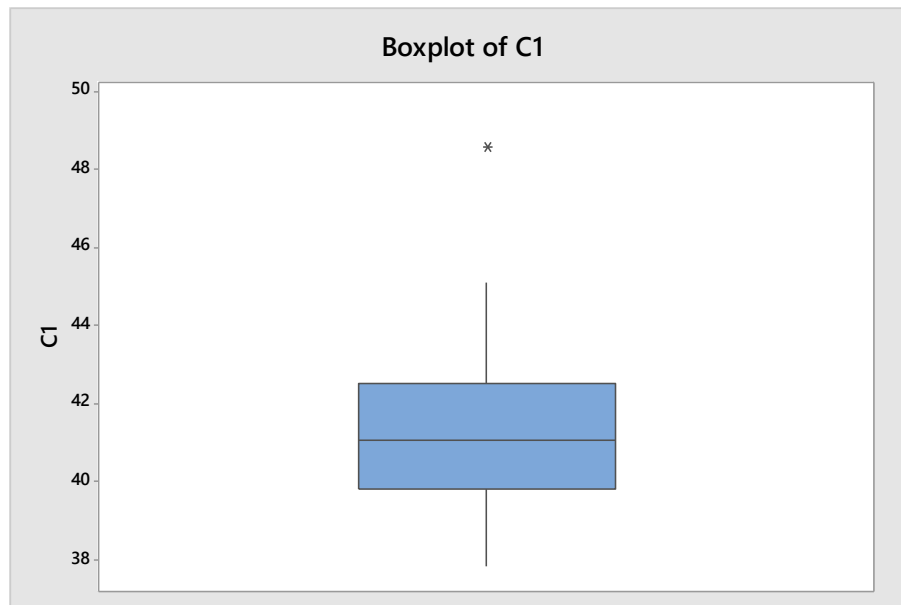


Obrázek 13. Histogram

### Box-plot diagram

Tento diagram rozděluje data dle kvartilů. Můžeme zde názorně vidět množství dat obsažených v daných kvartilech, včetně umístění mediánu. Dále zde můžeme porovnávat

medián s aritmetickým průměrem. Jeho hlavní využití je však dobré znázornění odlehlých hodnot, posouzení symetrie dat a v případě spojení více diagramů porovnání rozptylů více souborů. [8] [40]



Obrázek 14. Box-plot diagram

### 2.2.7 Teorie hypotéz

Teorie hypotéz popisuje vyhodnocovací proces, při kterém proti sobě stojí dvě protichůdná tvrzení. Prvním tvrzením je nulová hypotéza  $H_0$ , která se obvykle stanoví jako rovnost testovaných kritérií. Naproti tomu tvrzení stojí hypotéza alternativní  $H_A$ , která vyjadřuje stav jiný než rovnovážný. Vzhledem k tomu, že úplné rovnovážnosti je problematické dosáhnout, je lepší formulovat nulovou hypotézu tak, že rozdíl testovaných souborů je ovlivněn pouze náhodnou chybou a jejich rozdíl je tedy statisticky nevýznamný. [8]

Ačkoliv nulová hypotéza je vždy značena jako rovnost, alternativní hypotéza může být formulována třemi způsoby, a to že soubor je menší, větší či nerovný. Menší či větší se volí pouze v případě, že chceme zjišťovat rozdílnost v některém z těchto směrů, v ostatních případech, kdy nezáleží, zda jsou hodnoty menší či větší volíme alternativní hypotézu jako nerovnost. [8]

Teorie hypotéz a jejich testování ve silně ovlivněno velikostí výběrového souboru, ten totiž nemusí vždy dostatečně vystihovat základní soubor. Z toho důvodu jsou v testování hypotéz zavedeny koeficienty alfa a beta. Koeficient alfa je volena při vyhodnocování a stanoví nám, s jakou pravděpodobností můžeme spoléhat na výsledek. Koeficient beta nám vyjadřuje sílu testu. [8]

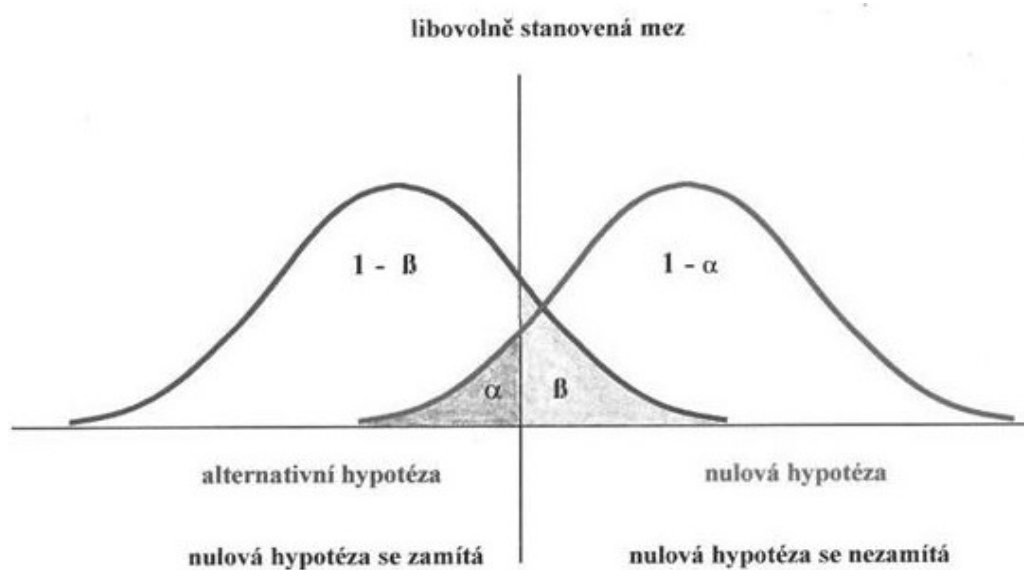
Při testování je možno dopustit se dvou chyb:

- Chyba I. druhu – nastává v případě, kdy je nulová hypotéza zamítnuta i přes to, že by zamítnuta být neměla.
- Chyba II. Druhu – hypotéza nulová nebyla zamítnuta i přes to, že by měla platit hypotéza alternativní

Tabulka 1. Chyby hypotéz [36]

Skutečnost	Výsledek testu	
	Nezamítáme H0	Zamítáme H0
Platí H0	Správné rozhodnutí Pravděpodobnost rozhodnutí $1-\alpha$ (spolehlivost)	Chyba I. Druhu Pravděpodobnost rozhodnutí $\alpha$ (hladina významnosti)
Platí H1	Chyba II. Druhu Pravděpodobnost rozhodnutí $\beta$	Správné rozhodnutí Pravděpodobnost rozhodnutí $1-\beta$ (síla testu)

Při testování hypotéz je snaha dosáhnout nízké hodnoty u obou těchto testů. Nastává zde však problém, že se zvyšováním síly testu se sníží hladina významnosti, snažíme se tedy dosáhnout jisté rovnováhy mezi těmito koeficienty. V praxi se nejčastěji volí hladina významnosti  $\alpha = 0,05$ . [8]



Obrázek 15. Chyby hypotéz [36]

Teorie hypotéz nachází uplatnění například u dvou testů v exploratorní datové analýze EDA:

- F – test je testem rozptylů, přičemž nulová hypotéza je zde formulována tak, že rozptyly se liší statisticky nevýznamně, je tedy možné považovat je za rovné. Alternativní hypotéza říká, že rozptyly se liší statisticky významně, rovné tedy nejsou
- T – test testuje střední hodnoty, tedy aritmetické průměry. Nulová hypotéza říká, že průměry se liší statisticky nevýznamně, alternativní hypotéza říká, že se liší statisticky významně, nerovnájí se tedy. [8]

### 3 NEKONVENČNÍ OBRÁBĚCÍ TECHNOLOGIE

V dnešní době existují materiály velmi vysoké tvrdosti a pevnosti, když však byly vytvořeny zjistilo se, že zpracovat je může být problém. Bylo tedy nutné vyvinout nové technologie, které nebudou spoléhat pouze na tření hrotu o materiál, ale bude se odebírat alternativními způsoby, které si poradí i s křehkými, avšak extrémně tuhými materiály.

#### 3.1 Definice nekonvenčního obrábění

Nekonvenční obrábění je definováno jako skupina procesů, které odstraňují přebytečný materiál z obrobku různými technikami zahrnujícími mechanickou, tepelnou, elektrickou a chemickou energii nebo kombinací těchto energií, avšak za absence řezných nástrojů. [37] Využití je převážně pro těžce obrobitelné materiály. I přes o, že v některých případech bylo využití konvenčních metod u takových materiálů možné, nebylo by to ekonomicky ani technicky výhodné. A proto nekonvenční obráběcí metody vznikly. Tyto metody využívají a kombinují chemické, elektrické či fyzické principy. Díky využití těchto disciplín není nutnost využívání nástroje tvrdšího než obráběný materiál. I přes to mají však nekonvenční technologie své omezení. Zatímco u konvenčních metod to je tvrdost materiálu, u nekonvenčních jsou ty právě fyzikální a chemické vlastnosti. [12]

##### 3.1.1 Využití nekonvenčních technologií

Kromě rozšíření možnosti opracovávat těžko obrobitelné materiály se využívají nekonvenční technologie pro:

- dosahování vysoce kvalitních povrchů
- obrábění komplexních tvarů
- obrábění obtížně upnutelných obrobků
- tenkostěnných výrobků, kde by třením nástroje mohlo dojít k poškození či deformaci
- Obrobení materiálů citlivých na teplo

Nekonvenční technologie však mají i nevýhody. Jedná se o poměrně drahé technologie. S tím souvisí i vysoké náklady na servis a údržbu a v poslední řadě i velká energetická spotřeba. [38]

## 3.2 Dělení nekonvenčních technologií podle způsobu úběru materiálu

### 3.2.1 Plazmová technologie

Plazma je čtvrtým skupenstvím látek. Dlouhá staletí byla známa 3 skupenství a to kapalné, pevné a plynné. S vynálezem elektřiny však začali lidé pozorovat další skupenství. Poprvé byla plazma popsána jako čtvrté skupenství roku 1923 chemikem Irvingem Langmuirem a její popis tedy zní velký počet částic bez pevné vazby, z nichž některé mají elektrický náboj, které jsou-li v dostatečném objemu při sečtení záporných a kladných elektrických nábojů získáme náboj nulový. Do průmyslového zařízení se však plazmový oblouk k řezání začal používat až roku 1955. [12]

#### Vznik plazmy

Nejdůležitějším faktorem pro vznik plazmy je ionizace plynů, čímž se stanou vodivými. Je-li úplně ionizovaná, může dosáhnout teploty přibližně  $10 \times 10^4 \text{ K}$ . Při běžném použití se však používá pouze částečná ionizace, které dosahuje teplot do  $20 \times 10^3 \text{ K}$ .

Principem obrábění plazmovým paprskem je vznik elektrického oblouku, do kterého je vhaněn plyn, který je následně ionizován, při čemž se značně zvedne jeho teplota a následně je vyfukován ven z nástroje. Tato plazma zvládne velmi dobře oddělovat kov i jiné materiály jako je keramika. [9]

V praxi se pro řezání plazmou využívají různé směsi plynů, které ovlivňují vzniklou plazmu

- Plazmové plyny – těmito plyny jsou Ar, Ar+H<sub>2</sub>, He, N<sub>2</sub>. Tato skupina je přiváděna do oblouku a slouží ke vzniku plazmy
- Fokusační plyny – do této skupiny patří Ar, Ar+H<sub>2</sub>, Ar+N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>. Slouží k zúžení paprsku po opuštění hořákové trysky
- Ochranné plyny – tyto plyny slouží k ochraně paprsku před vlivem plynů v atmosféře

#### Druhy plazmových řezáků

- **Hořák s transférovým obloukem**

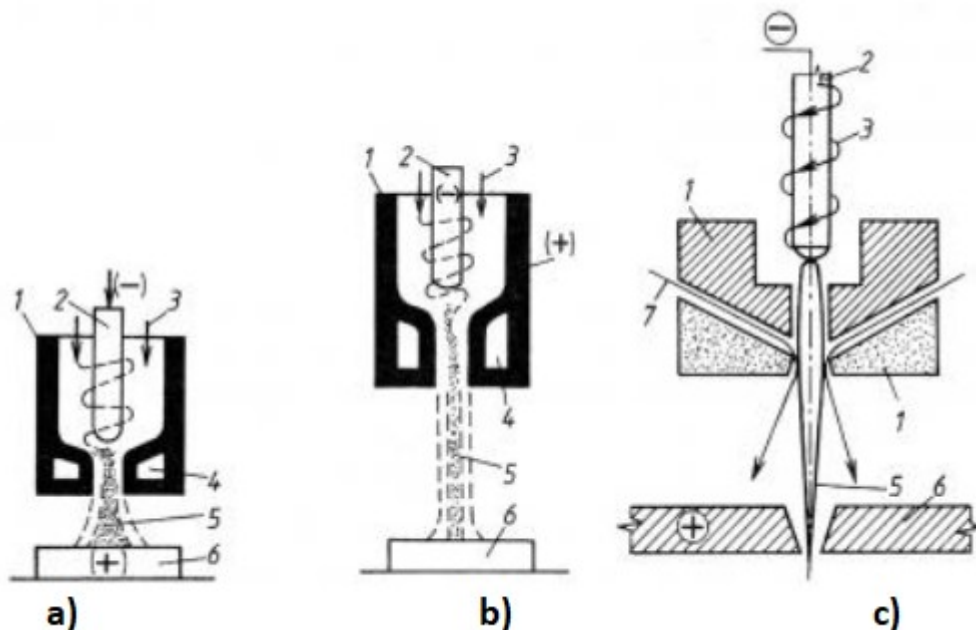
Nástroj obsahuje elektrodu, která slouží jako katoda a obrobek má funkci anody. Elektrický oblouk tedy vzniká mezi nimi. Kolem elektrody proudí plyn, který se ionizuje, díky čemuž se zahřeje a roztaví materiál (viz obrázek 16.a).

- **Hořák s netransferovým obloukem**

Princip je zde podobný jako u předešlého typu, rozdíl je však v tom, že anodu tvoří těleso hořáku, elektrický oblouk tedy vzniká mezi tělesem a vnitřní elektrodou. Spolu s předešlým typem jsou vhodné pro řezání ušlechtilých ocelí a neželezných kovů (viz obrázek 16.b).

- **Hořák s vstřikováním vody**

Účelem této metody je zvýšení trvanlivosti trysky. Voda je přiváděna bočními otvory a celý proces se obvykle provádí pod vodní hladinou, díky čemuž je tato metoda méně hlučná a snižuje se prašnost a vznik UV záření. Další výhodou této metody je dosažení vysokých řezných rychlostí. Je použitelná pro vysoce legované oceli, konstrukční oceli, měď, hliník, či titan. (viz obrázek 16.c).



Obrázek 16. Schéma plazmového řezání [39]

- **Třískové obrábění s plazmovým ohřevem**

Jedná se o specifický způsob obrábění, který kombinuje konvenční a nekonvenční metodu. Plazma zde slouží pro zahřátí výrobku, čímž se oslabí a je snadněji obrobitelný konvenčními metodami. Využití tato metoda nachází jak u obrábění, tak soustružení, a to nejčastěji u těžkoobrobitelných materiálů jako jsou žárupevné či žáruvzdorné oceli. [9]

## Použití plazmy

Plazma má ve strojírenství široké využití. Mezi nejčastější použití se řadí řezání či svařování, dále se však využívá k nanášení povlaků, tavení v pecích nebo pro rozklad škodlivých průmyslových odpadů. [23]

- **Řezání plazmatem**

Při řezání se využít zejména tepelný a dynamický účinek plazmatu. Díky tlaku plynu je natavený materiál ihned vyfukován z místa řezu. Plazmové řezání je omezeno tloušťkou materiálu, neboť ve velké tloušťce je nižší tlak a řezný účinek není tak efektivní. Výhodou je však vysoká rychlost a v případě řezání pod vodou i nízké teplotní ovlivnění materiálu. [23]

- **Svařování plazmatem**

Jedná se o vysoce efektivní způsob prováděný v ochranné atmosféře. Díky vysokým pracovním teplotám je materiál dobře nataven a dochází ke kvalitnímu spoji. Hlavní výhodou tohoto svařování je možnost svařit tupý svar bez úkosu až do tloušťky 8 mm a také nízká spotřeba přídavného materiálu. [23]

- **Nanášení povlaků**

Používá se k nanášení železných i neželezných kovů, skla, plastů či keramických materiálů pro úpravu vlastností výrobků. Ke spojení s podkladem dochází především účinkem adheze. Tloušťka povlaků se pohybuje od 2 mm do 5 mm. [23]

- **Obrábění plazmatem**

K obrábění plazmatem se používá dříve zmíněné třískové obrábění s předehřevem, další variantou je však odtavování materiálu. Ten se pomocí asistenčního plynu odfukuje, nejde však o přesné obrábění, spíše pro úběr materiálu, neboť takto obrobený povrch má vysokou drsnost a je tepelně ovlivněn. [23]

### 3.2.2 Laserový paprsek

Slovo laser, je zkratkou anglického sousloví Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, přičemž doslovný překlad je Světlo zesílené pomocí vybuzení emise záření. Koncept laseru, který známe dnes vznikl v roce 1958 a vytvořili jej vědci amerického původu A. L. Schawlow a C. H. Townes. S prvotním konceptem zvaným indukovaná emise,



který říká, že fotony mohou stimulovat emise stejných fotonů z excitovaných atomů, však přišel už Albert Einstein roku 1916. [25]

Laser využívá stimulovaného záření, přičemž generuje elektromagnetické záření v optické oblasti vlnových délek. Zjednodušeně lze tento jev vysvětlit na planetovém modelu atomu. Zde je možno vidět, jak kolem kladně nabitého jádra neboli protonu obíhají elektrony, které jsou pomocí elektrostatických sil udržovány v uzavřených drahách. Každá dráha má určité množství energie, přičemž čím je elektron vzdálenější, tím více energie mu náleží. Pro atom je přirozené, že se elektrony snaží zaujmout stav co nejmenšího množství energie, drží se tedy blízko jádru. Přejde-li elektron ze základní energetické hladiny  $E_0$  do vyšší hladiny  $E_1$ , musí určité množství energie v jednom směru absorbovat a v druhém ji emitovat. Tato emitovaná energie se projeví jako elektromagnetické záření s určitou frekvencí. [24]

$$E_1 - E_0 = h \cdot \nu \quad (7)$$

Působením energií ve formě elektronového záření, elektromagnetického vlnění či iontového záření tedy vybudíme atomy aktivní látky nacházející se v plynné, tuhé či kapalném skupenství, ve které následně nastane inverzní stav. Při následném návratu této látky do základního stavu začne vytvářet monochromatické koherentní záření, které je následně možné směřovat pomocí zrcadel a čoček. [12]

### ***Druhy laserů***

Lasery se dělí podle mnoha kritérií. Mezi ně patří vlnová délka, aktivní prostředí, provozní režim.

