

Statistické hodnocení opotřebení brzdných kotoučů

Bc. Krupková Vendula

Diplomová práce
2022

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Vendula Krupková
Osobní číslo: T20128
Studijní program: N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor: Řízení jakosti
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Statistické hodnocení opotřebení brzdných kotoučů

Zásady pro vypracování

- studenta má za úkol zjistit jaký je rozdíl mezi vyhodnocováním pomocí ISO 4287, ISO 4288 a ISO 25 178.
- provést kontrolu povrchů pomocí mikroskopu
- Dále provede analýzu povrchů na bezkontaktním profiloměru ZIGO
- Následně naměřená data drsnosti povrchu budou vyhodnocena pomocí programů Minitab a Statistika.

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

Seznam doporučené literatury:

1. ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1999.
2. ČSN EN ISO 4288. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. 1999.
3. BUMBÁLEK, L.- BUMBÁLEK, B.: Pokrokové trendy v hodnocení textury povrchu, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně.
4. MELOUN, Milan. Kompendium statistického zpracování dat: metody a řešení úlohy včetně CD. Praha: Academia, 2002, 764 s. ISBN 80-200-1008-4

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

Datum zadání diplomové práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2022**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 18. února 2022

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 je zaměřena na statické zhodnocení opotřebených povrchů brzdných kotoučů jízdních kol. Je rozdělena na část teoretickou a praktickou.

V teoretické části nalezneme seznámení se základními brzdnými systémy, které jsou používány ve světě od vynalezení prvního jízdního kola až po současnost. Největší pozornost je však věnována právě kotoučovým brzdným systémům, jejich funkci a hlavním částem, které, tvoří brzdové kotouče a brzdové destičky. Dále je zde pozornost věnována drsnosti povrchu, způsobu jeho měření, průzkumu dat za pomoci metodiky EDA a krátce popis Abbot-Firestonovy křivky.

V praktické části bylo uskutečněno měření šesti zkušebních vzorků z čehož 2 byly srovnávací (nové) a ostatní 4 byly opotřebené v běžném provozu. Další měření bylo zaměřeno na změnu povrchové tvrdosti kotoučů a úbytek materiálu funkčních ploch. Tato získaná data byla následně zpracována a zhodnocena.

Klíčová slova: Drsnost povrchu, Opotřebenění, Abbot-Firestonova křivka

ABSTRACT

This diploma thesis focused on the statistical evaluation of wear brake discs of bicycles. There is theoretical and practical part.

In theoretical part you can find introduction to the basic braking systems which are used in the world from creation of the first bicycle to nowadays. However, the greatest attention is paid to disc brakes, rim brakes, their function and main parts, which are brake discs and brake pads. Furthermore, attention is paid to the surface roughness, main types of measurement, the use of EDA method or brief description of Abbot-Firestone curve.

Practical part focus on measure of tested parts include two new samples and four samples which are worn out in a regular traffic. Next measurement focus on microhardness of surface and material decrease of functional parts. Data which were obtained were processed and evaluated.

Keywords: Roughness, Evaluate, Abbot-Firestone curve

Tímto bych chtěla poděkovat všem, kteří mě při psaní této práce podporovali a také mé vedoucí diplomové práce za skvělé vedení a užitečné rady.

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

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| ÚVOD..... | 9 |
| I TEORETICKÁ ČÁST | 10 |
| 1 BRZDNÉ SYSTÉMY JÍZDNÍCH KOL..... | 11 |
| 1.1 RÁFKOVÉ BRZDNÉ SYSTÉMY | 11 |
| 1.2 KOTOUČOVÉ BRZDNÉ SYSTÉMY..... | 14 |
| 1.2.1 Mechanické kotoučové brzdné systémy..... | 15 |
| 1.2.2 Hydraulické kotoučové brzdné systémy | 16 |
| 1.2.3 Opotřebenění brzdových kotoučů | 16 |
| 1.2.4 Druhy brzdových kotoučů | 18 |
| 1.2.5 Destičky kotoučových brzd | 20 |
| 2 INTEGRITA POVRCHU | 22 |
| 2.1 JAKOST..... | 23 |
| 2.2 DRSNOST POVRCHU | 25 |
| 2.3 PARAMETRY PROFILŮ POVRCHU | 26 |
| 2.3.1 Základní výškové parametry | 28 |
| 2.3.2 Základní délkové parametry..... | 29 |
| 2.3.3 Základní hybridní parametr..... | 29 |
| 2.4 METODY MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU | 30 |
| 2.4.1 Kontaktní metody snímání povrchu | 30 |
| 2.4.2 Bezkontaktní metody snímání povrchu..... | 31 |
| 3 ABBOT FIRESTONOVA KŘIVKA | 32 |
| 4 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ DAT | 34 |
| 4.1 ZÁKLADNÍ TYPY DAT..... | 34 |
| 4.1.1 Kvantitativní data | 34 |
| 4.1.2 Kvalitativní data | 35 |
| 4.2 METODA EDA (EXPLORATORNÍ DATOVÁ ANALÝZA) | 35 |
| 4.3 TESTOVÁNÍ STATISTICKÝCH HYPOTÉZ..... | 38 |
| 4.3.1 Testování normality dat..... | 39 |
| 4.3.2 F-Testy | 40 |
| 4.3.3 T-Testy | 40 |
| 4.3.4 Testy hrubých chyb | 40 |
| 5 MIKROTVRDOST | 41 |
| 5.1 MIKROTVRDOST DLE VICKERSE | 42 |
| 5.1.1 Označení a výpočet tvrdosti dle Vickerse | 42 |
| 5.2 MIKROTVRDOST DLE KNOOPA | 44 |
| 5.2.1 Značení a výpočet tvrdosti dle Knoopu..... | 44 |
| II PRAKTICKÁ ČÁST..... | 46 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 6 | CÍLE PRÁCE | 47 |
| 7 | ZKOUMANÉ VZORKY | 48 |
| 7.1 | ZNAČENÍ | 48 |
| 7.2 | POPIS..... | 49 |
| 7.2.1 | Vzorky typu A..... | 49 |
| 7.2.2 | Vzorky typu B..... | 50 |
| 8 | MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU | 51 |
| 8.1 | POSTUP MĚŘENÍ..... | 51 |
| 8.2 | ZPRACOVÁNÍ ZÍSKANÝCH DAT..... | 53 |
| 8.3 | STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ | 55 |
| 9 | MĚŘENÍ MIKROTVRDOTI MATERIÁLU | 72 |
| 9.1 | POSTUP MĚŘENÍ..... | 72 |
| 9.2 | ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ | 73 |
| 10 | MĚŘENÍ TLOUŠŤKY KOTOUČŮ..... | 74 |
| 10.1 | POSTUP MĚŘENÍ..... | 74 |
| 10.2 | ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ | 74 |
| | ZÁVĚR | 77 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | 78 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 82 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 83 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 86 |

ÚVOD

V dnešní době dochází k neustálým inovacím, které vedou ke zdokonalování, nebo zvyšování efektivity. Tento trend se nevyhnul ani jízdním kolům, jejichž popularita výrazně vzrostla přes dobu trvání pandemie. Mimo jiné došlo u jízdních kol také k vývoji brzdných systémů, což způsobilo že běžné ráfkové brzdné systémy již na nově vyráběných kolech téměř nenajdeme. Přejít na kotoučové brzdné systémy přináší výrazné zvýšení brzdného efektu, nebo možnost jeho úpravy na základě zvoleného průměru kotouče. Vyšší účinnost ale také obnáší vyšší opotřebení. Toto opotřebení se na brzdových kotoučích projevuje úbytkem materiálu na brzdných plochách, nebo jejich tepelným ovlivněním, což má vliv na jejich životnost. Současně také dochází k neustálému vývoji nových kotoučů jak po tvarové stránce, tak po stránce jejich složení, které je často uzpůsobeno tak aby co nejlépe odváděly teplo, nebo tvořily co nejmenší zátěž pro cyklistu. S významnými výhodami ale také přicházejí nevýhody v podobě složitějšího seřízení, montáže, vyšší pořizovací ceny, nebo také nižší životnosti. Ale i přes tyto nevýhody se kotoučové brzdné systémy těší veliké popularitě.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 BRZDNÉ SYSTÉMY JÍZDNÍCH KOL

Jízda na kole může pro každého znamenat něco jiného. Někdo kolo využívá pouze jako dopravní prostředek, díky kterému se dostane do práce, jiní jízdu na kole mohou považovat za své hobby, nebo pouze jako sport, který je udržuje v kondici.

Pro každého cyklistu ale bude důležité mít stoprocentní kontrolu nad svou jízdou. Tohoto požadavku nám umožňují dosáhnout právě brzdy, které cyklistům umožňují kontrolovaně zpomalovat, nebo zastavovat své kolo. Z pohledu bezpečnosti a funkčnosti se bude jednat o jednu z nejdůležitějších součástí bez kterých se běžný cyklista neobejde.

Historie jízdního kola je rozsáhlá a za tuto dobu již bylo vyvinuto několik druhů brzdných systémů, které plní svoji funkci snižování rychlosti, ale jsou vyvinuty na jiném principu a také mají odlišné vlastnosti. [1]

Jedním z prvních způsobů snižování rychlosti jízdních kol bylo využití podrážek bot pro vytvoření tření, které pomáhalo jezdcovi zpomalit. Tento způsob ale nebyl příliš efektivní ani praktický, a tak byl vynalezen brzdý systém zvaný „spoon brake“, Jednalo se o brzdý systém, který působil přímo na plášť kola, a tak docházelo k jeho rychlejšímu opotřebení. I přes tyto nevýhody se tento brzdý systém udržel na dětských kolech až do 50. let 20. století. [2] [3]

V dnešní době se můžeme setkat s brzdými systémy:

- Kotoučovými
- Ráfkovými
- Bubnovými
- Dráhovými (horskými)

Nejběžněji se ale setkáváme s ráfkovými, nebo kotoučovými brzdými systémy. [1]

1.1 Ráfkové brzdé systémy

V případě ráfkových brzd působí brzdé destičky přímo na samotný okraj ráfku kola což pomocí třecích sil způsobuje zpomalování, nebo úplné zastavení kola. Tyto typy brzd jsou ovládány pomocí páky, která je běžně umístěna na řídítkách jízdního kola. Jedná se o brzdý systém, u kterého je jako materiál brzdých destiček využívána pryž. Pryžové destičky jsou

umístěny na obou stranách ráfku a jsou postupně opotřebovávány. Mezní doba využití je stanovena výrobcem, ale běžně jsou měněny při úplném ztracení rýhování. [1] [2] [4]



Obrázek 1 Opotřeбенá pryžová destička

Řadí se sice k levnějším variantám brzd, ale na druhou stranu díky špatnému tření a nízkému působení vyvozených sil při brždění nejsou ráfkové brzdné systémy natolik účinné jako dnešní již běžně používané kotoučové brzdy. [1] [2] [4]



Obrázek 2 Ráfkový brzdny systém

Ráfkové brzdné systémy je možné dále dělit na:

- Třmenové brzdy – tento druh brzd je méně účinný při využití na širších pneumatikách. Není tedy využíván pro horská kola, ale nachází uplatnění především u silničních kol.
- Konzolová brzdy – tato brzda umožňuje díky svému uchycení velkou vzdálenost mezi brzdými destičkami a je tedy vhodná jako brzdný systém pro horská kola. Z hlediska seřizování a účinnosti se jedná o nejhorší typ ráfkových brzdných systémů.
- V-brzdy – jedná se o brzdu, která se montuje na vidlici. Brzdné lanko se přivádí přes jedno rameno ke druhému a po jeho utahení (zmáčknutí brzdy) jsou přitlačovány brzdé destičky na obě strany ráfků. [1] [2]

Ve srovnání s kotoučovými brzdnými systémy nevykazují ráfkové brzdné systémy takovou účinnost, ale nacházíme u nich jiné výhody jako:

- Snadnější údržba
- Delší životnost
- Finančně dostupnější
- Lehčí než brzdy diskové
- Lepší aerodynamika [2]

Nevýhody ráfkových brzdných systémů:

- V průběhu brždění se opotřebovává celý obvod ráfku což časem vyžaduje jeho kompletní výměnu
- Mechanismus systému může omezovat maximální šířku ráfku a pláště
- Nepravidelnost ráfku má vliv na účinnost brždění
- Nepředvídatelná účinnost za mokra [2]

1.2 Kotoučové brzdné systémy

Tento typ brzdných systémů byl nejdříve využíván převážně pro horská kola, kde je vyžadován vysoký výkon a spolehlivost. Postupem času se ale tento systém začal rozšiřovat a dnes je to již standard, který je použit ve většině nově vyráběných jízdních kol.

Jedná se o systém, kde je hlavní částí tvoří rotor (brzdný kotouč) umístěný na náboji kola. Pro zastavení kola v tomhle případě slouží brzdné destičky, které stlačí brzdný kotouč a za pomoci třecích sil je kolo zastaveno. Dostupnost diskového brzdného systému je v dnešní době již velice příznivá a můžeme si jej pořídit v mnoha cenových kategoriích. [1] [5]



Obrázek 3 kotoučový brzdný systém

Nejdůležitější výhody a nevýhody diskových brzdných systémů jsou uvedeny níže.

Výhody:

- Jejich výkon není tolik ovlivněn nepříznivým počasím, nebo extrémními jízdními podmínkami
- Účinnější odvod z tepla rotoru
- Vysoká brzdná síla bez nutnosti vyvození vysokých tlaků na brzdový pedál
- Bez opotřebovávání ráfků [2]

Nevýhody:

- Brzdné kotouče zvyšují hmotnost kola
- Rychlejší opotřebení brzdných kotoučů i destiček, což vede k častějším výměnám obou komponentů
- Ve srovnání s ráfkovými brzdnými systémy mají stále vyšší pořizovací ceny (zejména v případě hydraulických kotoučových brzd)
- Náročnější údržba a správné seřízení [2]

V dnešní době můžeme pozorovat používání dvou typů kotoučových brzdných systémů, které se liší svým principem, ale také parametry.

1.2.1 Mechanické kotoučové brzdné systémy

Jedná se o brzdný systém, který využívá pro svoji funkci kabely tažené přes rám kola až k přítlačným destičkám, stejně jako u ráfkových brzd. Jedná se o levnější variantu, která zaručuje dostatečnou účinnost za jakéhokoli počasí v přijatelné cenové kategorii. Další výhodou je relativní jednoduchost servisu a údržby oproti hydraulickým brzdným systémům. [5]

1.2.2 Hydraulické kotoučové brzdné systémy

Hydraulické brzdné systémy nahradily ovládací lanka za brzdou kapalinu. Po zmáčknutí brzdového pedálu je tlačeno na brzdou kapalinu tak aby byla přesunuta do třmenu, čímž způsobí stlačení brzdových destiček, které začnou působit potřebnou silou na kotouče.

Jedná se o dražší variantu brzdného systému, který již pro svoji údržbu vyžaduje odborníky. Výměna média je řízena podle doporučení výrobce, kde někteří doporučují výměnu po uplynutí 6 měsíců a jiní při změně barvy kapaliny. Brzdová kapalina je volena podle způsobu jízdy pro správný odvod tepla. [5]

1.2.3 Opotřebení brzdových kotoučů

Opotřebení brzdových kotoučů vzniká díky styku brzdových destiček a kotouče v průběhu jízdy. V první řadě se jedná o tření povrchů kotouče a destiček při kterých dochází k úbytku materiálu. Každý brzdový kotouč musí splňovat určitou tloušťku, aby bylo možné díky němu dosáhnout dostatečného brzdného výkonu. Výrobci kotoučů uvádějí tloušťku nových kotoučů na obalu a minimální doporučenou tloušťku pro správné fungování přímo na těle kotouče.



Obrázek 4 Minimální tloušťka kotouče doporučená výrobcem

Při přesáhnutí této doporučené tloušťky je možné že na sebe oba povrchy nebudou pevně doléhat a brzdový systém přestane být funkční.

Jedním za dalších významných problémů při opotřebení je špatná montáž, nebo nedokonalá konstrukce. Často dochází k neodborné montáži, nebo manipulaci s brzdovým systémem, který může vést ke špatné účinnosti a snížení životnosti kotouče a brzdových destiček.



Obrázek 5 překročení životnosti brzdové destičky

Při jízdě náročným terénem je nutné brát v potaz to, že při prudkém a dlouhém styku obou povrchů dochází k přeměny mechanické energie na tepelnou, která při překročení určité teploty může nepříznivě ovlivnit účinnost brzdného kotouče a tím také jeho životnost. Při vysokých teplotách může vzniknout tzv. opálení, nebo se kotouč zdeformuje. Tento problém je možné řešit velikostí a typem kotouče, nebo také volbou správných brzdových destiček. [7]



Obrázek 6 Opálený brzdový kotouč

1.2.4 Druhy brzdových kotoučů

Brzdné kotouče se s jejich postupným rozšiřováním do všech typů kol začaly vyvíjet a vzniklo více druhů mezi kterými si zákazník může vybrat ten, který bude nejvíce vyhovovat jeho požadavkům.

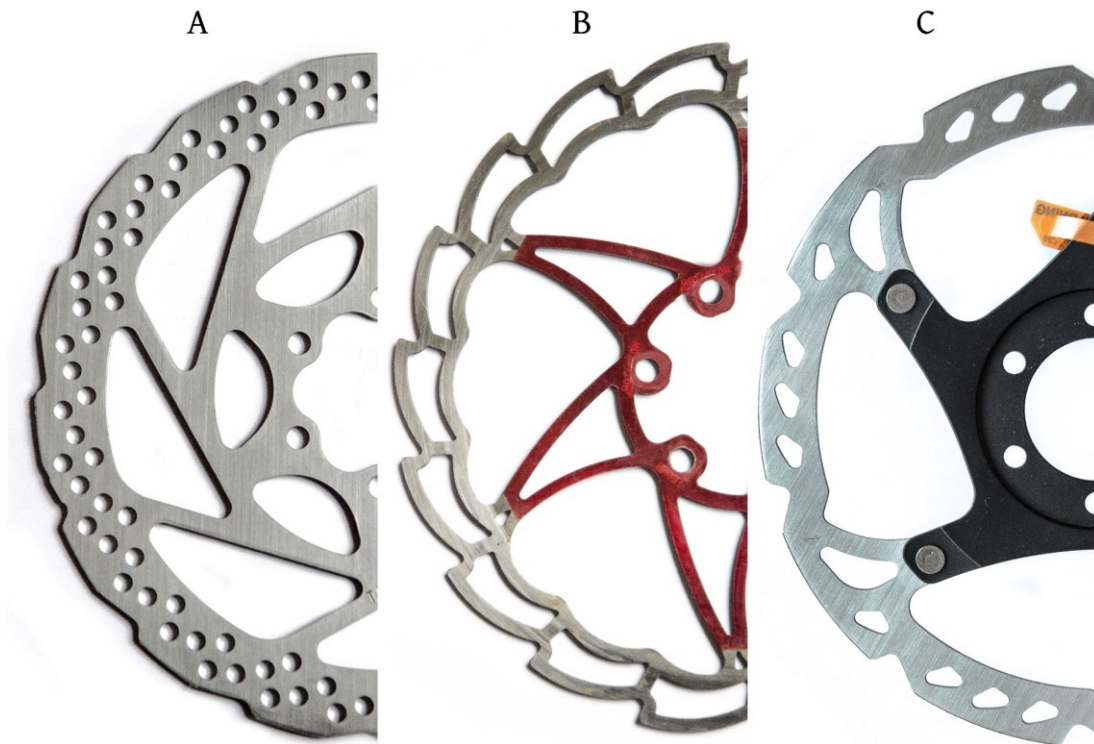
Rozdělení podle typu

Nízko hmotnostní brzdové kotouče jsou typické svou velice nízkou hmotností. Jejich plochu tvoří co nejnižší procento materiálu. Jsou to kotouče velice lehké, vhodné pro závody na rovných a přímých trasách. Jejich stavba ale neumožňuje takovou brzdou účinnost, snadno se ohnou, nebo také přehřejí.

Na druhou stranu, standardní celokovový brzdový kotouč bude disponovat výrazně lepšími brzdícími vlastnostmi, nebude tolik náchylný na ohnutí a bude lépe odvádět teplo, což zamezí jeho přehřívání.

Přehřívání brzdných kotoučů může znamenat výrazný problém. Jedním ze způsobů zamezení přehřívání je využití dvou materiálů brzdného kotouče, tedy kotouče vytvořeného z více částí. První kovová část tohoto kotouče nacházející se na vnějším průměru je určena pro brzdění za pomoci brzdových destiček. Druhou část tvoří hliníkový

střed, který pomáhá rozptýlit teplo. Tento typ kotouče je tužší a zajistí tedy nižší teplotu při brzdění což má za následek menší náchylnost k deformacím způsobených vysokou teplotou a větší brzdou silu. [6]



Obrázek 7 A) Běžný brzdný kotouč B) Ultra lehký kotouč C) Kompozitní kotouč

Rozdělení podle rozměrů

Brzdné kotouče můžou být voleny také podle jejich rozměrů. Pro silniční a cyklokrosové aplikace, nebo tam kde víme že bude využit méně agresivní styl brždění použijeme kotouče o rozměrech 140 až 160 mm. V případě většího zatížení brzd, kupříkladu při jízdě v horách volíme větší průměry až do rozměrů 205 mm. Větší rotory jsou schopné odvádět lépe teplo a jejich brzdny účinek je lepší. Často je lepší v případech těžších kol (elektro kol) a vyšší váze cyklisty zvážít volbu větších brzdnych kotoučů. [5]

1.2.5 Destičky kotoučových brzd

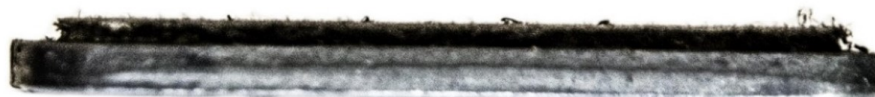
Jde o součásti brzdného systému, které jsou umístěny uvnitř třmenů. Jsou navrženy nejen aby zajišťovali efektivní zpomalování, ale i tak, aby zvládaly vysoké teploty a opotřebení, které při styku s kotouči vzniká.

V praxi jsou využívány dva druhy brzdných destiček. Jedná se o pryskyřicové, nebo taky organické brzdné destičky a kovové brzdové destičky. Pryskyřicové jsou složeny z organických materiálů jako je sklo, nebo guma a jsou spojeny pryskyřicí. Jejich výhodami je tišší chod a správa tepla. Jejich nevýhodami je rychlejší opotřebení v nepříznivých podmínkách, nebo jsou také náchylné ke ztrátě účinnosti při větším zahřátí.

V případě kovových destiček se jedná o výrobu z kovových prášků, které jsou spojeny za pomoci vysokého tlaku. Jsou vhodné pro jízdu v horách, kde je předpoklad prudšího brzdění. Produkují větší množství tepla, ale zároveň jsou vůči němu odolnější a vydrží déle i při intenzivní jízdě za mokra.



Obrázek 8 Nová kotoučová destička



Obrázek 9 Opotřebená kotoučová destička

Přehřívání může být významným problémem, který je v dnešní době možné kompenzovat díky speciálním brzdným destičkám, které jsou uzpůsobené tak, aby lépe odváděly teplo za pomoci přídavné hliníkové destičky, která je součástí běžné brzdné destičky. Jedná se o moderní komponent, který redukuje teplotu v místě styku čímž prodlužuje životnost jak brzdného kotouče, tak i brzdové destičky. [5] [6]

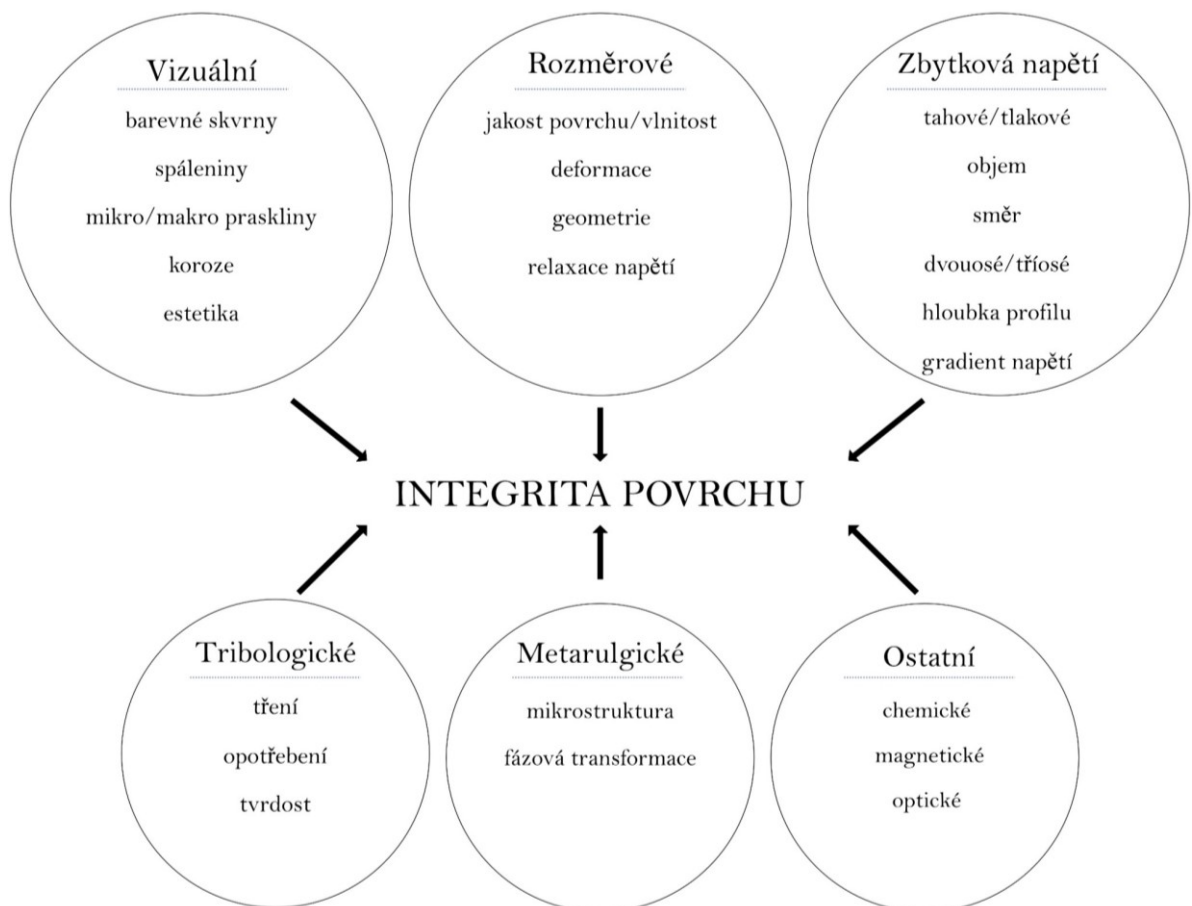


Obrázek 10 Brzdové destičky s přídavnou chladicí vložkou

2 INTEGRITA POVRCHU

Pro výrobu součásti je v dnešní době využíváno velké množství technologií a nástrojů. Jednou ze základních věcí je znalost tvorby nového povrchu součásti. Jedná se o znalost způsob výroby a nastavených technologických podmínek, které značně ovlivňují vznik nového povrchu a usnadňují nám pochopit jeho povahu i vlastnosti. Současně máme možnost daný způsob výroby upravit tak, aby došlo ke zlepšení výsledků a dosažení bezporuchového procesu výroby dané plochy.

