

Srovnání charakteristik povrchu brzdového kotouče osobního automobilu

Jan Machálek

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Jan Machálek
Osobní číslo:	T23358
Studijní program:	B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Srovnání charakteristik povrchu brzdového kotouče osobního automobilu

Zásady pro vypracování

- Vypracování literární rešerše na problematiku konstrukce a výroby brzdových kotoučů osobních automobilů.
- Přehled kovových i nekovových materiálů vhodných pro brzdové kotouče v automobilu.
- Návrh experimentálního postupu pro vyhodnocení charakteristik povrchu brzdových kotoučů.
- Experimentální testování dle doporučení.
- Vyhodnocení výsledků a formulace závěru.

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam doporučené literatury:

1. PATA Vladimír, KUBIŠOVÁ Milena, Statistické metody hodnocení jakosti strojírenských povrchů. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2018, 423 s. ISBN 978-80-7454-740-9
2. MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. Statistická analýza experimentálních dat. Vyd. 2., upr. a rozš. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1254-0
3. MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie. Košice: Viena, 2000. Edícia vedeckej a odbornej literatúry. ISBN 80-7099-430-4
4. POLAK, Adam a GRZYBEK, Janusz. The mechanism of changes in the surface layer of grey cast iron automotive brake disc. Online. Materials Research. 2005, roč. 8, č. 4, s. 475-479. ISSN 1516-1439. Dostupné z: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392005000400020>.
5. MALEQUE M.A.; DYUTI S.; RAHMAN M.M.; Material Selection Method in Design of Automotive Brake Disc. In: Proceedings of the World Congress on Engineering 2010, Vol III WCE 2010, June 30 – July 2, London, U.K., 2010, pp. 2322-2326.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Adam Cesnek
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: 2. ledna 2025
Termín odevzdání bakalářské práce: 16. května 2025

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 10. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Brzdy a jejich součásti jsou fundamentálním prvkem bezpečnosti v rámci automotive, jízdních kol a řady dalších dopravních prostředků. Tato práce se zaměří na charakteristiku povrchu kotoučové brzdy, která byla zatížená běžným provozem a povětrnostními podmínkami. Jako vzorek nám poslouží brzdový kotouč z osobního automobilu, který by jinak využití našel jen ve sběrném dvoře.

Klíčová slova: Brzda, disk kotoučové brzdy, měření povrchu;

ABSTRACT

Brakes and their components are a fundamental element of safety in the automotive industry, bicycles, and various other means of transport. This work focuses on the surface characterization of a disc brake that has been exposed to regular use and weather conditions. A used brake disc from a passenger car, which would otherwise end up in a scrapyard, will serve as the sample.

Keywords: brakes, disc brakes, surface analysis

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mě na cestě k vypracování této bakalářské práce podpořili.

Především bych chtěl poděkovat vedoucímu práce panu inženýru Adamu Cesnekovi za jeho odborné vedení, cenné rady, vstřícný přístup a trpělivost, které významně přispěly k dokončení této práce.

Velké díky patří také mým rodičům a přítelkyni za jejich podporu, motivaci a trpělivost během celého mého studia. Bez jejich zázemí a porozumění by tato práce nevznikla.

V neposlední řadě děkuji všem, kteří mi poskytli technické zázemí, konzultace či jinou formu pomoci během praktické části této práce.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 ROZDĚLENÍ AUTOMOBILOVÝCH BRZD DLE KONSTRUKCE.....	13
1.1 BUBNOVÁ BRZDA (VNITŘNÍ ČELISŤOVÁ)	13
1.1.1 Součásti bubnové brzdy	13
1.2 KOTOUČOVÁ BRZDA.....	14
1.2.1 Součásti kotoučové brzdy	15
1.3 VÝHODY A NEVÝHODY OBOU KONSTRUKCÍ.....	15
2 MATERIÁLY KOTOUČOVÝCH BRZD	16
2.1 HISTORIE MATERIÁLŮ VYUŽÍVANÝCH V BRZDNÝCH SYSTÉMECH	16
2.2 ŠEDÁ LITINA.....	17
2.3 SLITINY HLINÍKU	17
2.4 KARBON-KERAMIKA.....	18
2.5 BIMETALICKÉ DISKY	19
2.6 KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY BRZDOVÝCH KOTOUČŮ	21
3 MATERIÁLY PRO VÝROBU BRZDNÝCH DESTIČEK A JEJICH ZPRACOVÁNÍ.....	23
3.1 SMĚSI MATERIÁLŮ PRO VÝROBU KOMPOZITNÍCH BRZDNÝCH OBLOŽENÍ.....	24
3.2 REVIZE A KATEGORIZACE MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH K VÝROBĚ KOMPOZITNÍCH OBLOŽENÍ BRZD	25
3.3 POJIVA.....	26
3.3.1 Fenolová pryskyřice	26
3.3.2 Epoxidová pryskyřice.....	26
3.4 VÝZTUHY	27
3.4.1 Aramid.....	27
3.4.2 Sklo	27
3.4.3 Slupky banánů	27
3.4.4 Keramické kompozity	28
3.5 PLNIVA.....	28
3.5.1 Baryt.....	28
3.5.2 Poletavý popel.....	28
3.6 ABRAZIVA	29
3.6.1 Měď.....	29
3.6.2 Grafit	29
3.6.3 Titan	30
3.7 REGULACE ECE R90.....	31

4	METODIKA MĚŘENÍ ROVINNÝCH POVRCHŮ.....	32
4.1	KONTAKTNÍ MĚŘENÍ	32
4.2	BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ	33
4.3	STRUKTURA POVRCHU	34
4.3.1	Vlnitost povrchu	34
4.3.2	Drsnost povrchu	34
4.4	FILTRACE VÝSLEDKŮ.....	35
II	PRAKTICKÁ ČÁST	36
5	CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	37
6	MĚŘENÝ A REFERENČNÍ VZOREK.....	38
6.1	REFERENČNÍ VZOREK	38
6.2	MĚŘENÝ VZOREK	39
6.2.1	Příprava vzorku před měřením	40
7	POROVNÁNÍ VZORKŮ NA METALOGRAFICKÉM MIKROSKOPU	41
7.1	REFERENČNÍ VZOREK	42
7.2	MĚŘENÝ VZOREK	43
8	MĚŘENÍ POVRCHU.....	45
8.1	POSTUP MĚŘENÍ.....	46
8.2	MĚŘENÍ VZORKŮ.	47
9	DESKRIPTIVNÍ STATISTICKÁ ANALÝZA.....	48
9.1	ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT	48
9.2	BOXPLOTOVÉ GRAFY	49
9.3	GRUBBSŮV TEST	50
9.4	ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	51
9.5	ARITMETICKÉ URČENÍ DRSNOSTI POVRCHU	53
	ZÁVĚR.....	56
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	57
	SEZNAM OBRÁZKŮ	60
	SEZNAM TABULEK.....	62
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	63

ÚVOD

Klíčovým bezpečnostní prvek u automobilů a jiných dopravních prostředků, jsou na brzdové systémy kladeny vysoké nároky, jak na spolehlivost, tak i efektivitu. V historii se vyskytovaly rozličné druhy a mechanismy pro snižování rychlosti povozů, nejjednodušší systém využíval třecí síly.

Teoretická část práce se zaměří na popis dvou nejrozšířenějších konstrukčních variant užívaných automobily, brzdy bubnové a kotoučové. Dále se práce zaměří na materiály, které se používaly, používají a možný vývoj v blízké budoucnosti, při konstrukci jak disků, tak i brzdného obložení, ve formě kompozitních destiček.