- **Dělení podle aktivního prostředí**

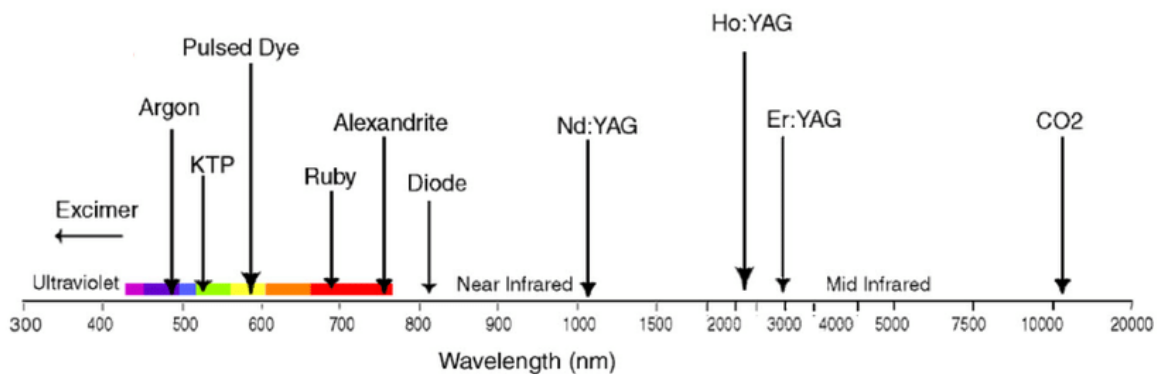
Aktivní látky se mohou vyskytovat ve 3 skupenstvích, tedy kapalném, tuhém či plynném. U technologických operací se nejčastěji setkáváme s plynným prostředím či tuhým fází. Nejčastějšími prostředími jsou:

- CO<sub>2</sub> lasery – ač se nazývají pouze CO<sub>2</sub> lasery, jejich prostředí je tvořeno směsí plynů CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> a He. Nevýhodou tohoto laseru je vysoké odpadní teplo, které může zařízení poškodit, u průmyslových laserů je proto využito chlazení například olejem s recirkulací, kde probíhá výměna tepla ve výměníku olej-voda. Pro řezání kovů se využívají lasery o výkonu několik set Watt až 20000 W. [26]

- Nd-YAG lasery – aktivním prostředím je neodym který dopuje krystaly ytrium-hliníkového granátu Y3-Al5-O12. I přesto, že aktivní materiál pro tento laser je neodym, je ho v laseru použito pouze asi 1 %. Tento systém se na rozdíl od CO2 laserů u větších aplikací chladí roztokem vody a glykolu. Účinnost tohoto laseru závisí na optimalizaci chlazení. [26]

#### • Dělení podle vlnových délek

Lasery dosahují širokého spektra vlnových délek. Pro praktické použití se používají lasery s vlnovou délkou od 400 nm do 10600 nm. V obrázku 17. je možno vidět zobrazení vlnových délek běžně používaných laserů. Díky působení energie v malém průměru a to 0,05 do 0,25 mm se energie koncentruje a její hustota dosahuje více než  $10^8 \text{W/cm}^2$ . Díky tomu v místě dopadu paprsku dosahuje teplotu až  $25000^\circ\text{C}$ . [27]



Obrázek 17. Využití vlnové délky u různých technologií [27]

#### • Dělení podle provozu

Podle způsobu provozu dělíme lasery na pulzní a kontinuální. Kontinuální laser vyzařuje souvislý paprsek, naopak pulzní vytváří paprsek v určitých intervalech. Doba trvání tohoto pulzu se může pohybovat od milisekundy až po femtosekundu, tedy  $1 \times 10^{-15}$  s. [27]

#### Využití laseru v praxi

Laser má velmi široké využití, a to nejen ve strojírenské praxi, ale i medicínské, vědecké, tiskařské. A i v samotné strojírenské praxi je využitelný pro široké spektrum operací jako je řezání, obrábění či povlakování. Hlavní výhodou laseru je bezkontaktnost procesu a vysoká účinnost, a to i na těžkoobrobitelné materiály jako je titan či diamant. [26]

- **řezání laserem:** Díky vysoké teplotě je laser schopný řezat materiály od plechů až pro tlusté ocelové pláty, u kterých spálí, odpaří či roztaví materiál v úzké šterbině. Hloubka řezu však ovlivňuje kvalitu povrchu. [26]

- **Vrtání laserem:** K vrtání laserem se obvykle používá pulzní režim, přičemž každý pulz odpaří či vypálí materiál do určité hloubky dle síly pulzu. [26]
- **Svařování:** Pro svařování se využívá laser k zahřátí povrchů stejných či kompatibilních materiálů, které se nataví a spojí. Při správném použití může svařený materiál vykazovat stejné vlastnosti jako celistvý kus. [26]
- **Tepelné zpracování:** Využívá se k zahřívání materiálu pro zlepšení jeho vlastností či k nanášení speciálních vrstev neboli depozitů, které zlepšují vlastnosti materiálu. [9]
- **Gravírování:** Pomocí odpařování materiálu v tenké vrstvě se vytváření složité reliéfy do různých materiálů jako jsou oceli, keramika, dřevo či sklo. [26]

### **Jakost povrchu po použití laseru**

Laserem řezaný povrch, ač působí hladce, vykazuje jistou míru nesourodosti. Při zvětšení je možno pozorovat drážkování, způsobené pohybem výrobku či laserového zařízení, zaostření paprsku či úběrem roztaveného materiálu. Dalším aspektem pozorovaným u laserem řezaných povrchů je rozdílná horní a dolní strana řezu, tedy vstupní a výstupní oblast paprsku. Blíže ke vstupnímu bodu je povrch hladší s pravidelnými drážkami, zatímco vzdálenější místo řezu je drsnější ovlivněna usazeninami. Z toho důvodu je pro správné měření vhodné měřit v 1/3 hloubky řezu. Nejčastěji používanými parametry při měření těchto povrchů jsou Ra a Rz. [28]

### **3.2.3 Mechanické metody**

Princip mechanického oddělování materiálu pomocí nekonvenčních metod je podobný jako u konvenčních. Na materiál je působeno nástrojem, který odštěpuje materiál.

#### **Ultrazvukové obrábění**

Metoda je založena na principu kmitání. Pomocí ultrazvukových vln je rozkmitán nástroj na frekvenci 18 až 25 kHz, následně nástroj s touto frekvencí začne vtlačovat vodu s brusnými zrny do obrobku. Díky ostrým hranám zrna vyštipují části materiálu a obrábí výrobek. [816]

Použití této metody je vhodné u tvrdých, avšak křehkých materiálů. Mezi takové patří keramika, křemík, diamant, polodrahokamy, sklo či slinuté karbidy.

Stroj pro obrábění ultrazvukem se skládá z:

- Ultrazvukového generátore – slouží k přeměně nízkofrekvenční energie, které se pohybuje kolem 50 Hz na vysokofrekvenční která dosahuje až 30 000 Hz. Výkon zdroje se odvíjí od velikosti nástroje.
- Ultrazvukového měniče – slouží k přetvoření elektrické energie na akusticko-mechanickou energii. K tomu využívá magnetostrikční či piezoelektrický jev. Jejich principem je změna délky určitých materiálů působením magnetické či elektrické energie.
- Koncentrátoru – jedná se o kovovou trubku či tyč vloženou mezi nástavec a měnič, která zesiluje amplitudu kmitů.
- Nástavce – jedná se o díl cylindrického tvaru, jehož průměr se po délce mění. Vyrábí se nejčastěji z titanu či hliníku a slouží k vedení kmitů k nástroji
- Nástroje – konečná část která je přímo ve styku s obrobkem. Její materiál je nutno volit podle materiálu obráběného výrobku. [9]

### **Obrábění vodním paprskem (WJM)**

Tato metoda je založena na vodním paprsku o vysokém tlaku a rychlosti, jež svým působením odebírá materiál. Může se jednat o paprsek čisté vody či vody s příměsí abraziva.

Pro dosažení tlaku vody potřebnému k obrábění se využívá hydraulický násobič, které dokáže mnohonásobně zvýšit tlak vody, a to z 20MPa až na 400MPa. K dopravě vody je využíváno potrubí, kde je udržován konstantní tlak. K případnému míchání vody s abrazivem dochází až k hlavě s tryskou. [9]

Využití této technologie nalezneme u kovových i nekovových materiálech, mezi něž patří oceli, slitiny titanu, plasty, kompozity, gumy, grafit. Hlavní výhodou této technologie je absence tepelného ovlivnění, díky čemuž se zamezí deformaci a změně struktury v místě působení paprsku. [10]

### **3.2.4 Chemické a elektrochemické metody**

#### **Elektrochemické obrábění**

Principem této metody je elektrochemická reakce, která rozpouští obráběný materiál. Využívá se k tomu kapalinový vodič neboli elektrolyt, který prochází mezi obrobkem a

nástrojem štěrbinou o rozměru od 0,05-2 mm. V tomto systému slouží obrobek jako anoda a nástroj jako katoda. [9]

Jako kapalinový vodič se nejčastěji volí různé chloridy jako chlorid draselný, sodný nebo nitrid sodný, které patří do skupiny anorganických solí. V určitých případech obrábění speciálních materiálů se volí i jiné roztoky, a to například kyseliny či zásady. [29]

Nejdůležitější roli však u elektrochemického obrábění hraje nástroj, neboť ten musí mít tvar negativu obrobku. Je proto nutné volit správný materiál, který musí splňovat několik kritérií. Je nutné, aby byl dostatečně tuhý, ale zároveň obrobitelný, aby bylo možno vytvořit potřebný tvar. Zároveň musí být odolný proti chemickému vlivu elektrolytu. Mezi materiály, které splňují tyto podmínky patří mosaz, titan, bronz, nerezové oceli. [10]

### **Chemické obrábění (CM)**

Při chemickém obrábění dochází k úběru materiálu pomocí chemické reakce. Tato reakce vzniká mezi obrobkem a prostředím ve kterém je vložen. Toto prostředí je tvořeno kyselinou či hydroxidem. Obrobek se odleptává po vrstvách o různých tloušťkách od setin milimetru až po milimetry. Abychom zamezili odleptání potřebných ploch, je nutné je chránit, a to pomocí speciální vrstvy neboli masky. [10]

## **3.2.5 Tepelné a elektrotepelné metody**

### **Elektroerozivní obrábění (EDM)**

Podobně jako u elektrochemického obrábění i zde zaujímá obrobek pozici anody, přičemž katodou se stává nástrojová elektroda. Obrobek je ponořen v tekutém dielektriku a materiál je odebrán pomocí elektrických výbojů. Dielektrikum, ve kterém obrábění probíhá, může být jak kapalně, tak plynně. Jedná se o prostředí s vysokým elektrickým odporem. Touto metodou je možno obrábět pouze vodivé materiály, nevodivý materiál by nemohl zastat úlohu anody a nevznikl by výboj, který slouží k odběru materiálu. [16]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavní cíle diplomové práce jsou statistické nalezení a stanovení diferencí mezi vyhodnocováním povrchů ve shodě s ISO 4287, ISO 4288 a dále ISO 25 178. Následně provedení průzkumové analýzy obrobených povrchů s využitím bezkontaktního profiloměru a následné statistické vyhodnocení povrchových komparací naměřených dat dle odpovídajících softwarů

Krom hlavních cílů se tato diplomová práce zabývá také vytvořením otisků vyhodnocovaných povrchů pomocí otiskovací hmoty SILOFLEX a následným určením podobnosti těchto otisků s originálními povrchy.

## 5 VYHODNOCOVANÉ VZORKY

Tato diplomová práce vyhodnocuje celkem 12 vzorků. Šest vzorků tvoří ocelové díly různých tloušťek, které byly rozřezány pomocí technologie plazmového a laserového řezání. Zbýlých 6 vzorků jsou otisky těchto dílů.

### 5.1 Ocelové vzorky

Tyto vzorky jsou vyrobeny z oceli ČSN 11 373, dle značení EN 1.0036. Jedná se o ocel nelegovanou, která obsahuje nanejvýše 0,17 % uhlíku a ostatních prvků ovlivňujících vlastnosti jako jsou síra, dusík či fosfor. Jedná se o ocel svařitelnou ocel, vhodnou pro části různých konstrukcí či strojů.

Tloušťky desek pro tyto vzorky byly zvoleny 5 mm, 10 mm a 15 mm. Aby bylo dosaženo stejnorodosti struktury při aplikaci obou technologií, byly vyřezány oběma technologiemi vždy z jedné desky. Díly vyřezány pomocí laseru byly vyrobeny ve firmě HP – KOVO a díly řezané pomocí plazmy byly vyrobeny ve firmě KS – KOVO.

Díly mají tvar vhodný pro zkoumání mnoha aspektů řezu, od delších řezů po menší rovné či kruhové výřezy a také zaoblené či zkosené hrany.

#### 5.1.1 Laserový stroj

Pro řez dílů laserovým paprskem byl využit stroj TruLaser 3030 vyrobený firmou TRUMPF. Stroj dokáže pracovat o výkonu až 3200 W a maximální rozměr tabule kterou je schopen zpracovat je 1500 x 3000 mm. Je schopen využívat dva řezné plyny, konkrétně dusík vhodný pro řezání hliníku a kyslík vhodný pro oceli. Maximální tloušťka, kterou je schopen řezat, se liší dle materiálu, například ocel až do 20 mm, hliník a hliníkové slitiny pouze do 8 mm. Stroj je chlazen dvěma okruhy pomocí ionizované vody. Přesnost řezu je  $\pm 0,1$  mm.

Řezné podmínky byly stanoveny firmou. Dle tloušťek desky firma zvolila tyto parametry:

- Deska 5 mm – řezný výkon 2500 W a řezná rychlost 2,8 m/min
- Deska 10 mm – řezný výkon 2800 W a řezná rychlost 1,3 m/min
- Deska 15 mm – řezný výkon 2900 W a řezná rychlost 0,8 m/min





Obrázek 18. Laserový stroj TruLaser 3030

### 5.1.2 Plazmový stroj

Řez dílů plazmovou technologií byl proveden na stroji od firmy CYBERTRONIC. Stroj je tvořen routerem neboli stolem od firmy CYBERTRONIC a agregátorem ALFA – IN PEGAS 101. Zpracovatelné tabule jsou stejně jako u laserového stroje 1500 x 3000 mm. Tento stroj je využitelný jak pro řezání, tak i svařování. Materiály vhodné pro řezání touto technologií jsou ocel, hliník či nerezová ocel. Stroj je schopný řezat materiál až do 20 mm. Přesnost tohoto stroje je  $\pm 0,6$  mm. Jako řezný plyn byl využit stlačený vzduch. Parametry řezání byly voleny zpracovatelskou firmou dle tloušťky plechu:

- Deska 5 mm – Proud na agregátoru 52 A a řezná rychlost 1,7 m/min
- Deska 5 mm – Proud na agregátoru 72 A a řezná rychlost 0,95 m/min
- Deska 5 mm – Proud na agregátoru 80 A a řezná rychlost 0,68 m/min

## 5.2 Otisky vzorků

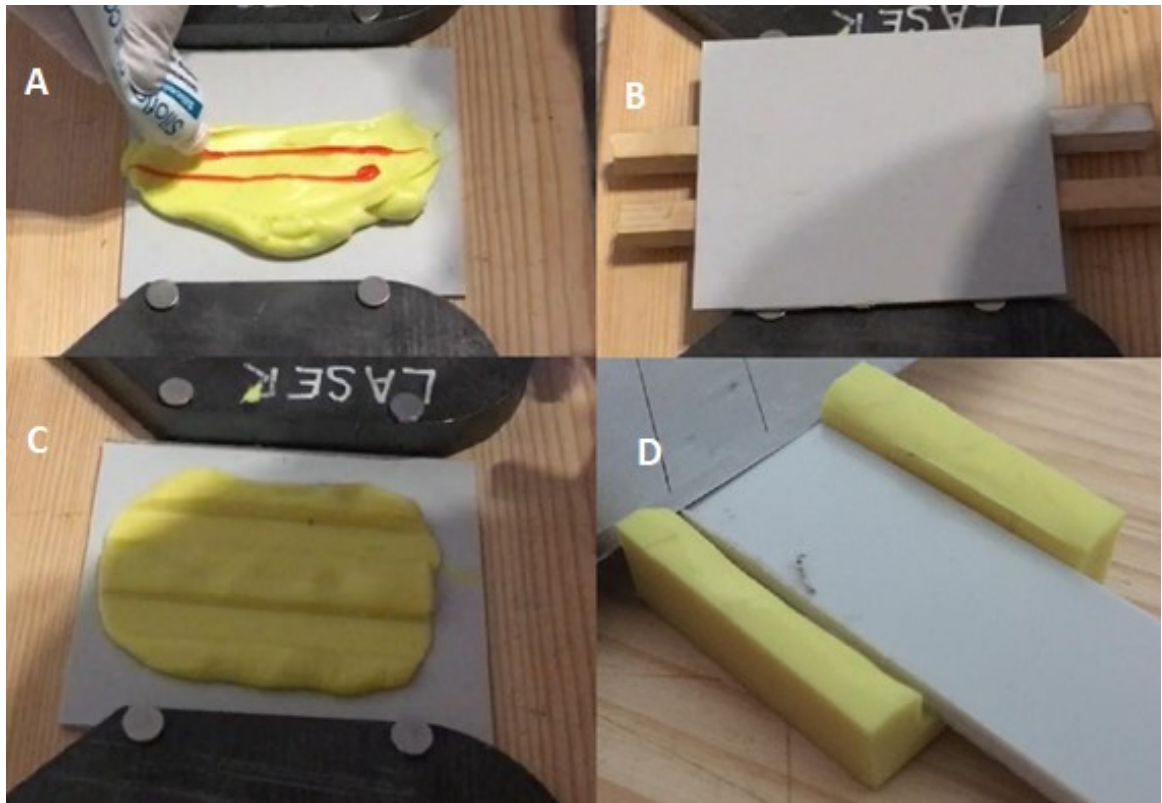
Pro výrobu otisku byly zvoleny výrobky firmy SILOFLEX. Pro podklad vzorku byla využita silikonová otiskovací hmota Siloflex Plus Putty, pro samotný otisk povrchu byla zvolena Siloflex Plus Light, které se vyznačuje vysokou objemovou stabilitou. Používá se převážně pro dentální otisky, její využití v aplikaci obráběných povrchů byla zjištěna v této práci. Jako katalyzátor tuhnutí byla využita hmota Siloflex Plus catalyst.