Integritu povrchu lze tedy popsat jako vztah mezi požadovanými funkčními vlastnostmi povrchu a změnou vlastností nového povrchu, které se následně projeví na jakosti dané plochy a její výsledné funkčnosti. Povrch lze následně hodnotit za pomoci dvou základních vlastností, a to prostorového uspořádání povrchu (drsnost povrchu) a fyzikálně chemické vlastnosti povrchové vrstvy. [8] [9] [10]



Obrázek 11 klíčové faktory ovlivňující integritu povrchu [10]

Při jakémkoli zásahu, nebo úpravě povrchu bude docházet ke změnám jakosti, kde právě tyto změny využijeme pro hodnocení integrity povrchu. Jedním z problémů integrity je potřeba brát v úvahu souvislosti mezi požadavky jakosti a technologickými operacemi, nebo životností a spolehlivostí součástí a zařízení. [8] [9] [10]

2.1 Jakost

Měření a hodnocení jakosti povrchu v posledních letech zaznamenaly významný kvalitativní pokrok. Jednou z hlavních příčin jsou aktivní reakce výrobců měřících přístrojů na nové požadavky. Tato skutečnost je dána tím, že struktura povrchu je často kontrolována speciálními přístroji, kvůli čemuž jsou to právě výrobci těchto přístrojů, kteří mají významný vliv na vývoj norem souvisejících s hodnocením vysoké kvality povrchu. Tyto skutečnosti vedly ke zlepšení technologií měření a vyhodnocování povrchů, nebo také vylepšení metod, systémů měření a následnému hodnocení povrchu. Hodnocení jakosti povrchu je definován souborem norem, které popisují značení, měření a hodnocení textury povrchu, nebo také popisují kalibraci měřidel. [8]

Pod pojmem jakost povrchu rozumíme přesnost z hlediska:

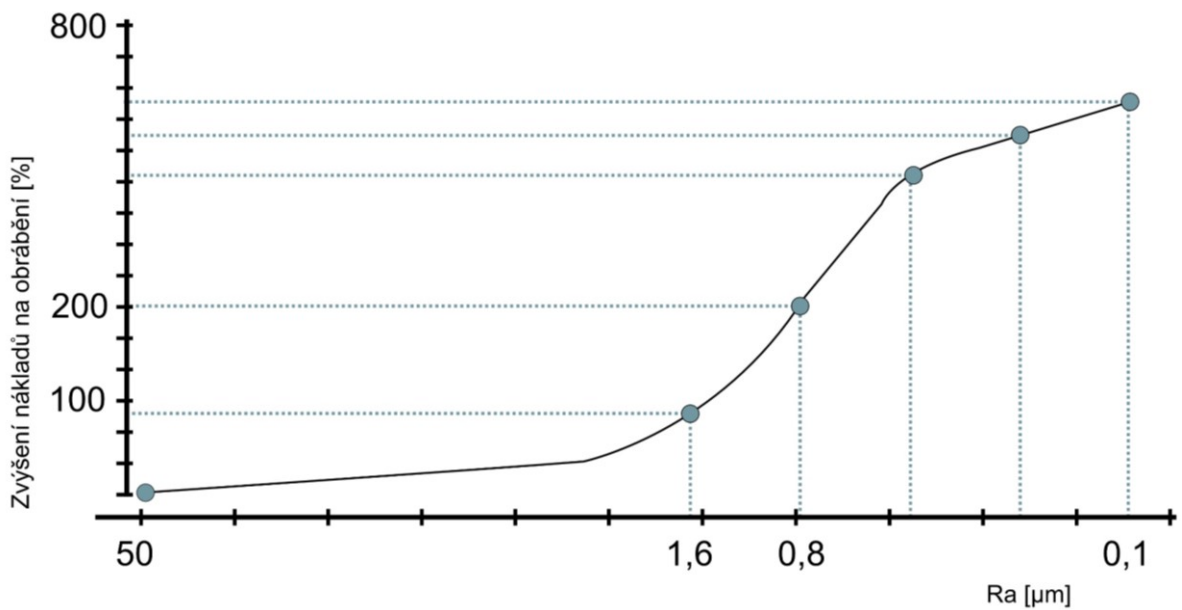
- geometrického tvaru
- polohy
- rozměrů
- drsnosti

Následně jsou tyto odchylky porovnávány vůči ideálnímu povrchu, kde jako ideální povrch je brán takový povrch, kterého v praxi není možné dosáhnout.

Dále jsou zde také zahrnovány fyzikální a chemické změny, které jsou způsobeny danou výrobní technologií.

Jakost povrchu je důležitá především pro funkční plochy výrobků, má totiž výrazný vliv na správnou funkci, ale i životnost, hlučnost, korozivzdornost, elektrickou vodivost, dobu záběhu, ztráty třením, únavová pevnost, nebo vzhled.

Postupem času se zvedají nároky na přesnost výroby, což také vede k vyšším požadavkům a důrazu na jakost povrchu. Tato skutečnost způsobuje růst cen, které mnohdy tvoří rozhodující faktor při výběru dodavatelů. [9] [10]



Obrázek 12 náklady na obrábění v závislosti na požadované jakosti povrchu [11]

Protože vliv jakosti povrchu na funkčnost plochy je již dobře známý, hraje významnou roli optimalizace dokončovacích procesů, které jsou pro výrobu funkčních ploch využívány. Dále je potřeba na základě znalosti provozních podmínek stanovit potřebné přesnosti tvaru, rozměru a textury povrchu čímž docílíme splnění požadavků a zajištění správné funkce součásti.

Každá výrobní metoda bude mít rozdílný vliv na výslednou jakost povrchu. Tato jakost bude záležet nejen na zvoleném nástroji a jeho geometrii, ale také na nastavených technických parametrech, nebo vibracích, které mohou přicházet z okolí, nebo vznikat přímo při procesu. V důsledku těchto vlivů mohou vznikat změny na výsledné ploše, jako například:

- vznik makro, nebo mikrotrhlin
- změna povrchové tvrdosti
- vznik zbytkových napětí v povrchové vrstvě
- rekrytalizace vlivem teploty
- plastické deformace [12] [13]

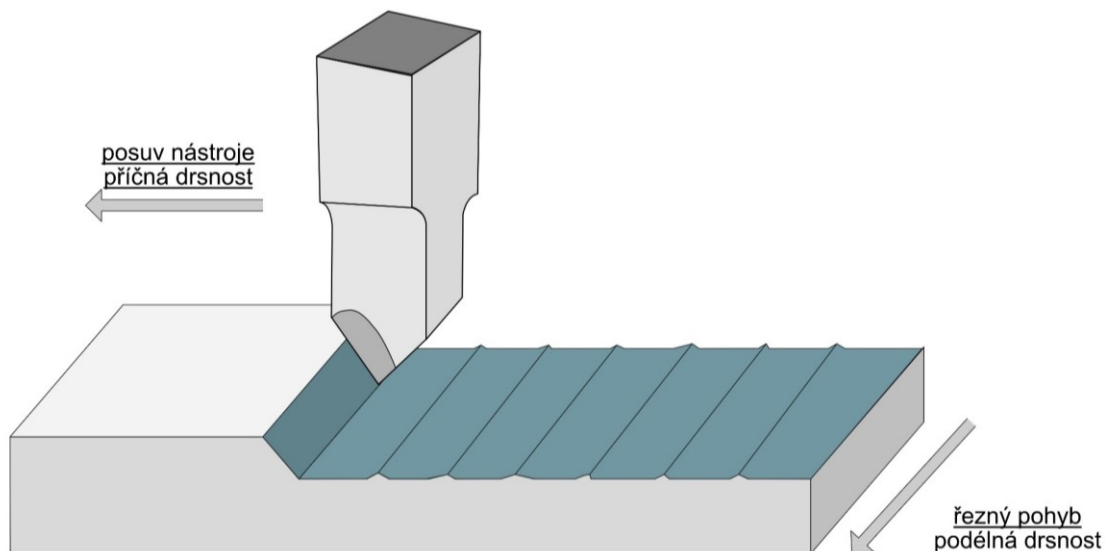
2.2 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu je možné charakterizovat jako souhrn odchylek vyskytujících se na malé vzdálenosti. Tyto odchylky jsou způsobeny vlivem opracování dané plochy, a to jako hrubovacími tak dokončovacími operacemi. Pro vyhodnocení drsnosti povrchu není možné počítat vady jako jsou ojedinělé rýhy, trhliny, nebo důlky, které jsou způsobeny vadou materiálu, poškrábáním, nebo jiným poškozením. V takovém případě by došlo k ovlivnění výsledků měření.

Faktory ovlivňující drsnost povrchu:

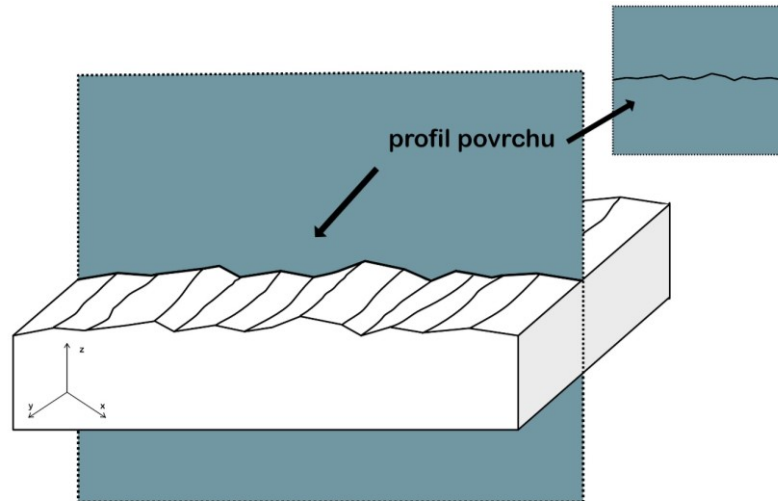
- Zvolená technologie obrábění
- Velikost posuvů
- Prostředí
- Nástrojem a jeho geometrií
- Materiál obráběné plochy
- Řezná rychlost

Dále je drsnost povrchu hodnocena v závislosti na převládajícím směru nerovností, a to v příčném, nebo podélném směru. [12] [17]



Obrázek 13 parametry pro posuzování povrchu [18]

Problematika získávání dat drsnosti povrchu je nejčastěji řešena tzv. profilovou metodou, při které je využita rovina zasazená kolmo k ploše. Do této roviny je následně promítnut profil, který je využíván jako zdroj informací pro hodnocení drsnosti povrchu.

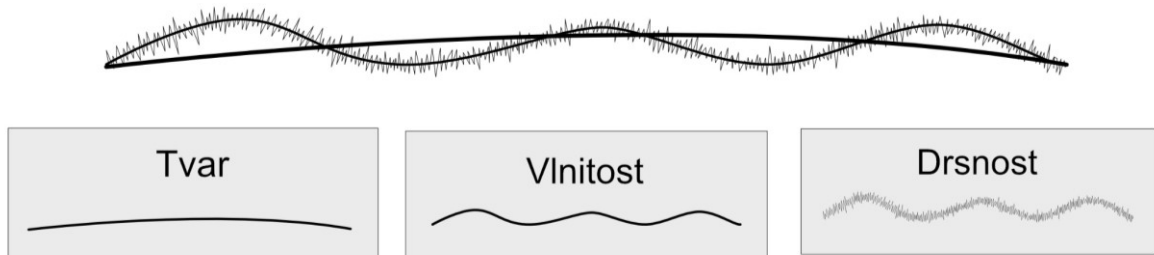


Obrázek 14 profil povrchu [14]

2.3 Parametry profilů povrchu

Popis a definice profilové metody a geometrických parametrů je zahrnuta v normě ČSN EN 4287.

Jedny z definic, které jsou v této normě uvedeny se zaměřují na základní profil, vlnitost a drsnost povrchu. Jedná se o parametry jejichž hranice jsou rozlišovány pomocí velikostí vlnových délek.



Obrázek 15 charakter textury povrchu [15]

Základní profil má největší vlnovou délku. Jedná se o úmyslně vytvořený tvar dle výkresové dokumentace, u kterého je hodnocena odchylka od ideálního geometrického tvaru.

Příčin těchto odchylek je velké množství a patří zde například odchylky způsobené:

Nástrojem

- Posuv
- Opotřebení
- Geometrie

Obrobkem

- Uvolnění zbytkových napětí
- Nedostatečná homogenita materiálu

Strojem

- Nepřesnost chodu, pružné deformace
- Vibrace

Prostředím

- Změna okolní teploty
- Vibrace a chvění způsobené provozem na dílně

Jedná-li se o vlnitost povrchu tak mluvíme o souhrnu periodicky či neperiodicky se opakujících nerovností (výstupků a prohlubní), jejichž vlnová délka se nachází mezi vlnovými délkami tvaru a drsnosti. Důvodem vzniku těchto nepřesností může být přisuzována tvarové úchylce brousícího vřeteníku kotouče, jeho tvarem, pracovními pohyby obrobku, nebo chvěním způsobeným například při použití vysokých otáček. [16]

Dalšími parametry, kterými se norma ČSN EN ISO 4287 zabývá jsou:

- **P-parametr**, který je počítán ze základního profilu v rozmezí délky l_n
- **W-parametr**, který je počítán z profilu vlnitosti a bude roven vzdálenosti mezi nejhlubším a nejvyšším bodem v rozsahu vyhodnocované délky l_n .
- **R-parametr**, který vyjadřuje svislou vzdálenost od nejhlubšího bodu k nejvyššímu bodu z již vyfiltrovaného profilu drsnosti na základní délce l_n . [14]

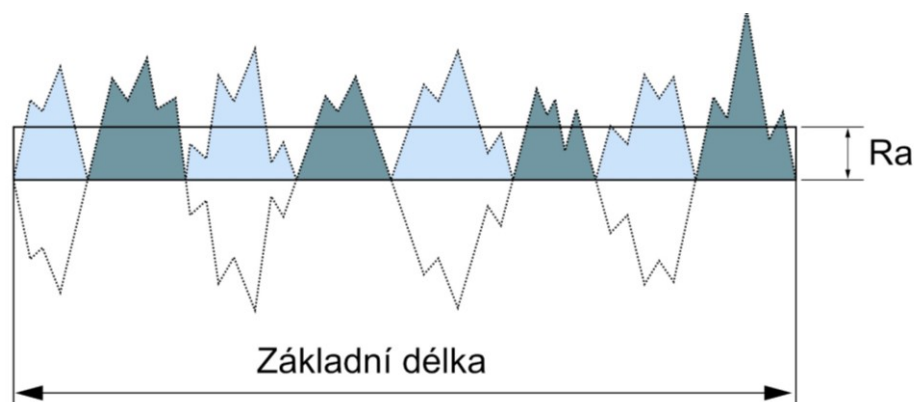
2.3.1 Základní výškové parametry

Jedná se o parametry, které jsou zkoumány ve vertikálním směru. Tedy určují velikosti vrcholů, nebo prohlubní, případně jejich kombinace bez ohledu na rozteč. Mezi nejvýznamnější parametry jsou řazeny parametry R_a a R_z . [14]

Střední aritmetická úchylka profilu R_a

Tento výškový parametr je jedním z nejvyžívanějších parametrů, se kterým se můžeme v praxi setkat. V současné době jsou ale řešeny i jeho nedostatky, mezi které spadá kupříkladu zprůměrování výstupků a prohlubní díky čemuž není schopen podat informace vychýlených hodnotách, a proto je doplňován i ostatními parametry pro objektivnější hodnocení kvality povrchu. [14]

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

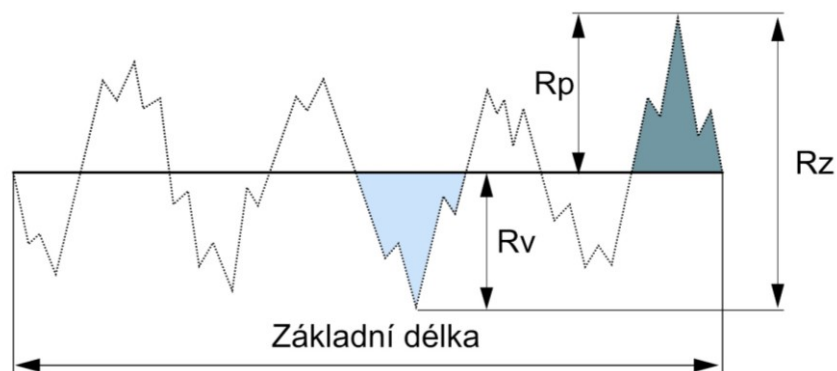


Obrázek 16 R_a parametr [19]

Největší výška profilu Rz

Jedná se o parametr, který je schopen podat informace o vychýlených hodnotách, a tak doplňovat funkci Ra parametru. Udává součet největšího výstupku R_p a největší prohlubně R_v v rozmezí základní délky.

$$R_z = R_p + R_v \quad 2)$$



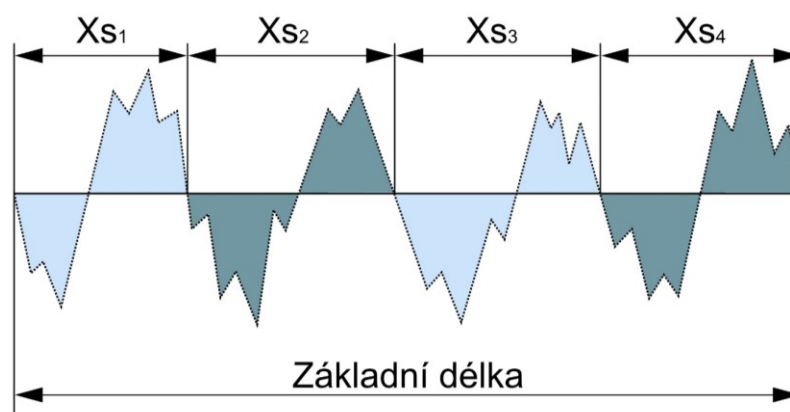
Obrázek 17 Rz parametr [19]

2.3.2 Základní délkové parametry

Průměrná vzdálenost prvků profilu Rsm

Jedná se o parametr znázorňující průměrnou šířku prvku profilu. Jako prvkový element je bráno prohloubení se sousedním vyvýšením profilu.

$$R_{sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{si} \quad 3)$$



Obrázek 18 Rsm parametr [19]

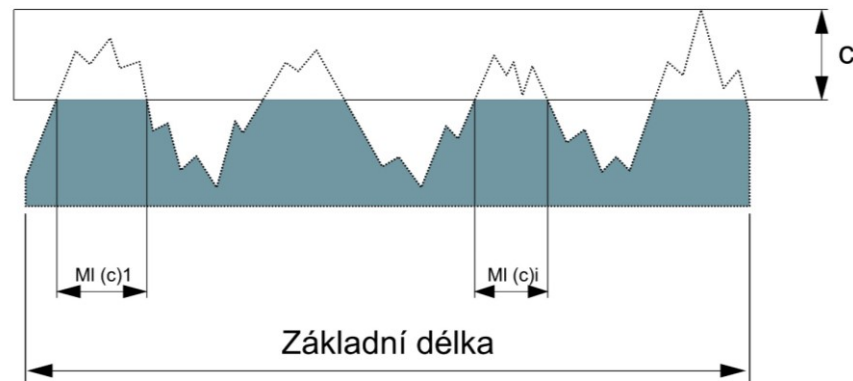
2.3.3 Základní hybridní parametr

Jedná se o parametr, který je dán kombinací amplitudy a rozteče. [14]

Materiálový poměr profilu Rmr

Jedná se o parametr, který určuje procento materiálu nacházející se v hloubce c v závislosti na základní délce l_n . [14]

$$R_{mr}(c) = \frac{1}{l_n} \sum_{i=1}^m ML(c)_i \quad 4)$$



Obrázek 19 Rmr parametr [20]

2.4 Metody měření drsnosti povrchu

V současné době je již vyvinuto velké množství metod, kterými je možné snímat povrch a jeho kvalitu. Tyto metody jsou založeny na odlišných principech. Základní rozdělení těchto metod je rozdělení na přístroje kontaktní, využívající dotykovou metodu a bezkontaktní.

2.4.1 Kontaktní metody snímání povrchu

Kontaktní způsob měření pro svoji funkci využívá hrotu, jehož průměr se liší v závislosti na měřeném materiálu. Hrot je v přímém kontaktu s měřeným povrchem a posouvá se ve zvoleném směru čímž snímá informace o daném profilu. Za pomoci této metody je možné získat nenormalizované i normalizované parametry drsnosti a využít je pro následné statistické zhodnocení. Kontaktní snímání lze dále dělit na absolutní a relativní snímání povrchu.

Jedny z nejdůležitějších faktorů ovlivňující měření a jeho výsledky jsou:

- Snímací hrot a příslušný poloměr zaoblení
- Přítlačná síla využitá v průběhu měření a její rychlost změny
- Vrcholový úhel příslušící snímacímu hrotu [12]

2.4.2 Bezkontaktní metody snímání povrchu

Jedná se o metody, kterým je v dnešní době věnována větší pozornost především z toho důvodu, že rostou požadavky na kvalitu při vývoji i výrobě, a to především v oblastech nanotechnologií, nebo elektronice. Především se jedná o přístroje, které nalezneme ve vědeckých laboratořích, převážně kvůli jejich vysokým pořizovacím cenám.

Bezkontaktní přístroje pro snímání povrchu využívají CLA snímače, nebo snímače laserové. Tyto paprsky postupně skenují povrch, kde ke každému bodu je následně připojena prostorová poloha. Zpracování dat následně probíhá počítačově díky příslušným softwarům umožňujícím zpracování dat i 3D vizualizaci. [12]

Taylor Hobson

Jedná se o významného výrobce měřících přístrojů. Společnost Taylor Hobson Ltd. se pyšní již dlouholetou tradicí, která zasahuje nejen do výroby systémů a strojů, které slouží pro zpracování dat, ale také se zaměřuje na normalizaci metod měření, nebo zpracování výsledků a jejich vyhodnocení.