Praktická část obsahuje porovnání opotřebovaných a nových brzdných kotoučů, pomocí metalografického mikroskopu a digitálního výškoměru. Součástí je také experimentální určení drsnosti povrchu na základě naměřených dat.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ROZDĚLENÍ AUTOMOBILOVÝCH BRZD DLE KONSTRUKCE

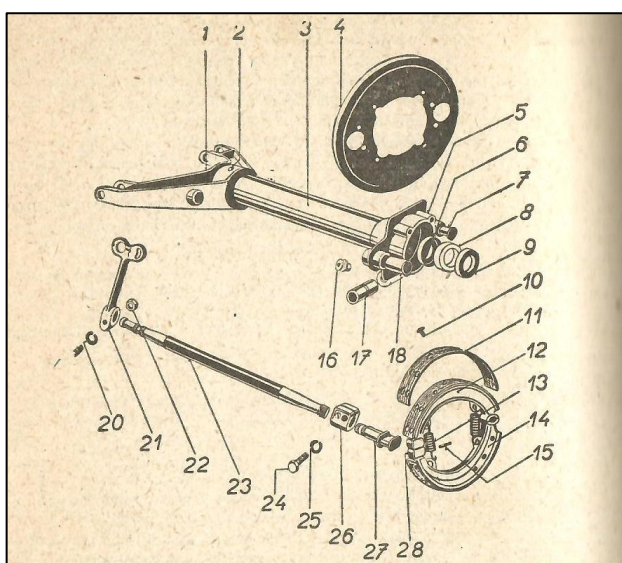
Brzdy lze dělit podle různých faktorů, buď podle ovládání brzd (ruční, nožní a nájezdové), podle působící síly (přímočinné, servobrzdy, nebo smíšené), podle místa účinku (kolové, převodové, motorové) a druhu brzdícího ústrojí (čelist'ové, pásové a kotoučové) [1].

1.1 Bubnová brzda (vnitřní čelist'ová)

Bubnová brzda je uložena u kol vozů. Ovládaná může být mechanicky, kapalinou nebo pneumaticky. Brzdné obložení s třecími segmenty je na vnitřním páru brzdových čelistí, které vyvinují tření potřebné k brzdění vozidla tím, že jsou přitlačovány k vnitřní ploše brzdového bubnu souběžně se otáčejícího s kolem vozidla [1].

1.1.1 Součásti bubnové brzdy

Na obrázku 1 je vyobrazené schéma bubnové brzdy a její součásti. Brzdové čelisti 12 a 14 jsou zakotveny na čepu čelisti 7, vsazeném do hrdla nápravy 5. spojeným s ním spojkou 26 a uložených ve vidlici závěsného ramena polonápravy 1. Klíč brzdový 27, který je spojený spojkou 26 s hřídelem 23, je poté uložený ve vidlici závěsného ramena polonápravy 1; páka brzdová 21 je nasazena na vnitřním konci hřídele 23. Brzda je chráněna proti vnikání nečistot z vnitřní strany krytem brzdovým 4, nasunutým na hrdlo polonápravy a k němu přinýtovaným. Z vnější části je čelist'ová brzda uzavřena brzdovým bubnem, na němž je pak připevněno vozové kolo.



Obrázek 1 Schéma vnitřní čelist'ové brzdy [1].

Efektivita této brzdy je způsoben třením brzdových čelistí o vnitřní obvod brzdového bubnu; čelisti jsou přitahovány klíčem brzdy 27. V základní poloze jsou brzdové čelisti drženy vrtanými pružinami 13 [1].

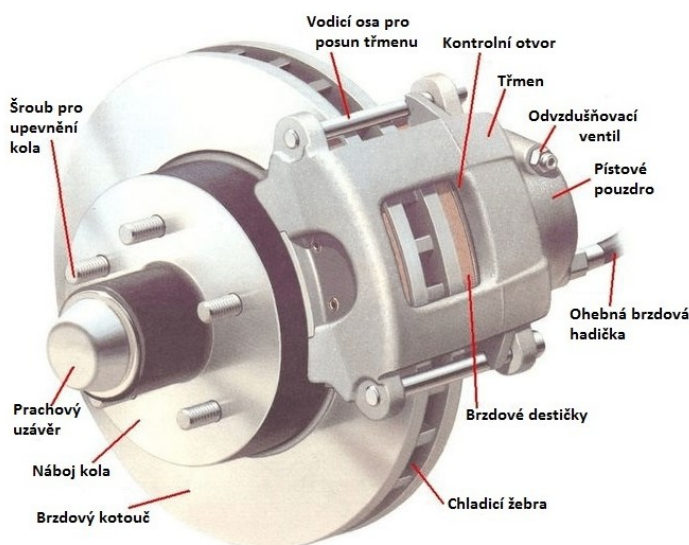
1.2 Kotoučová brzda

Kotoučová brzda k práci užívá pístu ve formě třmenu k vyvinutí tlaku na brzdné destičky, které jsou stlačovány současně na rotor – brzdový kotouč a tím je vyvoláno tření, tedy brzdná síla. Kotouč je pak napevno připevněn k náboji, jež je brzděn.

V moment, kdy je sešlápnut brzdový pedál, síla, která je vyvinuta na pedál je v posilovači zesílena. Tím je stlačován hydraulický olej působící stejným tlakem na píst osazený brzdou destičkou, ty se upínají na rotory z obou stran a zpomalují kola, čímž zpomalují a zastavují vozidlo. [2]

Dle Sabhadiya [2] je nejčastěji využívána u osobních automobilů, kvůli stabilnímu výkonu při vysokých rychlostech, odolnosti proti slábnutí brzdného účinku, nahrazují tedy bubnové brzdy. Princip ale může být využit i u jiných zařízení kde je třeba brzdit rotující hřídel jako třeba u jízdních kol.

Výhody této konstrukce mohou být v lepším odvodu vznikajícího tepla, jelikož brzdné elementy nejsou výrazně zakryté a umožňují proudícímu vzduchu je chladit. Odkrytí může být současně nevýhodou, jelikož se na kotouči mohou usazovat nečistoty, jako například prach, polétavá rez, voda a další. [2]



Obrázek 2 Schéma kotoučové brzdy [3].

Konstrukčně se dělí podle rozložení pístů. Pokud jsou písty na jedné straně rotoru jsou označovány jako brzdy s plovoucím třmenem, nebo druhá konstrukční možnost, kdy jsou písty po obou stranách rotoru označovány jako “brzda s protiběžnými písty”.

1.2.1 Součásti kotoučové brzdy

Kotouč neboli rotor, je rotující součást, která se otáčí spolu s kolem, jelikož je většinou montována přímo za něj. Kotouč v osobních vozech bývá nejčastěji z šedé litiny [3]. Může se lišit v provedení, kdy může být opatřen chladicími žebry, vrtán nebo třeba drážkován, to kvůli odvodu tepla, případných nečistot a vody. Tyto úpravy ovlivňují opotřebení brzdných destiček. Brzdné destičky jsou zpravidla vyráběny z kompozitních materiálů [3], uloženy jsou ve třmenu.

1.3 Výhody a nevýhody obou konstrukcí

Podle [3] jsou kotoučové brzdy odolnější proti opotřebení a jednodušší na údržbu.

Přestože obě varianty brzd fungují na podobných základech hydrauliky, může se jejich výkon lišit. Sabhadiya vyzdvihuje kotoučové brzdy, pro jejich efektivitu, větší brzdnou sílu, odvod tepla a spolehlivost v prostředí se zvýšenou vlhkostí. Zároveň si varianta s kotoučem zachovává jistou jednoduchost z konstrukčního hlediska. Výhodou bubnové brzdy je možnost ji využít i pro parkovací stání, protože zde působí menší teplotní roztažnost [4].