Obrázek 19. Sada otiskovacích hmot SILOFLEX

### 5.2.1 Výroba otisků

Prvním krokem při výrobě otisků bylo zhotovení podkladových destiček z otiskovací hmoty Siloflex Plus Putty. Pro snadné odformování destiček byla jako podklad zvolena plastová podložka. Následně bylo nabráno určité množství otiskovací hmoty obvykle pro výrobu 4 vzorků, ke kterému byl přidán katalyzátor v zadaném poměru. Důkladné smíchání těchto složek bylo provedeno ručně hnětením. Po výrobcem udávané minutě zpracování byla hmota rozprostřena na podložku a byly do ní vtlačeny dřevěné hranoly pro vytvoření rýhy pro otisk. Jakmile hmota zatuhla, byly hranoly odstraněny a otiskovací destička byla nařezána a zarovnána na 4 stejné podkladové destičky.



Obrázek 20. Postup výroby podkladové destičky

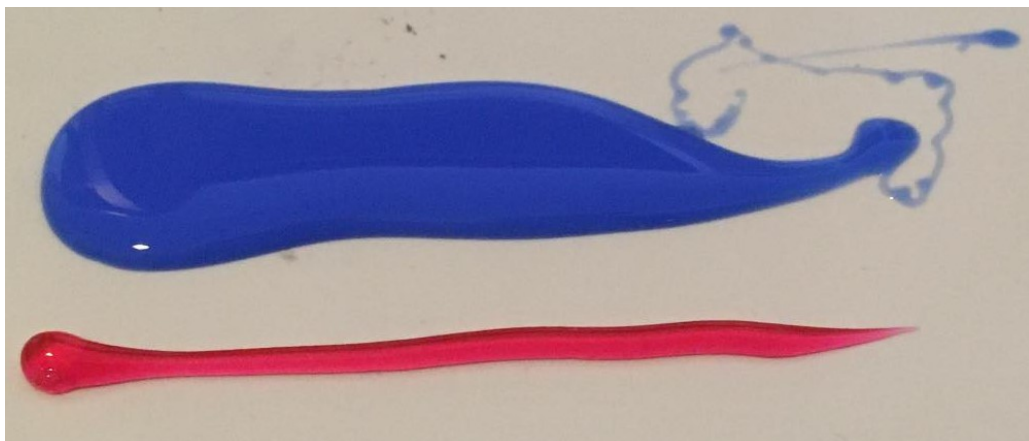
Na snímku A je možno vidět poměrové dávkování otiskovací hmoty a katalizátoru. Větší množství katalizátoru může urychlit tuhnutí, na vlastnosti nemá výrazný vliv. Na snímku B je možno vidět zaformování zpracované hmoty. Na snímku C je podložka po odformování. Na snímku D je možno vidět ořezávání podkladové destičky z důvodu sjednocení rozměru všech vzorků.

Následovala příprava vzorků pro zhotovení otisku. Otiskovaný povrch byl důkladně očištěn a odmaštěn a poté byly vzorky rozestavěny a zajištěny pomocí ocelových profilů a magnetů, aby se při otiskování nepohnuly a nenarušily tak strukturu povrchu otisku.



*Obrázek 21. Vzorky připravené pro otisk*

Příprava hmoty probíhala na plastové destičce, kde byl z tuby nanesen z tuby pruh hmoty Siloflex Plus Light a pruh katalyzátoru a následně byly pomocí špachtle smíchány. Při míchání byl kladen důraz na zamezení vzniku bublin, které by nepříznivě narušily kvalitu výsledného otisku. Jakmile byla důkladně smíchána hmota s katalyzátorem, byla část aplikována na podkladní destičku a následně přiložena na otiskovaný povrch. Destička s hmotou byla za mírného tlaku 10 sekund přitlačena k povrchu a následně ponechána 15 minut, aby dostatečně zatuhla. Po dokončení tuhnutí byla na vzorku označena technologie výroby a umístění horní strany řezaného povrchu.



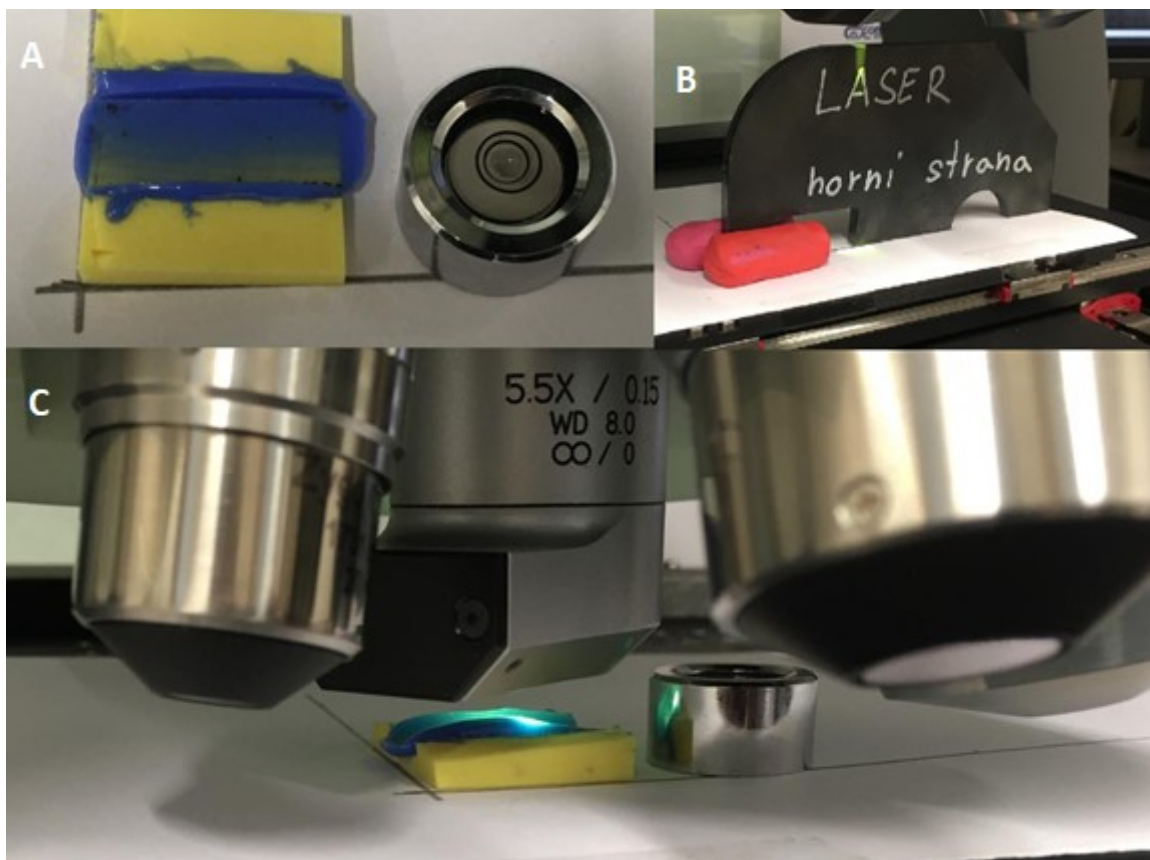
*Obrázek 22. Dávkování otiskovací hmoty a katalyzátoru*

## 6 MĚŘENÍ VZORKŮ

### 6.1.1 Snímání povrchu

Pro snímání povrchu byl využit přístroj firmy ZYGO, konkrétně optický profiloměr NEWVIEW 8000, který využívá technologii CSI. Je schopen měřit jak transparentní, tak netransparentní materiály, měřitelné je tedy sklo, kovy, polymery, organické materiály i keramika.

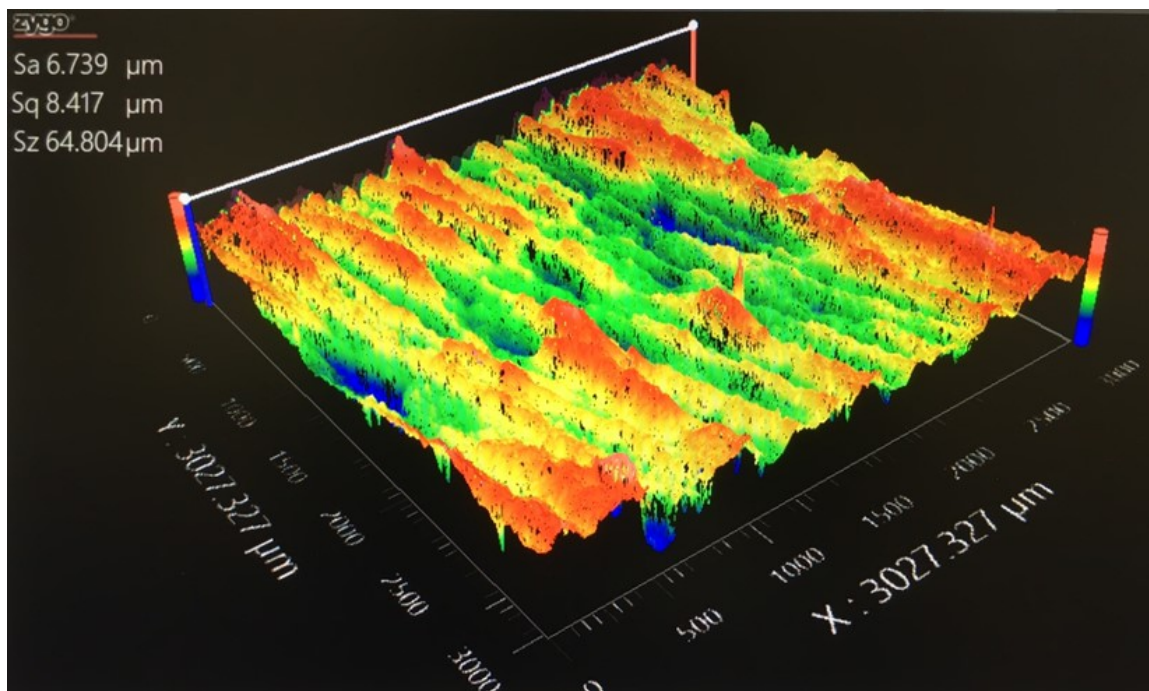
Vzhledem k omezené snímatelné ploše bylo nutno každý vzorek nasnímat několikrát. Jelikož se jedná o 3D měřicí přístroj, bylo nutné na snímaných plochách provádět řezy pro získání požadovaných hodnot. Každý vzorek byl měřen od horní strany, kde docházelo k začátku styku řezného paprsku s dílcem po spodní stranu, kde paprsek plazmy a laseru pronikal skrz plech. Zachování pořadí snímání od horní strany po spodní bylo důležité kvůli proměnnému charakteru kvality řezu vzhledem k tloušťce řezaného materiálu. Pro získání co nejpřesnějších dat byla snímací podkladní deska vyrovnána pomocí vodováhy.



Obrázek 23. Měření vzorků na bezkontaktním profiloměru ZYGO NEWVIEW

Na snímku A je možno vidět rovnovážné ustálení měrné podkladní plochy a měřený vzorek. Na snímku B je možno vidět měřený ocelový vzorek, který byl zafixován proti pohybu a

pádu. Dále je možno si zde povšimnout zeleného paprsku značícího měřenou plochu. Na snímku C je možné vidět snímání povrchu otisku.



Obrázek 24. Softwarová 3D vizualizace snímaného povrchu

Na obrázku 24. je možné vidět výstupní zobrazení vygenerované pomocí softwaru. Jedná se o mapu měřeného povrchu, kde barevnost značí výškovou úroveň daného místa.

### 6.1.2 Značení vzorků

Pro snadnější orientaci v datech dostal každý naměřený datový soubor označení. To se skládalo z měřeného parametru, technologie a tloušťky výrobku.

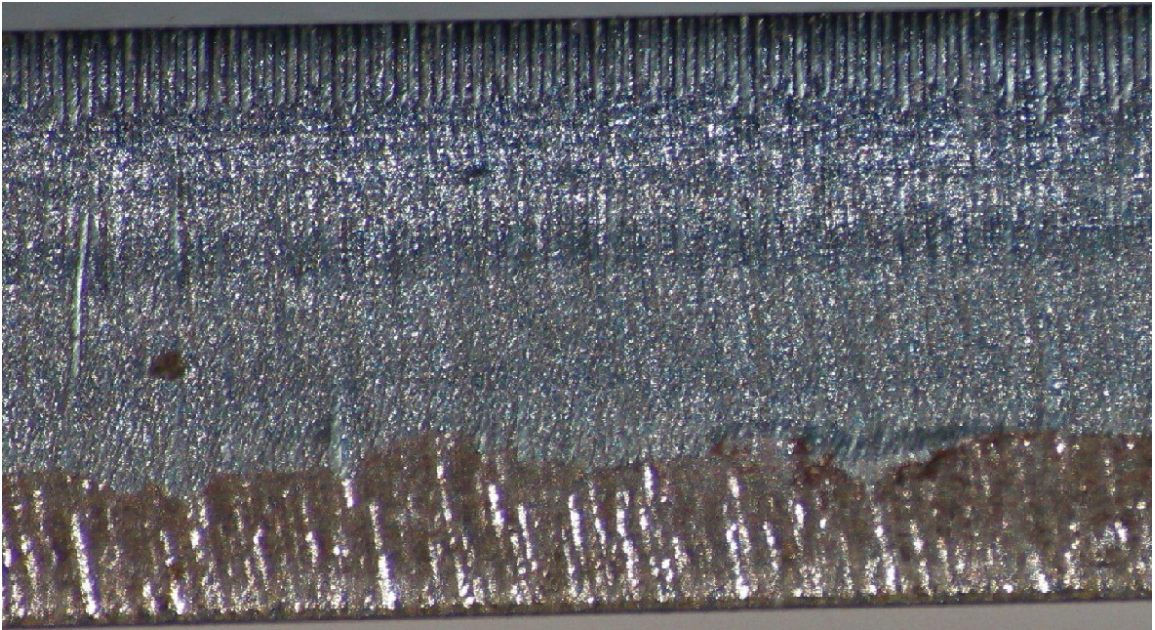
Tabulka 2. Označení vzorků

Parametr	technologie	tloušťka (mm)	Označení
Ra	Laser	15	Ra_P_15
Ra	Plazma	15	Ra_L_15
Ra	Laser	10	Ra_P_10
Ra	Plazma	10	Ra_L_10
Ra	Laser	5	Ra_P_5
Ra	Plazma	5	Ra_L_5

## 6.2 Kvalitativní hodnocení vzorků

Před započítáním statistického hodnocení dat byly vzorky zhodnoceny kvalitativním způsobem. K tomu byl využit digitální mikroskop značky Leica, který dosahuje 50x

zvětšení. Důvodem kvalitativního hodnocení vzorků byla kontrola povrchu z důvodu poškození dle normy ISO 4287 a hodnocení vizuálních charakteristik řezu.



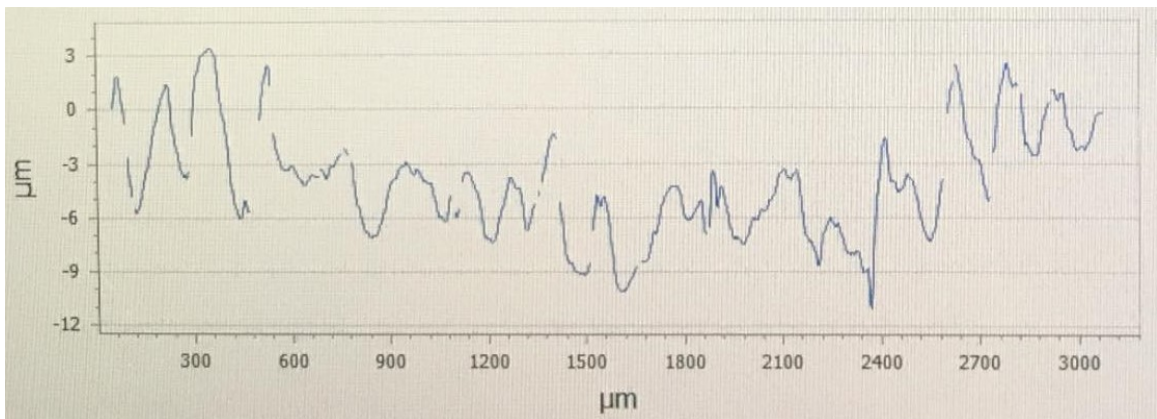
*Obrázek 25. Povrch vzorku 10 mm řezaný laserem*



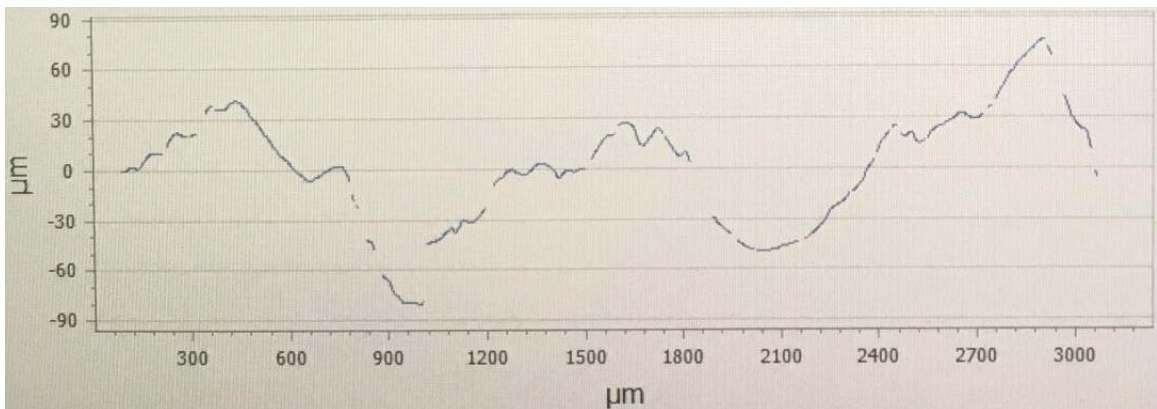
*Obrázek 26. Povrch vzorku 10 mm řezaný plazmou*

Na obrázcích 25. a 26. můžeme vidět řezy oběma technologiemi na vzorcích tloušťky 10 mm. U laseru je možné si všimnout, že na horní straně, kde paprsek do materiálu vstupoval zanechával výrazné rýhy kolmé k směru řezu, které však ve střední části příliš viditelné nejsou a objevují se opět v koncové části. Rýhy u vstupu jsou nejspíše způsobeny špatným ohniskem paprsku laseru. Řez má kvůli rýhám poměrně hrubou strukturu, není však výrazně

zešikmen. Naproti tomu plazma zanechala stopu řezu po celé řezané ploše, stopy však nejsou zdaleka tak hluboké, oproti laseru je povrch více hladký. Řez je však výrazně zešikmen, což je způsobeno kuželovým tvarem plazmového paprsku. Tato šikmost je výrazně ovlivněna tloušťkou řezu, kde u tenčího vzorku se kuželový tvar paprsku tolik neprojeví jako na silnějších vzorcích.