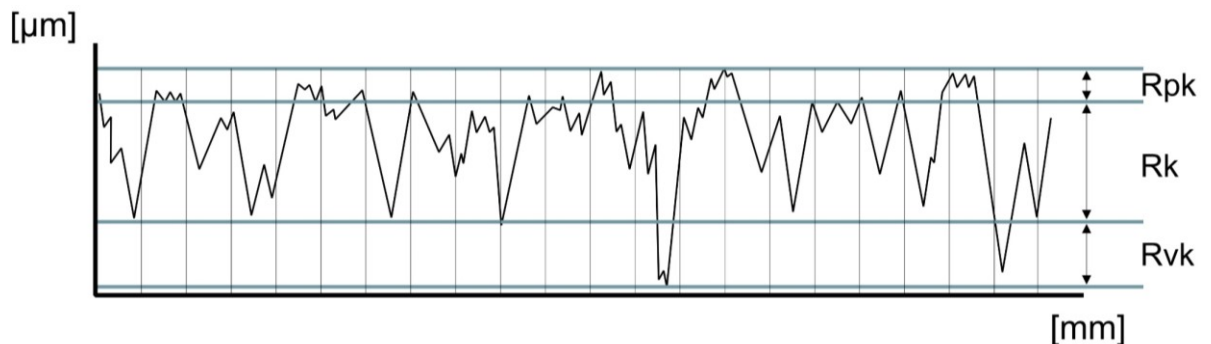
Jedním z jeho přístrojů pro měření a zkoumání drsnosti povrchu je Talysurf CLI, který disponuje vysokými měřícími rychlostmi, ale také vysokou přesností měření. Měření probíhá ve třech osách a umožňuje využití kontaktního i bezkontaktního principu snímání. [21]

3 ABBOT FIRESTONOVA KŘIVKA

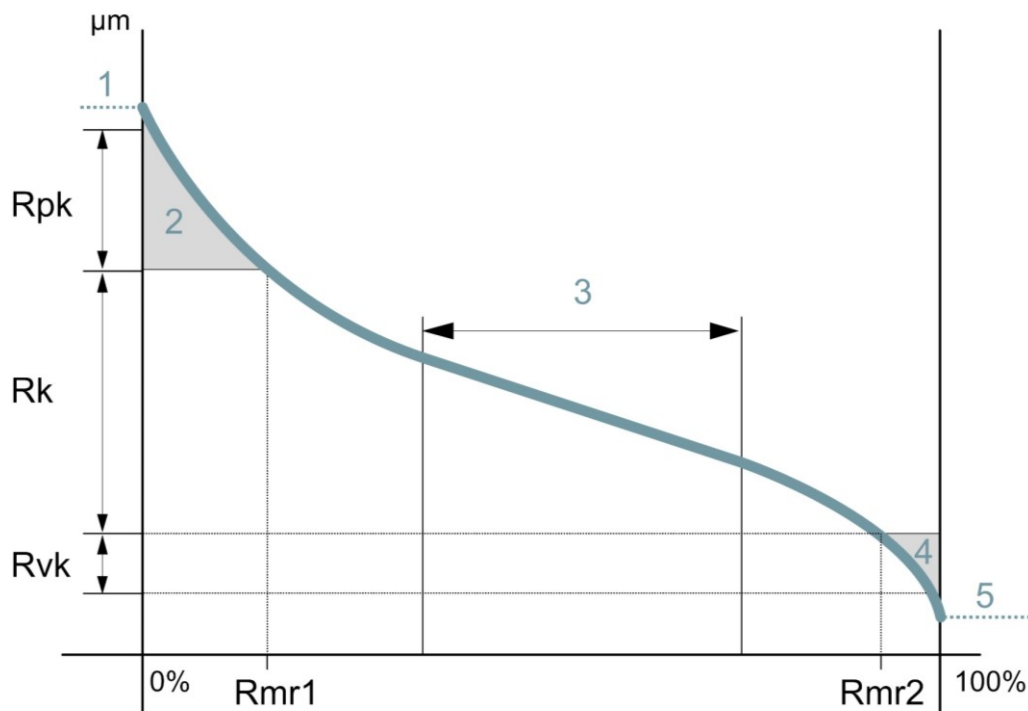
Abbot-Firestonova křivka je jednou z velice důležitých metod charakterizace povrchu součásti především tam, kde je potřeba zavést specifické vlastnosti, které souvisejí s integritou povrchu a funkčními požadavky. Příkladem těchto povrchů mohou být kupříkladu vnitřní stěny spalovacích motorů. Jedná se o povrchy, které vyžadují speciální charakteristiky rozložení vrcholků a prohlubní. Právě tyto vlastnosti povrchu jsou špatně rozeznatelné za pomoci běžných amplitudových parametrů drsnosti jako Ra, nebo Rz. V důsledku vývoje přesnějšího popisu byly výškové charakteristiky doplněny o tvarové charakteristiky.

Jedná se velice užitečnou metodu kupříkladu pro výpočty opotřebení, které povrch utrpěl. Je možné ji aplikovat na vnitřní stěny válců ve spalovacích motorech, v hydraulických válcích, nebo při zjištění životnosti součásti při určitém zatížení po různých povrchových úpravách.

Jedná se tedy o křivku, která slouží k vyhodnocování parametrů Rk, Rpk, Rvk, Rmr1 a Rmr 2. [22] [23]



Obrázek 20 Profil drsnosti, ze kterého vychází Abbot-Firestonova křivka [23]



Obrázek 21 Abbot Firestonova křivka [23]

Obrázek výše zobrazuje Abbot Firestonovu křivku, kde:

Oblast č.1 -definuje maximální výšku píku měřeného profilu.

Oblast č.2 -ukazuje pole s redukovanou výškou vrcholku, tedy záběh daného povrchu, kde opotřebení bude probíhat rychleji.

Oblast č. 3 -zobrazuje pole s minimálním sklonem, tedy oblast pracovní činnosti (životnosti) daného výrobku, kterou v běžné praxi vyžadujeme co největší.

Oblast č.4 -zobrazuje pole se sníženou hloubkou prohlubně, tedy doběh a konec životnosti daného povrchu.

Oblast č.5 -upozorňuje na minimální hloubku měřeného profilu.

Na ose x je uvedeny materiálové poměry zobrazující Procento materiálu pro záběh (Rmr1) a procento materiálu při skončení životnosti (Rmr2) [23]

4 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ DAT

V podstatě všechny firmy a společnosti využívají několik klíčových ukazatelů, které využívají k posuzování celkové výkonnosti a chodu firmy, nebo výrobního procesu. Jedním z primárních ukazatelů je právě statistická analýza dat.

Statistická analýza dat je často využívána ke kontrole a optimalizaci výrobního procesu, nebo také k predikci budoucích výsledků.

Téměř v každé situaci, kdy jsou k dispozici kvalitativní a kvantitativní data je možné využít statistickou analýzu dat pro získání hodnot a výsledků datového souboru. Je možné ji provádět ručně, nebo v dnešní době jsou nejčastěji využívány softwary, se kterými jsme schopni zajistit maximální množství informací, které nám budou dále napomáhat s řízením procesu, nebo celé firmy. [23]

4.1 Základní typy dat

Data lze popsat jako skupinu shromážděných a nezpracovaných informací, které jsou určeny pro výzkum, nebo analýzu. Pro správnou analýzu dat je důležitá znalost typu dat, se kterými pracujeme. Podle typu dat je následně možné rozhodnout o způsobu zpracování a vyhodnocení tak, aby závěr byl smysluplný a vypovídající.

V praxi rozlišujeme dva základní typy dat, a to kvantitativní a kvalitativní. [25] [26]

4.1.1 Kvantitativní data

Jedná se o číselné charakteristiky, které mají různé využití ve výzkumu pro jejich kompatibilitu s významným množstvím metod statistické analýzy.

Tato data dále dělíme na:

Spojité – Jedná se o data, která mohou mít jakoukoliv hodnotu v příslušném intervalu. Příkladem spojitých dat je kupříkladu úsek časového období od narození do smrti, kde se tyto hodnoty mohou objevovat v jakémkoli podobě právě v tomto intervalu.

Diskrétní – V tomto případě se jedná o data, která mohou nabývat jen určitého množství hodnot. Na číselné stupnici jsou zobrazena jako omezené body. Příkladem může být množství krav v ohradě, nebo počet členů v jedné domácnosti. [25] [26]

4.1.2 Kvalitativní data

Jedná se o data, která popisují informace. Ve statistice mohou mít omezené využití kvůli své nekompatibilitě s většinou statistických metod. Tento typ dat lze třídit do kategorií, ale není možné jej kvantifikovat. Příkladem kvalitativních dat může být barva vlasů, pohlaví, nebo přítomnost alkoholu v krvi. [25] [26]

Dále se dělí na:

Nominální (jmenná proměnná) – jedná se o typ dat, který je charakteristický nemožností třídění. Při jakémkoliv setřídění se výsledek nezmění. Příkladem nominálních proměnných mohou být barvy, nebo nevyhovující a dobré výrobky. Mezi charakteristiky nominálních dat patří absolutní četnost, relativní četnost a modus.

Ordinální proměnná – Tento typ dat je uspořadatelný podle svého charakteru. Jedná se kupříkladu o dny v týdnu, měsíce, nebo roční období, které má smysl třídit a mají své dané pořadí. Charakteristikami těchto dat je absolutní četnost, kumulativní absolutní četnost, relativní četnost, kumulativní relativní četnost a modus.

Binární proměnná – Jedná se o data, která nabývají pouze dvou hodnot. V praxi se nejčastěji vyskytují jako zakódovaná data s využitím nul a jedniček. Příkladem binárních dat jsou kupříkladu odpovědi ano/ne, souhlasím/nesouhlasím, nebo přijímám/zamítám. [25] [26]

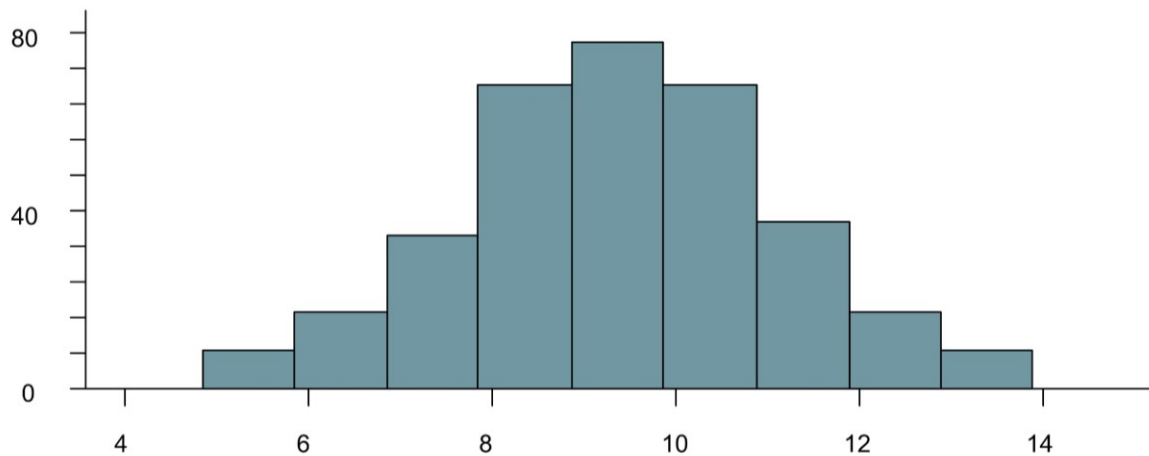
4.2 Metoda EDA (Exploratorní datová analýza)

Exploratorní analýza dat je metodou, která je využívána v oblasti zpracování a zkoumání dat, kde výstupem je shrnutí jejich hlavních charakteristik s obsáhlým využitím vizualizace dat. Jedná se o metodu, která napomáhá určit, jak s daty nejlépe manipulovat pro získání potřebných informací a odpovědí, které usnadňují rozpoznání anomálií, testování hypotéz, nebo ověření předpokladů.

Primární využití nachází metoda EDA jako nástroj pro přesnější pochopení proměnných a vztahů, které se mezi nimi nacházejí, nebo napomáhá správnému výběru statistické techniky, kterou využijeme pro analýzu dat. Pomáhá s pochopením dat před vytvořením prvotních předpokladů, nebo odhalí hrubé chyby, které se v datovém souboru nacházejí.

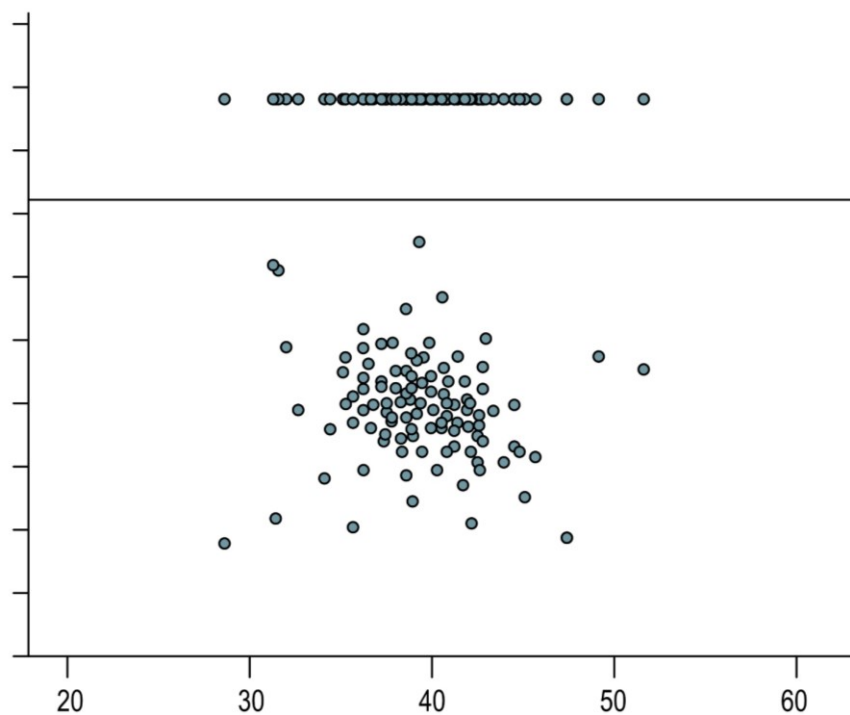
Po aplikaci Exploratorní datové analýzy budou k dispozici přehledy a její funkce mohou být dále použity pro sofistikovanější analýzu dat. [27] [28]

Histogram – Díky histogramu získáme přehled o distribuci dat. Je z něj snadno čitelná šikmost a špičatost dat, nebo zda jsou data symetrická, nebo bimodální.



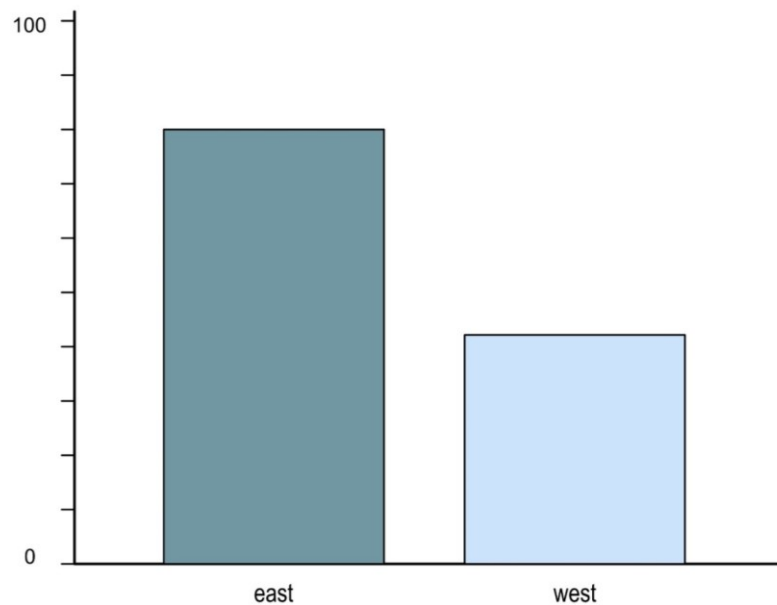
Obrázek 23 Histogram [28]

Scatter plot (diagram rozptýlení) – V případě spojitých dat se jedná o běžnou techniku vizualizace, která vykresluje každou proměnnou. Z tohoto grafu lze získat celkový přehled o výskytu dat, jejich závislosti a distribuci.



Obrázek 24 Scatterplot [28]

Barplot (sloupcový graf) – jedná se o graf, díky kterému získáme přehled o kategoriích dat a jejich změnách v průběhu času. [28]



Obrázek 25 Barplot [28]

4.3 Testování statistických hypotéz

Jedná se o metodu, která testuje věrohodnost hypotézy za pomoci vzorového datového souboru. Tato metoda pracuje na principu testování vzorku za účelem získat důkaz o věrohodnosti nulové hypotézy a nepravděpodobnosti platnosti hypotézy alternativní, která ztvárňuje opak tvrzení hypotézy nulové. Nulová hypotéza ve většině případů prezentuje tvrzení rovnosti mezi parametry. [29]

Základní postup při testování statistických hypotéz je:

- Určení nulové hypotézy H_0 a hypotézy alternativní H_a
- Zvolení hladiny významnosti α (volíme nejčastěji 0,05, nebo 0,01)
- Výpočet kritického parametru p (p -hodnota)
- Rozhodnutí o přijetí, nebo zamítnutí nulové hypotézy H_0 na základě vypočítané kritické hodnoty p [29]

Při testování statistických hypotéz se můžeme dopustit dvou chyb, jedná se o chybu prvního druhu, která vznikne zamítneme-li hypotézu, která ve skutečnosti platí, nebo se dopustíme chyby druhého druhu, přičemž přijmeme hypotézu, která ve skutečnosti neplatí. [30]

| | | Výsledek testu | |
|------------|----------|--|--|
| | | Platí H0 | Platí H1 |
| Skutečnost | Platí H0 | správné rozhodnutí pravděpodobnost $1-\alpha$ (spolehlivost testu) | Chyba I. druhu pravděpodobnost α (hladina významnosti) |
| | Platí H1 | Chyba II. druhu pravděpodobnost β | správné rozhodnutí pravděpodobnost $1-\beta$ (síla testu) |

Obrázek 26 Testování statistických hypotéz (chyba prvního a druhého druhu) [30]

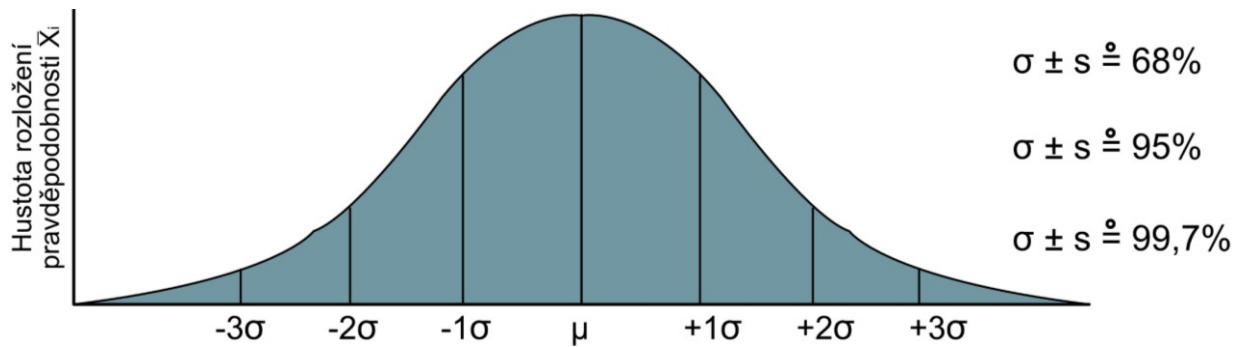
4.3.1 Testování normality dat

V případě zpracování a hodnocení dat je podstatná znalost jejich rozdělení. Ve značném množství případů se jedná o rozdělení normální. Jedním ze způsobů prověření normality dat je využití grafů pro jejich vizualizaci a přibližný odhad toho, jestli se jedná o rozdělení normální či nikoliv. Vhodným grafem pro otestování této skutečnosti je histogram. Na osu x budou naneseny pozorované veličiny a osa y bude zobrazovat jejich četnost. Normalita sledovaného souboru bude srovnávána s Gaussovou křivkou.

Pro přesnější určení normality dat je možné využít testy normality dat na principu testování hypotéz. Následně je možné konstatovat věrohodnost rozhodnutí s určitou pravděpodobností.

V případě posuzování parametrů drsnosti je uznávána podmínka normality, jestliže jsou dané parametry vypočítány z náhodného výběru.

Ověření této podmínky může být provedeno za pomoci Centrálního limitního teorému, podle kterého se bude rozdělení výběrových parametrů blížit k normálnímu rozdělení, jestliže bude provedeno mnoho náhodných výběrů, ze kterých tyto parametry získáme. V konečném důsledku se bude průměr ze zjištěných průměrů rovnat celkovému průměru datového souboru. [31]

Obrázek 27 Hustota pravděpodobnosti výskytu \bar{X}_i [31]

4.3.2 F-Testy

Jedná se o případ testování, kde ověřujeme, jestli se liší rozptyly dvou výběrových souborů pouze náhodně či nikoliv. Postup ověřování je založen na testování statistických hypotéz, kdy nulová hypotéza se přiklání k rovnosti rozptylů obou souborů a hypotéza alternativní reprezentuje tvrzení, že rozdíly rozptylů mezi daty jsou pouze náhodné. [30] [31]

4.3.3 T-Testy

T-testy využijeme budeme-li chtít ověřit, zda se průměry dvou výběrových souborů liší pouze za působení náhody, nebo liší statisticky významně. Porovnání provádíme s využitím teorie hypotéz. [30] [31]

4.3.4 Testy hrubých chyb

Obecně jsme již obeznámeni s tím, že každé měření je zatíženo chybou. Náhodné chyby není možné zcela odstranit a v běžné praxi se s nimi počítá, ale je vynakládáno úsilí k jejich redukci. Hrubé chyby, které se také mohou v datech objevovat je zapotřebí vyšetřit a v nutném případě vyřadit ze souboru, aby nedošlo k ovlivnění výsledků. Hrubé chyby totiž mají značný vliv na výslednou podobu průměru, nebo směrodatné odchylky souboru, což může značně ovlivnit další úsudky a rozhodnutí. Hrubé chyby jsou často způsobeny osobou zodpovědnou za měření a zápis hodnot, při kterém může dojít k chybnému záznamu naměřené veličiny což se následně projeví jako hrubá chyba.

V první řadě je vhodné se s daty a jejich charakterem seznámit za pomoci grafů, které nám prozradí možný výskyt odlehlých hodnot, na které je potřeba se zaměřit.

Pro odhalení hrubých chyb v datovém souboru je možné využít Grubbsův test odlehlých hodnot, který za pomoci teorie hypotéz ověří, zdali se nejmenší či největší hodnota liší od průměru pouze náhodně či nikoliv. [32]

5 MIKROTVRDOST

Tvrдость materiálu může být obecně definována jako odolnost materiálu proti plastické deformaci, nebo odolnost proti vnikání jiného tělesa. S rostoucí tvrdostí roste i odolnost materiálu proti ohnutí, zlomení, nebo změně tvaru. Tento parametr také může odkazovat na odolnost proti oděru, nebo řezání. Jedná se o velice významný parametr, se kterým se můžeme v praxi často setkávat.

Výhoda měření tvrdosti materiálu je, že měření je jednoduché, relativně snadno opakovatelné a často lze provádět přímo na výrobcích, nebo zkušebních tělískách, které byly vyrobeny pro účely jiné zkoušky.

Pro měření mikrotvrđosti materiálů se od běžného měření tvrdosti liší pouze silami použitými pro měření, dál je způsob měření stejný jako při určování tvrdosti materiálu.

Pro měření mikrotvrđosti používány přístroje využívající malých indentorů a sil, které se pohybují v rozsahu od jednoho gramu (0,09807 N) až do jednoho tisíce gramů (9,807 N). V závislosti na snižování zatěžující síly se mění i velikost vtisku což má negativní vliv i na přesnost měření. [35] [36]

Využití mikrotvrđosti je díky malým výsledným vtiskům vhodné pro:

- Součásti, které se vyznačují malými rozměry, nebo šířkou. Může se jednat o folie, nebo dráty, kde není možné provádět testování běžným způsobem
- Materiály, které jsou křehké
- Výzkum tvrdosti ve svaru
- Povrchové vrstvy vzniklé tepelným, chemicko-tepelným, nebo jiným zpracováním
- Prověření odhlašujících procesů v povrchové vrstvě
- Měření malých ploch
- Měření na ohraji zkoumané plochy

Pro měření mikrotvrđosti využíváme dva základní způsoby, a to měření dle Vickerse a Knoop. [35] [36]

5.1 Mikrotvrдость dle Vickerse

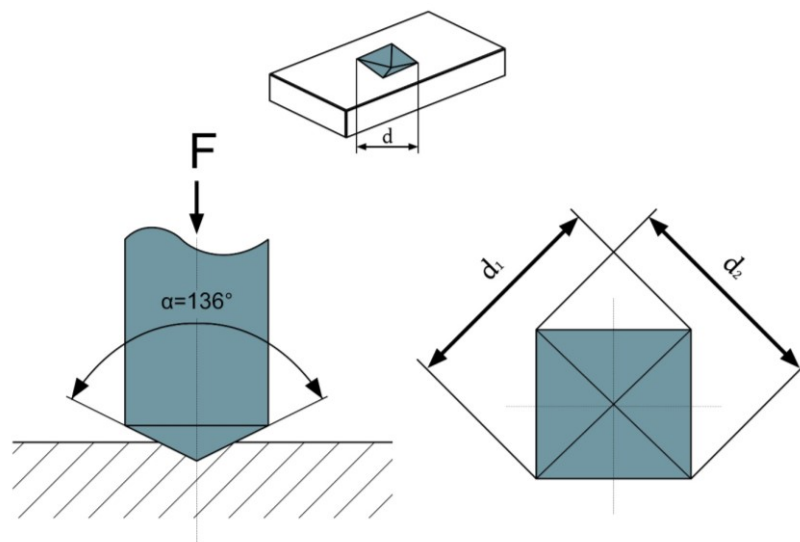
Zkouška mikrotvrđosti dle Vickerse se řídí podle normy ČSN EN ISO 6507-1. Je zde popsáno měření pro různé rozsahy zkušebního zatížení pro kovové materiály, tvrdokovy a slinuté karbidy. Jeden z těchto rozsahů popisuje zkoušku mikrotvrđosti dle Vickerse v rozmezí zatěžujících sil od 0,09807 N do 1,961 N. [35]

Podstata zkoušky je založena na vnikání indentoru ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu o přesně daném vrcholovém úhlu do povrchu testovaného tělesa. Úhel mezi protilehlými stěnami indentoru činí 136°. Jakmile je indentor vtačen do povrchové vrstvy požadovanou silou vznikne po odlehčení jehlanu na povrchu vryp, u kterého je následně změřena hloubka vrypu. Dále je s klesající silou, využívající se při měření mikrotvrđosti, již není Vickersova tvrđost nezávislá na hodnotě použité zatěžující síly. [34] [35]

Vzhledem k malým rozměrům vtisku je metoda náchylná na stav povrchu, u kterého je potřeba aby byl hladký rovný a bez nečistot stejně jako u Knopovy metody. [35]

5.1.1 Označení a výpočet tvrđosti dle Vickerse

Následné vyhodnocení tvrđosti dle Vickerse je vyjádřeno jako poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku.