Zajímavé může být řešení u automobilů, kde se kombinují obě varianty těchto brzd. Typický automobil je těžší v jeho přední části, kde je uložen motor, to při brždění způsobuje větší zatížení právě přední nápravy i z důvodů setrvačných sil. Je žádoucí mít efektivnější brzdy v této části vozidla. Umisťují se tedy kotoučové brzdy na přední nápravy a bubnové na nápravu zadní [4].

2 MATERIÁLY KOTOUČOVÝCH BRZD

2.1 Historie materiálů využívaných v brzdných systémech

Vývoj automobilů a jiných dopravních prostředků požadoval i následnou inovaci materiálů užívaných k výrobě součástí kotoučových brzd, to se dá vypořádat hlavně u kompozitních materiálů využívaných k výrobě brzdných destiček.

Kromě volby samotných materiálů, je možné kotouče konstrukčně upravit a odlehčit pomocí drážek a děr. Pro potřeby skladování a přepravy tyto součásti lze opatřit povrchovou úpravou ve formě olejového filmu, laku, nebo galvanizací. Důležitá je hloubka těchto vrstev, jelikož samotným brzděním dochází k úbytku materiálu jak na rotoru, tak i na přítlačných brzdových destičkách.

Tam kde původně stačilo použít materiál zvyšující třecí vlastnosti a nějaký jednodušší mechanismus k vyvinutí třecí síly, bylo potřeba tento celkový mechanismus zefektivnit a vylepšit.

Brzdové kotouče byly z počátku vyráběny z šedé litiny, protože splňovala požadavky, na které byl kladen důraz. To byly zejména: dobrá tepelná vodivost, dlouhá životnost, nízká míra opotřebení a hlavně cena/výkon. Dále se využívají slitiny hliníku, pro letecký průmysl a sportovní využití se může objevit i kompozit s uhlíkovou maticí, nebo se do šedé litiny může přidat titan ten zvýší pevnost, ale sníží jeho třecí schopnosti [3]. Kromě kompozitních materiálů jsou na trhu i kotouče bimetalové.

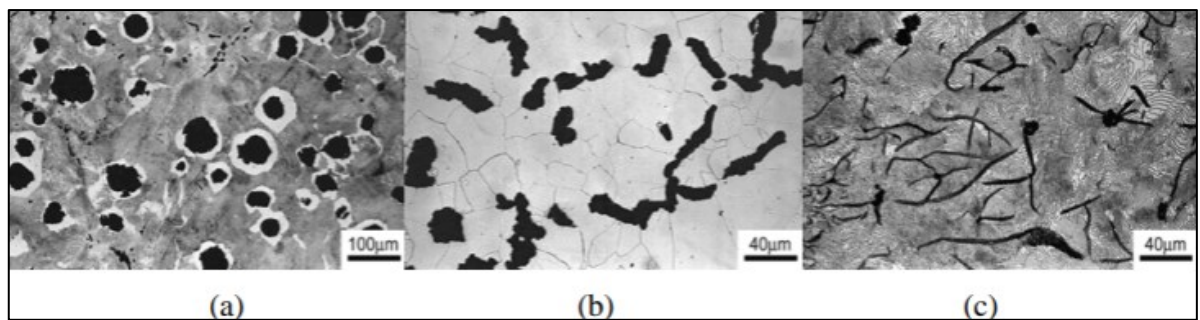
Díky dnešním technologiím v oblasti simulace jsme schopni použít metodu konečných prvků pro zkoumání a porovnání různých období již tradičně používaných a známých materiálů. S přibývajícím trendem elektromobility a opětovným navýšením hmotnosti těchto EV kvůli bateriím, by mohl přijít požadavek na další snížení váhy a zvýšení efektivity. Zároveň při brzdění vznikají vlivem tření prachové částice, které by dle nové Euro normy 7 měli splňovat určité požadavky. Tato skutečnost by také mohla ovlivnit pomyslný materiálový katalog, ze kterého bude třeba vybírat v budoucnu.

2.2 Šedá litina

Nejpreferovanějším materiálem k výrobě disků je šedá litina, je to díky vlastnostem materiálu a jeho ceny, proto se nejčastěji vyskytuje u osobních automobilů.

Disky z šedé litiny jsou často odlitky, to umožňuje modifikovat taveninu přísadami, používá se třeba křemík, nikl, vanad, mangan a další.

Šedá litina je také velmi výhodná díky redukci vibrací vzniklých během tření mezi diskem a destičky. A její tepelná vodivost se dá optimalizovat modifikací uhlíkové fáze, pro tuto vlastnost se nejvíce hodí uhlík ve formě vloček (viz obrázek 3 část c), je výhodnější než litina s červíkovým grafitem (b), nebo s kuličkovým grafitem (a[3]



Obrázek 3 Struktura litin [3].

2.3 Slitiny hliníku

Slitiny hliníku s karbidem křemíku jsou lehčí, ale jejich velkou nevýhodou je zvýšená tepelná vodivost, to se kompenzuje větší plochou disku, nebo jinými úpravami, často ale na úkor právě hmotnosti komponenty. [3]

2.4 Karbon-keramika

Klikněte nebo klepněte sem a zadejte text. Kromě šedé litiny lze využít například karbon keramiky, tedy kompozitní materiál s keramickou maticí a uhlíkovou výztuží (C/SiC), dále i bimetalů. Karbon-keramické disky, jsou řešením převážně pro automobily typu supersport. Na stránkách firmy MAT uvádějí, že jsou velmi responzivní a nevyžadují přílišnou sílu pro výraznou deceleraci. Mají i skvělý odvod tepla. [5]

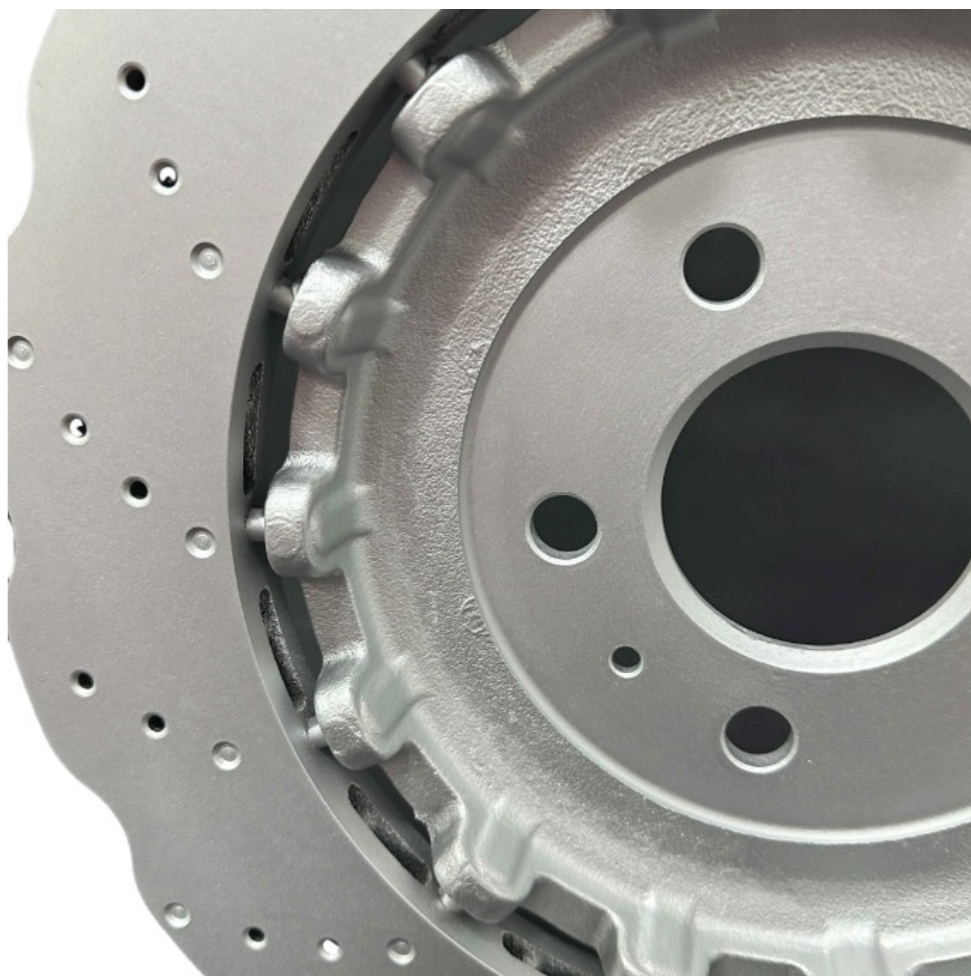
Keramická část tohoto kompozitu je tvořená karbidem křemíku (SiC). Tento karbid je vysoce tvrdý a plní funkci matrice, Uhlíková vlákna (C) jsou pak výztuží a výslednému kompozitu pomáhají k vysoké lomové houževnatosti a pro ně typickou kvazi-tažností. Výsledný materiál je při jeho nízké hmotnosti odolný vůči mechanickému i tepelnému namáhání, protože hustota kompozitu je skoro třikrát menší než hustota šedé litiny (viz tabulka 1) [6]. Pro přehledné porovnání šedé litiny a C/SiC kompozitu může být použita následující tabulka zpracována v práci Bence Rancsóa ze Slovenské technické univerzity v Bratislave [6].