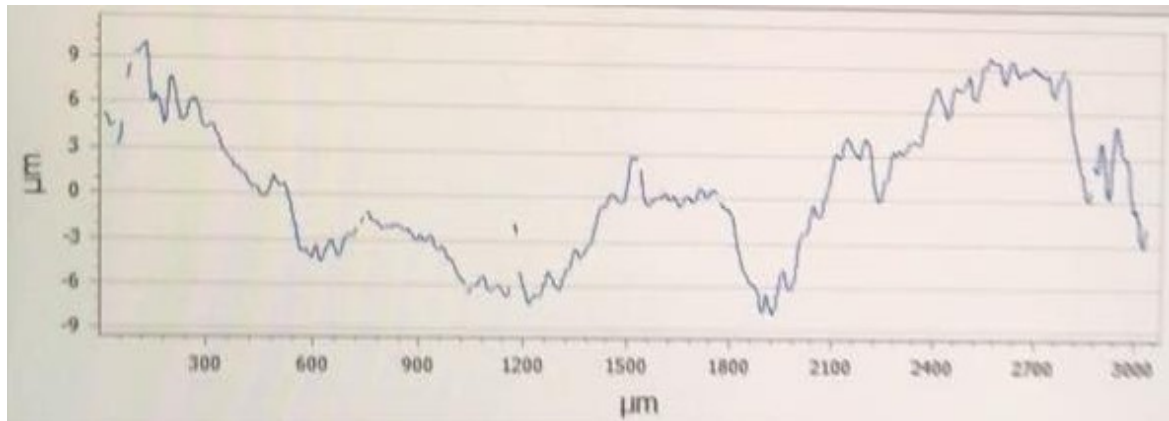


Obrázek 27. Profil povrchu na vstupní části řezu u vzorku Ra\_L\_10  
laser

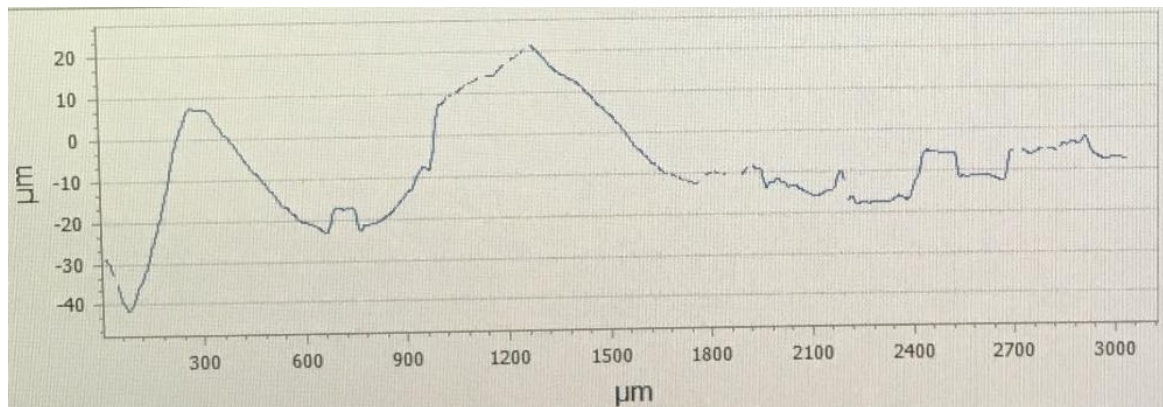


Obrázek 28. Profil povrchu na výstupní části řezu u vzorku Ra\_L\_10





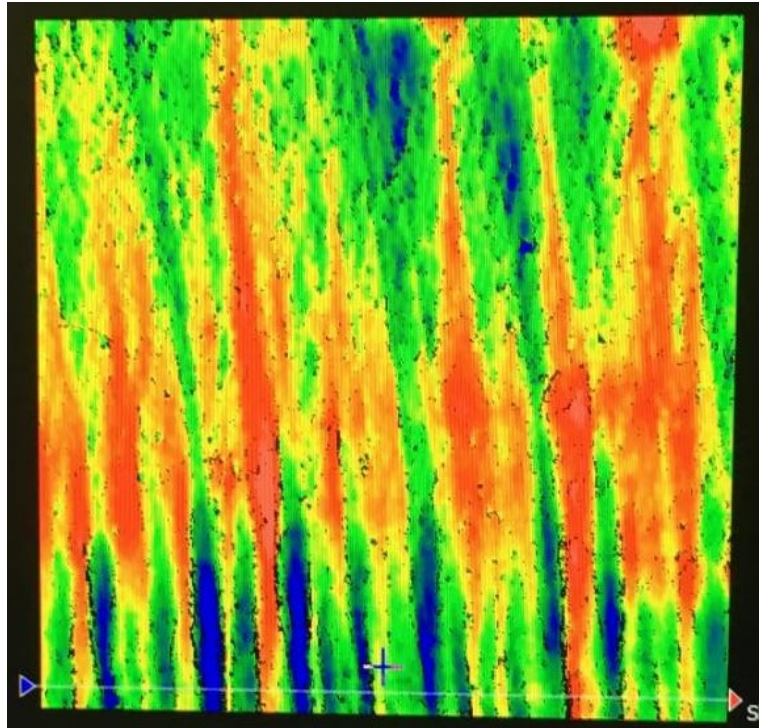
Obrázek 29. Profil povrchu na vstupní části řezu u vzorku Ra\_P\_10



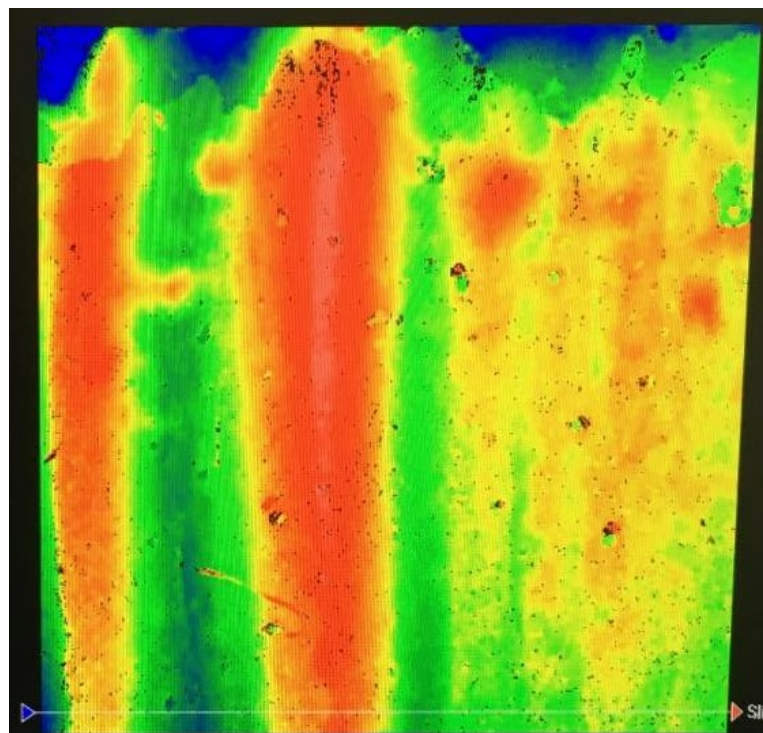
Obrázek 30. Profil povrchu na výstupní části řezu u vzorku Ra\_P\_10

V grafech pro vzorek řezaný laserem je možno si povšimnout velkého množství prvků u vstupní části laseru, které mají poměrně stabilní charakter, kdežto u grafu znázorňujícím konec řezu je možno si všimnout jednodušší struktury s výrazným nárůstem rozsahu Rz.

U plazmou řezaného vzorku je možné pozorovat tento jev také, u začátku řezu je struktura tvořená spoustou prvků, kdežto u konce řezu se skoro nevyskytují a struktura je jednodušší.



Obrázek 31. 3D vizualizace povrchu vzorku Ra\_L\_10



Obrázek 32. 3D vizualizace povrchu vzorku Ra\_P\_10

Na obrázcích 31. a 32. jsou znázorněny snímané povrchy. I zde je možné vidět, že laser vytváří velkou spoustu rýh na povrchu, kdežto povrch po řezu se skládá z větších jednolitých úseků.

## 7 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ DAT

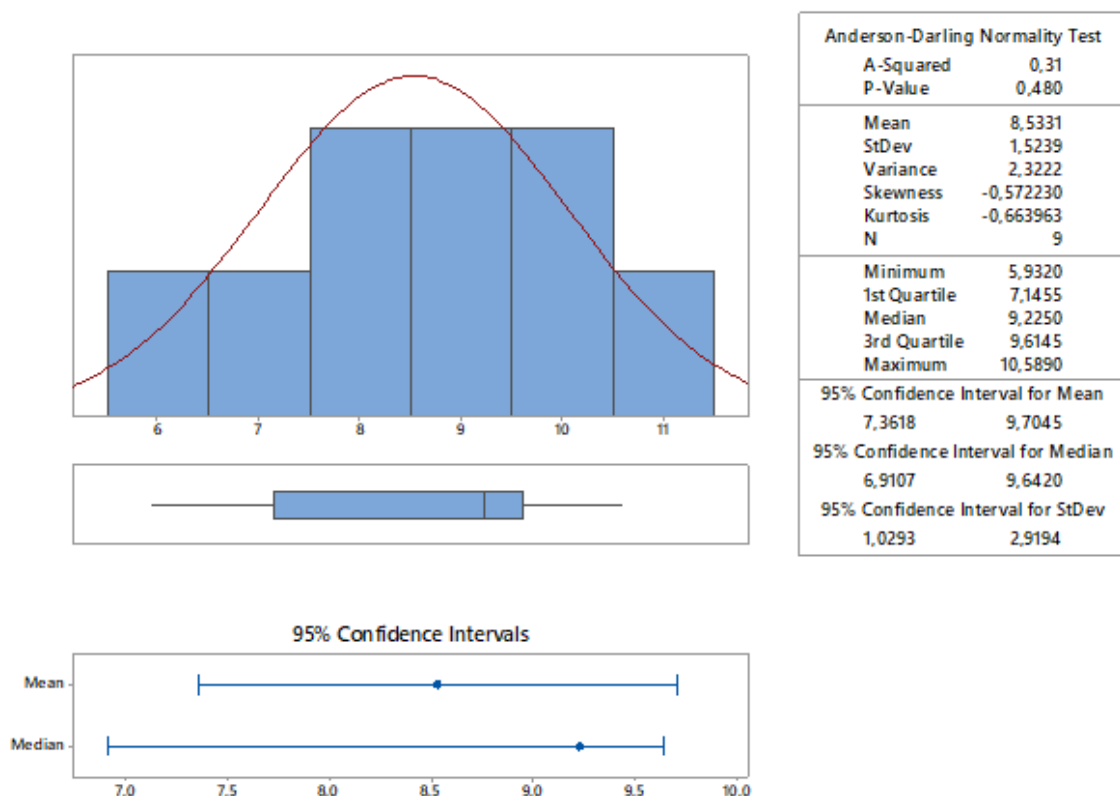
Pro statistické vyhodnocení dat bylo využito statistického softwaru Minitab, ve kterém je možno data analyzovat jak číselně, tak graficky.

### 7.1 Exploratorní datová analýza EDA

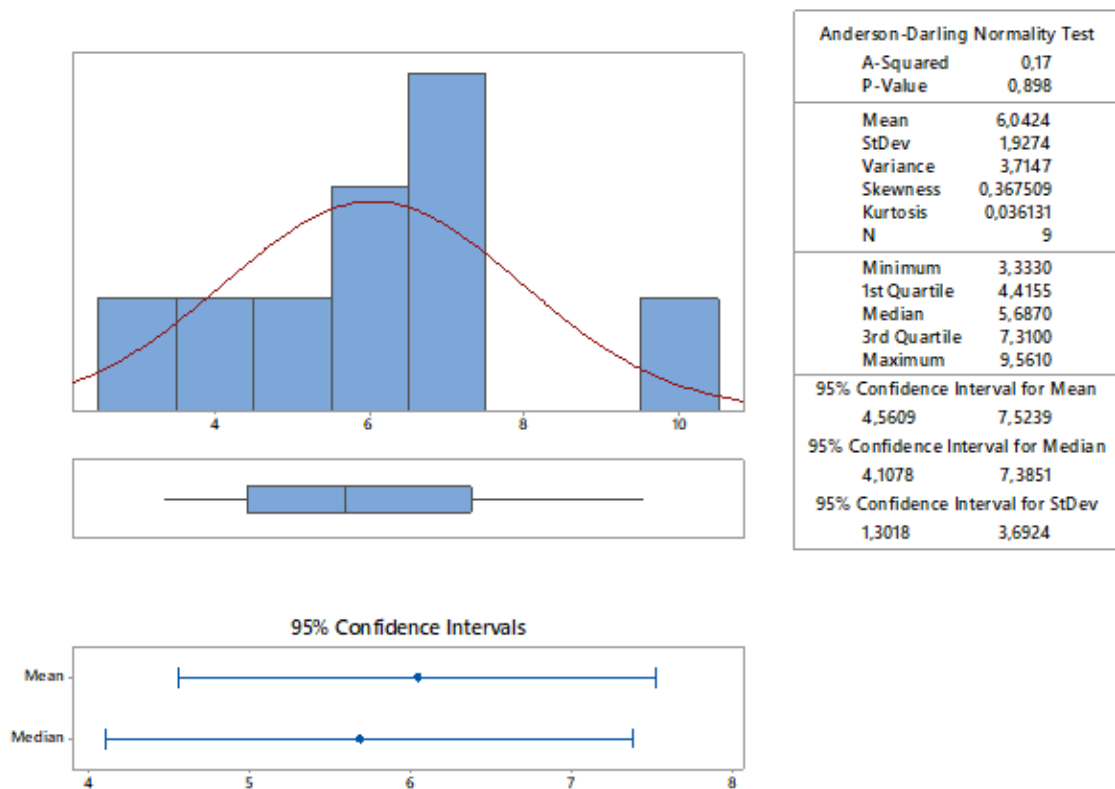
Než bude možno analyzovat jednotlivé shody mezi technologiemi, vzorky a otisky je nutno vyšetřit naměřená data, zda pochází z normálního, či jiného rozdělení, zda neobsahují hrubé chyby a zda nebude zamítnuta shoda rozptylů.

#### 7.1.1 EDA pro ocelové díly

Při analýze bylo potřeba vyšetřit zvlášť každý výběrový soubor. Vzhledem k tomu, že u ocelových vzorků se porovnávají dvě technologie na třech různých tloušťkách vzorků, bylo nutno analyzovat každý výběrový soubor na normalitu a absenci hrubých chyb, aby na ně později bylo možno použít metody ANOVA, která vyžaduje splnění těchto kritérií.



Obrázek 33. Sumarizace základních vlastností datového souboru Ra\_P\_10



Obrázek 34. Sumarizace základních vlastností datového souboru Ra\_P\_10

Na obrázcích 33. a 34. Můžeme vidět souhrn základních vlastností souborů pro vzorky řezané plazmou a laserem na tloušťce 1 cm. Na těchto souhrnech se nachází v první řadě histogramy těchto datových souborů. V histogramech můžeme vidět rozložení dat na základě četnosti jednotlivých hodnot v určitých intervalech, které jsou zároveň znázorněny Gausovou křivkou. Byla-li by tato křivka symetrická jednalo by se o dokonalé rozdělení, zde je však na křivkách možno vidět v obou případech šikmost. Data naměřená na dílu řezaným plazmou je možno vidět hodnotu šikmosti -0,57, což je méně než nula, je zde tedy možno pozorovat negativní šikmost. Naopak u druhého vzorku data vykazují šikmost 0,37, což značí šikmost pozitivní.

Dalším grafem zde je box-plotový diagram, který značí rozmístění dat na kvartily. Opět je zde možné pozorovat nesymetričnost dat. Nenachází se zde však žádná viditelná odlehlá hodnota, což značí, že soubor nejspíše nebude obsahovat hrubé chyby.

Poslední graf porovnává konfidenční intervaly mediánu a průměru.

Napravo můžeme pozorovat tabulku shrnující základní vlastnosti souboru včetně číselných hodnot rozložení kvartilů, které bylo graficky znázorněno box-plotovým diagramem.

Nachází se zde také Anderson-Darlingův test normality, jež na základě teorie hypotéz určuje, zda zamítneme nebo nezamítneme normální rozdělení.