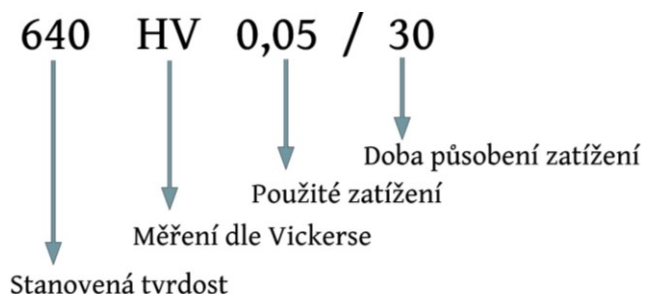


Mikrotvrđost dle Vickerse

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2}$$

Obrázek 28 Zkouška dle Vickerse [35]

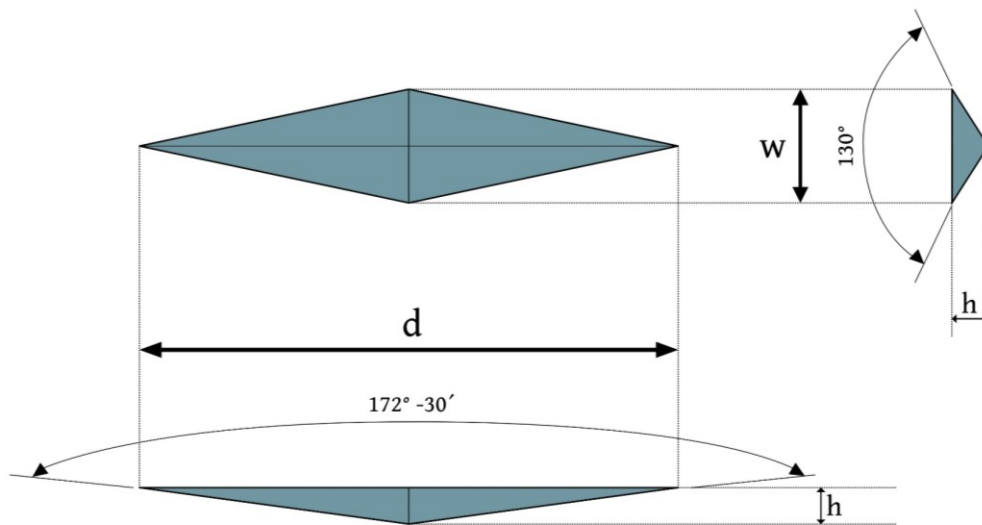
Naměřená tvrdost dle Vickerse je běžně označována zkratkou HV. Po téhle zkratce následuje číslice, která označuje velikost působícího zatížení a dobu v sekundách, po kterou jsme na plochu danou silou působily. Tato doba se ovšem uvádí pouze v případě, jestliže se liší od předepsané doby v rozmezí od deseti do patnácti sekund. [34]



Obrázek 29 Příklad značení tvrdosti dle Vickerse [33]

Tabulka 1 Zkušební zatížení pro měření mikrotvrdosti dle Vickerse [35]

| Zkouška mikrotvrdosti | |
|-----------------------|---|
| Symbol mikrotvrdosti | Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N] |
| HV 0,01 | 0,09807 |
| HV 0,015 | 0,1471 |
| HV 0,02 | 0,1961 |
| HV 0,025 | 0,2942 |
| HV 0,05 | 0,4903 |
| HV 0,1 | 0,9807 |

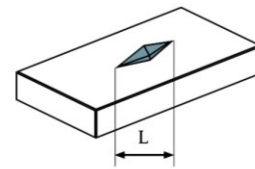


Mikrotvrdość dle Knoopa

$$HV = 0,102 \cdot \frac{F}{d^2 \cdot c} = 0,102 \cdot \frac{F}{d^2 \cdot 0,07028} = 1,451 \cdot \frac{F}{d^2}$$

Konstanta vnikacího tělesa

$$c = \frac{\tan 130^\circ/2}{2 \tan 172^\circ - 30'/2} = 0,07028$$



Obrázek 31 Mikrotvrdość dle Knoopa [35]

Pro následné značení je využíván symbol HK za kterým nalezneme hodnotu zatížení, které bylo použito a dobu, po kterou jsme na povrch indentorem působili. Doba působení zatížení je uvedena pouze v případě, jestliže se liší od hodnoty 10-15 s. [35] [36]

Tabulka 2 Zkušební zatížení pro měření tvrdosti dle Knoopa [35]

| Zkouška tvrdosti dle Knoopa | |
|-----------------------------|---|
| Symbol tvrdosti | Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N] |
| HK 0,01 | 0,09807 |
| HK 0,02 | 0,1961 |
| HK 0,025 | 0,2452 |
| HK 0,05 | 0,4903 |
| HK 0,1 | 0,9807 |
| HK 0,2 | 1,961 |
| HK 0,3 | 2,942 |
| HK 0,5 | 4,903 |
| HK 1 | 9,807 |

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je statistické zhodnocení opotřebení brzdných kotoučů. Jedná se o zhodnocení a porovnání povrchů kotoučů, které byly využívány s novými kotouči a následné porovnání celkového opotřebení těchto dvou typů kotoučů z hlediska běžného uživatele.

V první řadě se bude jednat o měření drsnosti povrchů jednotlivých kotoučů. Hlavní cíle pro takto získaná data jsou:

- základní seznámení s daty za pomoci metody EDA (Exploratorní Datová Analýza)
- vyšetření na výskyt odlehlých hodnot za pomoci Grubsova testu odlehlých hodnot.
- Ověření normality dat
- F-testy (test rozptylů) a T-testy (test aritmetických průmětů)
- porovnání parametrů drsnosti povrchu Ra, Rz, Rp
- zhodnocení průběhu Abbot-Firestonovy křivky pro jednotlivé plochy brzdových kotoučů.

Následně bude zhodnocen vliv vysokých teplot, kterými mohou být kotouče zatěžovány, na jejich výslednou tvrdost povrchu. Vzhledem ke skutečnosti, že povrch může být ovlivněn pouze do malé hloubky bude měřena mikrotvrdost povrchové vrstvy.

V posledním kroku bude u kotoučů proměřeno množství úbytku materiálu na funkčních plochách, ke kterému dochází při tření brzdových destiček s kotoučem.

7 ZKOUMANÉ VZORKY

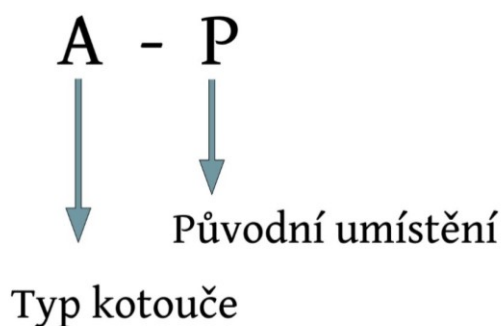
Pro vypracování teoretické části této diplomové práce byly využity 2 vzorky (brzdové kotouče kol). Kde u každého vzorku byly zkoumány charakteristiky ojetého předního a zadního kotouče a zcela nový kotouč byl využit jako srovnávací.

Ojeté kotouče byly voleny podle počtu najetých kilometrů a stylu jízdy tak aby bylo možné tyto kotouče porovnávat. Dalším faktorem bylo zjištění preference předního, nebo zadního kotouče jako dominantního při brždění.

U všech ojetých vzorků byly používány kovové brzdové destičky, které jsou ve srovnání s pryskyřicovými účinnější, ale také hlučnější.

7.1 Značení

Pro jednoduché a rychlé rozpoznání zkušebních vzorků bylo využito značení, které je zobrazeno a popsáno níže.



| Typ vzorku: A, B |
|--|
| Původní umístění: P - přední ojetý kotouč Z - zadní ojetý kotouč N - nový srovnávací kotouč |

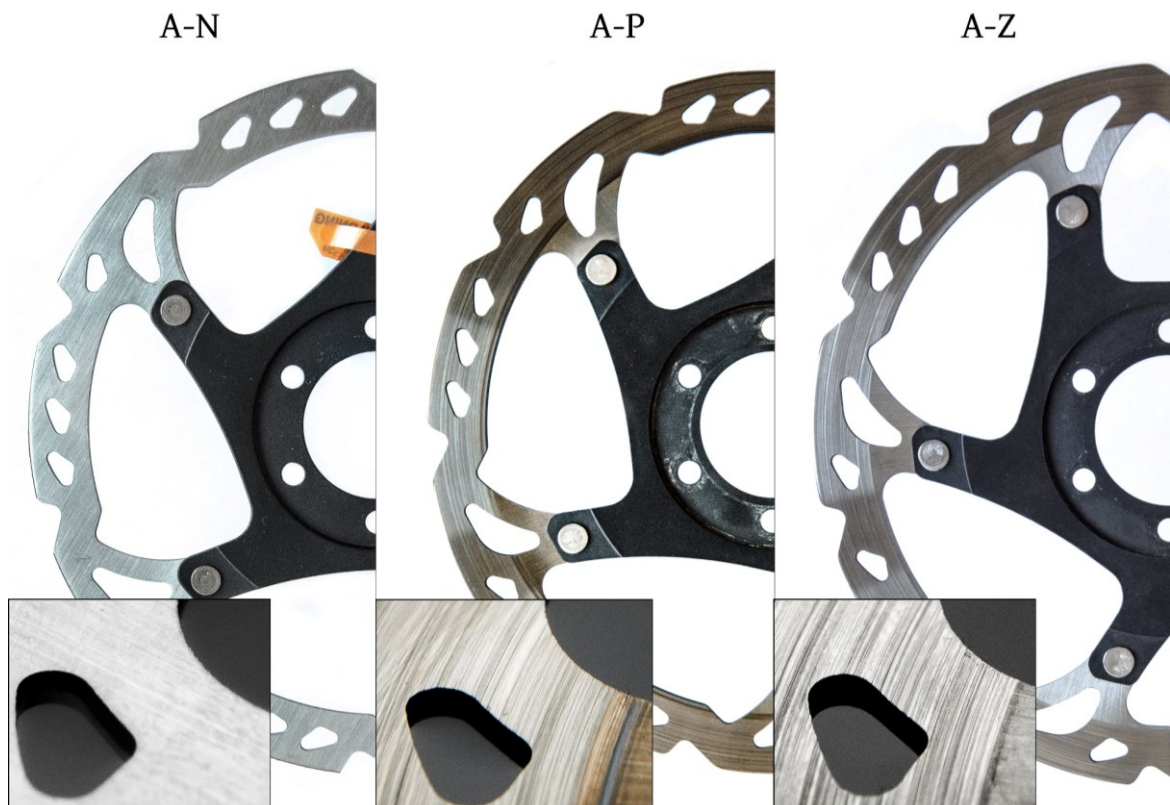
Obrázek 32 Značení vzorků

7.2 Popis

7.2.1 Vzorčky typu A

Jedná se o brzdové kotouče o průměru 160 mm s dvoudílným složením. Střed kotouče, který je vyroben hliníku zajišťuje efektivnější chlazení, zlepšuje tuhost a snižuje hmotnost kotouče.

Vnější část kotouče byla vyrobena technologií stříhání ocelových pásů. Tato technologie byla pravděpodobně volena v důsledku vysokých šarží daného produktu a zajistila rychlejší výrobu.



Obrázek 33 Vzorčky typu A

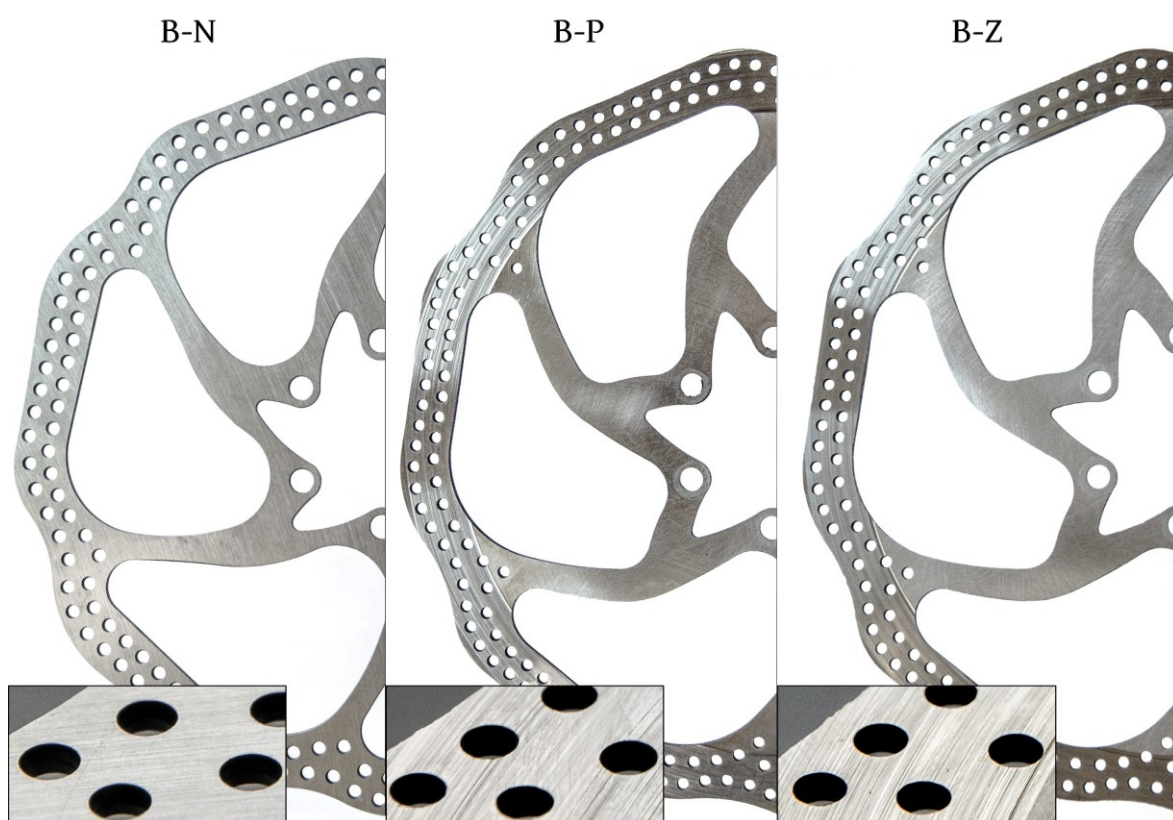
Tabulka 3 Parametry pro vzorky typu A

| A | |
|------------|-----------------------|
| Najeto | 1000 km |
| Styl jízdy | Mírný |
| Využití | Převážně zadní kotouč |

7.2.2 Vzorčky typu B

Tyto vzorčky jsou vyrobeny klasicky pouze z jednoho materiálu. Rozměry kotoučů jsou 180 mm. Právě tyto rozměry kotouč činí vhodnější pro použití do náročnějšího terénu, kde je potřeba lepší účinnost brždění, nebo pro těžší elektrokola. Právě v těchto případech jsou kotouče více namáhány a volbou kotouče s větším průměrem také předcházíme přehřívání kotouče a tím i snížení jeho brzdných vlastností.

Pro výrobu daných kotoučů byly využity aditivní technologie řezání materiálů. Tento princip výroby je volen při výrobě menších sérií.



Obrázek 34 Vzorčky typu B

Tabulka 4 Parametry pro vzorčky typu B

| B | |
|------------|-----------------------|
| Najeto | 1000 km |
| Styl jízdy | Mírný |
| Využití | Převážně zadní kotouč |

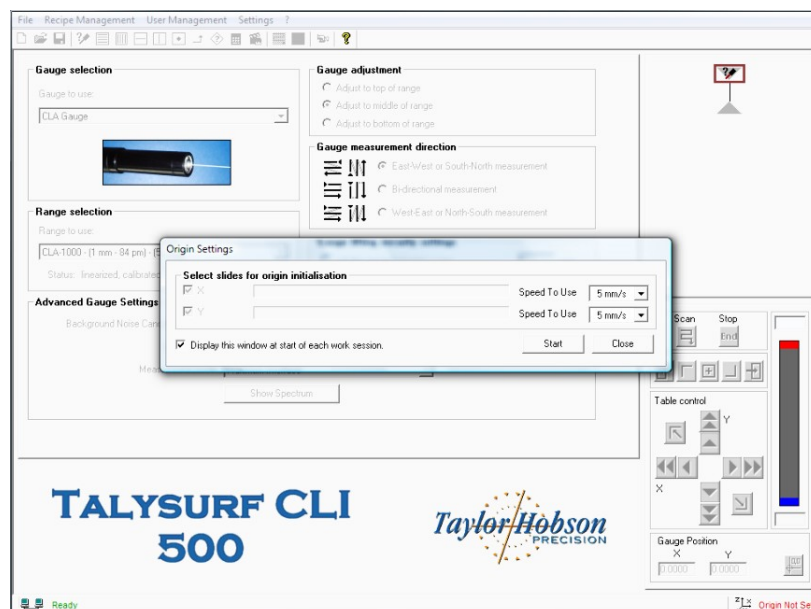
8 MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU

Měření drsnosti povrchu brzdných ploch kotoučů bylo provedeno na přístroji Taylor Hobson Talysurf CLI 500. Jedná se o bezdotykový způsob měření s využitím CLA snímače s vysokou přesností a velkým rozsahem.

8.1 Postup měření

Před samotným měřením musely být vzorky náležitě nachystány. Bylo potřeba zbavit vzorky povrchových nečistot, aby nedošlo k ovlivnění výsledků měření.

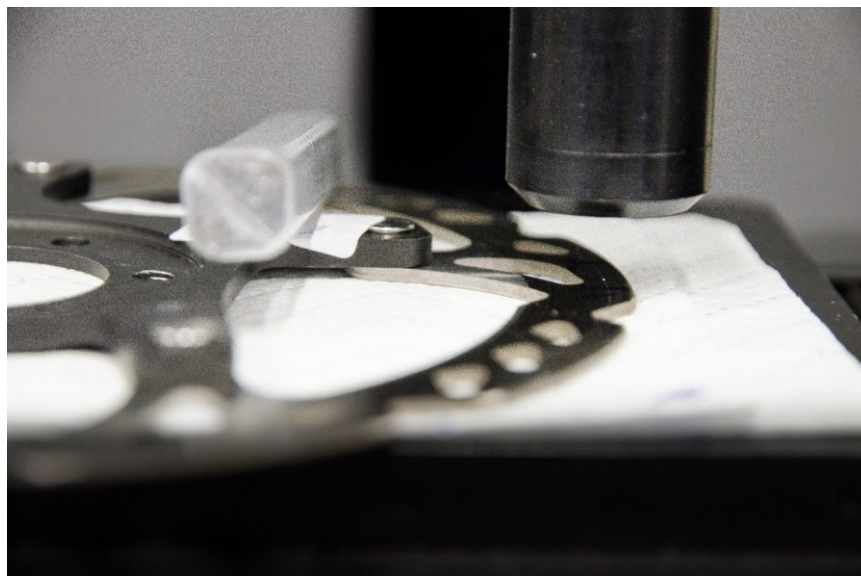
Po spuštění přístroje Talysurf CLI 500 a příslušného ovládacího programu bylo za potřeby přístroj zkalibrovat. Po zadání příkazu je kalibrace provedena automaticky.



Obrázek 35 Kalibrace přístroje

Po kalibraci zařízení byl na pohyblivou podložku umístěn vzorek tak, aby snímaná plocha byla kolmo k ose čočky.

Následně byl nastaven počátek snímání za pomoci pohyblivé desky a orientačního ostříciho bodu na měřené ploše.



Obrázek 36 Ostřící bod na snímané ploše

Dále byla nastavena odrazivost, která by neměla klesnout pod 40 %. Nastavení odrazivosti je možné kontrolovat na informačním displeji v dolní části přístroje, na ukazateli odrazivosti ve střední části přístroje, nebo na monitoru počítače.



Obrázek 37 Přístroj Talysurf CLI s nastavenou odrazivostí

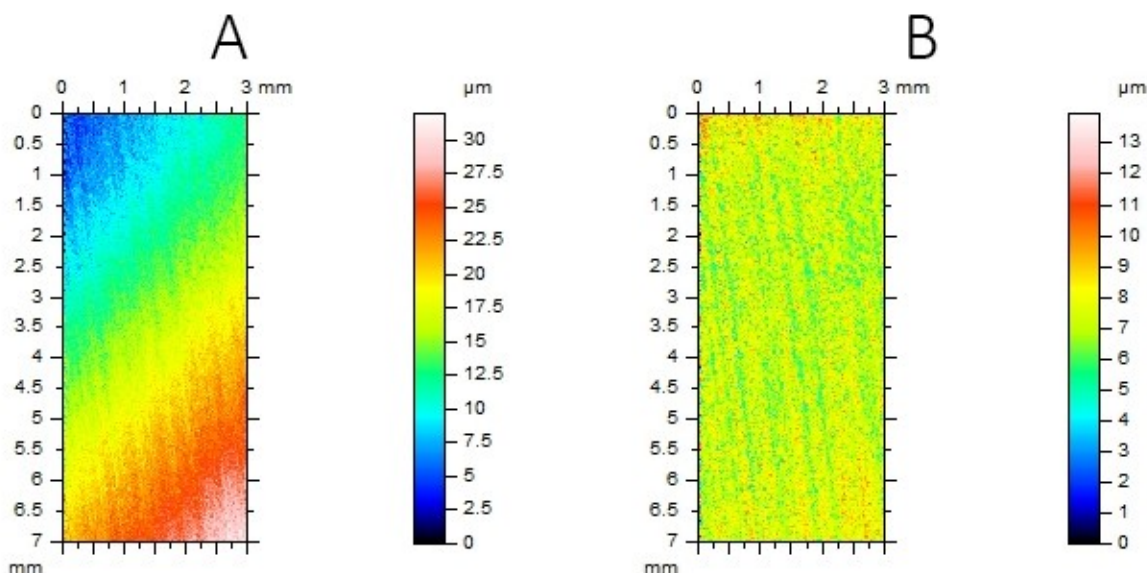
Obrázek 38

Následně byla určena plocha měření, která se měnila s každým typem kotouče podle prostorových možností. Vždy s ohledem na tvar a uspořádání kotouče byl zvolen prostor na brzdě části, kde bylo možné nasnímat co největší plochu. Ostatní parametry snímání již zůstaly stejné pro všechny typy kotoučů.

8.2 Zpracování získaných dat.

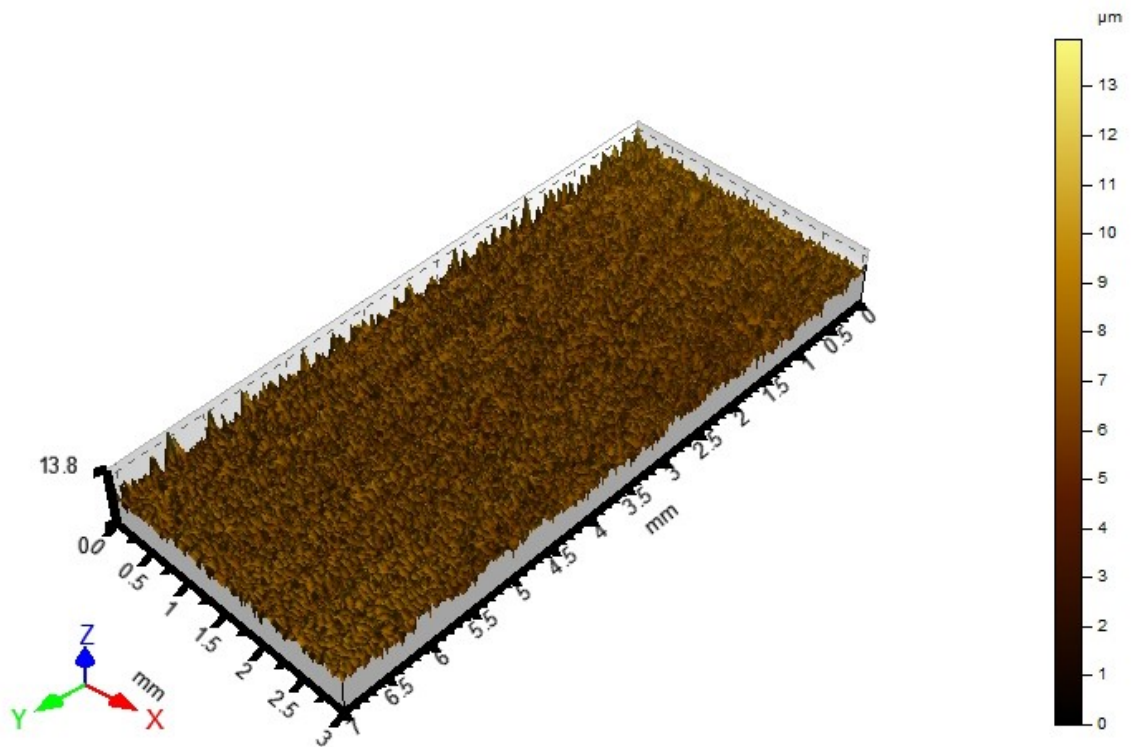
Po naměření daných ploch bylo možné začít se zpracováním získaných dat s pomocí programu Talymap. Postup zpracování je znázorněn na vzorku B_N.

Po dokončení měření získáme obraz znázorňující vlnitost dané plochy. Pro získání drsnosti povrchu bylo zapotřebí vyfiltrovat delší vlnové délky.