Tabulka 1 Porovnání materiálových vlastností. [6]

	C/SiC	Šedá litina
Hustota [$g \cdot cm^{-3}$]	2,45	7,25
Pevnost v tahu [MPa]	20-40	200-250
Modul pružnosti [GPa]	30	90-110
Tepelná vodivost [$W \cdot (mK)^{-1}$]	40	54
Měrná tepelná kapacita [$kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}$]	0,8	0,5

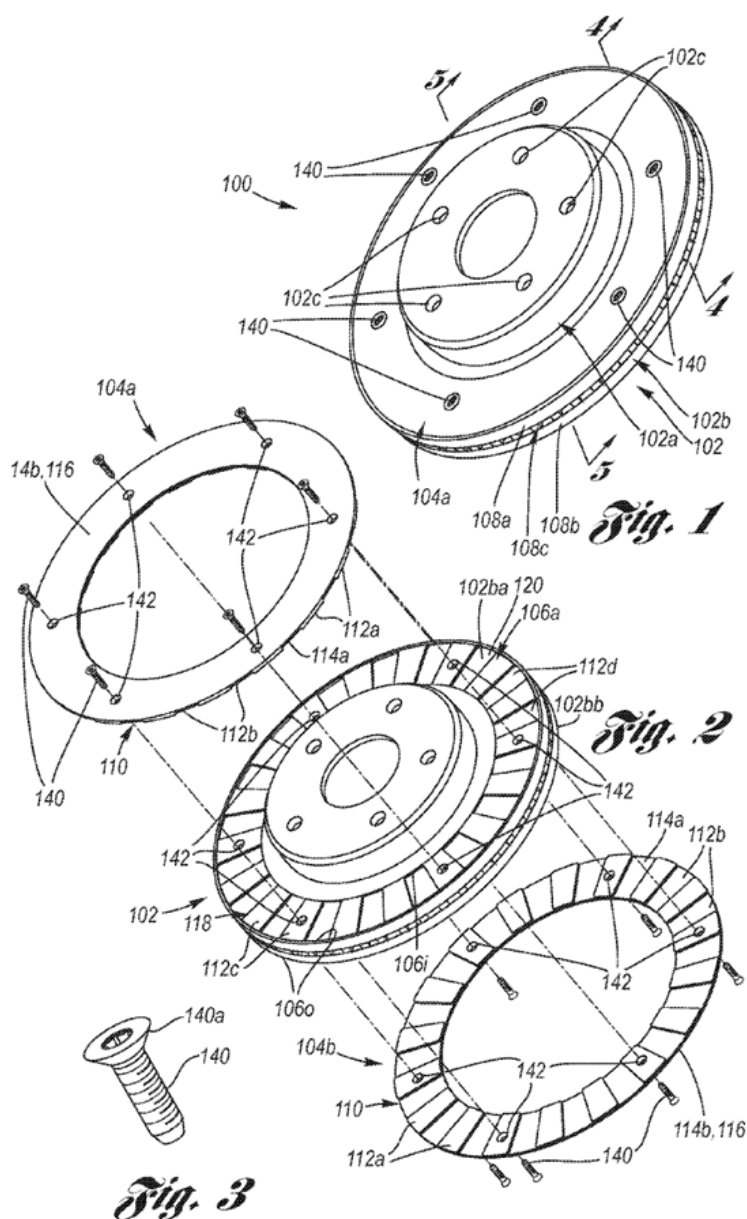
2.5 Bimetalické disky

Bimetalické disky jsou efektivnější než disky z šedé litiny při nestabilních podmínkách, jako například vyšší vlhkost okolí, kombinací dvou kovů lépe odolávají teplu vznikajícího během tření. To hlavně zmiňují při rychlém shrnutí právě na stránkách MAT [5]. Jako hlavní výhody je brzdný výkon, a hlavně nižší hmotnost. Nevýhodou je pak vyšší cena a náročnost na výrobu v porovnání s konvekčním litinovým diskem. Firma MAT navrhuje využití těchto disků pro vozidla typu SUV nebo výkonnějších sedanů.



Obrázek 4 Bimetalová brzda výrobce Frontech [7]

Nicméně v jedné z publikovaných žádostí o patentování [8] bimetalického disku v abstraktu, hovoří, že k tělu disku z prvního kovového materiálu je přidán na funkční plochu brzdíče kovový materiál druhý. Obě části jsou spojeny pomocí soustav drážek a zubů. Na rozhraní těchto spojení dochází k přenášení tepelného a mechanického namáhání. Typickou bimetalickou kombinací materiálů pro výrobu brzdných kotoučů jsou hliník a šedá litina. Hliník, který tvoří tělo disku, byl zvolen pro odlehčení součásti, nemusí být odolný proti otěru, stačí, aby odváděl teplo ze styčné plochy. Brzdné vložky jsou z šedé litiny, o ně se otírají brzdné destičky.



Obrázek 5 Vyobrazení bimetalické brzdy z patentu [8]

2.6 Konstrukční úpravy brzdových kotoučů

Při výběru brzdných kotoučů je možné se setkat i s různými úpravami, například dutiny pro odvětrávání, drážky na povrchu brzdíče a děrování. Kromě lehké redukce váhy touto úpravou můžeme dosáhnout i lepší odvod vzniklých prachových částic a odvod tepla pomocí přívodu studeného vzduchu k místu kontaktu obou komponent. Nevýhodou může být vyšší opotřebení brzdných destiček.