Stanovení hypotéz pro test normality:

$H_0$ : soubor pochází z normálního rozdělení

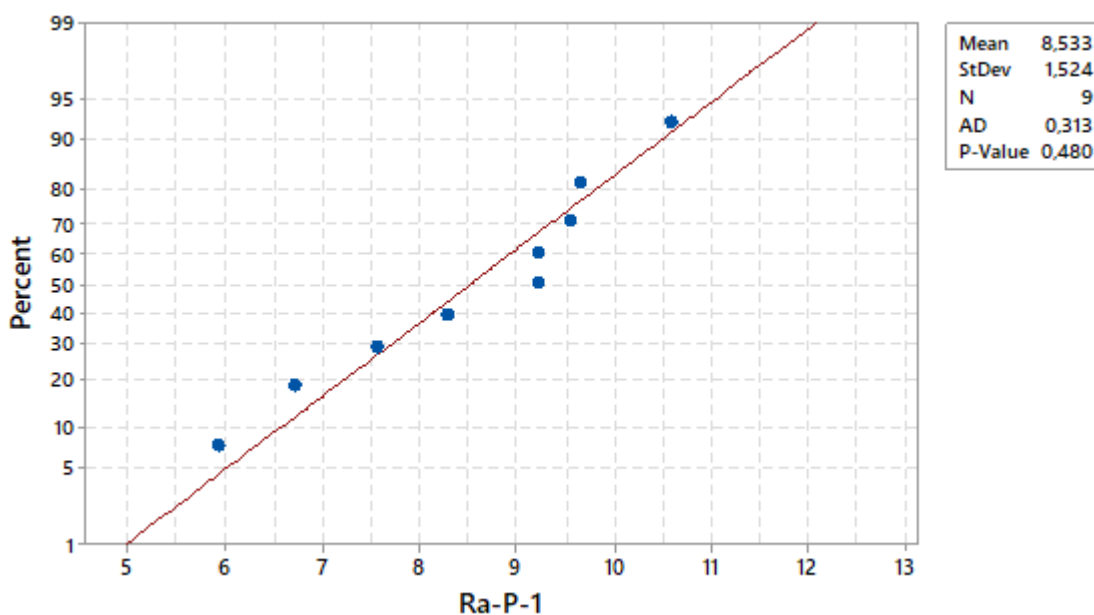
$H_a$ : soubor pochází z jiného než normálního rozdělení

Tyto hypotézy jsou testovány na konfidenčním úrovní  $1 - \alpha = 0,95$

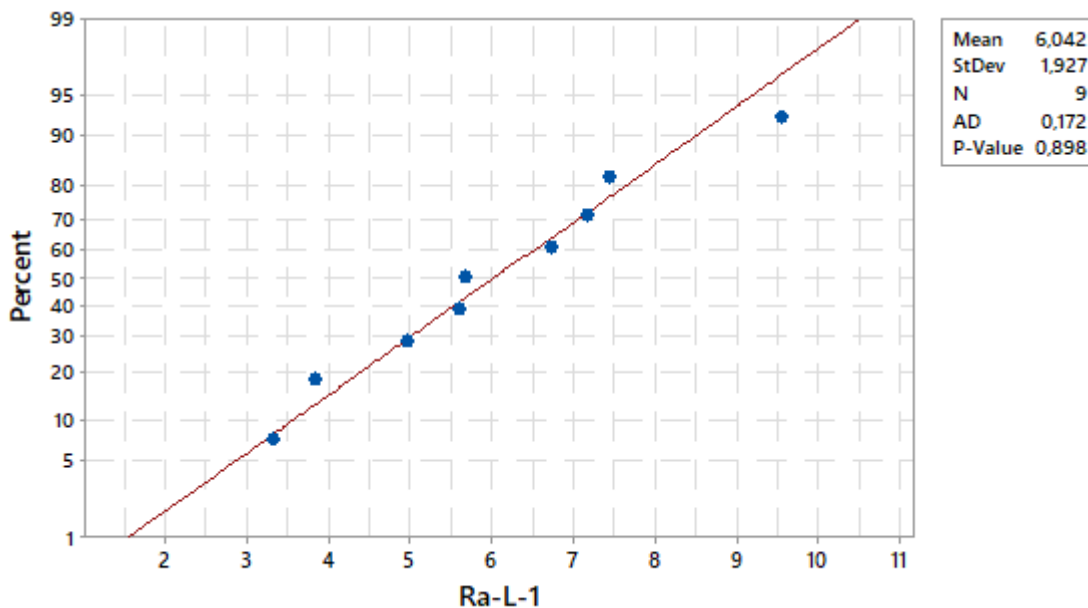
Tabulka 3. Výsledky testu normality pro ocelové vzorky

Vzorek	N	Průměr( $\mu\text{m}$ )	Stdev	p-hodnota	normalita
Ra_P_15	9	9,58	1,63	0,21	přijata
Ra_P_10	9	8,53	1,52	0,48	přijata
Ra_P_5	9	8,03	2,75	0,21	přijata
Ra_L_15	9	12,40	4,69	0,11	přijata
Ra_L_10	9	6,04	1,92	0,90	přijata
Ra_L_5	9	6,78	2,98	0,32	přijata

V tabulce 3. je možno vidět souhrn hodnot podstatných pro další vyšetřování dat, nachází se zde průměry, směrodatná odchylka a p hodnoty, které slouží pro posouzení normality datových výběrů.



Obrázek 35. Graf normality pro vzorek Ra\_P\_10



Obrázek 36. Graf normality pro vzorek Ra\_L\_10

Na základě  $N = 9$  měření pro každý vzorek vyšla  $p$  hodnota  $> 0,05$  na konfidenční úrovni  $1 - \alpha = 0,95$ , nezamítám tedy nulovou hypotézu, že výběry hodnoty Ra pocházejí z normálního rozdělení u všech ocelových vzorků.

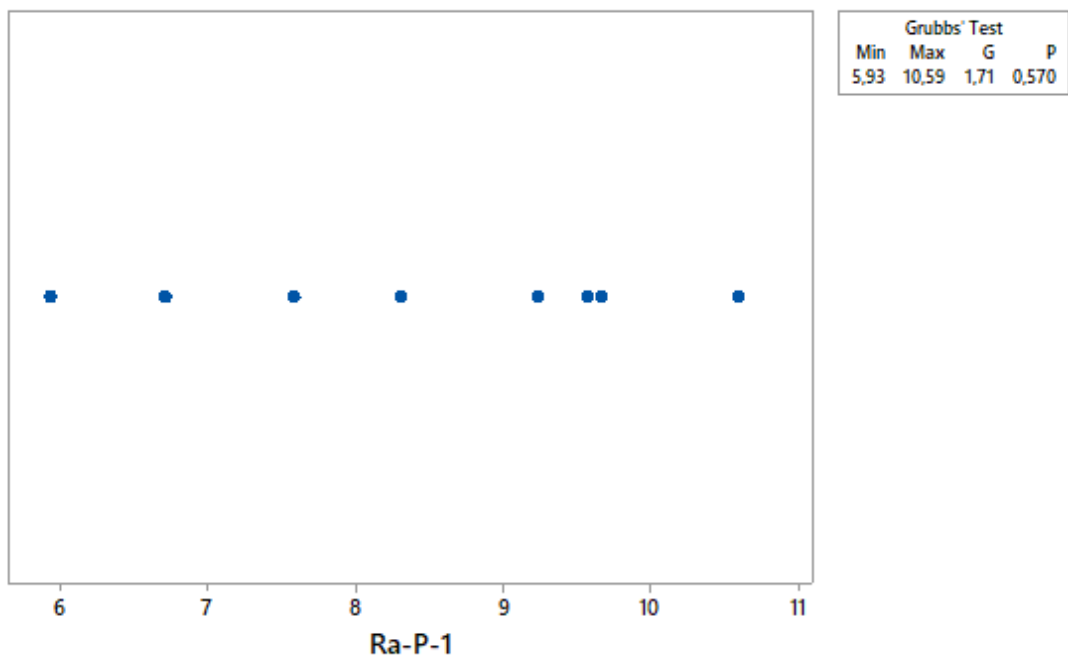
### Test odlehlých hodnot

Před započítáním testování shody vzorků s otisky je nutné otestovat, zda výběry neobsahují hrubé chyby. K tomu je využito Grubbsova testu odlehlých hodnot, který pomocí teorie hypotéz určuje, zda jsou odlehlé hodnoty pouze extrémy a nejedná se o hrubé chyby.

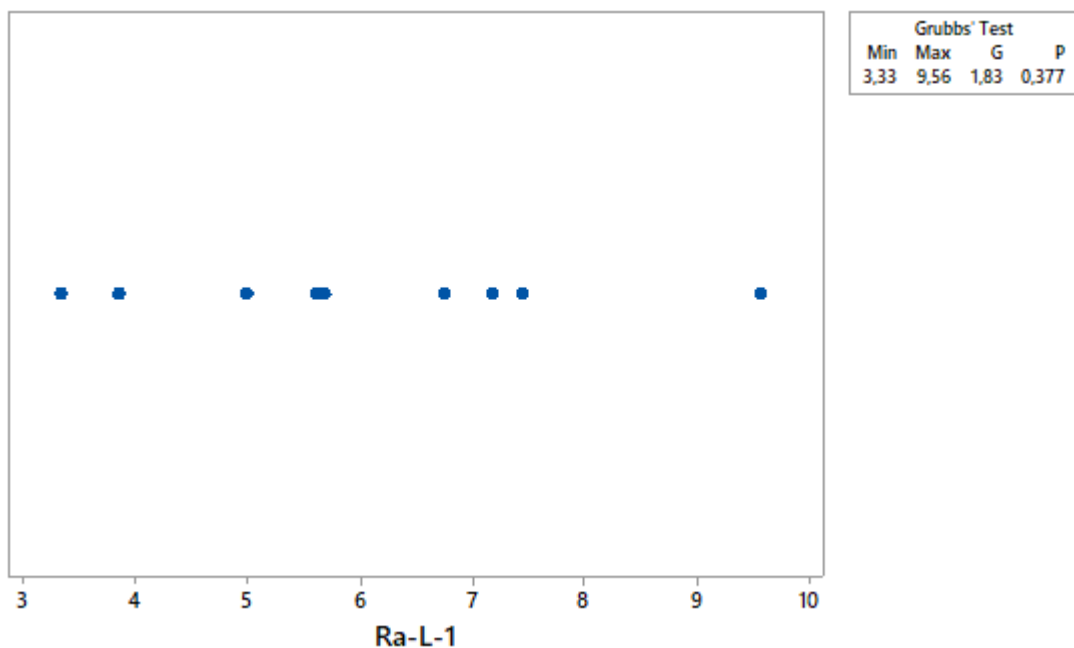
$H_0$ : Nejmenší a největší hodnota jsou pouze extrémy, nejedná se o odlehlou hodnotu

$H_a$ : Nejmenší nebo největší hodnota je hodnotou odlehlou, nebo hrubou chybou

$1 - \alpha = 0,95$



Obrázek 37. Graf odlehých hodnot pro vzorek Ra\_P\_10



Obrázek 38. Graf odlehých hodnot pro vzorek Ra\_L\_10

Na obrázcích 37. a 38. je možno vidět výsledek Grubbsova testu jak graficky, tak číselně. Hodnoty pro vzorek Ra-P-10 jsou rovnoměrně rozloženy a nezná se tedy, že by se zde nacházela hrubá chyba. To potvrzuje i p hodnota, která vyšla větší než 0,05, tudíž není zamítnuto, že krajní hodnoty jsou pouze extrémny.

U vzorku Ra\_L\_10 je možno pozorovat jednu vzdálenou hodnotu, Grubbsův test však opět nezamítl nulovou hypotézu a jedná se tedy pouze o extrém, nikoliv hrubou chybu.

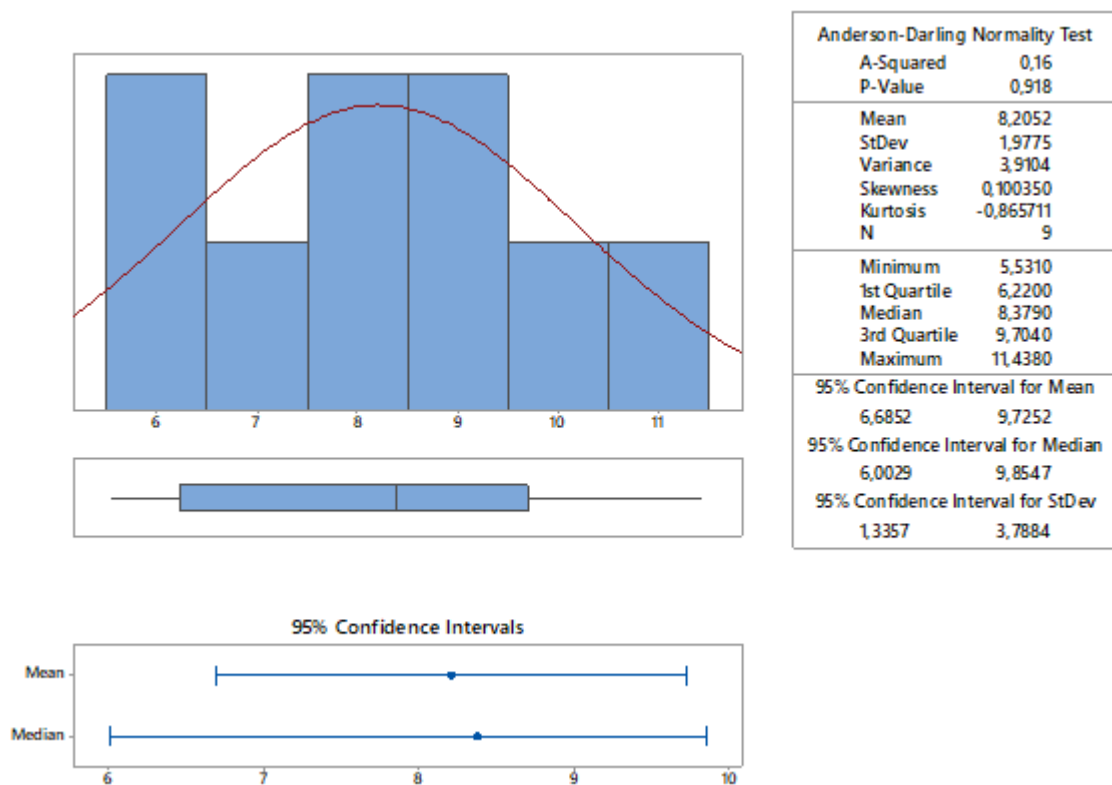
Tabulka 4. Výsledky Grubbsova testu odlehlých hodnot pro ocelové vzorky

Vzorek	Min( $\mu\text{m}$ )	Max( $\mu\text{m}$ )	p-hodnota	vyložené hodnoty
Ra_P_15	7,4	11,37	0,89	ne
Ra_P_10	5,93	10,59	0,57	ne
Ra_P_5	4,12	10,5	0,43	ne
Ra_L_15	8,04	20,72	0,45	ne
Ra_L_10	3,33	9,56	0,34	ne
Ra_L_5	4,54	9,22	0,17	ne

V tabulce 4. můžeme vidět zbylé výsledky Grubbsova testu odlehlých hodnot.

### 7.1.2 EDA pro otisky

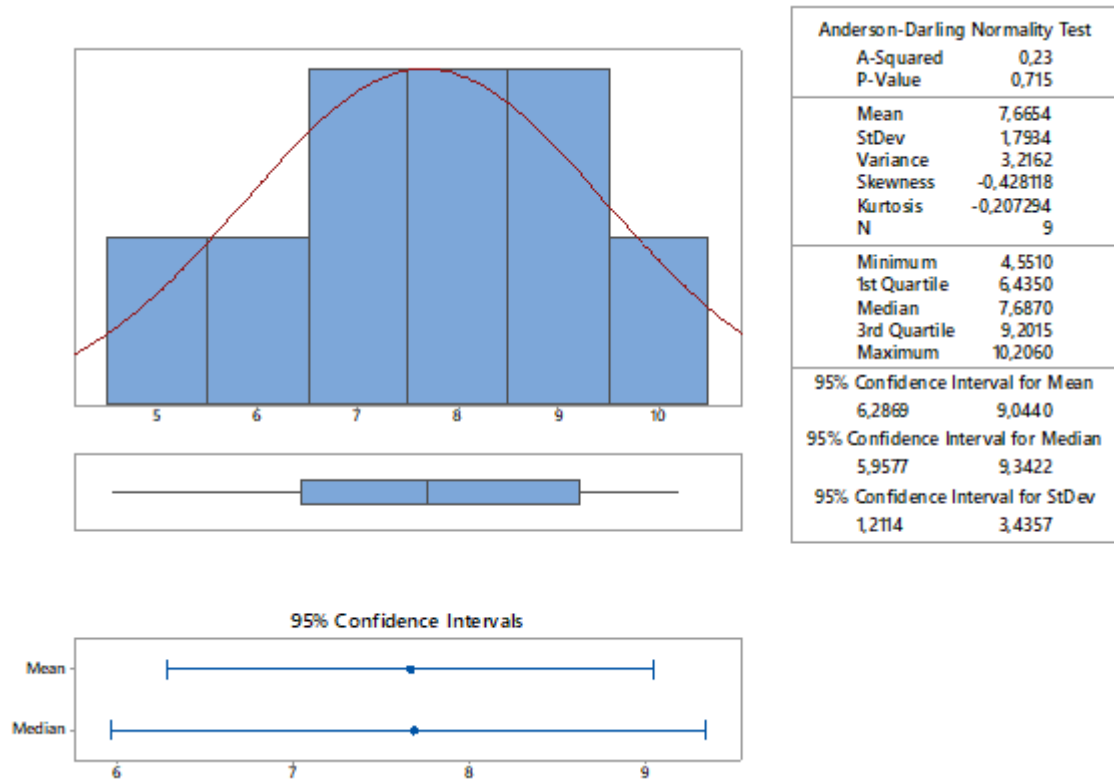
Při analýze bylo nutno vyšetřit zvlášť otisk pro každou z 6 variant ocelových vzorků.



Obrázek 39. Sumarizace základních vlastností datového souboru Ot\_Ra\_P\_10

Na obrázku 39. můžeme pozorovat rozdělení hodnot, box plotové diagramy, intervaly průměru a mediánu a základní hodnoty včetně Anderson-Darlingova testu normality. Je zde možné vidět nesymetrii dat, konkrétně negativní šikmost, které se vyskytovala i u ocelového vzorku, pro který byl tento otisk vytvořen. I přes to zde také test normality nezamítá nulovou hypotézu, že data pocházejí z normálního rozdělení.