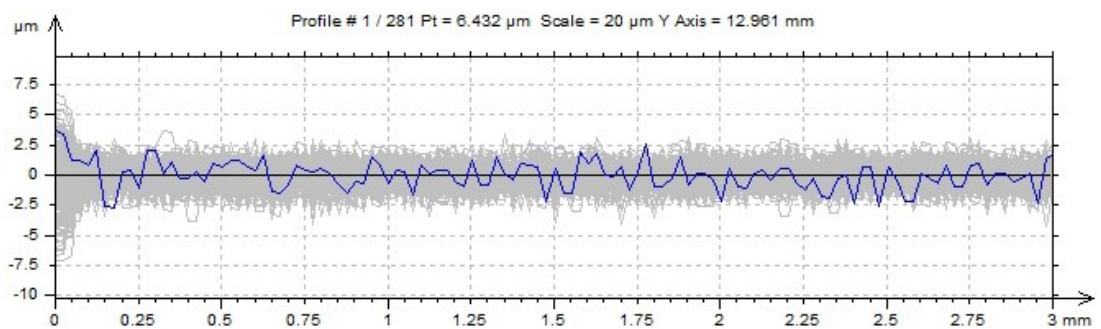
Obrázek 39 A) vlnitost plochy ve 2D B) drsnost plochy ve 2D po provedené filtraci

Díky této filtraci získáme drsnost měřené plochy ve 2D zobrazení, která je následně využita pro zobrazení plochy ve 3D. Následně byly daným simulacím povrchu přiděleny měřítka, osy a stupnice.



Obrázek 40 Drsnost plochy ve 3D

Z takto vyfiltrované plochy byl získán profil drsnosti povrchu ve směru kolmém na směr opotřebení kotouče.



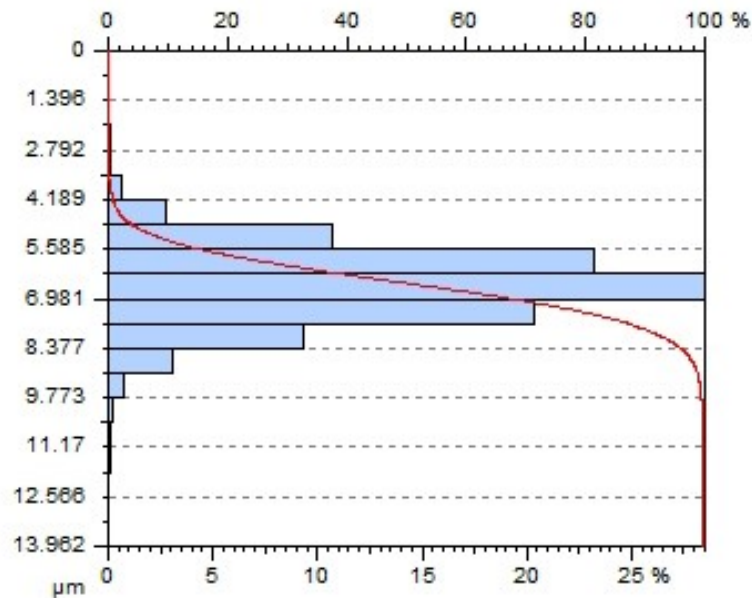
Obrázek 41 Průměrný profil povrchu pro měřenou plochu

Na výše obrázku jsou viditelné jednotlivé profily snímané plochy s modře zvýrazněným průměrným profilem daného povrchu.

Z takto připraveného profilu byly následně získány potřebné parametry, které byly využity pro další vyhodnocení. Mezi tyto parametry patří R_a , R_z , R_v , nebo R_p . Vzhledem ke

způsobu zobrazení dat programem Talymap byla data uložena v běžném textovém editoru a následně převedena do programu Minitab.

Dále byla vytvořena Abbot-Firestovova křivka, která zobrazuje opotřebení daného kotouče.



Obrázek 42 Abbot-Firestonova křivka

8.3 Statistické vyhodnocení výsledků

Pro zpracování naměřených hodnot byl využit program Minitab17. Při vyhodnocení byl kladen důraz na porovnání parametrů povrchu opotřebovaných a nepoužitých ploch pro všechny tři typy brzdných kotoučů.

Získaná data byla převedena do programu Minitab17, kde bylo potřeba převedení desetinné tečky za desetinnou čárku.

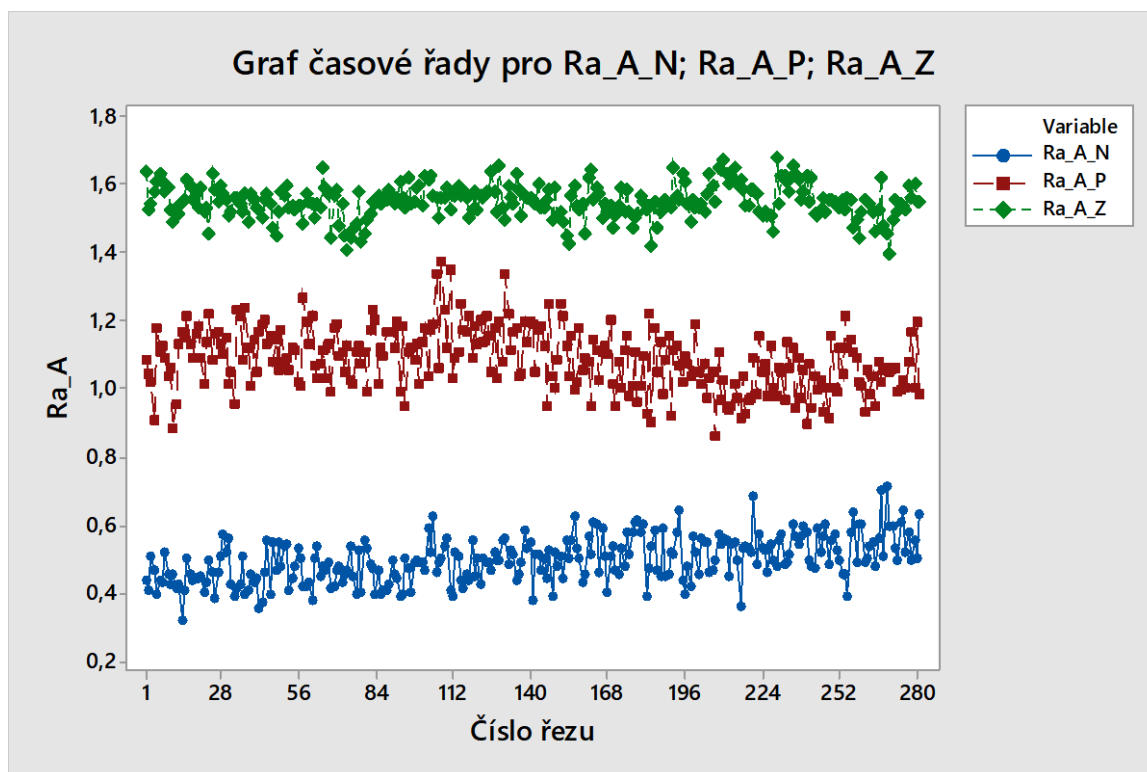
Metodika EDA

Pro základní seznámení s daty byla využita metodika EDA (exploratorní datová analýza), která využívá především znázornění za pomoci grafů.

Graf časové řady

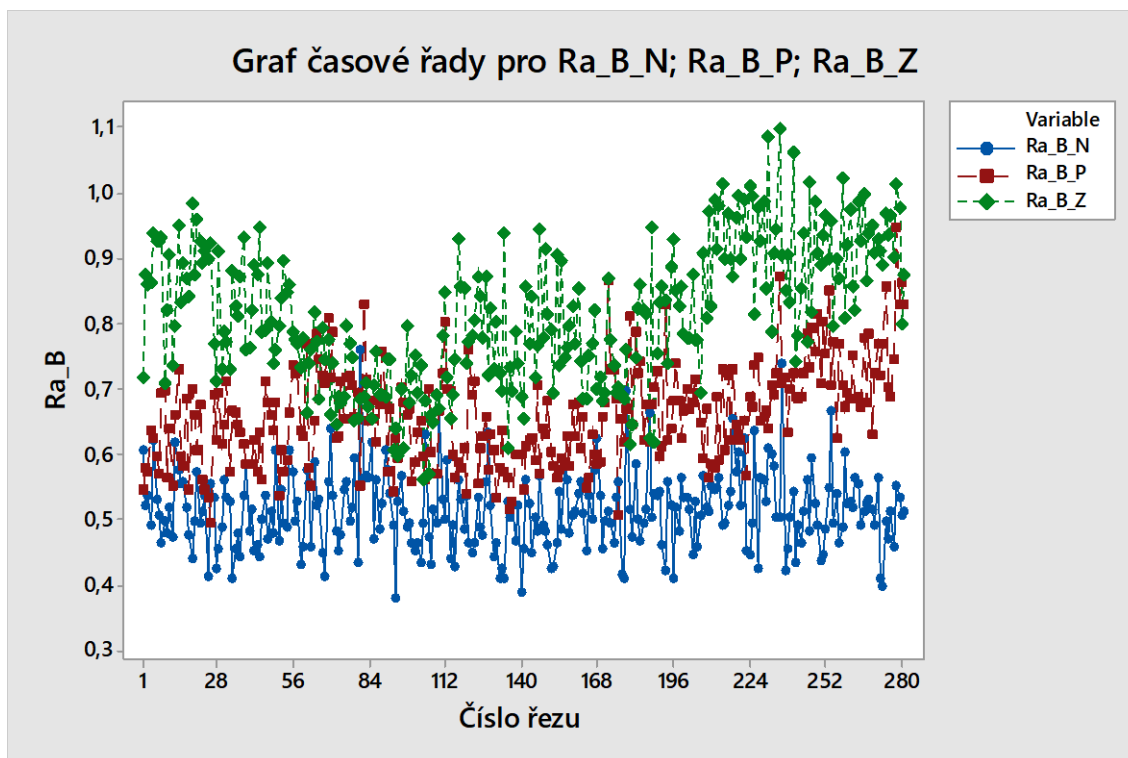
Graf časové řady zobrazuje záznam hodnot Ra v řezech kolmých ke směru opotřebení kotouče, tak jak šly za sebou. Poskytuje nám základní náhled na rozmístění a koncentraci hodnot.

Následující grafy časové řady, které jsou zobrazeny níže ukazují, jak se liší hodnoty Ra pro kotouč, který je nový a pro kotouče opotřeбенé. Na první pohled je patrné, že nový kotouč vykazuje nejnižší hodnotu Ra zatím co u kotoučů opotřeбенých se drsnost zvyšuje v závislosti na dominantně používaném kotouči.



Obrázek 43 Graf časové řady (Ra_A_N, Ra_A_P, Ra_A_Z)

Současně je na první pohled patrný rozdíl v míře opotřebení pro oba typy kotoučů. Při srovnání vykazují větší opotřebení kotouče typu A.

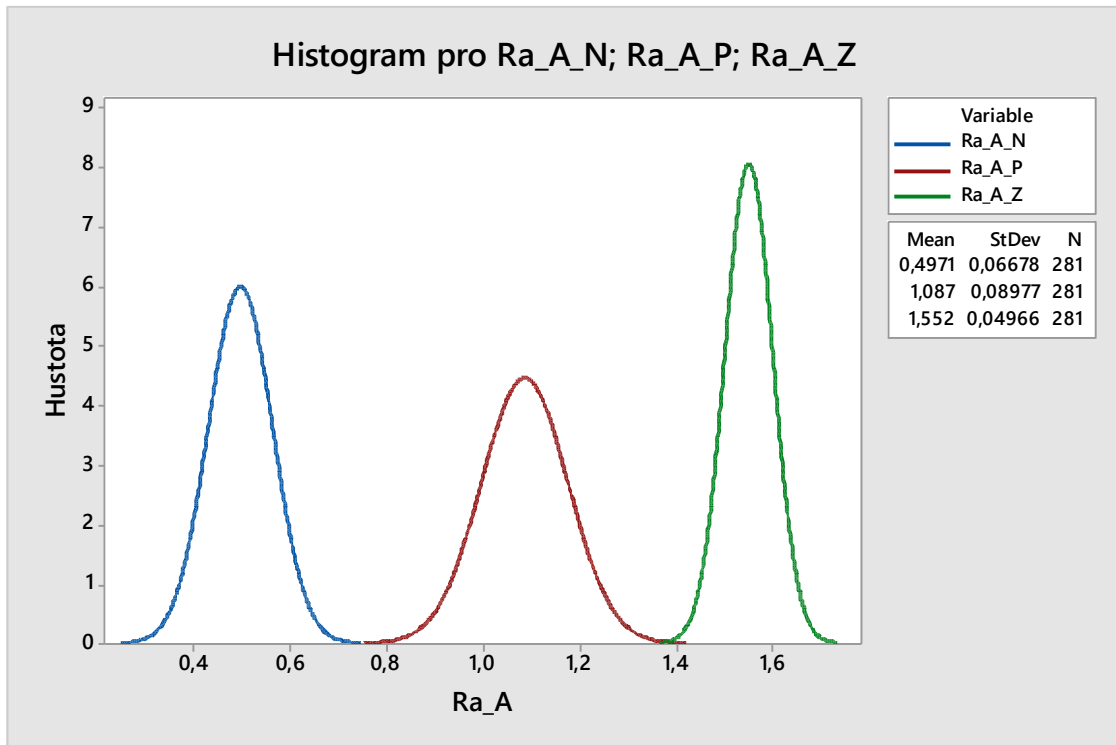


Obrázek 44 Graf časové řady (Ra_B_N, Ra_B_P, Ra_B_Z)

Histogram

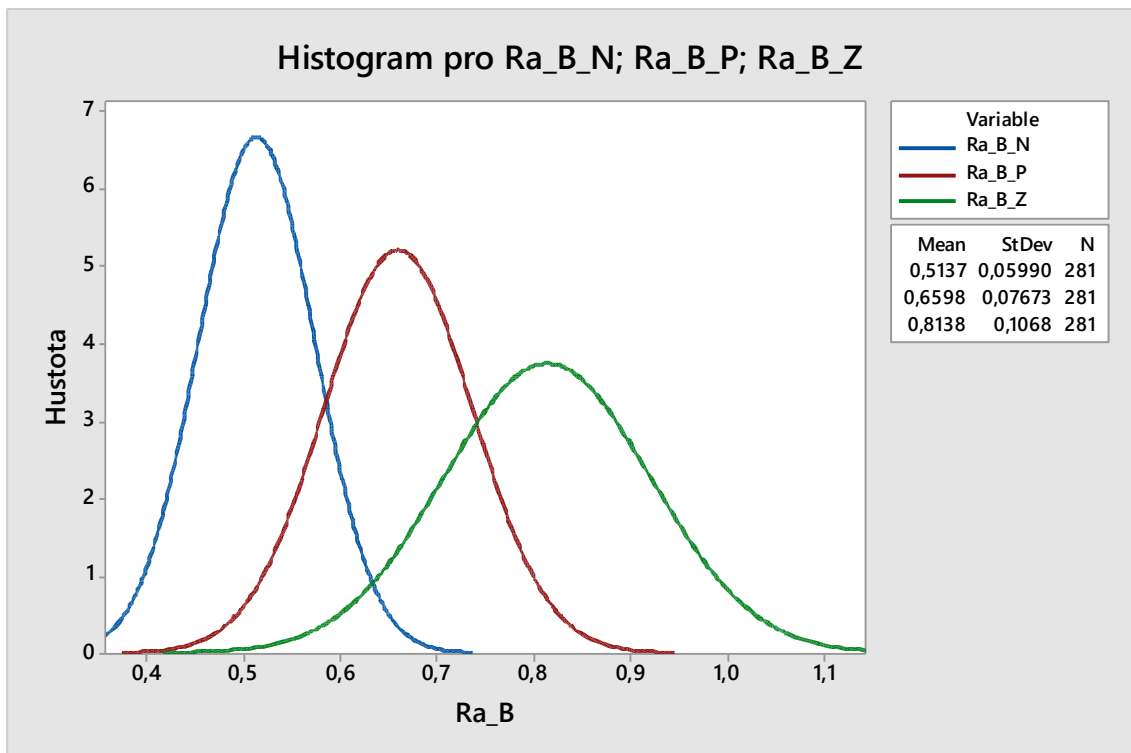
Po grafu časové řady následoval histogram, který zobrazuje hustotu hodnot daného parametru.

Z následujících histogramů lze opět vyčíst změna hodnot Ra na opotřebovaných kotoučích, stejně jako u předchozích grafů, ale také je patrnější změna rozptylů hodnot. Přední kotouč ve srovnání s kotoučem novým vykazuje zvýšení parametru Ra stejně jako nárůst rozptylu naměřených hodnot. Pro zadní kotouč platí jiná situace, kdy parametr Ra se také zvýšil, ale rozptyl naměřených hodnot se naopak poklesl.



Obrázek 45 Histogram pro (Ra_A_N, Ra_A_P, Ra_A_Z)

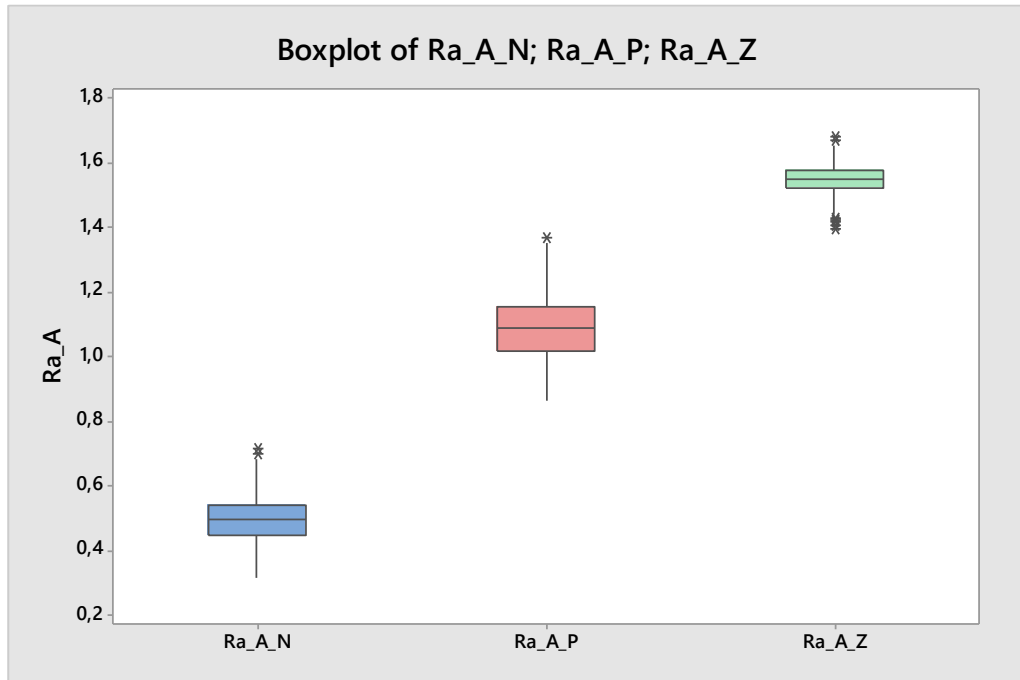
Pro kotouč typu B se ale hustota zvyšuje společně se zvyšujícím se parametrem Ra pro dané opotřebené kotouče.



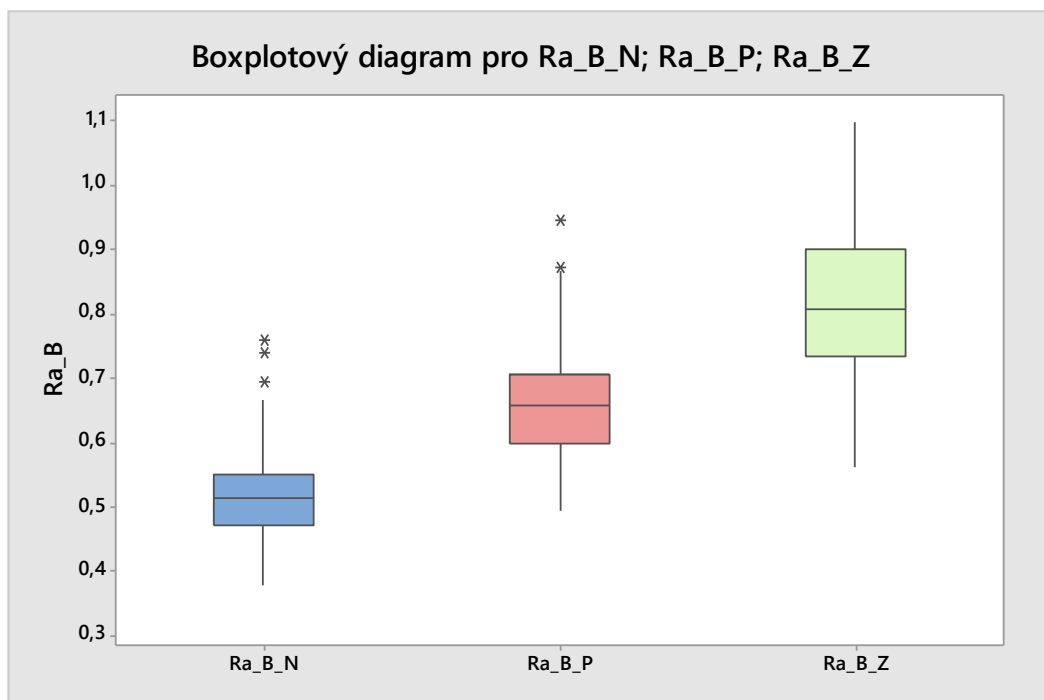
Obrázek 46 Histogram pro (Ra_B_N, Ra_B_P, Ra_B_Z)

Boxplot

Následuje krabicový graf (boxplot), který slouží pro zobrazení parametrů v jednotlivých kvartilech. Kromě patrných rozdílů mezi hodnotami Ra a rozptyly těchto parametrů jsou zde také zobrazeny hodnoty, které by bylo vhodné prošetřit jako možné odlehlé hodnoty.



Obrázek 47 Boxplotový diagram (Ra_A_N, Ra_A_P, Ra_A_Z)



Obrázek 48 Boxplotový diagram (Ra_B_N, Ra_B_P, Ra_B_Z)

Odlehlé hodnoty a hrubé chyby

Po základním seznámení s daty za pomoci grafů časových řad, histogramů a boxplotů byla veškerá data přezkoumána na výskyt odlehlých hodnot. Vytvořené grafy při metodě EDA byly využity také pro odhalení možných hrubých chyb, které je potřeba řádně prošetřit. Za tímto účelem bylo využito Grubsova testu odlehlých hodnot, který je principiálně založeného na teorii hypotéz. V případě ponechání hrubých chyb v souboru by mohlo dojít k nežádoucímu zkreslení výsledků.

Pro využití teorie hypotéz je zapotřebí stanovit:

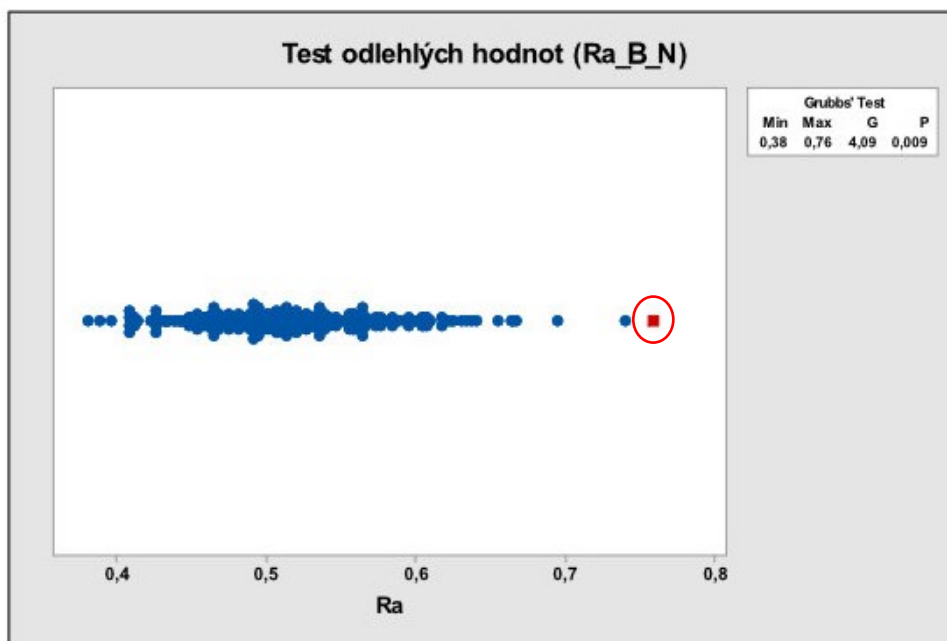
- hypotézu nulovou H_0
- hypotézu alternativní H_a
- hladinu významnosti α

H_0 = maximální, nebo minimální hodnota je hrubá chyba

H_a = maximální, nebo minimální hodnota je hrubá chyba

$\alpha = 0,05$

Následně je za pomoci programu Minitab17 zjištěna p-hodnota. V případě, je-li p – hodnota větší, než zvolená hladina významnosti α přijímám H_0 , v opačné případě přijímám H_a .

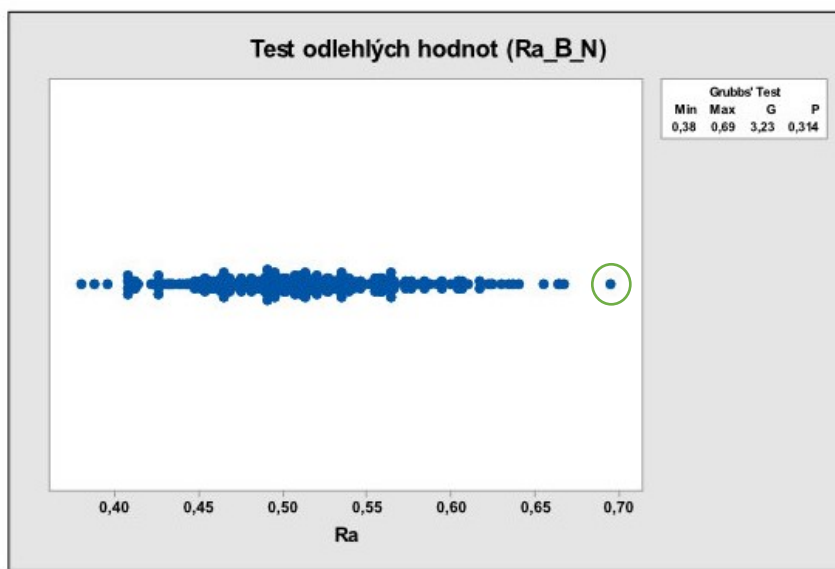


Obrázek 49 Test odlehlých hodnot

Jestliže p – hodnota vychází menší než hladina významnosti $\alpha = 0,05$, tak se s 95 % pravděpodobností jedná o hrubou chybu a je potřeba ji ze souboru vyřadit.