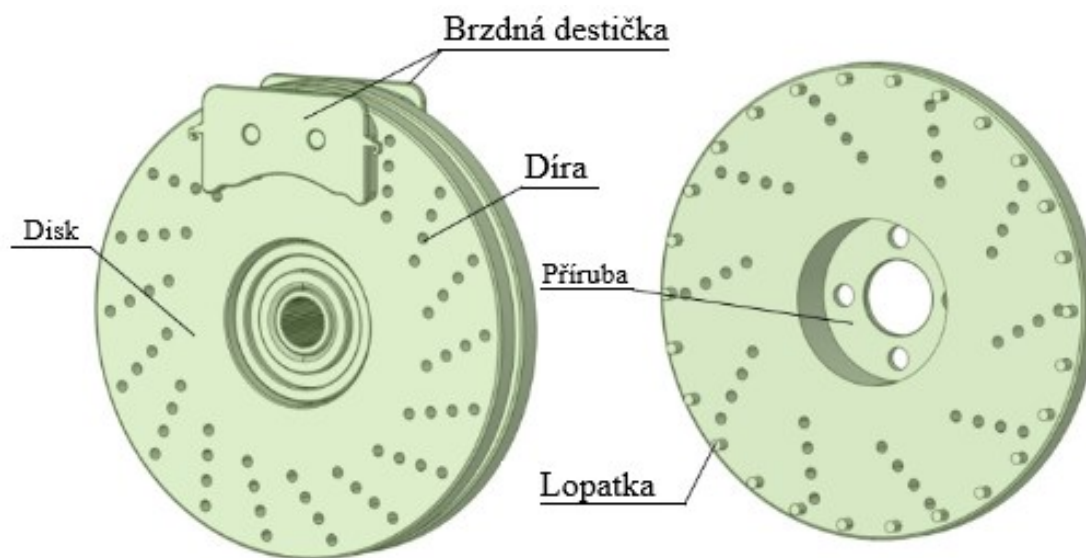
Vlivem obrábění mohou vzniknout a vznikají mikrotrhliny v okolí děr a drážek což může vést k prasklinám.

O účincích těchto úprav se lze přesvědčit například pomocí FEM analýzy. V časopise nazvaném APPLIED SCIENCES publikoval Soojin Park [9] kolektiv právě jednu takovou. Pro tento experiment byl využit inženýrský program ANSYS, vstupní parametry vymodelované součásti a krajní podmínky jsou shrnuté v tabulce 2, stejně jako vlastnosti materiálu pro disk, který byl vyroben z šedé litiny.

Tabulka 2 Vstupní parametry použité ve FEM analýze [9]

Parametr	Hodnota
Hmotnost vozidla [kg]	1500
Počáteční rychlost [$m \cdot s^{-1}$]	40
Efektivní poloměr rotoru / kola [mm]	406
Povrch brzdné destičky [mm^2]	68
Koeficient tření	0,2
Hustota [$kg \cdot m^{-3}$]	7200
Youngův modul [Pa]	$1,1 \cdot 10^{11}$
Poissonuv poměr [-]	0,28
Koeficient teplotní roztažnosti [K^{-1}]	$1,1 \cdot 10^{-5}$

Po provedení analýzy [9] a upravení součásti pomocí odvozených ideálních rozměrů a umístění podle výhodných šablon drážek, děr a vnitřních lopatek větrací dutiny, možné vidět na obrázku 6, se dají výsledky interpretovat a sumarizovat následovně:



Obrázek 6 Model disku brzdy pro FEM analýzu. [9]

1. Pomocí první optimalizace tvarů všech výše zmíněných prvků napětí snížilo o 28,4 % oproti disku neupravenému z původních 64,04 MPa na 45,85 MPa a teplota byla snížena o 6,57 °C z původních 45,90 °C. [9]
2. Následně bylo Soojin Park a týmem zjištěno, že největší vliv na výsledek má optimalizace lopatek větrací dutiny. Výsledky byly následující v porovnání s původním řešením: napětí nižší o 23,2 % na nových 49,20 MPa z původních 64,04 MPa a teplota taky klesla z 45,90 °C na 35,12 °C, pokles teploty byl tedy roven 10,77 °C. [9]
3. Finální design by tedy podle FEM analýzy měl být následující: 30 děr ve tvaru drážky s průměrem 4 mm a tvar vnitřní lopatky ve větrací dutině má být prohnutý, s délkou 58 mm s průměrem 4 mm. [9]

3 MATERIÁLY PRO VÝROBU BRZDNÝCH DESTIČEK A JEJICH ZPRACOVÁNÍ

Ve výrobě brzdnych destiček a jiných, jim podobných, částí je patrný velký vývoj. Je to typický díl, kde je možné uplatnit vlastnosti kompozitních materiálů.

Typická brzdna destička se skládá ze tří vrstev. První je opěrná deska nebo také nosná deska, obrázek 7 pozice 1. Tato deska je ještě lakována pro dodatečné tepelné izolování. Dodává celému celku pevnost a musí zaručit pohyblivost na třmení. Na desce je nanesená další vrstva, lepidlo, nebo jiná adhezivní vrstva, spojuje první a třetí vrstvu. Třetí vrstva je třecí směs, vyobrazená na obrázku 7 třetí pozici. [10]



Obrázek 7 Průřez brzdou destičkou [10]

Jelikož destička je z této brzdny dvojce ten jedinec, u něž vlivem tření dochází k abrazi a úbytku materiálu více než u tvrdšího rotoru, dostává se tento prach a další částice do ovzduší. Tím vzniká poptávka pro nové přírodní kompozity, které nahrazují dnešní syntetické a materiály škodlivé okolí.

3.1 Směsi materiálů pro výrobu kompozitních brzdných obložení

Složky směsi pro výrobu kompozitních materiálů, rozdělujeme podle jejich funkce. Dělíme je na pojivo, výztuž a samotný třecí materiál. Jako nejčastější pojivo udává AKEBONO fenolovou pryskyřici, první zleva na obrázku 8. Výztuž definuje jako kovová a aramidová vlákna, druhý a třetí zleva na obrázku 8. Jako třecí materiál se může využít cokoliv, co doplní směs o požadovaný třecí koeficient. Příkladem je grafit, nebo mleté kešu skořápky, poslední dva na obrázku 8. [11]



Obrázek 8 Přísady do směsi na brzdné destičky. [11]

Další požadavky na třecí materiál jsou snížení vibrací a pískání, použitý materiál by neměl způsobovat deformace kotouči. Neměl by vést teplo, aby destička nepřenášela teplo dál do třmene, což by mohlo zahřívát brzdnu kapalinu. [11]

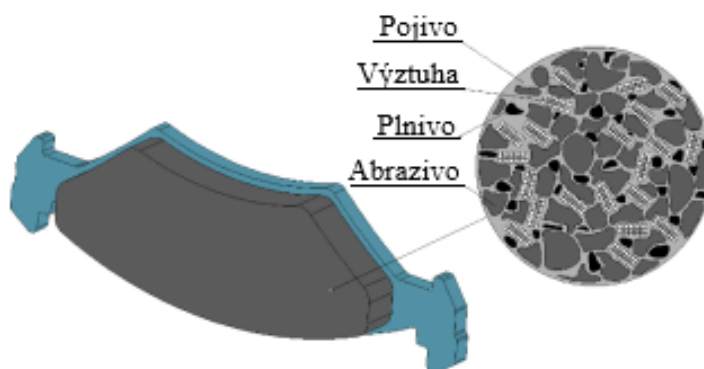
Výrobce ADVICS v článku na svém webu [12] ještě doplňuje výběr materiálových směsí používaných pro výrobu těchto komponent. Zmiňuje, že se přidával azbest, který se zpočátku hojně využíval pro své vlastnosti jako je tepelná a mechanická odolnost. Využívání azbestu ale skončilo z důvodů zdravotních rizik. Nástupcem azbestu se stala měď, vznikla tím, ale další obava o zamořování životního prostředí. Proto se v roce 2021 zavedlo nařízení, že výrobci mají cílit na snížení 5% hmotnostního obsahu mědi na nových 0.5 % do roku 2025. Ve směsích se měď začala nahrazovat jinými materiály, ať už keramikou, nebo přírodními materiály. [12]

3.2 Revize a kategorizace materiálů používaných k výrobě kompozitních obložení brzd

Následuje přehled různých kombinací používaných se v průmyslu, nebo jen zajímavých experimentů a studií, některé ve své práci shrnuje Andrzej Borawski [10], ta byla doplněna dodatečnou rešerší.