Obrázek 40. Sumarizace základních vlastností datového souboru Ot\_Ra\_L\_10

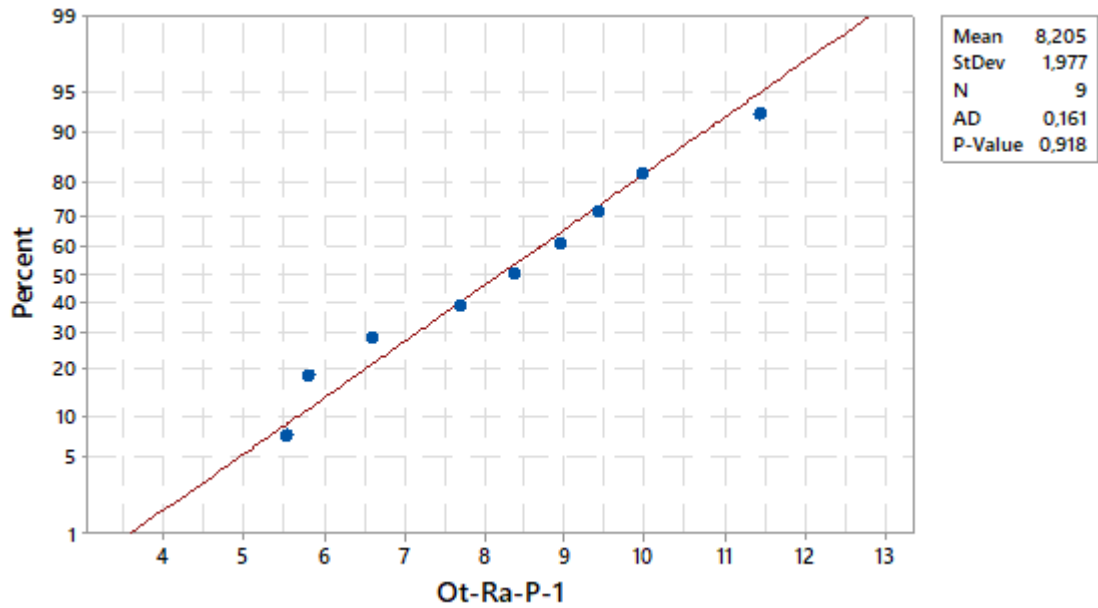
Na obrázku 40. je možné pozorovat pozitivní šikmost dat stejně jako u originálního vzorku řezaného laserem tloušťky 10 mm, p hodnota opět však vyšla nad hodnotou 0,05, normalita tedy není zamítnuta.

Tabulka 5. Výsledky testu normality pro otisky

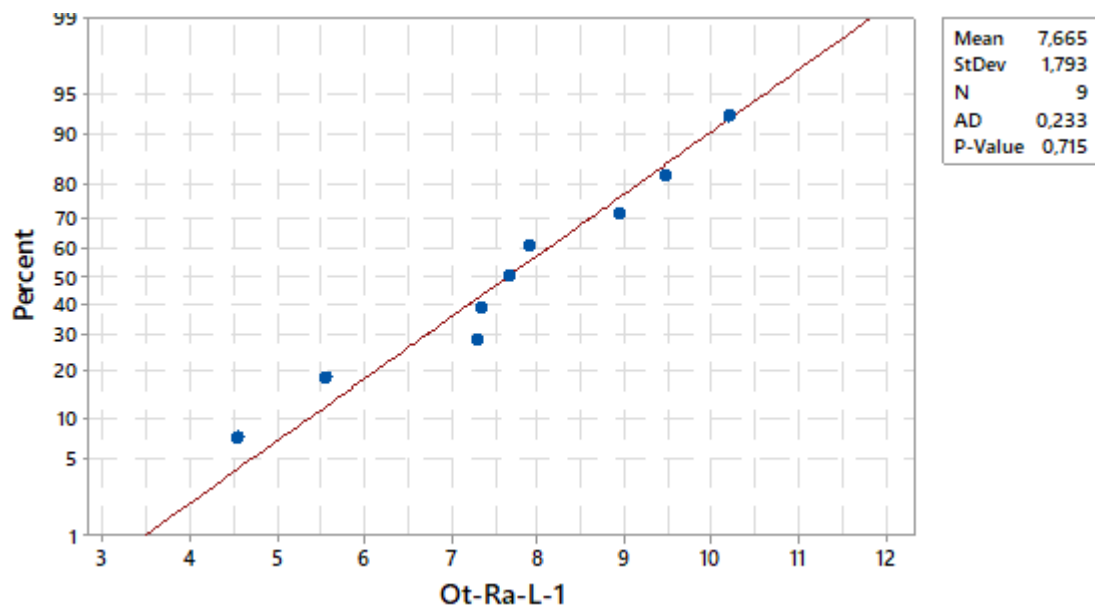
Vzorek	N	průměr	Stdev	p-hodnota	normalita
Ra_P_15	9	9,06	1,80	0,13	přijata
Ra_P_10	9	8,21	1,98	0,92	přijata
Ra_P_5	9	8,46	1,82	0,22	přijata
Ra_L_15	9	11,64	4,73	0,06	přijata
Ra_L_10	9	7,67	1,79	0,72	přijata
Ra_L_5	9	6,56	1,78	0,15	přijata

V souhrnné tabulce 5. můžeme vidět základní hodnoty potřebné pro další analýzu včetně p-hodnoty pro normalitu, která u žádného vzorku normalitu nezamítnula.

## 7.1.3 Test normality



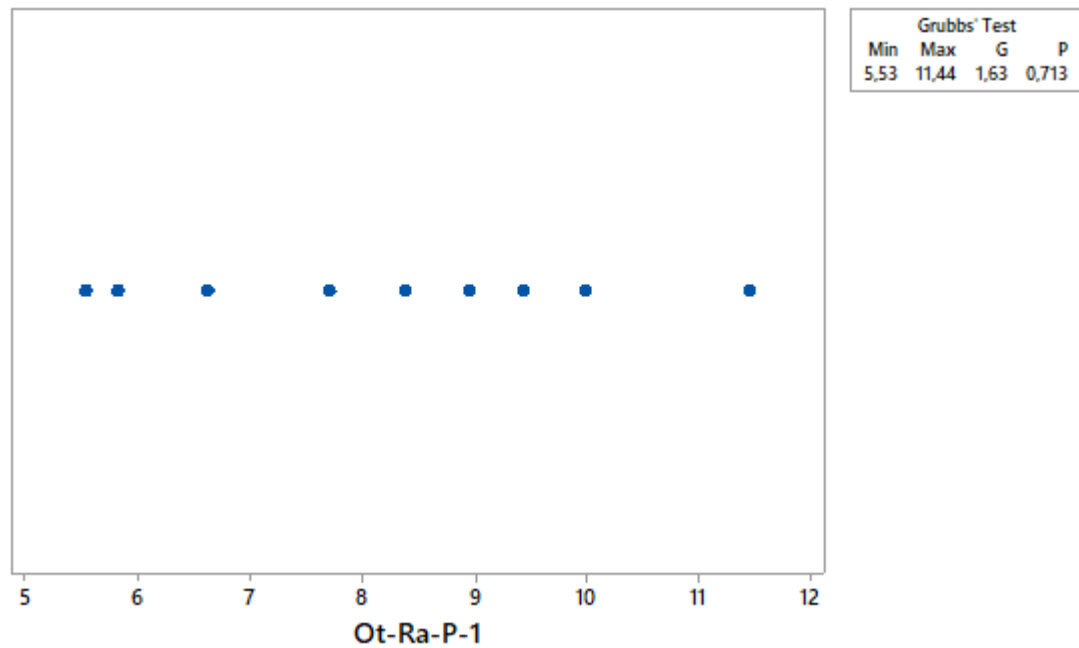
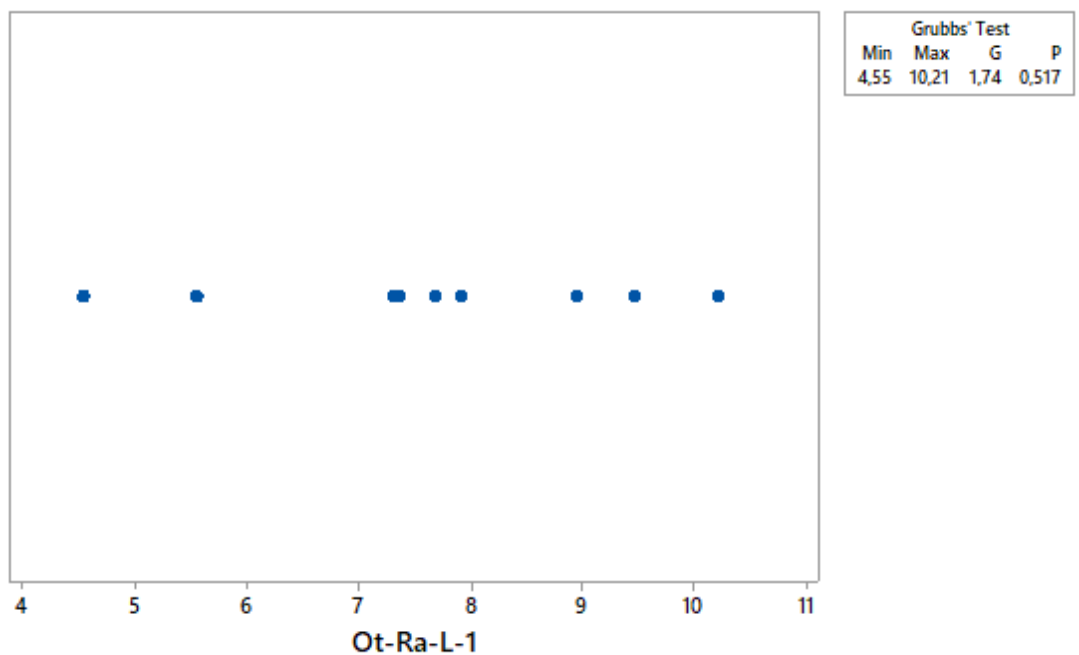
Obrázek 41. Graf normality pro vzorek Ot\_Ra\_P\_10



Obrázek 42. Graf normality pro vzorek Ot\_Ra\_L\_10

V grafech pro otisky vzorků tloušťky 10 mm můžeme vidět Anderson-Darlingův test normality, který vzhledem k tomu, že p hodnota je vyšší než 0,05, nezamítnul normalitu na konfidenční úrovni  $1 - \alpha = 0,95$ .

## 7.1.4 Test odlehlých hodnot

Obrázek 43. Graf odlehlých hodnot pro vzorek *Ot\_Ra\_P\_10*Obrázek 44. Graf odlehlých hodnot pro vzorek *Ot\_Ra\_L\_10*

H<sub>0</sub>: Nejmenší a největší hodnota jsou pouze extrémny, nejedná se o odlehlou hodnotu

H<sub>a</sub>: Nejmenší nebo největší hodnota je hodnotou odlehlou, nebo hrubou chybou

$1 - \alpha = 0,95$

V grafech 43. a 44. můžeme vidět Grubbsův test odlehlých hodnot. Hodnoty pro vzorek Ot\_Ra\_P\_10 jsou rovnoměrně rozptýleny a p-hodnota větší než 0,05 potvrzuje, že data neobsahují hrubé chyby. U vzorku Ot\_Ra\_L\_10 jsou data uskupena spíše ke středu a vyšším hodnotám, opět zde však není žádná hodnota vyhodnocena jako chybná.

Tabulka 6. Výsledky Grubbsova testu odlehlých hodnot pro otisky

Vzorek	Min	Max	P-hodnota	vyloučené hodnoty
Ot_Ra_P_15	6,51	10,89	0,96	ne
Ot_Ra_P_10	5,53	11,14	0,71	ne
Ot_Ra_P_5	5,13	10,41	0,10	ne
Ot_Ra_L_15	7,26	20,11	0,43	ne
Ot_Ra_L_10	4,55	10,21	0,52	ne
Ot_Ra_L_5	4,92	9,82	0,13	ne

V tabulce 6. můžeme vidět hodnoty z provedeného Grubbsova testu odlehlých hodnot. Jsou zde uvedeny minimální a maximální hodnoty. Vzhledem k faktu, že žádná z p hodnot nebyla menší než 0,05 byly potvrzeny nulové hypotézy a minimální a maximální hodnoty jsou ve všech případech pouze extrémy, nikoliv hrubé chyby.

## 7.2 Test shody otisků s ocelovými vzorky

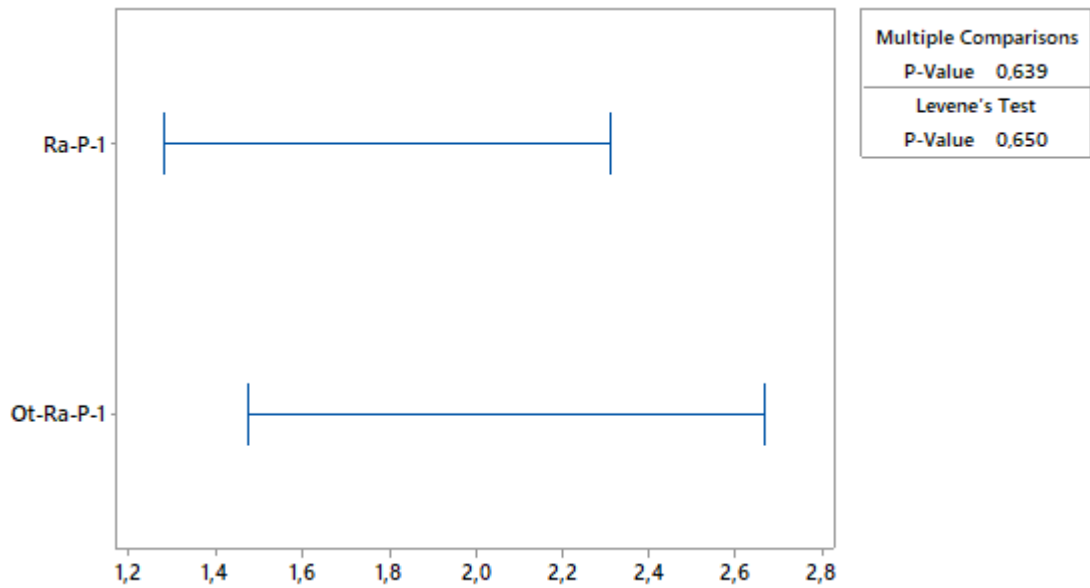
Po provedené exoratorní datové analýze mohu konstatovat, že všechna data pochází z normálního rozdělení a neobsahují žádné hrubé chyby. Nyní je tedy možné provést f-test a t-test pro porovnání každého vzorku s jeho otiskem.

### 7.2.1 F-test

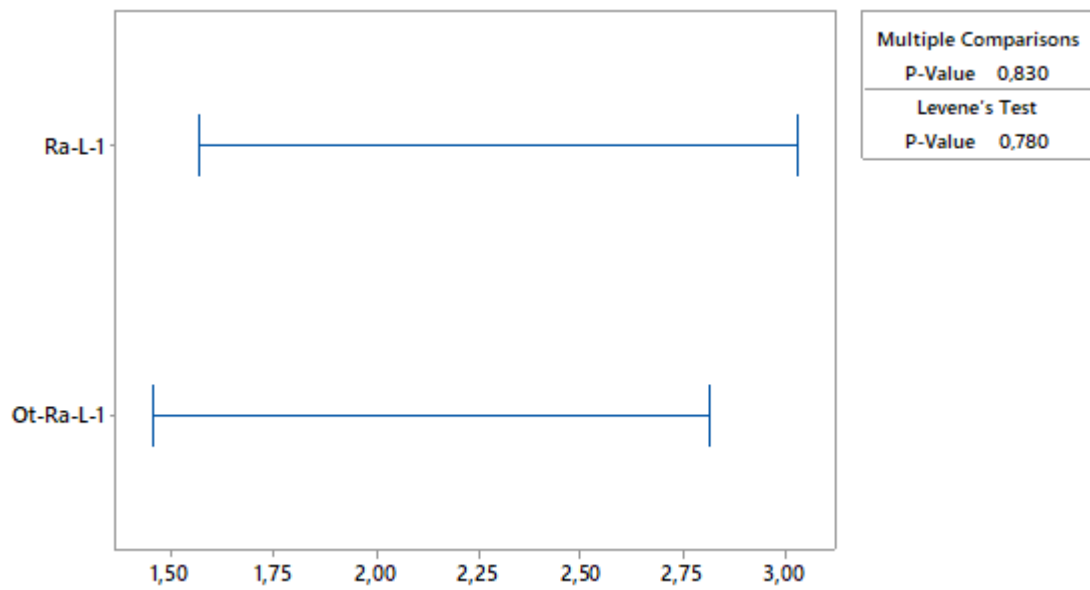
Tento test prokáže, zda se rozptyly hodnoty Ra povrchu dílu a otisku liší statisticky významně či nevýznamně.

H<sub>0</sub>: Rozptyly výběrů se liší statisticky nevýznamně:  $\sigma_{Ra_P_x}^2 = \sigma_{Ra_L_x}^2$

H<sub>a</sub>: Rozptyly výběrů se liší statisticky významně:  $\sigma_{Ra_P_x}^2 \neq \sigma_{Ra_L_x}^2$



Obrázek 45. Test shody rozptylů pro vzorky Ra\_P\_10 a Ot\_Ra\_P\_10



Obrázek 46. Test shody rozptylů pro vzorky Ra\_P\_10 a Ot\_Ra\_P\_10

Tabulka 7. Výsledky F-testu pro shodu ocelových dílů a otisků

Vzorky	Stdev OC	Stdev OT	Bartletův test P-hodnota	Leveneův test P-hodnota	Shoda
Ra_P_15 – Ot_Ra_P_15	1,63	1,80	0,71	0,85	Ano
Ra_P_10 – Ot_Ra_P_10	1,52	1,98	0,64	0,65	Ano
Ra_P_5 – Ot_Ra_P_5	2,75	1,82	0,55	0,27	Ano
Ra_L_15 – Ot_Ra_L_15	4,69	4,73	0,98	0,91	Ano
Ra_L_10 – Ot_Ra_L_10	1,92	1,79	0,83	0,78	Ano
Ra_L_5 – Ot_Ra_L_5	2,98	1,78	0,29	0,13	Ano

Na obrázcích 45. a 46. můžeme vidět srovnání konfidenčních intervalů směrodatných odchylek pro díly a otisky tloušťky 10 mm. Byl zde proveden Bartlettův test, v grafu uveden jako Multiple Comparisons, který se používá pro data s normálním rozdělením. Vzhledem k potvrzené normalitě můžeme tedy brát výsledek jako směrodatný. Druhým testem je Levenův test, který není tak citlivý na dodržení normality jako Bartlettův test, tudíž v případě, že by někde byla chybně přijata normalita, byl by průkazný tento test. Jak je možno vidět v tabulce, p-hodnota pro srovnání všech dílů s otisky vyšla vyšší nad hodnotou 0,05 ve všech případech u obou testů, můžeme tedy konstatovat, že rozdíl směrodatných odchylek je statisticky nevýznamný.