Takto ošetřený soubor opět vyšetříme na výskyt odlehlých hodnot.

Obrázek č. 50 dokazuje, že ostatní odlehlé hodnoty vyskytující se v daném souboru jsou jen odlehlé hodnoty s nízkou pravděpodobností výskytu a jsou tedy v souboru ponechány.



Obrázek 50 Test odlehlých hodnot

Jestliže soubor neobsahuje další odlehlé hodnoty je možné pokračovat ve vyhodnocení dat.

Test normality dat

Test normality je využíván za účelem zjištění, jestli data, se kterými pracujeme mají normální (Grubsovo) rozdělení či nikoliv.

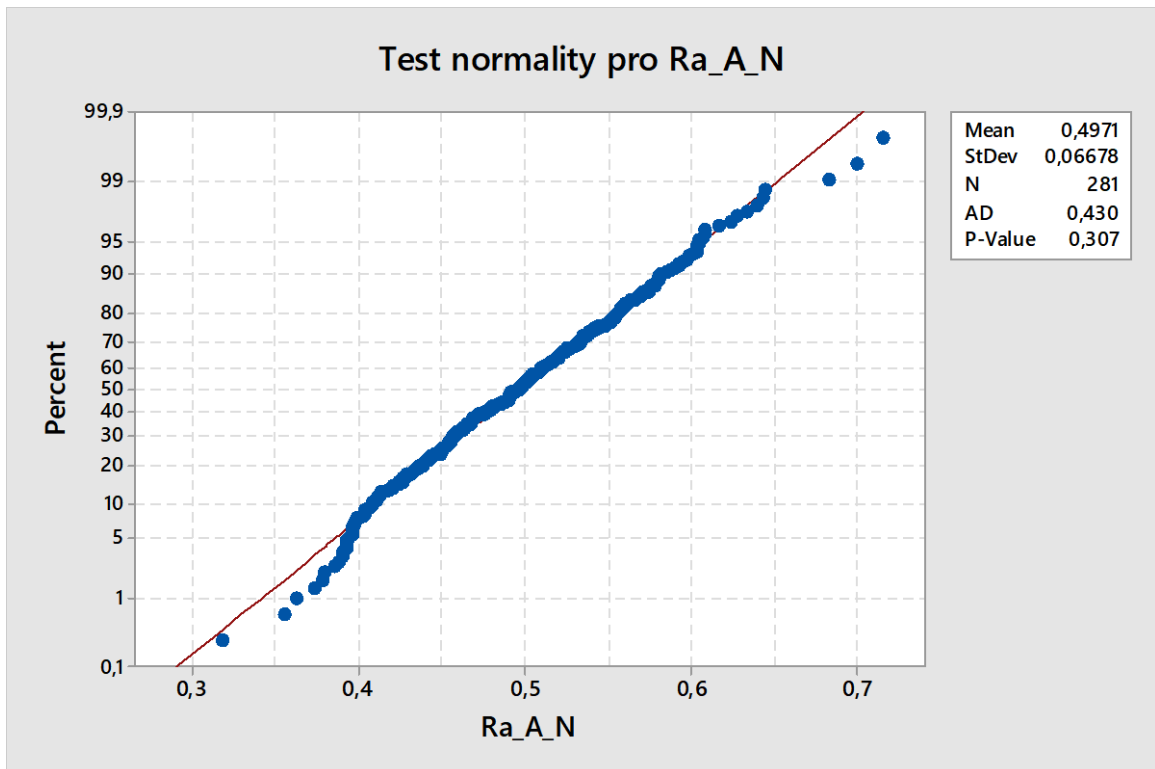
Jedná se opět o test, který je založen na teorii hypotéz. Je tedy nutné zvolení nulové hypotézy, alternativní hypotézy a také hladiny významnosti.

H_0 = Data pochází ze základního souboru, který má normální rozdělení

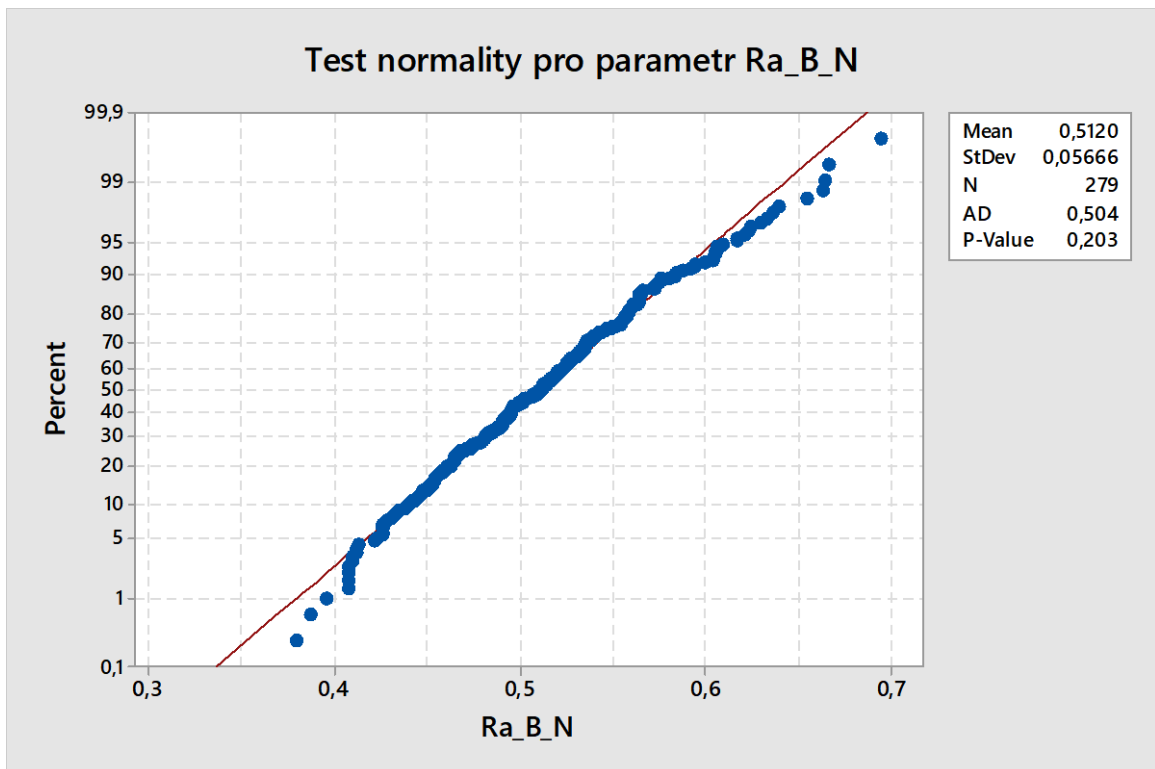
H_a = Data nepochází ze základního souboru, který má normální rozdělení

$\alpha = 0,05$

Následující grafy zobrazují výslednou P -hodnotu, která je vyšší než hodnota kritická a s 95 % pravděpodobností správného rozhodnutí přijímáme H_0 v neprospěch H_a .



Obrázek 51 Test normality dat Ra_N



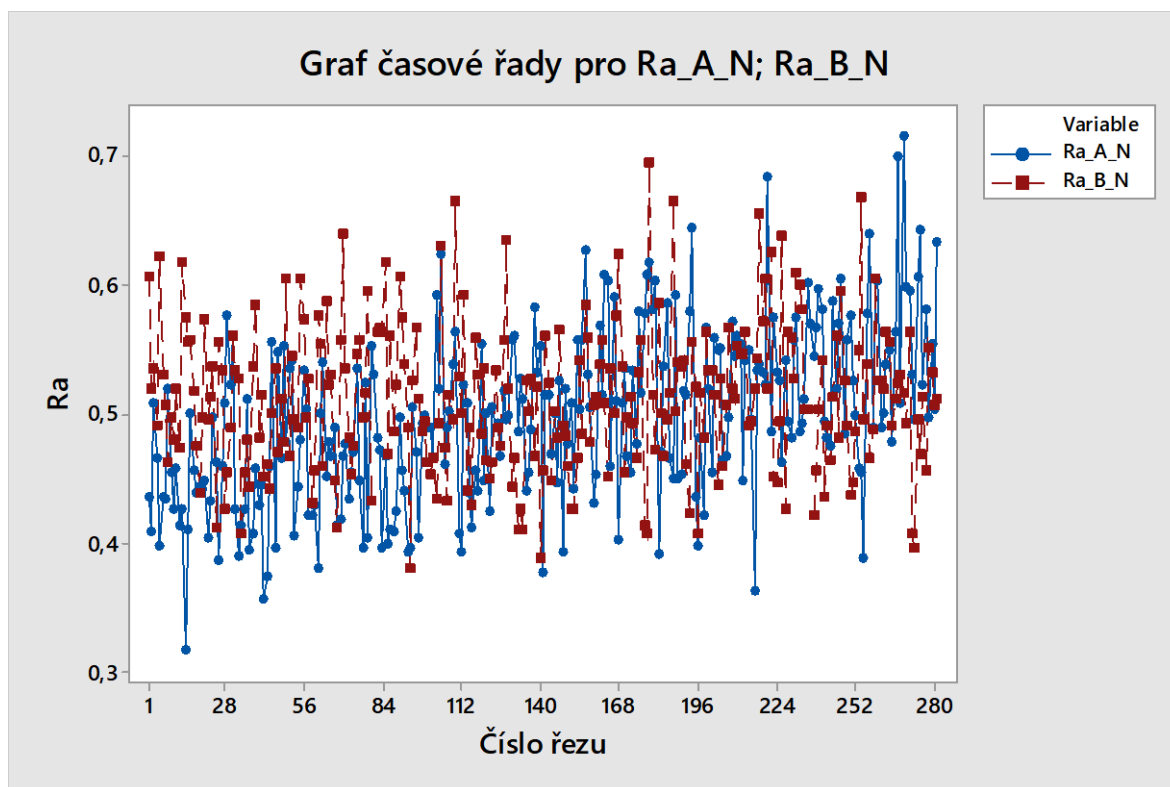
Obrázek 52 Test normality dat Ra_B_N

F-test

Vzhledem k tomu, že účelem je srovnání daných typů kotoučů a jejich opotřebení při stejné najeté vzdálenosti je zapotřebí zhodnotit jejich počáteční stav. Tedy jaký povrch a nalezneme u obou neopotřebovaných kotoučů.

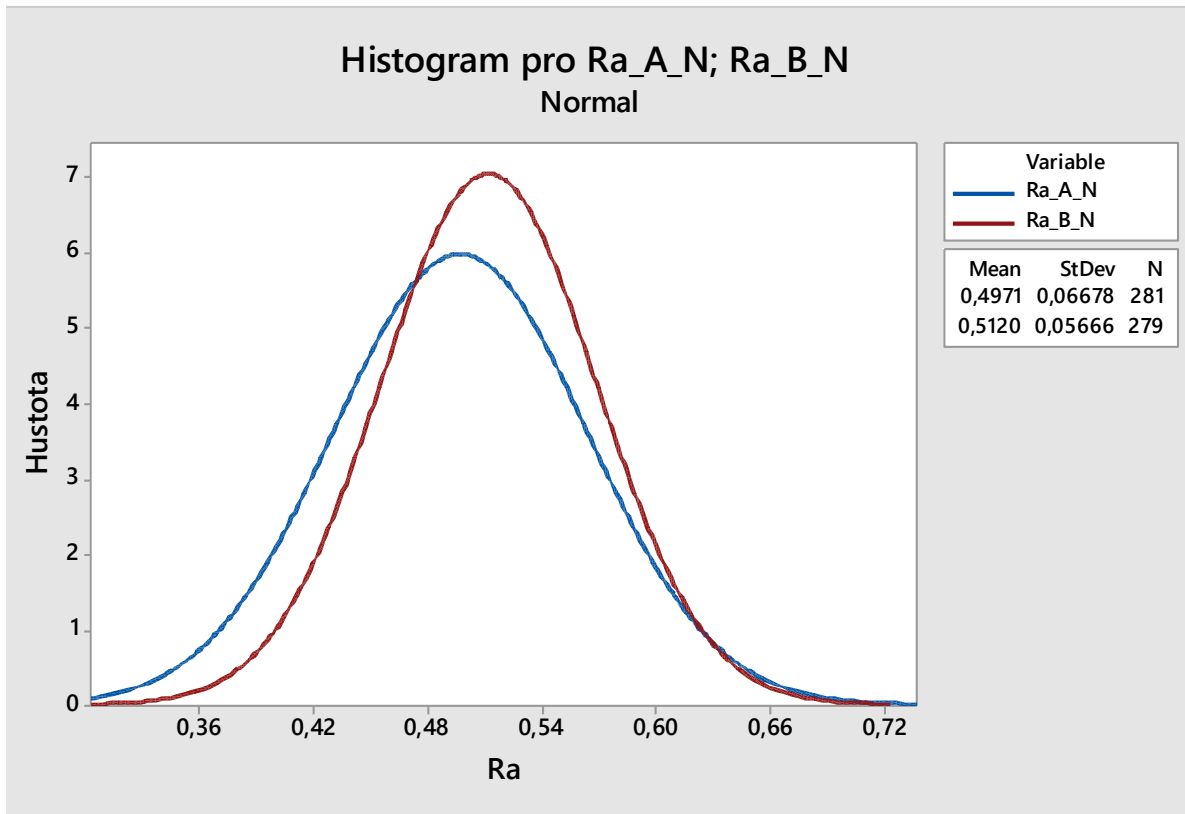
Za pomoci F-testu a následujícím T-testu rozhodneme, zda povrchy kotoučů vznikly ve stejném procesu.

Z grafu časové řady pro Ra_A_N a Ra_B_N, který je zobrazen níže je patrná značná podobnost jak v průměrné hodnotě Ra, tak i v rozptylu daných parametrů.



Obrázek 53 Graf časové řady pro Ra_A_N a Ra_B_N

Následující histogram znatelněji zobrazuje mírný rozdíl v naměřených hodnotách drsnosti povrchu Ra, ale také rozdíl v rozptylu hodnot.



Obrázek 54 Histogram pro Ra_A_N a Ra_B_N

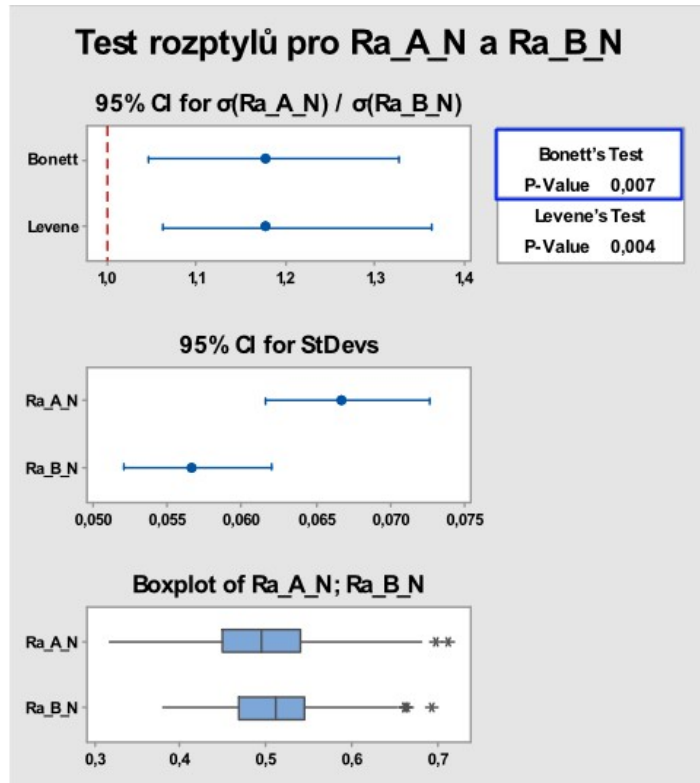
Pro provedení F-testu (testu rozptylů) je opět zapotřebí definovat hypotézu nulovou, alternativní a hladinu významnosti.

H_0 = směrodatné odchytky Ra_A_N a Ra_B_N se liší statisticky nevýznamně

H_a = směrodatné odchytky Ra_A_N a Ra_B_N se liší statisticky významně

$\alpha = 0,05$

Z následujícího obrázku je patrné, že p-hodnota vyšla menší než 0,05. Přijímáme hypotézu alternativní v neprospěch hypotézy nulové a můžeme tedy s 95 % pravděpodobností tvrdit, že dané kotouče nebyly vyrobeny ve stejném procesu.



Obrázek 55 Výsledky F-testu pro parametry Ra_A_N a Ra_B_N

T-test

Postup bude stejný jako u předchozího F-testu.

H_0 = aritmetické průměry Ra_A_N a Ra_B_N se liší statisticky nevýznamně

H_a = aritmetické průměry Ra_A_N a Ra_B_N se liší statisticky významně

$\alpha = 0,05$

Z následujícího obrázku je zřejmé, že nulová hypotéza bude zamítnuta ve prospěch hypotézy alternativní, protože P-hodnota vyšla menší, než hodnota kritická.

Two-Sample T-Test and CI: Ra_A_N; Ra_B_N

Two-sample T for Ra_A_N vs Ra_B_N

| | N | Mean | StDev | SE Mean |
|--------|-----|--------|--------|---------|
| Ra_A_N | 281 | 0,4971 | 0,0668 | 0,0040 |
| Ra_B_N | 279 | 0,5120 | 0,0567 | 0,0034 |

Difference = μ (Ra_A_N) - μ (Ra_B_N)

Estimate for difference: -0,01491

95% CI for difference: (-0,02519; -0,00463)

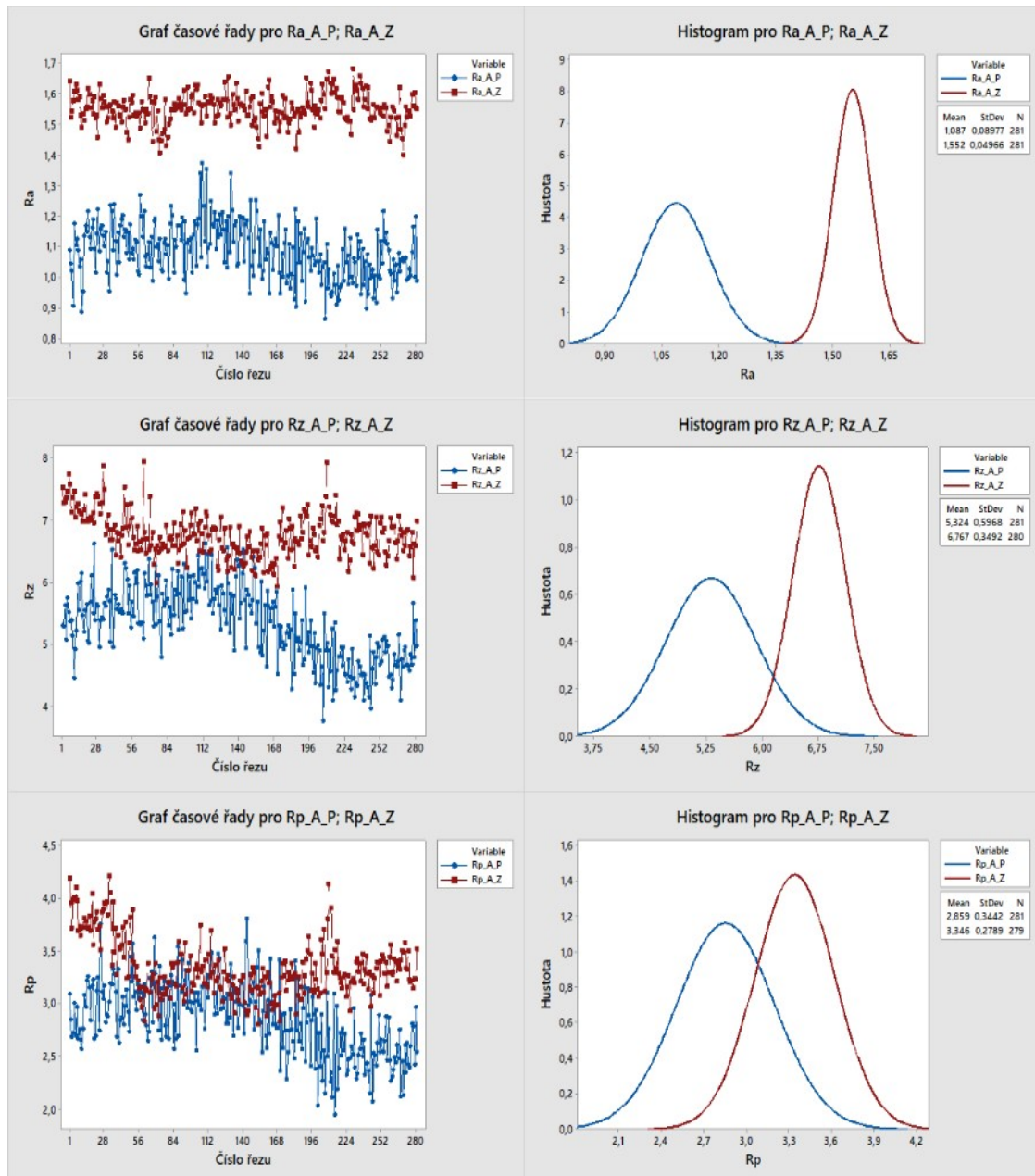
T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -2,85

P-Value = 0,005

Obrázek 56 Výsledky T-testu pro parametry Ra_A_N a Ra_B_N

Srovnání parametrů Ra, Rz a Rp předního a zadního kotouče typu A

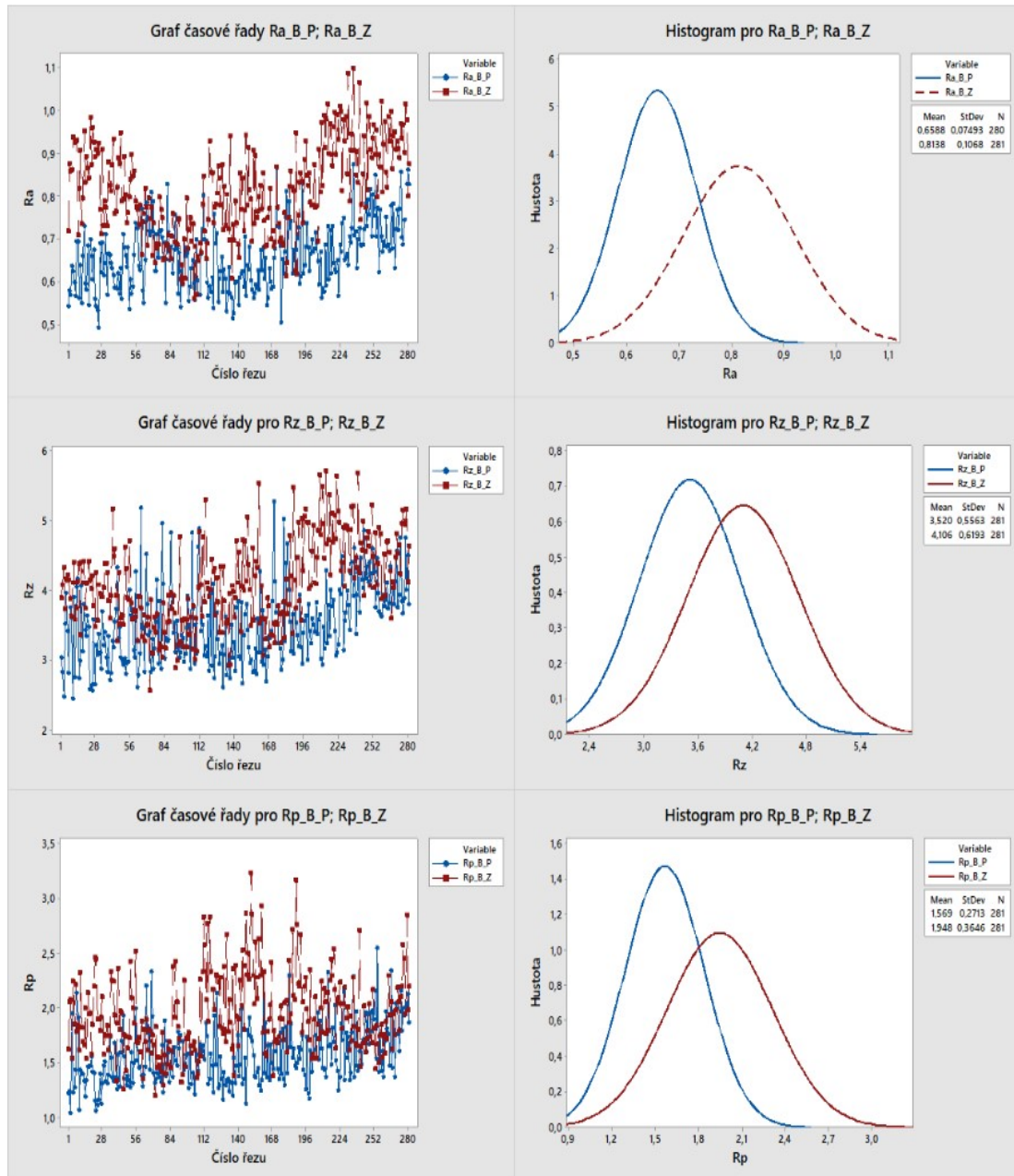
Pro srovnání těchto parametrů byly zvoleny grafy časové řady a histogramy. Z následujících grafů je patrné, že zadní kotouč vykazuje vyšší hodnoty drsnosti povrchu, ale také si udržuje nižší rozptyl hodnot.