Podobně jako AKEBONO [11] i Borawski [10] ve své práci dělí jednotlivé složky výsledného kompozitu na složky podle jejich úlohy ve směsi, tedy na pojiva, aditiva, plniva a abraziva. Stejně tak popisují tyto složky i jiní [13], [14], [10]. Dále můžeme dělit i podle původu na umělé a přírodní [14], [10]. Nebo podle abraziv, které bývají dominantní komponentou ve směsi, dělení je následující:

- Kovové: např ocel, měď, nebo jiné kovy. Charakteristická je vysoká odolnost a tepelná vodivost, v kombinaci s diskem z šedé litiny dochází k jeho abrazi. [10]
- Polo-kovové: směs kovů s organickými materiály, nižší odolnost a tepelná vodivost, větší opotřebení, oproti kovovým. [10]
- Bez azbestové organické nebo keramické: organický materiál často vyztužen aramidovými, skleněnými nebo keramickými vlákny. Teplu odolné, odolné, lehké a tiché při brždění, často ale křehké. Pro svou náročnost na výrobu jsou dražší. [10]
- Karbon-karbon: podobné keramickým, vysoce odolné teplu, vysoký třecí koeficient, lehké, často využívané u sportovních automobilů. [10]
- Ekologické: využití materiálů z biomasy, například odpady z výroby jídla. Vlastnostmi podobné všem předchozím. [10]



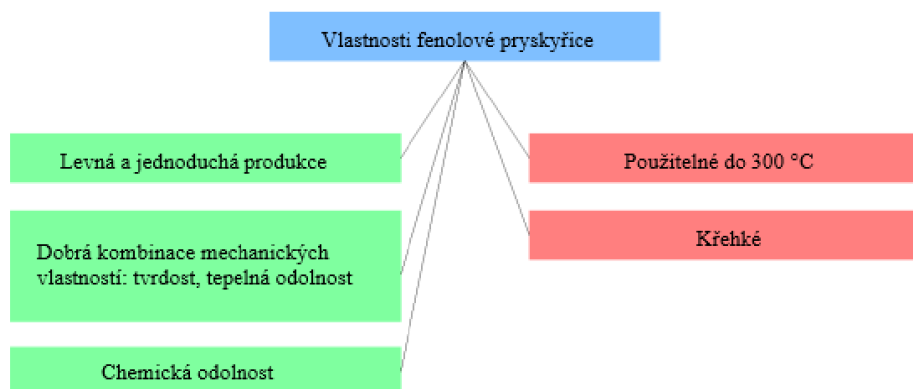
Obrázek 9 Struktura brzdného kompozitu na destičce. [10]

3.3 Pojiva

Největší zastoupení zde mají pryskyřice. přidávat se musí v přesně daném množství. Čím méně pryskyřice tím se snižuje trvanlivost destičky, čím více bude pojiva tím víc se snižuje tím třecí koeficient při vyšších teplotách a zvyšuje se tvrdost.

3.3.1 Fenolová pryskyřice

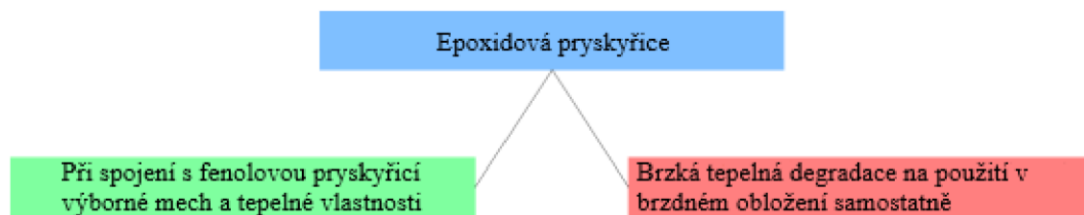
Je to pryskyřice zejména používaná pro výrobu třecích segmentů. Objem pryskyřice je v destičce mezi 5 až 35 %. Využívaná je v automotive průmyslu pro své výhodné vlastnosti jako je nízká teplotní roztažnost a vysoká odolnost proti mechanickým deformacím, odolná je i chemicky to vše za nízkou cenu. Funkční je do 300 °C, kdy se může dostavit fenomén zvaný brake fading, tzn. pokles účinnosti brzdových destiček při zahřátí. Jelikož je tento materiál křehký, přidáním olejů, nebo silikonové gumy se křehkost snižuj. Modifikací fenolové pryskyřice právě silikonovou gumou vzniká silikonová pryskyřice. [10][15]



Obrázek 10 Grafické shrnutí vlastností Fenolové pryskyřice [10]

3.3.2 Epoxidová pryskyřice

Epoxidová pryskyřice je hojně používaný materiál v průmyslu. Má nižší tepelnou odolnost, začíná degradovat při 260 °C a při 100 °C dochází k 7% ztrátě hmotnosti. Je možné ji kombinovat s fenolovou pryskyřicí, zvýší se tepelná odolnost a mechanické vlastnosti. [10]



Obrázek 11 Grafické shrnutí vlastností epoxidové pryskyřice [10]

3.4 Výztuhy

3.4.1 Aramid

Aramid je materiál složený z tuhých molekulárních řetězců orientovaných podél osy vlákna. Tato struktura umožňuje využít kovalentních vazeb podél polymeru, což vede k vysokému Youngovu modulu a pevnosti. Prodává se pod různými obchodními názvy, z nichž nejznámější je Kevlar. [16][10]

Aramidová vlákna představují vynikající alternativu k azbestu, a proto se používají jako výztuž v brzdových destičkách [17]. Materiál se dobře chová při vysokých teplotách. [10]

3.4.2 Sklo

S přechodem od azbestu začal automobilový průmysl zkoumat použití skla ve formě skelných vláken jako vhodné náhrady. Tento materiál má dobré mechanické vlastnosti zejména tvrdost a odolnost proti opotřebení. [10]

Na druhou stranu bylo také pozorováno, že v závislosti na provozní teplotě mají brzdové destičky se skelnými vlákny tendenci vytvářet ochranný film na brzdovém kotouči. To je způsobeno rozpadem pojiva a „vytahováním“ vláken. Následně se usazují na třecí ploše [18]. Tento jev může vést ke zvýšenému opotřebení destičky, nežádoucím vibracím a hluku, zejména pokud je obsah skelných vláken vysoký (např. 10 % objemových). Tyto negativní jevy byly částečně zmírněny použitím kratších vláken. [19], [20]

3.4.3 Slupky banánů

V současnosti se využívají jako hnojivo nebo se jednoduše likvidují jako odpad. Klasifikovány jsou jako netoxické pro lidské tkáně, a tedy bezpečné pro použití v různých průmyslových odvětvích. Fyzikální a chemické testy banánových slupek ukázaly, že jsou složeny především z antioxidantů a pektinu. [10]