### 7.2.2 T-test

Po provedení F-testů, které ve všech případech prokázaly shodu rozptylů hodnoty Ra pro otisky a díly můžeme přejít na T-test, který vyhodnotí, zda se statisticky významně či nevýznamně liší průměry porovnávaných vzorků.

H<sub>0</sub>: Průměry výběrů se liší statisticky nevýznamně:  $\mu_{Ra\_P\_x}^2 = \mu_{Ra\_L\_x}^2$

H<sub>a</sub>: Průměry výběrů se liší statisticky významně:  $\mu_{Ra\_P\_x}^2 \neq \mu_{Ra\_L\_x}^2$

Tabulka 8. Výsledky F-testu pro komparaci ocelových dílů a otisků

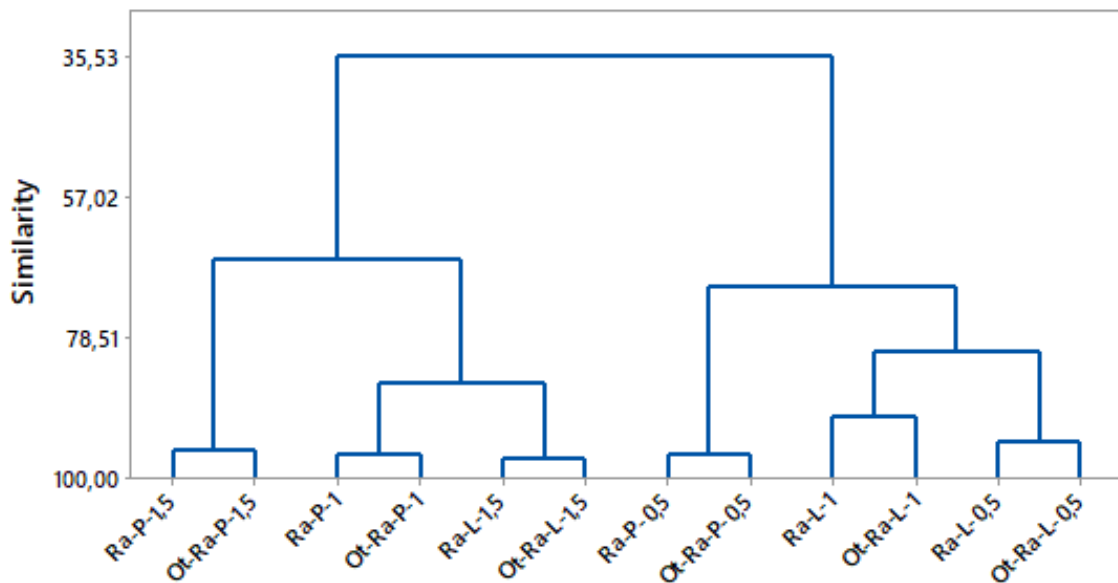
Vzorky	Průměr OC (μm)	Průměr OT (μm)	Rozdíl průměrů (μm)	P-hodnota	Shoda
Ra_P_15 – Ot_Ra_P_15	9,58	9,06	0,52	0,53	Ano
Ra_P_10 – Ot_Ra_P_10	8,53	8,21	0,45	0,57	Ano
Ra_P_5 – Ot_Ra_P_5	8,03	8,46	0,43	0,74	Ano
Ra_L_15 – Ot_Ra_L_15	12,4	11,64	0,76	0,74	Ano
Ra_L_10 – Ot_Ra_L_10	6,04	7,67	0,40	0,08	Ano
Ra_L_5 – Ot_Ra_L_5	6,78	6,56	0,22	0,88	Ano

V tabulce 8. můžeme vidět výsledky T-testu pro porovnání Díl-otisk. Ačkoliv všechny průměry byly rozdílné, tak na základě p hodnot, které jsou větší než 0,05 mohu říci, že s pravděpodobností  $1 - \alpha = 0,95$  lze považovat hodnoty Ra u otisků za srovnatelné s hodnotami Ra originálních dílů.

### 7.2.3 Clusterová analýza

Ačkoliv již bylo prokázáno, že rozdíl mezi díly a jejich otisky je statisticky nevýznamný, je možné tuto shodu prokázat pomocí clusterové analýzy. Tato analýza dokáže vyhodnotit shodu dat a vyhodnotit jejich podobnost. Jsou-li tedy předchozí závěry správné a otisky jsou

podobné, měla by clusterová analýza správně přiřadit otisk ke vzorku, ke kterému patří a určit, jak se procentuálně shodují



Obrázek 47. Clusterová analýza

Jak bylo předpokládáno, clusterová analýza správně rozřadila vzorky díl-otisk podle tloušťky a technologie. To tedy potvrzuje závěr, že otisky věrohodně kopírovaly původní povrch a jsou tedy pro otisk drsnosti povrchu vhodné. V grafu je možné vidět další skupiny, které clusterová analýza vyhodnotila, ty však nemají statistický význam a jedná se pouze o náhodné podobnosti mezi datovými soubory.

### 7.3 Srovnání drsnosti povrchu mezi technologiemi

Při kvalitativním hodnocení bylo viditelné, že největší rozdíl mezi technologiemi je v místě vstupu a výstupu paprsku. Následné hodnocení bude tedy srovnávat mezi technologiemi právě tyto místa, zda bude tvrzení o rozdílu technologií potvrzeno statistickou analýzou. Vzorky budou porovnány na základě tloušťky, neboť s tloušťkou taky narůstaly vizuální rozdíly mezi vzorky. Pro srovnání bude využito metodiky jednocestné ANOVY.

#### 7.3.1 Vyhodnocení parametru Ra u vstupní části paprsku

Pro vyhodnocení bylo naměřeno 10 hodnot na ploše 3 mm od hrany řezu. Data byla otestována na normalitu a hrubé chyby, výsledky se nachází v tabulce 9.

Tabulka 9. Souhrn vlastností datových souborů pro vstupní část řezu

Vzorek	Průměr (μm)	Stdev	P-nor	normalita	P-out	Vyloučené hodnoty
Z_Ra_P_15	9,95	1,80	0,31	Přijata	0,43	Ne
Z_Ra_P_10	7,93	1,84	0,51	Přijata	0,67	ne
Z_Ra_P_5	8,07	0,45	0,62	Přijata	0,82	ne
Z_Ra_L_15	10,79	1,19	0,26	Přijata	0,37	Ne
Z_Ra_L_10	8,06	1,31	0,14	Přijata	0,20	Ne
Z_Ra_L_5	7,42	1,66	0,52	Přijata	0,66	Ne

Pro vyhodnocení bylo naměřeno 10 hodnot na ploše 3 mm od hrany řezu.

H<sub>0</sub>: efekt faktoru technologie je nulový, jeho vliv na parametr Ra na vstupní části řezu je tedy statisticky nevýznamný.

H<sub>a</sub>: efekt faktoru technologie je nenulový, jeho vliv na parametr Ra na vstupní části řezu je statisticky významný.

$$1 - \alpha = 0,95$$

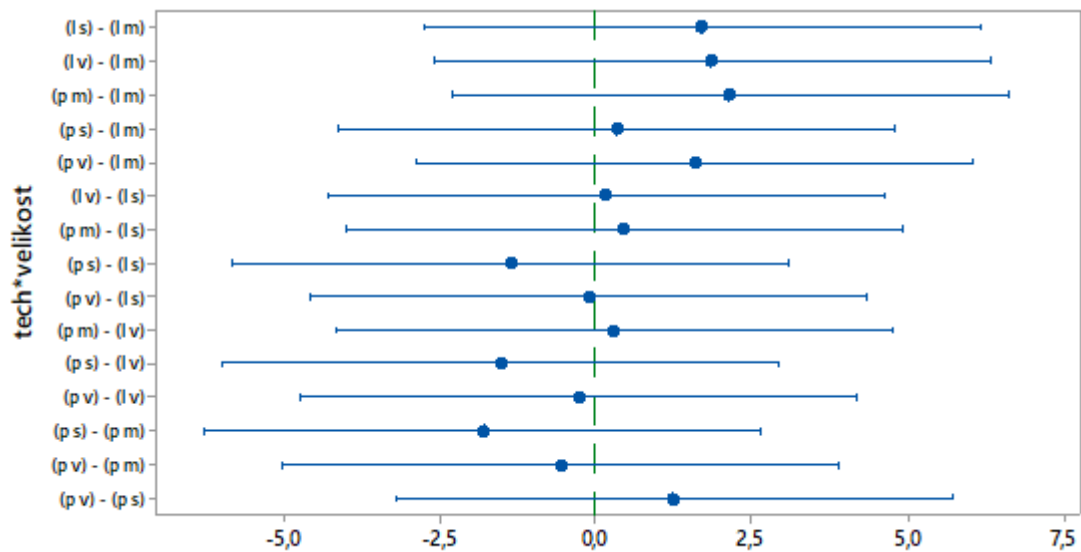
Tabulka 10. Výsledek metody ANOVA pro rozdíl mezi technologiemi na vstupní části řezu

Tloušťka	Vzorek	N	průměr(μm)	Stdev	95% CI	p hodnota
15 mm	Z_Ra_P_15	10	9,95	1,80	(8,351; 13,220)	0,54
	Z_Ra_L_15	10	10,79	1,19	(7,52; 12,39)	
10mm	Z_Ra_P_10	10	7,93	1,84	(5,499; 10,622)	0,93
	Z_Ra_L_10	10	8,06	1,31	(5,37; 10,49)	
5mm	Z_Ra_P_5	10	8,07	0,45	(5,478; 9,379)	0,06
	Z_Ra_L_5	10	7,42	1,56	(8,117; 12,018)	

V tabulce 10. je znázorněn výsledek metodiky ANOVA, které byla provedena zvlášť pro každou tloušťku. Jak můžeme vidět, p hodnota > 0,05, nezamítáme tedy nulovou hypotézu, že ve vstupní části řezu je vliv technologie na parametr Ra statisticky nevýznamný.

Pro ověření výsledku byla následně provedena dvoucestná ANOVA, kde byly dva faktory, konkrétně tloušťka a technologie.





Obrázek 48. Grafické znázornění shody průměrů pro kombinaci faktorů na vstupní části

Tabulka 11. Výsledky dvoucestné metodiky ANOVA pro vstupní část řezu

Faktor	p-hodnota
technologie	0,827
velikost	0,714
technologie*velikost	0,203

U provedení dvoucestné metodiky ANOVA pro tři faktory, tedy velikost, technologii a kombinaci technologie a velikosti vyšly p-hodnoty ve všech případech  $p > 0,05$ , můžeme tedy konstatovat, že na vstupní části řezu nemá statistický význam ani technologie, ani tloušťka vzorku ani kombinace obou faktorů.

### 7.3.2 Vyhodnocení parametru Ra na výstupní části paprsku

Pro vyhodnocení bylo naměřeno 10 hodnot na ploše 3 mm od hrany řezu. Data byla otestována na normalitu a hrubé chyby, výsledky se nachází v tabulce 12.

Tabulka 12. Souhrn vlastností datových souborů pro výstupní část řezu

Vzorek	Průměr( $\mu\text{m}$ )	Stdev	P-normalita	normalita	P – out.	Vyloučené hodnoty
K_Ra_P_15	10,72	0,801	0,285	Přijata	0,407	ne
K_Ra_P_10	9,82	0,69	0,467	Přijata	0,614	ne
K_Ra_P_5	5,98	1,63	0,113	Přijata	0,15	ne
K_Ra_L_15	18,09	3,02	0,488	Přijata	0,095	ne
K_Ra_L_10	6,03	1,07	0,101	Přijata	0,123	ne
K_Ra_L_5	5,13	2,01	0,268	Přijata	0,387	ne

H<sub>0</sub>: efekt faktoru technologie je nulový, jeho vliv na parametr Ra na výstupní části řezu je tedy statisticky nevýznamný.

H<sub>a</sub>: efekt faktoru technologie je nenulový, jeho vliv na parametr Ra na výstupní části řezu je statisticky významný.

$$1 - \alpha = 0,95.$$

Tabulka 13. Výsledek metody ANOVA pro rozdíl mezi technologiemi na výstupní části řezu

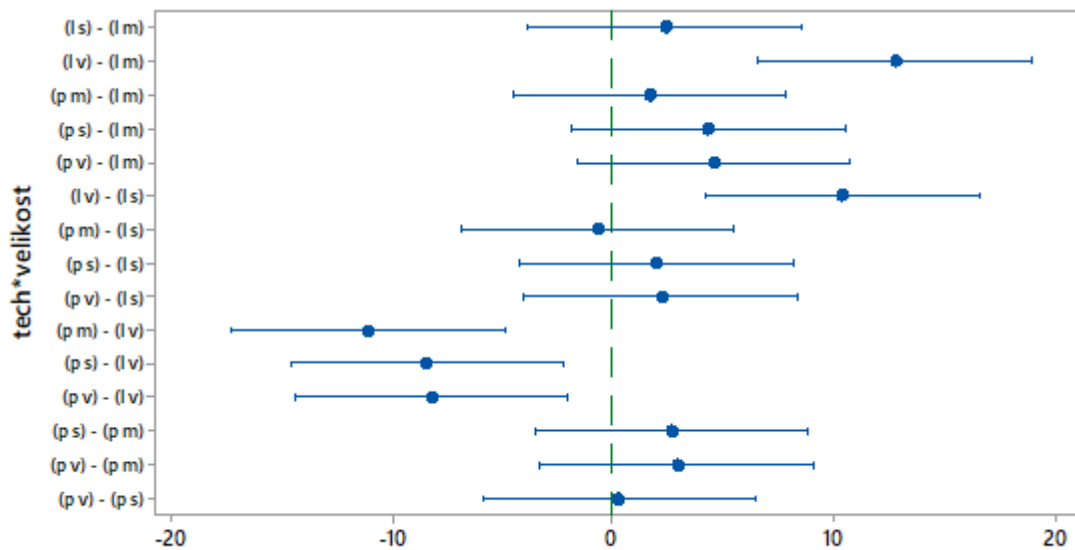
Tloušťka	Vzorek	N	průměr(μm)	stdev	95% CI	p hodnota
15 mm	K_Ra_P_15	10	10,72	0,80	(12,81; 23,91)	0,04
	K_Ra_P_10	10	18,09	3,02	(4,63; 15,73)	
10mm	K_Ra_P_5	10	9,82	0,69	(5,06; 8,44)	0,02
	K_Ra_L_15	10	5,98	1,07	(8,25; 11,63)	
5mm	K_Ra_L_10	10	5,98	1,63	(3,07;8,91)	0,74
	K_Ra_L_5	10	5,13	2,01	(3,36; 7,38)	

V tabulce 13. je znázorněn výsledek metodiky ANOVA, které byla provedena zvlášť pro každou tloušťku. Jak můžeme vidět, p hodnota u vzorků 15 mm a 10 mm je menší než 0,05, můžeme tedy zamítnout nulovou hypotézu ve prospěch hypotézy alternativní. To znamená, že u těchto vzorků má statisticky významný vliv použitá technologie na parametr Ra. U vzorku 5 mm je p hodnota > 0,05, nezamítáme zde tedy nulovou hypotézu, že vliv technologie zde není statisticky významný na parametru povrchu Ra.

Pro ověření výsledku byla následně provedena dvoucestná ANOVA, kde byly dva faktory, konkrétně tloušťka a technologie a následně kombinace těchto faktorů. Výsledek kombinace faktorů nám určí, zda se vzorky liší statisticky významně použijeme-li různé technologie na různá velikosti řezu.

H<sub>0</sub>: efekt kombinace faktorů velikosti a technologie je nulový, jeho vliv na parametr Ra na výstupní části řezu je tedy statisticky nevýznamný.

H<sub>a</sub>: efekt kombinace faktorů velikosti a technologie je nenulový, jeho vliv na parametr Ra na výstupní části řezu je statisticky významný.



Obrázek 49. Grafické znázornění shody průměrů pro kombinaci faktorů na vstupní části

Tabulka 14. Výsledky dvoucestné metodiky ANOVA pro výstupní část řezu

Faktor	p-hodnota
technologie	0,176
velikost	0,000
technologie*velikost	0,003

U provedení dvoucestné metodiky ANOVA pro dva faktory, tedy velikost a technologii a také kombinaci technologie a velikosti, vyšly p-hodnoty pro velikost a kombinaci velikosti a technologie menší než 0,05. Zamítáme tedy nulovou hypotézu ve prospěch hypotézy alternativní. Velikost vzorku statisticky významně ovlivňuje parametr  $R_a$ , stejně tak jako tento parametr je rozdílný vlivem kombinace technologie a velikosti. Naproti tomu p-hodnota pro vliv technologie vyšla větší než 0,05, to tedy znamená, že nulovou hypotézu nezamítáme. To by znamenalo, že technologie na parametr  $R_a$  vliv nemá. Tento výsledek je nejspíše zapříčiněn tím, že u vzorků 5 mm rozdíl technologií nebyl statisticky významný. Důvodem provedení dvoucestné metodiky ANOVA však bylo zjištění, zda je statisticky významný vliv obou těchto vlivů a toto tvrzení bylo potvrzeno.

## ZÁVĚR

Smyslem této diplomové práce byla komparace charakteristik povrchů vzniklých nekonvenčními obráběcími technologiemi a dále replikace těchto povrchů.

V teoretické části byla shrnuta problematika snímání povrchů jak kontaktním, tak bezkontaktním způsobem. Dále byly prostudovány normy zabývající se drsností povrchu, konkrétně ISO 4287, ISO 4288 a ISO 25178. Z těchto norem byl následně udělán výpis důležitých informací o charakterizacích povrchu. Dále zde byly vypsány statistické metody pro vyšetření a zpracování dat sloužící později v praktické části k získání požadovaných závěrů. V poslední řadě byly v teoretické části popsány nekonvenční obráběcí technologie, především pak laser a plazma, které jsou předmětem studie v praktické části.