Obrázek 57 Srovnání parametrů drsnosti povrchu předního a zadního kotouče typu A

Srovnání parametrů Ra, Rz a Rp předního a zadního kotouče typu B

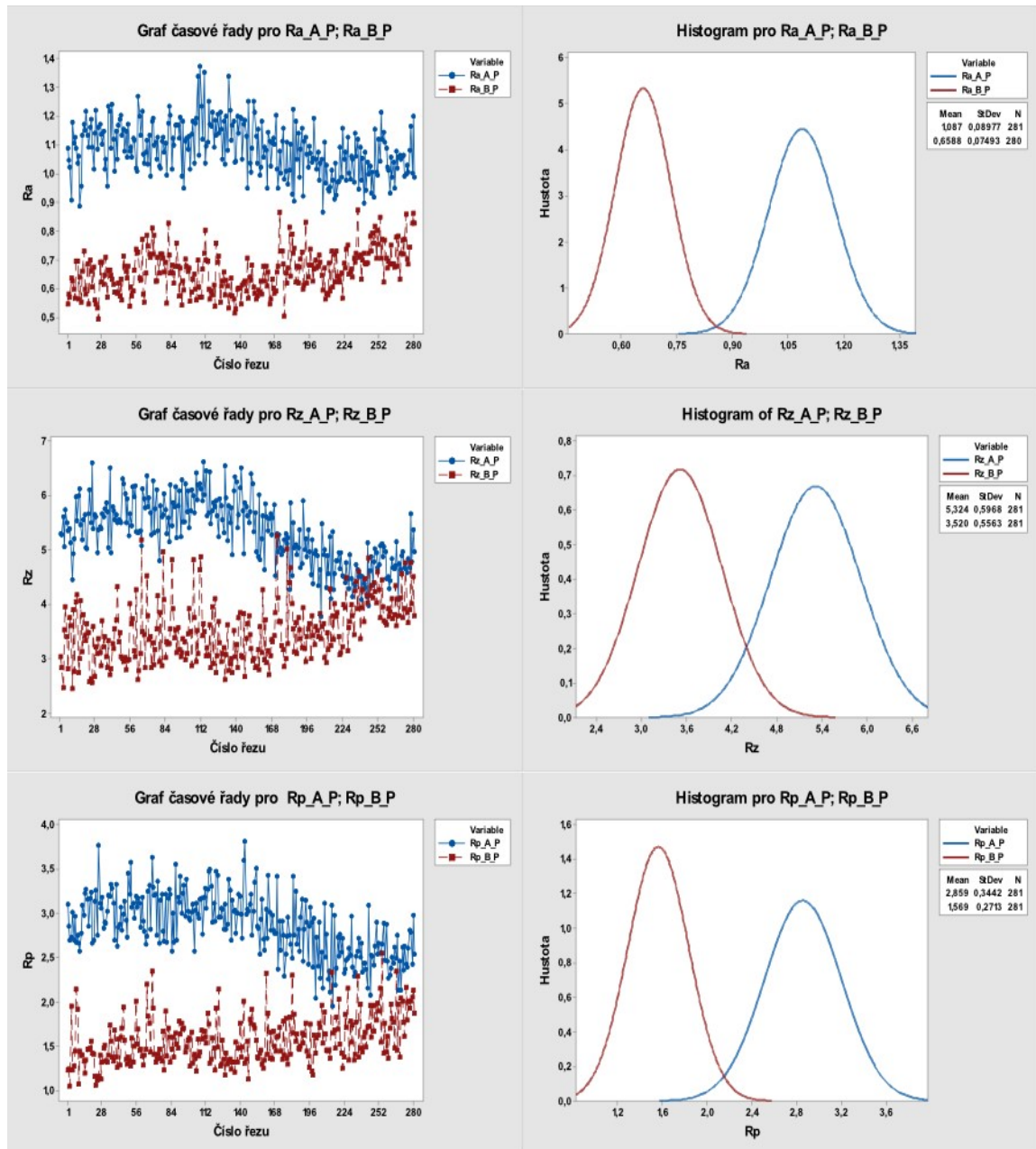
Při porovnání parametrů drsnosti povrchu pro kotouče typu B je patrný mnohem menší rozdíl mezi opotřebovaným předním a zadním kotoučem. Zároveň Zadní kotouč vykazuje vyšší průměrné hodnoty pro parametry Ra, Rz i Rp a zároveň také větší rozptyl těchto hodnot.



Obrázek 58 Srovnání parametrů drsnosti povrchu předního a zadního kotouče typu B

Srovnání parametrů drsnosti povrchu předních opotřebených kotoučů A a B

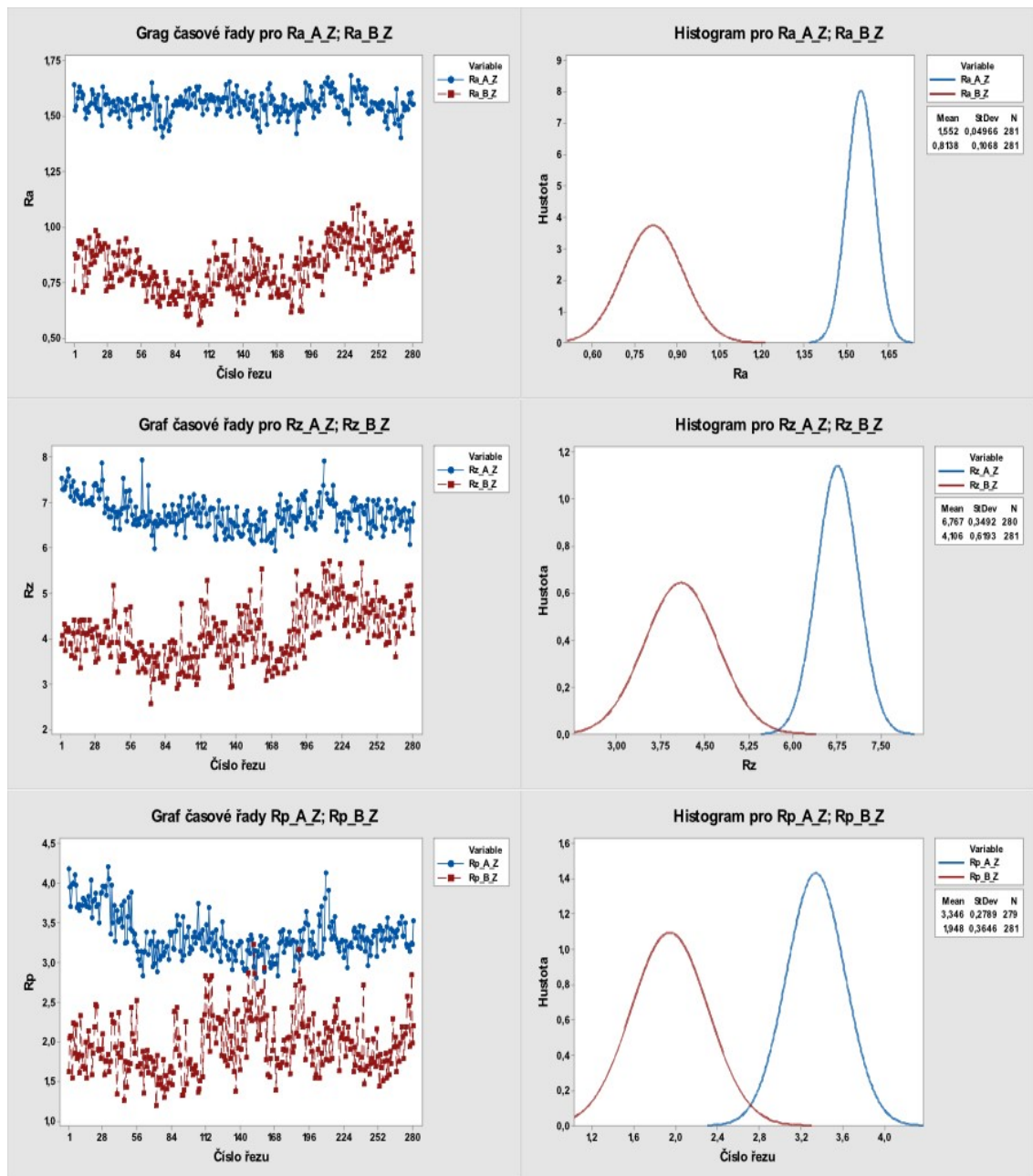
Následující grafy srovnávají opotřebení předních kotoučů mezi oběma typy kotoučů. Z těchto grafů je patrné, že vyšších parametrů drsnosti povrchu dosahuje přední kotouč typu A pro všechny tři prošetřované parametry drsnosti.



Obrázek 59 Srovnání parametrů drsnosti povrchu předních opotřebených kotoučů A a B

Srovnání parametrů drsnosti povrchu zadních opotřebených kotoučů A a B

Při porovnání parametrů drsnosti povrchu zadních kotoučů pro typy A i B je patrný největší rozdíl jak v průměrné hodnotě, tak i v rozptylu u grafů porovnávající hodnotu R_a . Zadní opotřebený kotouč typu A vyhazuje výrazně vyšší průměrné hodnoty, ale také nižší rozptyl hodnot. Podobný trend pokračuje i o ostatních grafů pro srovnání parametrů R_z a R_p , ale již ne v takové míře.



Obrázek 60 Srovnání parametrů drsnosti povrchu zadních opotřebených kotoučů A a B

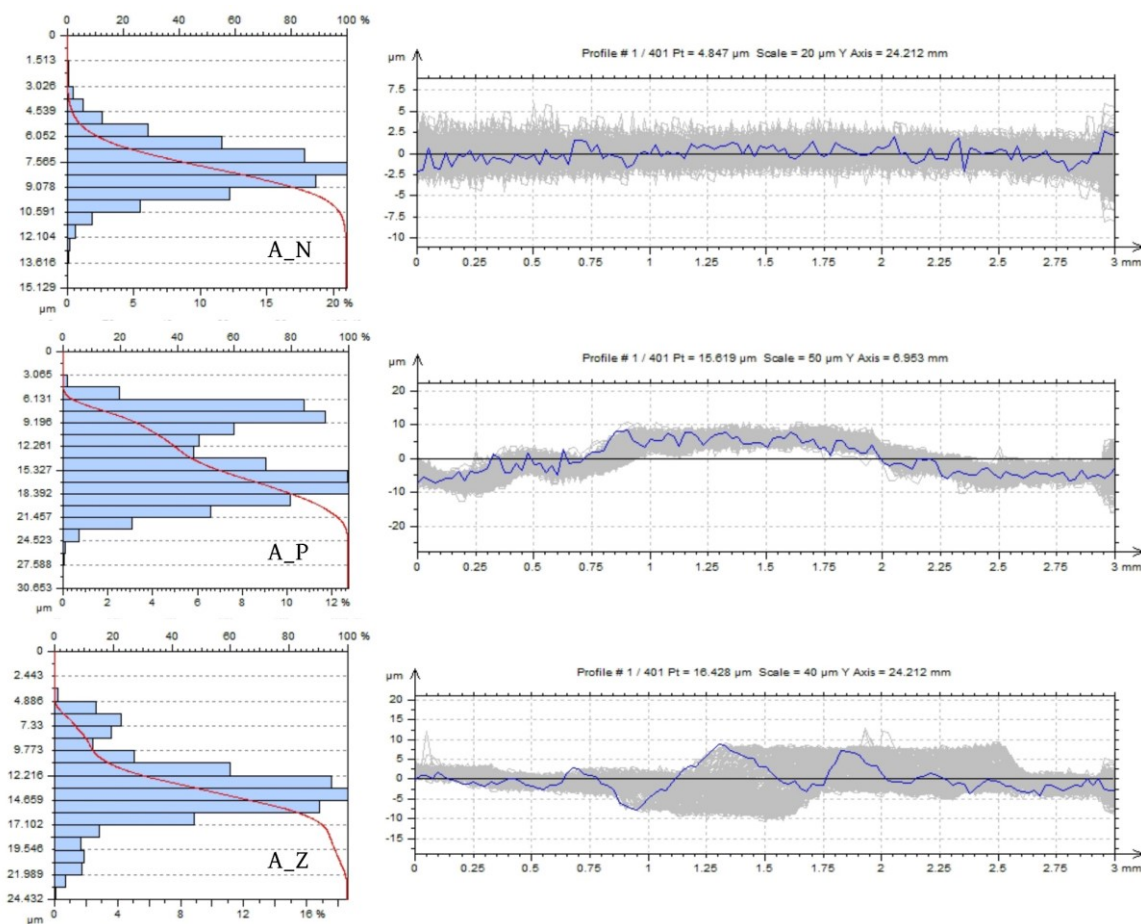
Abbot-Firestonova křivka

Tato křivka zobrazuje množství materiálu, který se nachází v určité hloubce.

Kotouč A_N vykazuje značnou symetrii výstupků a prohlubní, kde ze začátku by opotřebení bylo rychlé kvůli nízkému procentu materiálu, který by se v této hloubce nacházel. Následně je možné pozorovat, že mezi 20 % a 75 % by byl úběr lineární, což je patrné z kumulační křivky, která je znázorněna červenou barvou.

Následující dva opotřebené kotouče vykazují značné opotřebení. Abbot-Firestonova křivka pro kotouč A_P vykazuje bimodulárnost. Při výměně brzdových destiček by to mohlo znamenat rychlejší opotřebení.

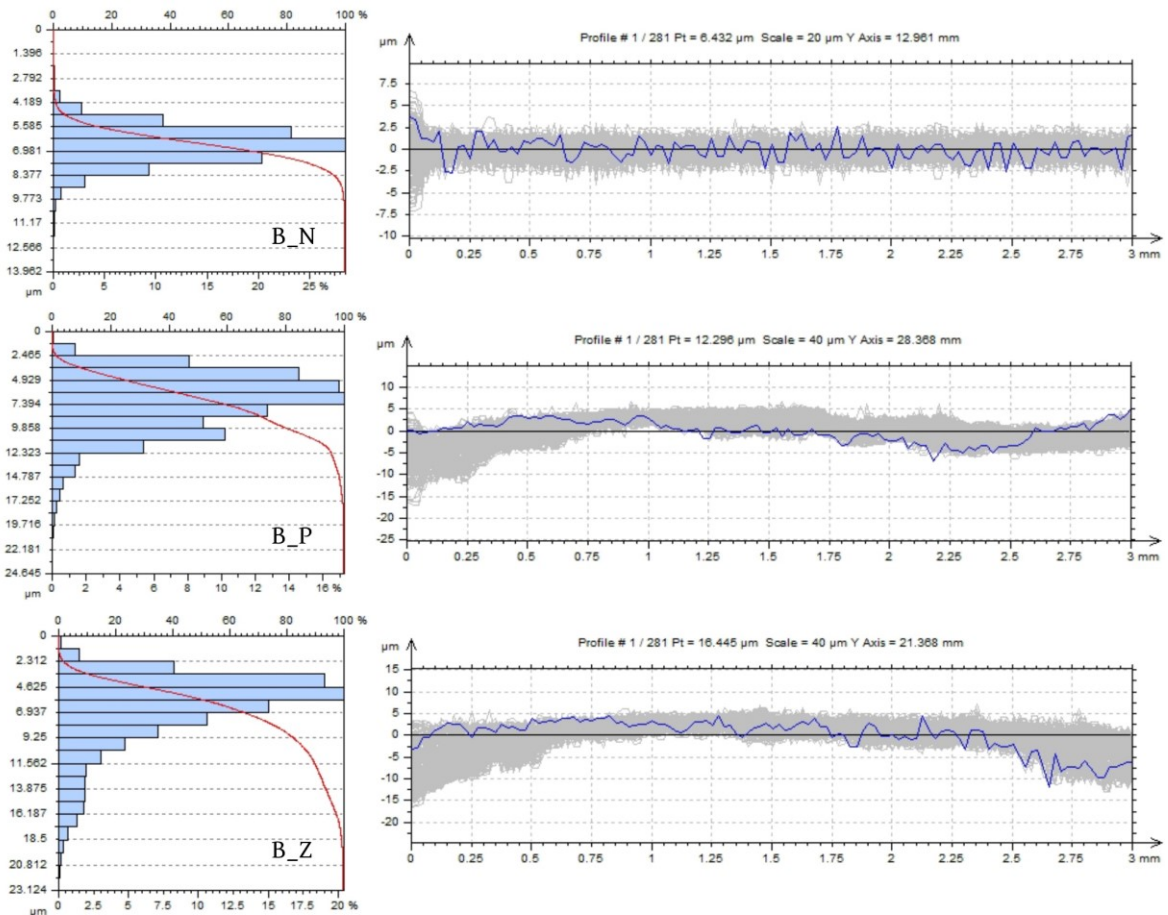
Podobný případ by mohl nastat u kotouče A_Z. Nečistoty, nebo zanesený písek způsobil vyskytující se rýhy.



Obrázek 61 Abbot-Firestonova křivka pro kotouče typu A

Kotouč B_N se chová podobně jako kotouč A_N. Rozdílem může být vyšší počet hodnot, které se pohybují v blízkosti střední hodnoty, kde kumulační křivka klesá lineárně. V tomto případě je lineární průběh opotřebení možné pozorovat mezi 20 % a 80 %.

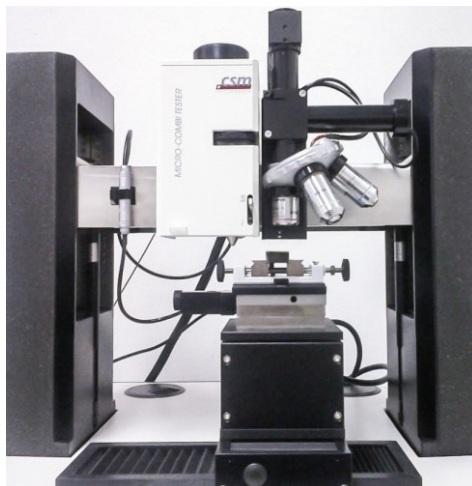
Následující dva opotřebené kotouče B_P a B_Z vykazují úbytek vrcholků, které jsou patrné na grafech níže. Takto sjeté kotouče by mohly být považovány za dobře zaseté a vhodné pro další použití.



Obrázek 62 Abbot-Firestonova křivka pro kotouče typu A

9 MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI MATERIÁLU

Vzhledem k možnému ovlivnění brzdných ploch pouze do malých hloubek, byl zvolen způsob měření mikrotvrdomosti. Tento způsob měření je například vhodný pro ověřování tvrdosti při tepelných povrchových úpravách jako je povrchové kalení, nebo nitrodování.



Obrázek 63 Zařízení pro měření mikrotvrdomosti (Micro-Combi Tester)

Měření mikrotvrdomosti bylo uskutečněno na přístroji MicroCombi, který je vyráběn firmou CSM Instruments. Jedná se o přístroj vhodný pro měření při nízkém zatížení a hloubkou měření v rozsahu nanometrů. V daném případě je tvrdost vyhodnocována z hloubky vtisku.

9.1 Postup měření

Před samotným měřením musely být vzorky náležitě připraveny. Byly tedy nařezány na menší díly, které byly následně vlisovány do polymerní výztuže pro snadné upnutí do přístroje. Následovalo lehké leštění pro odstranění výčnělků.

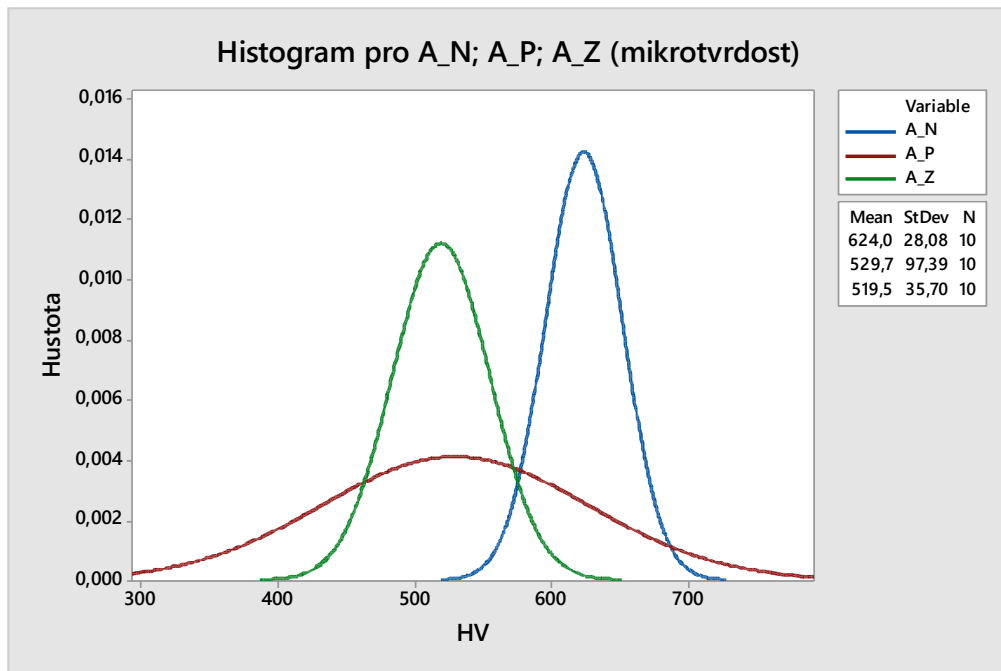


Obrázek 64 Připravené vzorky pro měření mikrotvrdomosti

Takto připravené vzorky byly podrobeny deseti měření při zatížení 1 N po dobu trvání 12 s.

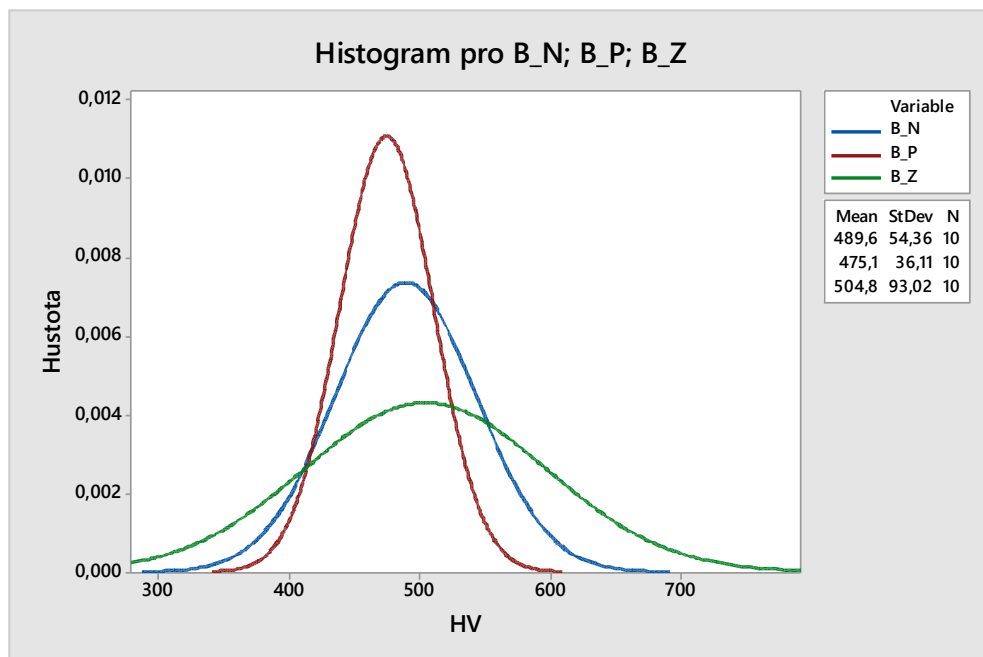
9.2 Zpracování výsledků

Následující graf zobrazuje, že u opotřebených kotoučů typu A mírně poklesla tvrdost.



Obrázek 65 Porovnání mikrotvrdości pro nové kotouče A_N, A_P a A_Z

U Kotoučů typu B jsou změny v tvrdosti minimální. Je tedy možné konstatovat, že působení tepla na brzdové kotouče je za běžného používání zanedbatelné.



Obrázek 66 Porovnání mikrotvrdości pro nové kotouče B_N, B_P a B_Z

10 MĚŘENÍ TLOUŠŤKY KOTOUČŮ

Síla, kterou cyklista vyvíjí na brzdny pedál působí jako síla přitlačující brzdové destičky na brzdový kotouč. Výsledek těchto sil je třecí síla, která přemění kinetickou energii jízdního kola na tepelnou. Během tohoto účinku nedochází pouze k tepelnému ovlivnění kotouče, ale také k mechanickému opotřebení a úbytku materiálu v důsledku tření brzdových destiček o kotouč.

Mechanické opotřebení a úbytek materiálu má ve větší míře nepříznivý vliv na brzdny účinek. Při velkém úbytku materiálu nemusí při zmáčknutí brzdového pedálu dojít k dostatečnému styku brzdových destiček s kotoučem a brzdny účinek může být minimální.

Právě i z tohoto důvodu jsou na brzdnych kotoučích uváděny minimální tloušťky brzdnych kotoučů pro zajištění spolehlivosti a správného fungování celého brzdneho systému.

10.1 Postup měření

Pro měření tloušťky kotoučů byl zvolen digitální mikrometr s rozsahem 25 mm a chybou měření 0,001 mm.

Bylo zvoleno 15 bodů rozložených na brzdnych plochách kotouče.