Tímto řešením se ve své práci zabýval tým z Ahmadu Bello University v Nigerii [21]. Nahrazován byl azbest částicemi dekarbonované banánové slupky (uncarbonized banana peel; BUNCp) a uhlíkováné slupky (carbonized banana peel; BCp). Lepší schopnost se vázat na použitou pryskyřici měly BUNCp při 20 hmotnostních % pojiva, fenolové pryskyřice, zatímco u karbonizovaných částic (BCp) ani při 30 hmotnostních % pojiva nedošlo k výraznému zlepšení vazby. Výsledky tohoto výzkumu ukazují, že částice banánových slupek mohou být účinně použity jako náhrada za azbest při výrobě brzdových destiček. [21]

3.4.4 Keramické kompozity

Keramické kompozity jsou materiály složené alespoň ze dvou fází: pojiva a výztuže vložené do pojiva. Jednou z nejběžnějších kombinací používaných v automobilovém průmyslu je karbid křemíku (pojivo) a uhlíkové vlákno (výztuž). [10]

Díky své struktuře se keramické kompozity vyznačují příznivými mechanickými vlastnostmi, jako jsou: vysoká odolnost a dlouhá životnost (životnost brzdových systémů využívajících C/SiC může být až pětikrát delší než u konvenčních řešení), odolnost vůči vysokým a rychle se měnícím teplotám, nízká tepelná roztažnost a nízká hmotnost.[10]

Hlavní nevýhodou tohoto typu materiálu je nestabilita součinitele tření, závislosti na třecích podmínkách se hodnota může pohybovat od cca 0,2 až po 0,8. Navíc výroba těchto kompozitů vyžaduje specializované zařízení, je časově náročná a vede k vysokým nákladům na finální produkt [10]

3.5 Plniva

3.5.1 Baryt

Baryt je velmi dostupný, levný a tím pádem hojně využívány právě jako plnivo pro v brzděném obložení. Má vysokou hustotu a výhodné tribologické vlastnosti, které se při zvyšování teploty mění jen minimálně. [10].

Sugözü a Behcet v jejich práci [22] zabývající se právě efektem barytu ve směsi, porovnávali různý obsah barytu ve směsi, od 20 gramů přes 30 gramů až po 40 gramů. Nejmenší zastoupení barytu ve směsi znamenalo největší koeficient tření, s rostoucím obsahem však tento koeficient klesal. S rostoucím obsahem přidaného barytu klesala směsí celková hustota, zároveň však klesala tvrdost měřená podle Brinella. [22]

3.5.2 Poletavý popel

Jedná se o zbytkový popel vzniknutý při spalování v továrnách, nebo spalovacích elektrárnách. Zbytkový odpadní materiál, má využití jako plnivo a tím se recykluje již vzniklý odpad. Obsahem takového popílku může být křemík, hliník nebo železo, případně zbytky dalších přírodních materiálů jako jsou horniny, nebo nespálený uhlík. Nekonstantní složení se jeví jako nevýhodné, jelikož vždy záleží na druhu uhlí a typu kotle, ve kterém je spalováno, mění se složení popílku je kompenzováno jeho nízkou cenou. [10]

Podle Malhotra a kolektivu [23], se při obsahu popela do 20% pevnost nezvyšovala, dokonce klesala. Od 30 % objemu popílku se začaly moduly pružnosti a pevnosti zlepšovat. Popel se ale začal chovat jako abrazivo, protože vlivem braking fade fenoménu začal na kotouči vnikat film právě z pomalu připékajícího-se popílku. Závěrem je dodáno, že přidání popílku je možné, ale do 20 objemových procent.

3.6 Abraziva

3.6.1 Měď

Aby měď měla jakýkoliv vliv na vlastnosti kompozitu, musí jí být ve směsi více než 4 %, což přispívá k třecímu koeficientu. Bohužel při brždění z vyšších rychlostí, a tím vyšším brzděním tlaku, roste úroveň hluku. Měď tvoří ochranný film na povrchu obložení, zvyšuje tím tepelnou vodivost, což snižuje pravděpodobnost přehřívání.

Velká nevýhoda mědi je její škodlivost pro člověka a životní prostředí, což vede k její regulaci ve směsích a tak je nahrazována grafitem nebo titanem. [10][24][25]

3.6.2 Grafit

Používá se přírodní, umělý nebo expandovaný grafit. Je odolný proti vysokým teplotám, začíná sice oxidovat už v rozmezí 180 až 300 °C. Tato vlastnost jej zařadila jako vhodný materiál pro využití v brzděných destičkách pro letecký průmysl. V automotive nahrazuje měď ve směsích, jelikož funguje podobně. [10]

Grafit umí vázat oxidy železa vznikající na kotoučích, tvoří tím ochranný film na obou částech třecího páru. Jakožto vodič tepla, odvádí teplo z bodů kontaktu, chrání tak pojivo před tepelnou degradací. Přidáním grafitu do směsi je brždění tišší.[26][10]

3.6.3 Titan

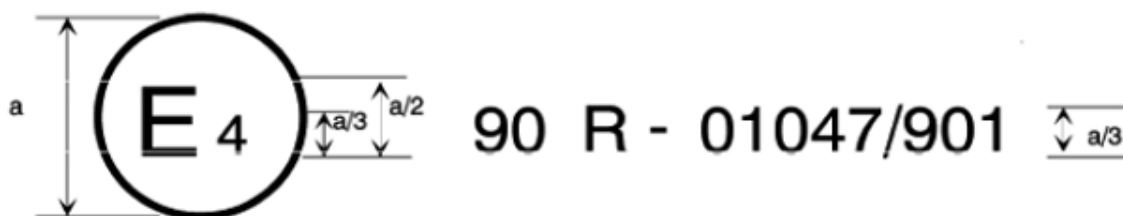
Titan se osvědčuje jako náhrada mědi, zejména při vysokých teplotách, kdy se projevují jeho mazací vlastnosti. Rovněž vyrovnává změny třecího koeficientu v závislosti na rostoucí teplotě. To vede ke snížení hluku při brzdění. Mechanické vlastnosti titanu rovněž zabraňují tvorbě filmu na brzdovém kotouči a to díky nízké adhezi k železu. Brzdové destičky s obsahem titanu jsou navíc méně náchylné k brake fade. [10]

Nevýhodou je cena titanu, navyšující celkovou cenu destiček. Keramická forma titanu, titan draselný, se rád páruje s aramidovými vlákny a bývá pojen fenolovou pryskyřicí. [10] [27] [28]

3.7 Regulace ECE R90

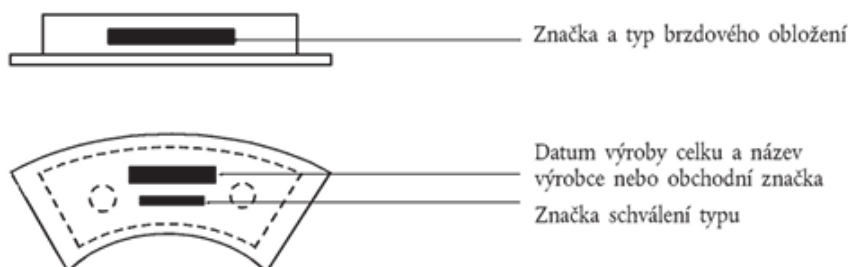
Jelikož je brzdové obložení pravidelně servisováno a spotřebitel není povinen využívat náhradní díly vyrobené pouze výrobcem automobilu, je možnost vybírat si díly dle vlastního uvážení, ať už z ekonomického pohledu, výkonosti obložení, nebo složení brzdové směsi. Poptávka dává příležitost jiným výrobcům k dodávání svých dílů konečným zákazníkům, aby ale byla zaručena všeobecná bezpečnost a spolehlivost takovýchto výrobků, musí daný náhradní díl v Evropské Unii splňovat ECE R90.