Praktická část se nejdříve zabývá výrobou vzorků. Vzorky tvoří šest ocelových dílů a šest otisků. Ocelové díly byly vyřezány pomocí plazmy a laserového paprsku z plechů o tloušťkách 5 mm, 10 mm a 15 mm. Otisky byly vytvořeny pomocí otiskovací hmoty SILOFLEX.

Po vytvoření byly vzorky naskenovány. K tomu byl využit bezkontaktní profiloměr ZYGO NEWVIEW 8000, který snímal povrchy vzorků na ploše 3x3 mm, každý vzorek bylo tedy nutné nasnímat několikrát. Získané snímky měly charakter 3D mapy snímaného povrchu, na které byly vytvářeny v určitých místech řezy, aby byl získán požadovaný parametr Ra.

Po získání dat přišlo na řadu hodnocení vzorků. Nejprve byly ocelové vzorky srovnány pomocí zvětšených fotografií, kde bylo možné si povšimnout svarových charakteristik povrchu. Plazmou řezané vzorky byly hladší, ale s narůstající tloušťkou výrobku výrazně zešikmené. Laserem řezané vzorky měly na povrchu výrazné rýhy vzniklé špatným ohniskem laseru. Následně byly porovnány profily povrchu, kde bylo možno povšimnout si u vzorků výrazného rozdílu u vstupní a výstupní části paprsku. Na vstupní části bylo větší množství prvků profilu v menším rozsahu velikosti, ve výstupní části byl naopak profil více jednolité a jeho rozsah narůstal.

Následovalo statistické vyhodnocení dat. Nejprve byly porovnávány vzorky a jejich otisky. Všechna data byla otestována na normalitu pomocí Anderson-Darlingova testu, kde pro všechna data byla normalita přijata. Dále byl proveden test Grubbsův test odlehlých hodnot, kde bylo přijato tvrzení, že krajní hodnoty jsou pouze extrémy, nikoliv hrubé chyby. Po vyšetření dat byl proveden F-test pro zjištění podobnosti rozptylů. Porovnáván byl vždy vzorek a jeho otisk. Ve všech případech nebylo zamítnuto, že rozptyly se liší statisticky

nevýznamně. Po zjištění, že rozptyly jsou shodné, byl proveden T-test, které vyhodnotil statistickou významnost rozdílu průměrů. Zde ve všech případech byl rozdíl mezi průměry dílů a otisků vyhodnocen jako statisticky nevýznamný. Tvrzení o shodnosti dílů a otisků bylo nakonec potvrzeno clusterovou analýzou, která rozpoznala podobnost dat a správně rozdělila vzorky a jejich otisky.

Následná komparace mezi technologiemi byla prováděna mezi vstupní a výstupní částí řezu, protože zde byl rozdíl hodnot nejvýraznější. Veškerá data z těchto oblastí byla otestována na všechny náležitosti potřebné k provedení metodiky ANOVA, která byla zvolena jako metoda pro toto porovnání. Díly byly porovnávány jednocestnou metodou ANOVA podle tloušťky vzorku. Na vstupní části řezu byl rozdíl parametru Ra vyhodnocen na všech tloušťkách jako statisticky nevýznamný, což bylo následně potvrzeno i dvoucestnou metodikou ANOVA, které vyhodnotila jak faktor tloušťky, tak technologie jako statisticky nevýznamné. Na výstupní části však byl výsledek jiný. Zde již byla kvalita výstupního povrchu na vzorcích 15 mm a 10 mm vyhodnocena jako rozdílná mezi technologiemi. Povrchy vzorků tloušťky 5 mm byly vyhodnoceny jako podobné, vliv technologie zde tedy nebyl významný. Následné provedení dvoucestné metodiky ANOVA potvrdilo, že faktor tloušťky je zde významný, naopak však faktor technologie byl vyhodnocen jako nevýznamný, což bylo nejspíše zapříčiněno podobností vzorků tloušťky 5 mm. Hlavním záměrem dvoucestné ANOVY však byl vliv kombinace obou faktorů, který byl vyhodnocen jako statisticky významný. Můžeme tedy konstatovat, že při větších tloušťkách plechů je potřeba volit technologii podle požadavků na kvalitu, neboť kvalita řezů je rozdílná.



**SEZNAM POUŽITÉ 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 požadavky na výrobky (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [4] BUMBÁLEK, Bohumil; ODVODY, Vladimír; OŠŤÁDAL, Bohuslav. Drsnost povrchu. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. 338 s.
- [5] SLANEC, Karel. *Konstruování: geometrická přesnost výrobků*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02992-1.
- [6] PERNIKÁŘ, Jiří, Josef VAČKÁŘ a Miroslav TYKAL. *Jakost a metrologie*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1997-0.
- [7] Dotykové, nebo bezdotykové měření struktury povrchu?. Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum [online]. Copyright © 2021 www.mmspektrum.com [cit. 01.03.2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/dotykov-nebo-bezdotykov-mereni-struktury-povrchu.html>
- [8] PATA, V. *Jakost a metrologie (přednáška)* Zlín: UTB
- [9] MORÁVEK R.: *Nekonvenční metody obrábění* 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 1999, ISBN 80-7082-518-9
- [10] KOČMAN, Karel, 2011. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství cerm
- [11] Joseph, Leena & Velayudhan, Arumugham & Rp, Rajesh & Vayalappil, Muraleedharan. (2013). *Chromatic Length Aberration Technique \_ A Tool for Bio material surface characterization in Nano scale*.
- [12] Maňková, Ildikó. *Progresívne technológie*. Vienala Košice, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [13] WHITEHOUSE, David. *Surfaces and their measurement*. London: Kogan Page Science, 2004. ISBN 1-9039-9660-0.

- [14] PEŠIČKA, L. Geometrická specifikace výrobků strojírenské výroby (GPS). Praha: ČNI, 2006. 49 S.
- [15] ELUC. ELUC [online]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1103>
- [16] ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL, 2001. Strojírenská technologie 3: Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění 2. díl. Praha: Scientia, spol. s. r. o., pedagogické nakladatelství
- [17] [online]. Dostupné z: <https://eprintspublications.npl.co.uk/2041/>
- [18] WHITEHOUSE, D. J. *Handbook of surface and nanometrology*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2011. ISBN 978-1-4200-8201-2.
- [19] Fallqvist, Mikael. (2012). Microstructural, Mechanical and Tribological Characterisation of CVD and PVD Coatings for Metal Cutting Applications.
- [20] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Kompendium statistického zpracování dat: metody a řešené úlohy*. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: Academia, 2006. ISBN 80-200-1396-2.
- [21] Popisná statistika. [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/201/08.html>
- [22] Medián — Matematika.cz. Matematika pro střední a základní školy — Matematika.cz [online]. Copyright © 2006 [cit. 01.03.2021]. Dostupné z: <https://matematika.cz/median>
- [23] Nekonenční metody obrábění – 8. díl. Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum [online]. Copyright © 2021 [www.mmspektrum.com](http://www.mmspektrum.com) [cit. 01.03.2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-8-dil.html>
- [24] SEDLÁČEK, Karel. *Laser v mnoha podobách*. Praha: Naše vojsko, 1982. Mars.
- [25] Hecht, Jeff. (2010). Short history of Laser development. *Applied optics*. 49. F99-122. 10.1117/1.3483597.
- [26] ATE Central - Course 2: Laser Systems and Applications. ATE Central - Supporting Advanced Technological Education [online]. Dostupné z: [https://atecentral.net/r37341/course\\_2\\_laser\\_systems\\_and\\_applications](https://atecentral.net/r37341/course_2_laser_systems_and_applications)
- [27] Zlatanov, Nikola. (2016). Lasers and laser applications. 10.13140/RG.2.2.26771.89123.
- [28] Radovanović, Miroslav & Dašić, Predrag. (2006). Research on surface roughness by laser cut. *The Annals of "Dunărea de Jos" University of Galați, Fascicle VIII: Tribology*. 12. 84-88.
- [29] BARCAL, Jaroslav, 1989. Nekonenční metody obrábění. Praha: ČVUT.



- [30] Coherence Scanning Interferometry | Robust Metrology | ZYGO. ZYGO | Precision Optical Metrology | Optical Components [online]. Copyright © 2021 Zygo Corporation [cit. 02.03.2021]. Dostupné z: <https://www.zygo.com/support/technologies/csi-technology>
- [31] Using Coherence Scanning Interferometry to Measure High-Slope Parts. Material Science | News | Materials Engineering | News [online]. Copyright © 2000 [cit. 28.03.2021]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=13792>
- [32] Surface Profilometry | Pack Functionality | Smithers. [online]. Copyright © 2021 [cit. 28.03.2021]. Dostupné z: <https://www.smithers.com/industries/packaging/manufacturers-and-users/primary-pack-testing/pack-functionality/surface-profilometry>
- [33] D ANTONIO, Palma et al., 2012. Scale-independent roughness value of cell membranes studied by means of AFM technique. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes* [online]. **1818**(12), 3141-3148 [cit. 2021-5-9]. ISSN 00052736. Dostupné z: doi:10.1016/j.bbamem.2012.08.001
- [34] Maximum height of profile (Rz, Pz, Wz) | What is line roughness? | Solving the questions about profile and surface roughness measurements! Introduction to "Roughness" | KEYENCE International Belgium. Sensors and Machine Vision Systems for Factory Automation | KEYENCE International Belgium [online]. Dostupné z: [https://www.keyence.eu/ss/products/microscope/roughness/line/tab01\\_b.jsp](https://www.keyence.eu/ss/products/microscope/roughness/line/tab01_b.jsp)
- [35] Materiálovotechnologická fakulta STU v Bratislave [online]. Copyright © [cit. 28.03.2021]. Dostupné z: [https://www.mtf.stuba.sk/buxus/docs/internetovy\\_casopis/2010/4/lipa\\_tomanickova.pdf](https://www.mtf.stuba.sk/buxus/docs/internetovy_casopis/2010/4/lipa_tomanickova.pdf)
- [36] [online]. Dostupné z: <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/hypotezy.htm>
- [37] Unconventional machining processes. Share and Discover Knowledge on SlideShare [online]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/NarayananSamy/unconventional-machining-processes-95472913#:~:text=Unconventional%20Machining%20Processes%20%E2%80%93%20Introduction%20An,the%20tool%20and%20the%20workpiece.>
- [38] Non-Traditional Machining Process: Requirements, Types, Advantages and Disadvantages - mech4study. mech4study - Mechanical Engineering Blog [online]. Copyright © 2021 [cit. 28.03.2021]. Dostupné z:

<https://www.mech4study.com/2017/04/non-traditional-machining-process-requirements-types-advantages-and-disadvantages.html>

[39] ELUC. ELUC [online]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1419>

[40] Meloun M., Militký M. and Forina M. Chemometrics for analytical chemistry. 1. New York: Ellis Horwood (1992). ISBN 01-312-6376-5.

[41] What are Histograms? Analysis & Frequency Distribution | ASQ. Excellence Through Quality | ASQ [online]. Copyright © 2021 American Society for Quality. All rights reserved. [cit. 28.03.2021]. Dostupné z: <https://asq.org/quality-resources/histogram>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

ČSN	česká státní norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
EN	Evropské normy
$\mu\text{m}$	mikrometr
mm	milimetr
m	metr
nm	nanometr
CLA	Chromatic Lenght Abberation
CSI	Coherence scanning interferometry
m/min	Metry za minutu
$\mu$	aritmetický průměr
$\bar{x}$	odhad aritmetického průměru
n	počet prvků výběrového souboru
s	odhad směrodatné odchyly
$s^2$	odhad rozptylu
$\sigma$	Směrodatná odchylka
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia
MPa	megapascal
kHz	kilohertz
W	watt
Ra	Střední aritmetická drsnost
Rmr	Materiálový poměr profilu
Rz	Největší výška profilu
Rv	největší hloubka prohlubně profilu
RSm	Průměrná šířka prvků profilu

---

ln	vyhodnocovaná délka
lr	základní délka
Rv	Největší hloubka prohlubně profilu na základní délce
Rp	Největší výška výstupku profilu na základní délce
H0	Nulová hypotéza
Ha	Alternativní hypotéza
3D	trojrozměrný prostor
2D	dvojrzměrný prostor
CO2	Oxid uhličitý
N	dusík
He	Helium
Ar	argon
%	procento
R	interkvartilové rozpětí
EDA	Exploratorní datová analýza
K	stupeň Kelvina
UV	ultrafialové záření
E0	základní energetická hladina
E1	vyšší energetická hladina
A	ampér
EDM	elektroerozivní obrábění
CM	chemické obrábění
WJM	obrábění vodním paprskem

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obrázek 1. schéma CLA snímače [15]</i> .....	14
<i>Obrázek 2. Schéma CSI snímače [31]</i> .....	14
<i>Obrázek 3. Schéma laserového snímače [32]</i> .....	15
<i>Obrázek 4. Textura povrchu [33]</i> .....	18
<i>Obrázek 5. Tvar povrchu [33]</i> .....	18
<i>Obrázek 6. Vlnitost povrchu [33]</i> .....	19
<i>Obrázek 7. Drsnost povrchu [33]</i> .....	19
<i>Obrázek 8. Výška nerovností profilu drsnosti [34]</i> .....	20
<i>Obrázek 9. šířka prvků profilu [34]</i> .....	21
<i>Obrázek 10. Vyjádření parametru Rmr [1]</i> .....	21
<i>Obrázek 11. Abbott-Firestoneova křivka [35]</i> .....	22
<i>Obrázek 12. Graf časové řady</i> .....	25
<i>Obrázek 13. Histogram</i> .....	25
<i>Obrázek 14. Box-plot diagram</i> .....	26
<i>Obrázek 15. Chyby hypotéz [36]</i> .....	27
<i>Obrázek 16. Schéma plazmového řezání [39]</i> .....	31
<i>Obrázek 17. Využití vlnové délky u různých technologií [27]</i> .....	34
<i>Obrázek 18. Laserový stroj TruLaser 3030</i> .....	41
<i>Obrázek 19. Sada otiskovacích hmot SILOFLEX</i> .....	42
<i>Obrázek 20. Postup výroby podkladové destičky</i> .....	43
<i>Obrázek 21. Vzorky připravené pro otisk</i> .....	44
<i>Obrázek 22. Dávkování otiskovací hmoty a katalyzátoru</i> .....	44
<i>Obrázek 23. Měření vzorků na bezkontaktním profiloměru ZYGO NEWVIEW</i> .....	45
<i>Obrázek 24. Softwarová 3D vizualizace snímaného povrchu</i> .....	46
<i>Obrázek 25. Povrch vzorku 10 mm řezaný laserem</i> .....	47
<i>Obrázek 26. Povrch vzorku 10 mm řezaný plazmou</i> .....	47
<i>Obrázek 27. Profil povrchu na vstupní části řezu u vzorku Ra_L_10</i> .....	48
<i>Obrázek 28. Profil povrchu na výstupní části řezu u vzorku Ra_L_10</i> .....	48
<i>Obrázek 29. Profil povrchu na vstupní části řezu u vzorku Ra_P_10</i> .....	49
<i>Obrázek 30. Profil povrchu na výstupní části řezu u vzorku Ra_P_10</i> .....	49
<i>Obrázek 31. 3D vizualizace povrchu vzorku Ra_L_10</i> .....	50
<i>Obrázek 32. 3D vizualizace povrchu vzorku Ra_P_10</i> .....	50
<i>Obrázek 33. Sumarizace základních vlastností datového souboru Ra_P_10</i> .....	51
<i>Obrázek 34. Sumarizace základních vlastností datového souboru Ra_P_10</i> .....	52

<i>Obrázek 35. Graf normality pro vzorek Ra_P_10</i> .....	53
<i>Obrázek 36. Graf normality pro vzorek Ra_L_10</i> .....	54
<i>Obrázek 37. Graf odlehých hodnot pro vzorek Ra_P_10</i> .....	55
<i>Obrázek 38. Graf odlehých hodnot pro vzorek Ra_L_10</i> .....	55
<i>Obrázek 39. Sumarizace základních vlastností datového souboru Ot_Ra_P_10</i> .....	56
<i>Obrázek 40. Sumarizace základních vlastností datového souboru Ot_Ra_L_10</i> .....	57
<i>Obrázek 41. Graf normality pro vzorek Ot_Ra_P_10</i> .....	58
<i>Obrázek 42. Graf normality pro vzorek Ot_Ra_L_10</i> .....	58
<i>Obrázek 43. Graf odlehých hodnot pro vzorek Ot_Ra_P_10</i> .....	59
<i>Obrázek 44. Graf odlehých hodnot pro vzorek Ot_Ra_L_10</i> .....	59
<i>Obrázek 45. Test shody rozptylů pro vzorky Ra_P_10 a Ot_Ra_P_10</i> .....	61
<i>Obrázek 46. Test shody rozptylů pro vzorky Ra_P_10 a Ot_Ra_P_10</i> .....	61
<i>Obrázek 47. Clusterová analýza</i> .....	63
<i>Obrázek 48. Grafické znázornění shody průměrů pro kombinaci faktorů na vstupní části</i>	65
<i>Obrázek 49. Grafické znázornění shody průměrů pro kombinaci faktorů na vstupní části</i>	67

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1. Chyby hypotéz [36] .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 2. Označení vzorků.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 3. Výsledky testu normality pro ocelové vzorky.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 4. Výsledky Grubbsova testu odlehlých hodnot pro ocelové vzorky.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 5. Výsledky testu normality pro otisky .....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 6. Výsledky Grubbsova testu odlehlých hodnot pro otisky .....</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 7. Výsledky F-testu pro shodu ocelových dílů a otisků.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 8. Výsledky F-testu pro komparaci ocelových dílů a otisků .....</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 9. Souhrn vlastností datových souborů pro vstupní část řezu .....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 10. Výsledek metody ANOVA pro rozdíl mezi technologiemi na vstupní části řezu .....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 11. Výsledky dvoucestné metodiky ANOVA pro vstupní část řezu.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 12. Souhrn vlastností datových souborů pro výstupní část řezu.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 13. Výsledek metody ANOVA pro rozdíl mezi technologiemi na výstupní části řezu .....</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 14. Výsledky dvoucestné metodiky ANOVA pro výstupní část řezu.....</i>	<i>67</i>