Před zahájením měření byly kotouče náležitě očištěny, aby nedošlo k ovlivnění výsledků.

10.2 Zpracování výsledků

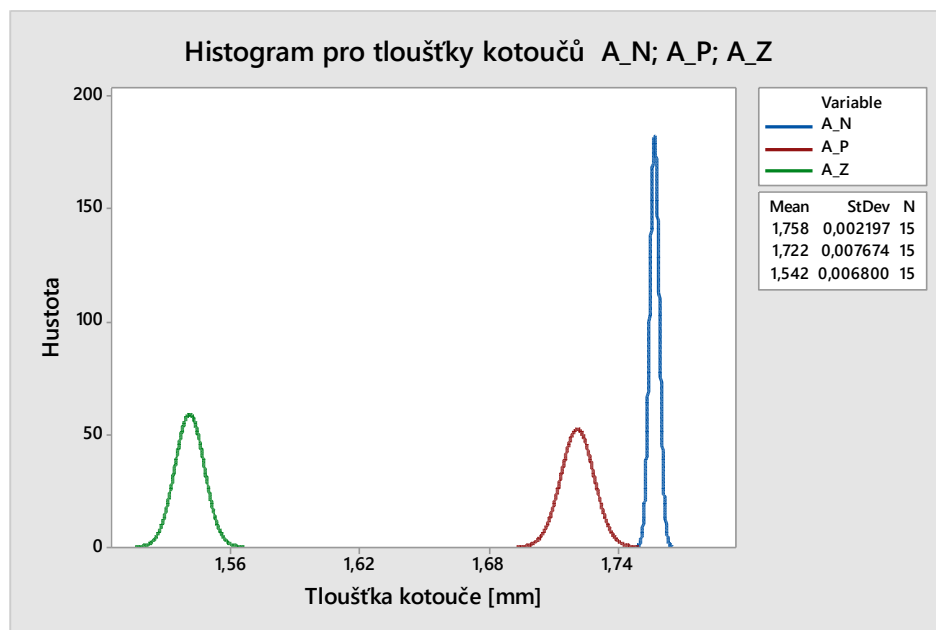
Stejně jako u předchozího zpracování dat byly i tato data prozkoumána na výskyt odlehlých hodnot.

Následně byly vytvořeny histogramy a boxplotové grafy pro srovnání tlouštěk kotoučů.

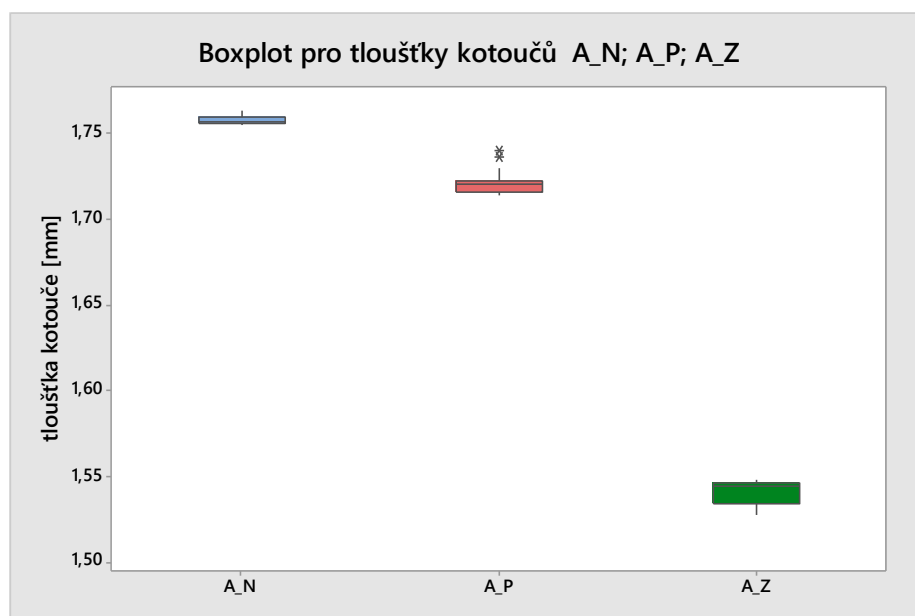
Kotouč typu A

Tabulka 5 Průměrné hodnoty pro tloušťky kotoučů typu A

| Tloušťka kotouče (mm) | | | |
|-----------------------|--------|--------|--------|
| Typ kotouče | A_N | A_P | A_Z |
| průměr | 1,758 | 1,722 | 1,542 |
| sm. odchylka | 0,0022 | 0,0077 | 0,0068 |



Obrázek 67 Srovnání tloušťky kotoučů typu A pomocí histogramu

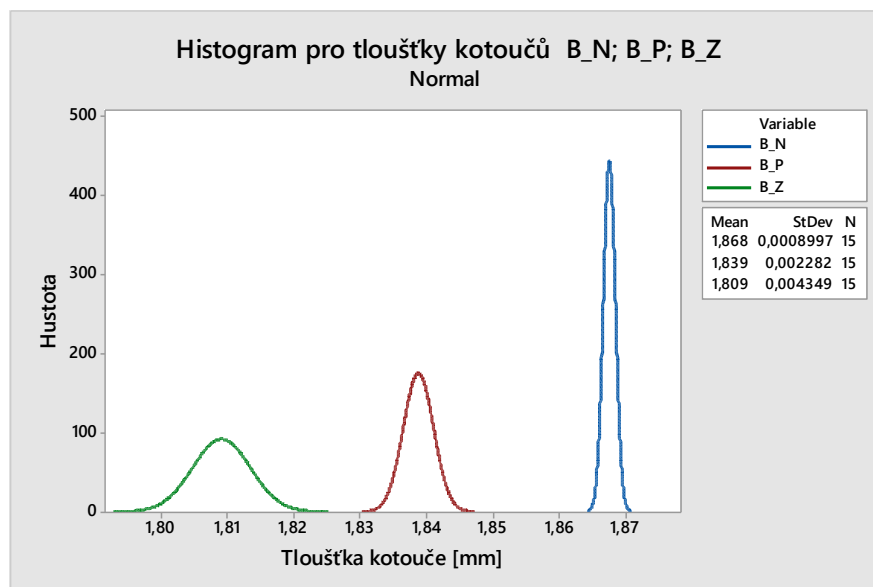


Obrázek 68 Srovnání tloušťky kotoučů typu B pomocí boxplotového grafu

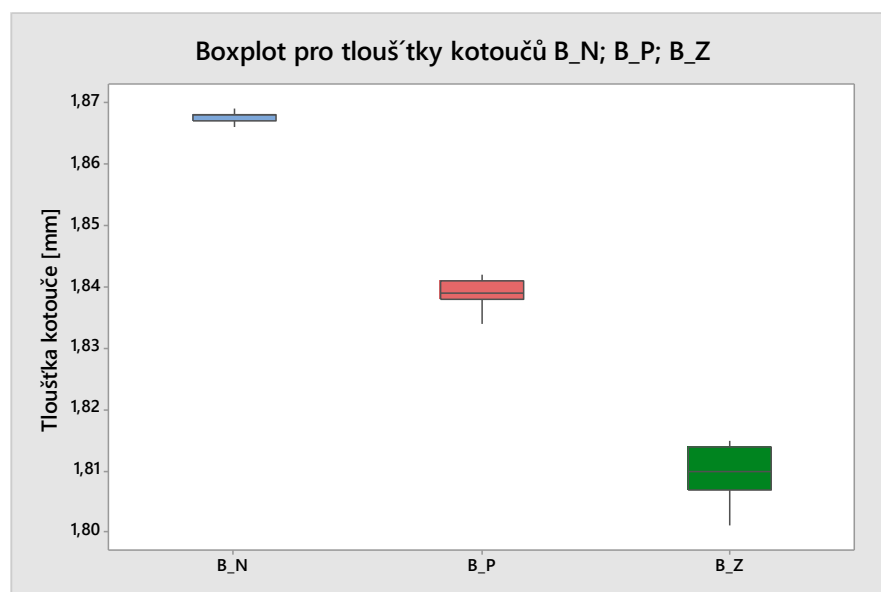
Kotouč typu B

Tabulka 6 Průměrné hodnoty pro tloušťky kotoučů typu B

| Tloušťka kotouče (mm) | | | |
|-----------------------|--------|--------|--------|
| Typ kotouče | B_N | B_P | B_Z |
| průměr | 1,868 | 1,839 | 1,809 |
| sm. odchylka | 0,0009 | 0,0023 | 0,0043 |



Obrázek 69 Srovnání tloušťky kotoučů typu C pomocí histogramu



Obrázek 70 Srovnání tloušťky kotoučů typu C pomocí boxplotového grafu

ZÁVĚR

Účelem této diplomové práce bylo statistické zhodnocení a porovnání opotřebení brzdných kotoučů pro jízdní kola a jejich následné srovnání. Pro tyto účely byly nasnímány funkční plochy, naměřeny tloušťky kotoučů a mikrotvrdost. Následně byla takto získaná data zpracována a porovnána.

Ze získaných parametrů drsnosti povrchu, i z dat získaných při měření tloušťky brzdných ploch kotoučů bylo u obou typů dokázáno větší opotřebení na zadních kotoučích. Z čehož plyne preference používání zadního brzdného kotouče u obou cyklistů. Při následném porovnání výsledků vyplývá, že kotouče typu A vykazují větší opotřebení, kde největší rozdíl nalezneme u zadního kotouče, který měl při porovnání s novým kotoučem daného typu nejvzdálenější hodnoty drsnosti povrchu, ale také největší úbytek materiálu na brzdných plochách kotouče, který činil 0,216 mm.

Při dalším porovnávání za pomoci Abbot-Firestonových křivek by se u kotoučů typu A dalo usuzovat nerovnoměrný úbytek materiálu. Tato skutečnost by mohla být způsobena průnikem větších nečistot, nebo písku do prostoru mezi brzdové destičky a kotouč.

V opačném případě u kotoučů typu B je z Abbot-Firestonových křivek možné pozorovat úbytek píků. Z grafů tedy pro oba kotouče B_P a B_Z vyplývá, že po najetí 1000 km se jejich povrch zdá dobře zajetý a kotouče mohou ještě dál dobře sloužit.

Při následném měření mikrotvrdosti z vytvořených grafů vyplývá, že vliv teploty vzniklé při procesu brždění nemá na kotouče výrazný vliv, a proto při běžné cyklistice není zapotřebí investovat do dražších kotoučů, nebo destiček, které jsou přizpůsobeny pro efektivnější odvod tepla.

Závěrem je tedy možné tvrdit, že po najetí srovnatelného množství kilometrů, s použitím stejných brzdových destiček vykazují větší opotřebení kotouče typu A a pro běžného uživatele by bylo vhodnější využití kotouče typu B, který tvoří méně nákladnou variantu s možnou delší životností.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FIREFOX, 2020. *What are the different types of Bicycle Brakes* [online] [cit.2021-09-15] Dostupné z: https://www.firefoxbikes.com/blog/what-are-the-different-types-of-bicycle-brakes/?fbclid=IwAR194s_RUa5StfcJtY_pWIKrsYqWydKYUoqk1WWkJI6wub6LRFiYtRFt6Xw
- [2] LIGHT BICYCLE, 2017 *Rim Brake or Disc Brake ? Is There a Clear Winner?* [online] [cit.2021-09-15] Dostupné z: <https://www.lightbicycle.com/newsletter/Disc-brake-vs-rim-brake--is-there-a-clear-winner-.html>
- [3] Marshal,A 2019 *Brief hystory of braking systems* [online] [cit.2021-09-15] Dostupné z: <https://www.welovecycling.com/wide/2019/10/09/a-brief-history-of-braking-systems/>
- [4] Keong, L. Teon, CH 2018 *Topology analysis of bicycle rim brake pad to improve braking performance* [online] [cit.2021-09-15] Dostupné z: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/76/mateconf_icvssd2018_04004.pdf
- [5] Lindsey, J. and Lodge, G. 2021 *Your go-to guide to disc brakes for bikes, Bicycling* [online] [cit.2021-09-15] Dostupné z: <https://www.bicycling.com/bikes-gear/a20023166/the-beginners-guide-to-disc-brakes/>
- [6] SICKBIKER, 2017 *Bicycle Disc Brakes - How To Prevent Overheating. Ice Technologies, Pads With Fins*, in YouTube [online] [cit.2021-09-15] Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=li61wVqpyAM>
- [7] Priyanka, Miss & Kale, Prachi. 2020. "*FORCE & FRICTION ANALYSIS OF DISC BRAKE OF 2 WHEELER*". [online] [cit.2021-09-15] Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/343788297_FORCE_FRICTION_ANALYSIS_OF_DISC_BRAKE_OF_2_WHEELER
- [8] Kubatova, D and Melichar, M (2019) *Roughness Evaluation Using Abbott-Firestone Curve Parameters*, Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, pp. 0467-0475, B Katalinic (Ed.) Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-22-8, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10./2507/30th.daaam.proceedings.0,63

- [9] BUMBÁLEK, B 2005 *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci*. [online] [cit.2021-09-15] Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf
- [10] MADL, J., HOLEŠOVSKY, F. *Integrita obroběných povrchu z hlediska funkčních vlastností*. Miroslav Slama. 1. vyd. Usti nad Labem: UJEP, FVTM Usti n. Labem, 2008. 230 s. ISBN 978-80-7414-095-2.
- [11] HALEVI, G. *Process and operation planning*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003. ISBN 14-020-1653-0. [obrázek č.12]
- [12] Bumbálek, L. aj.: *Kontrola a měření*. Informatorium Praha. 2009. ISBN 978-80-7333-072-9
- [13] Bumbálek, L. 2008 *Jakost povrchu a její význam pro funkci ploch součástí*. QMprofi [online] [cit.2021-09-15] Dostupné z: https://www.qmprofi.cz/33/jakost-povrchu-a-jeji-vyznam-pro-funkci-ploch-soucasti-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EkV75G4Ef0m1ykRJA65X_UhJsiLzWm2bjg/?query=jakost%20povrchu&serp=1
- [14] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [15] DIGITAL METROLOGY 2014 *Three steps to understanding surface texture* [online] Dostupné z: <https://digitalmetrology.com/tutorials/3-steps-to-understanding-surface-texture/>
- [16] Neslušán, M. aj.: *Experimentálné metódy v trieskovom obrábání*. ZU Žilina. 2007. ISBN 978-80-7318-488-9
- [17] WHITEHOUSE, D. J. *Handbook of surface and nanometrology*. Second edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2011], xxiii, 975 s. ISBN 9781420082012.;4
- [18] Leinveber, J, a Švercl, J. *Technické kreslení a základy deskriptivní geometrie*. 3. přeprac. vyd. Praha: Scientia, 1999. ISBN 80-7183-162-x. [obrázek č.13]
- [19] Stout, KJ, 2018 *Surface Engineering and Surface Roughness*. [online]. [cit. 2021-01-18]. Dostupné z:

- <https://ocw.snu.ac.kr/sites/default/files/NOTE/Precision%20Metrology%20Week14%20-%20Surface%20Engineering%20and%20Surface%20Roughness.pdf>
- [20] OLYMPUS, *Profile Method (Linear Roughness) Parameters* [online]. [cit. 2021-01-18]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/ru/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/> [obrázek 19]
- [21] Novák, Z. *Prostorové měření a hodnocení textury povrchu přístroji Taylor Hobson Ltd.* [online]. [cit. 2020-01-30] Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2_Novak_3D_mereni_textury.pdf
- [22] Coba S, Irene C, aj *Charakterization of surface topology with Abbot Firestone Curve* [2018] Obrázek č.20
- [23] Kubatova, D & Melichar, M [2019]. *Roughness Evaluation Using Abbott-Firestone Curve Parameters*, Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, pp.0467-0475, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-22-8, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.063
- [24] Hiter S, [2021] *What is statistic data analysis.* [online] [cit. 2021-01-18] Dostupné online z: <https://www.datamation.com/big-data/statistical-data-analysis/>
- [25] FORMPLUS BLOG 2017 *Qualitative vs Quantitative data* [online] [cit. 2021-01-18] Dostupné z: <https://www.formpl.us/blog/qualitative-quantitative-data>
- [26] PORTÁŮ MATEMATICKÉ BIOLOGIE, *Typy dat.* [online] [cit. 2021-01-18] Dostupné také z: <https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=aplikovana-analyza-klinickyh-a-biologickyh-dat--analyza-a-management-dat-pro-zdravotnicke-obory--data-jejich-popis-a-vizualizace--typy-dat>
- [27] IBM Cloud Education,. 2020 *Exploratory data analysis* [online] Dostupné z: <https://www.ibm.com/cloud/learn/exploratory-data-analysis>
- [28] Rodger, R., Peng, D., 2020 *Exploratory data analasys with* [online] [cit.2021-09-15] Dostupné online: <https://bookdown.org/rdpeng/exdata/exploratory-graphs.html>
- [29] Majaski, CH 2021 *Hypothesis testing.* Investopedia [online] [cit.2021-09-15] Dostupné z: <https://www.investopedia.com/terms/h/hypothesistesting.asp>
- [30] Dorda, M *Testování statistických hypotéz.* VŠB [online] [cit.2021-09-15]

Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~dor028/Aplikace_7.pdf

- [31] Meloun, Milan a Jiří Militký. *Interaktivní statistická analýza dat*. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 9788024621739
- [32] Dave. 2019 *Diferent types of errors in Measurement and error calculation*. WatElectrikal.com. [online] [cit.2021-09-15] Dostupné z: <https://www.watelectrical.com/different-types-of-errors-in-measurement-and-measurement-error-calculation/>
- [33] Einstein, A., B. Podolsky, and N. Rosen, 1935, “*Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*”, Phys. Rev. 47, 777-780. (obrázek č.12)
- [34] ČSN EN ISO 6507-1 (420374) *Kovové materiály-Zkouška tvrdosti podle Vickerse část 1: Zkušební metoda*.
- [35] DOLEŽAL, P., PACAL, B. *Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálu*. Brno: VUT 2006. 41 s.
- [36] J. Kamm and G.W. Woort. 2015 *An introduction to microindentation Methods* [online] [cit.2021-09-15] dostupné z: https://www.buehler.com/assets/solutions/technotes/vol1_issue6.pdf
- [37] Pavlina, E., Van Tyne, C. 2008 *Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels*. J. of Materi Eng and Perform 17 [online] [cit.2021-09-15] Dostupné na: <https://doi.org/10.1007/s11665-008-9225-5>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|----------|---|
| 2D | Dvourozměrný prostor |
| 3D | Třírozměrný prostor |
| ČSN | Česká státní norma |
| EN | Evropská norma |
| H0 | Nulová hypotéza [μm] |
| HA | Alternativní hypotéza |
| ISO | Mezinárodní organizace pro normalizaci |
| lr | Základní délka profilu drsnosti |
| ln | Vyhodnocovaná délka profilu drsnosti |
| α | hladina významnosti |
| μ | Průměr výběrového |
| Xs | šířka prvků profilu |
| Rp | největší výška výstupku profilu |
| Rv | největší hloubka prohlubně profilu |
| Rz | největší výška profilu |
| Ra | průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu |
| Rsm | průměrná šířka prvků profilu |
| Rmr | materiálový poměr |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obrázek 1 Opotřebená pryžová destička | 12 |
| Obrázek 2 Ráfkový brzdňý systém | 12 |
| Obrázek 3 kotoučový brzdňý systém..... | 14 |
| Obrázek 4 Minimální tloušťka kotouče doporučená výrobcem | 16 |
| Obrázek 5 překročení životnosti brzdové destičky | 17 |
| Obrázek 6 Opálený brzdový kotouč | 18 |
| Obrázek 7 A) Běžný brzdňý kotouč B) Ultra lehký kotouč C) Kompozitní kotouč | 19 |
| Obrázek 8 Nová kotoučová destička | 20 |
| Obrázek 9 Opotřebená kotoučová destička | 20 |
| Obrázek 10 Brzdové destičky s přídavnou chladicí vložkou..... | 21 |
| Obrázek 11 klíčové faktory ovlivňující integritu povrchu [10] | 22 |
| Obrázek 12 náklady na obrábění v závislosti na požadované jakosti povrchu [11] | 24 |
| Obrázek 13 parametry pro posuzování povrchu [18] | 25 |
| Obrázek 14 profil povrchu [14] | 26 |
| Obrázek 15 charakter textury povrchu [15]..... | 26 |
| Obrázek 16 Ra parametr [19]..... | 28 |
| Obrázek 17 Rz parametr [19]..... | 29 |
| Obrázek 18 Rsm parametr [19]..... | 29 |
| Obrázek 19 Rmr parametr [20] | 30 |
| Obrázek 20 Profil drsnosti, ze kterého vychází Abbot-Firestonova křivka [23] | 32 |
| Obrázek 21 Abbot Firestonova křivka [23] | 33 |
| Obrázek 22 Boxplotový graf [28] | 36 |
| Obrázek 23 Histogram [28] | 37 |
| Obrázek 24 Scatterplot [28]..... | 37 |
| Obrázek 25 Barplot [28] | 38 |
| Obrázek 26 Testování statistických hypotéz (chyba prvního a druhého druhu) [30] | 39 |
| Obrázek 27 Hustota pravděpodobnosti výskytu X_i [31] | 40 |
| Obrázek 28 Zkouška dle Vickerse [35] | 42 |
| Obrázek 29 Příklad značení tvrdosti dle Vickerse [33] | 43 |
| Obrázek 30 Příklad značení mikrotvrdosti dle Knoopu [35] | 44 |
| Obrázek 31 Mikrotvrdost dle Knoopu [35]..... | 45 |
| Obrázek 32 Značení vzorků | 48 |
| Obrázek 33 Vzorky typu A | 49 |
| Obrázek 34 Vzorky typu B | 50 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 35 Kalibrace přístroje | 51 |
| Obrázek 36 Ostřicí bod na snímané ploše | 52 |
| Obrázek 37 Přístroj Talysurf CLI s nastavenou odrazivostí..... | 52 |
| Obrázek 38..... | 52 |
| Obrázek 39 A) vlnitost plochy ve 2D B) drsnost plochy ve 2D po provedené filtraci..... | 53 |
| Obrázek 40 Drsnost plochy ve 3D | 54 |
| Obrázek 41 Průměrný profil povrchu pro měřenou plochu..... | 54 |
| Obrázek 42 Abbot-Firestonova křivka | 55 |
| Obrázek 43 Graf časové řady (Ra_A_N, Ra_A_P, Ra_A_Z) | 56 |
| Obrázek 44 Graf časové řady (Ra_B_N, Ra_B_P, Ra_B_Z)..... | 57 |
| Obrázek 45 Histogram pro (Ra_A_N, Ra_A_P, Ra_A_Z) | 58 |
| Obrázek 46 Histogram pro (Ra_B_N, Ra_B_P, Ra_B_Z)..... | 58 |
| Obrázek 47 Boxplotový diagram (Ra_A_N, Ra_A_P, Ra_A_Z)..... | 59 |
| Obrázek 48 Boxplotový diagram (Ra_B_N, Ra_B_P, Ra_B_Z) | 59 |
| Obrázek 49 Test odlehlých hodnot | 60 |
| Obrázek 50 Test odlehlých hodnot | 61 |
| Obrázek 51 Test normality dat Ra_N | 62 |
| Obrázek 52 Test normality dat Ra_B_N..... | 62 |
| Obrázek 53 Graf časové řady pro Ra_A_N a Ra_B_N | 63 |
| Obrázek 54 Histogram pro Ra_A_N a Ra_B_N..... | 64 |
| Obrázek 55 Výsledky F-testu pro parametry Ra_A_N a Ra_B_N..... | 65 |
| Obrázek 56 Výsledky T-testu pro parametry Ra_A_N a Ra_B_N..... | 65 |
| Obrázek 57 Srovnání parametrů drsnosti povrchu předního a zadního kotouče typu A | 66 |
| Obrázek 58 Srovnání parametrů drsnosti povrchu předního a zadního kotouče typu B | 67 |
| Obrázek 59 Srovnání parametrů drsnosti povrchu předních opotřebovaných kotoučů A a B | 68 |
| Obrázek 60 Srovnání parametrů drsnosti povrchu zadních opotřebovaných kotoučů A a B .. | 69 |
| Obrázek 61 Abbot-Firestonova křivka pro kotouče typu A | 70 |
| Obrázek 62 Abbot-Firestonova křivka pro kotouče typu A | 71 |
| Obrázek 63 Zařízení pro měření mikrotvrdosti (Micro-Combi Tester)..... | 72 |
| Obrázek 64 Připravené vzorky pro měření mikrotvrdosti | 72 |
| Obrázek 65 Porovnání mikrotvrdosti pro nové kotouče A_N, A_P a A_Z..... | 73 |
| Obrázek 66 Porovnání mikrotvrdosti pro nové kotouče B_N, B_P a B_Z..... | 73 |
| Obrázek 67 Srovnání tloušťky kotoučů typu A pomocí histogramu | 75 |
| Obrázek 68 Srovnání tloušťky kotoučů typu B pomocí boxplotového grafu..... | 75 |
| Obrázek 69 Srovnání tloušťky kotoučů typu C pomocí histogramu | 76 |

Obrázek 70 Srovnání tloušťky kotoučů typu C pomocí boxplotového grafu..... 76

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tabulka 1 Zkušební zatížení pro měření mikrotvrdosti dle Vickerse [35] | 43 |
| Tabulka 2 Zkušební zatížení pro měření tvrdosti dle Knoopu [35] | 45 |
| Tabulka 3 Parametry pro vzorky typu A | 49 |
| Tabulka 4 Parametry pro vzorky typu B..... | 50 |
| Tabulka 5 Průměrné hodnoty pro tloušťky kotoučů typu A..... | 75 |
| Tabulka 6 Průměrné hodnoty pro tloušťky kotoučů typu B | 76 |