V nařízení ECE R90 [29], je popsáno, jak provádět kontrolní testy, měření a jejich vyhodnocování. Udává značku i tvar certifikace a jeho umístění na výrobku.



Obrázek 12 Značka schválení [29]

Uvedená značka na obrázku výše schválení typu udává, že příslušný výrobek byl schválen v Nizozemsku (E4) podle předpisu č. 90. V tomto příkladu udávají první dvě číslice u čísla schválení typu, že v době vydání čísla schválení typu již předpis č. 90 zahrnoval sérii změn 01; následující tři číslice jsou schvalovacím orgánem přiděleny typu brzdového obložení a zbývající tři číslice jsou schvalovacím orgánem přiděleny čelisti nebo destičce. Všechny osm číslic společně tvoří číslo schválení pro uvedený typ náhradní části s brzdovým obložením. [29]



Obrázek 13 Příklad označení celku s obložením. [29]

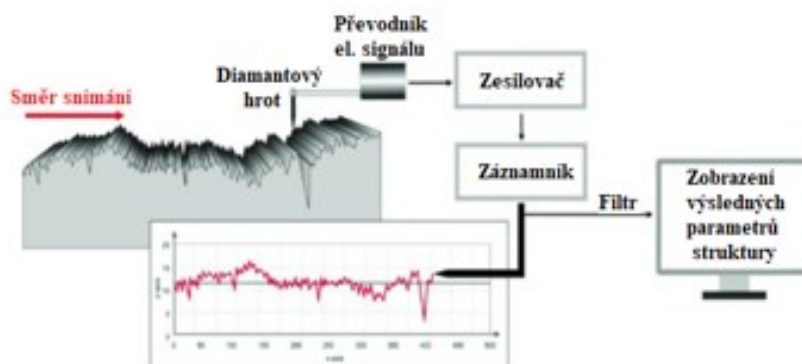
4 METODIKA MĚŘENÍ ROVINNÝCH POVRCHŮ

Kvantitativní metody měření povrchu pracují na matematickém principu popisu povrchu optickým profilometrem. Výhodou profilometrů je schopnost analyzovat nejen drsnost povrchu, ale i jeho vlnitost a tvar. Podle způsobu snímání povrchu rozlišujeme dva základní způsoby na: kontaktní a bezkontaktní.[30][31]

Metody kvalitativní, porovnávací vzorkovnici s reálným povrchem, k čemuž slouží dodnes využívané vzorkovnice povrchů, či komparační mikroskopy. Zde je však nutné upozornit, že se jedná o celkem zastaralou metodu, založenou na individuálních schopnostech povrch posuzujícího pracovníka.[30][31]

4.1 Kontaktní měření

Při kontaktním způsobu je povrch snímán diamantovým hrotem, který je posouván po povrchu a přitahován přitlačnou silou. Úchylinky povrchu způsobují, že hrot mění svou polohu ve svislé ose. Tyto změny polohy jsou převedeny na elektrický signál, ten je zesílen, filtrován, a nakonec počítačově zpracován (pomocí zvolených parametrů struktury povrchu – amplitudové, frekvenční, hybridní).[30][31]

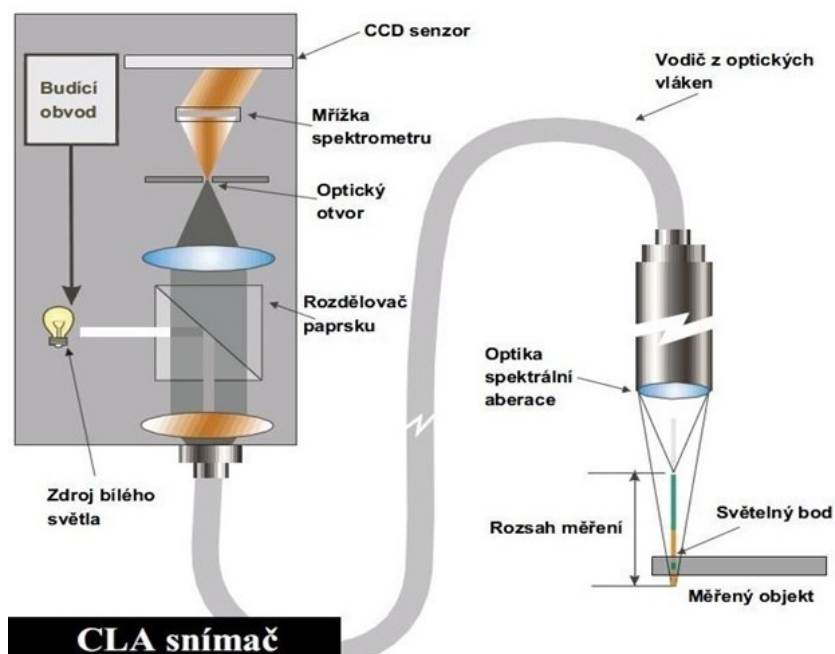


Obrázek 14 Princip kontaktního měření povrchu

Výhodou oproti bezkontaktnímu snímání je tolerance vůči nečistotám okolního prostředí i na vzorku. Hrot dokáže povrchové nečistoty po povrchu odsunout a na správnost výsledků nemá vliv ani olejová vrstva z předchozího obrábění. Nevýhodou je zkreslení výsledků kvůli poloměru zaoblení snímacího hrotu, velikosti přitlačné síly k povrchu nebo rychlost snímání. Velké riziko poškození hrotu kvůli náhlým změnám ve struktuře a nemožnost měřit měkké materiály, například elastomery, protože by se hrot do materiálu zabořil. [30][31]

4.2 Bezkontaktní měření

V praxi se využívá bezkontaktní způsob měření buď CLA (Chromatic Length Aberration) snímačem s rozlišitelností v řádu μm nebo laserové snímače s o řád nižší rozlišitelností.[30]



Obrázek 15 Princip CLA snímače [30]

Princip bezkontaktního snímání: Ze zdroje bílého světla míří paprsky na rozdělovač a optikou jsou směřovány na povrch vzorku. Na jednotlivých bodech povrchu je zaostřeno světlo jen určité vlnové délky. Z povrchu jsou paprsky odraženy zpět, prochází optickým otvorem, který propustí paprsky jen zaostřené vlnové délky. Potom prochází mřížkou, která je nasměruje na senzor. Každý zaostřený paprsek světla nese informaci o konkrétním bodě na povrchu měřeného vzorku. [31][30]

Výhodou je měření měkkých vzorků a vzorků citlivých na mechanické poškození hrozí poškrábání hrotem. Malé nebezpečí poškození či opotřebení přístroje. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena, udržování čistoty přístroje i okolí. Náchylnost na zkreslení výsledků vlivem nečistot. Od olejové vrstvy by se mohl paprsek špatně odrazit.

4.3 Struktura povrchu

Struktura povrchu je souhrnné označení pro opakující se geometrické odchylky povrchu od jeho ideálního tvaru. Tyto úchyly způsobuje deformace plynoucí z procesu obrábění, například špatná přímota vodících ploch nebo nežádoucí teplo vznikající ze vzájemného kontaktu obrobku s nástrojem. Struktura povrchu je tvořena tvarem základního profilu, drsností a vlnitostí. Dělí se podle velikosti rozteče. Při praktickém zkoumání jakosti povrchu jsou parametry drsnosti a vlnitosti navzájem překryty v jednom snímku. Pro další analýzu je nutné použití vhodného filtru a parametry od sebe oddělit. [30][31]

Základní profil se vyznačuje největší roztečí nerovností ve struktuře povrchu. Skutečný tvar základního profilu je možné získat odfiltrováním vlnitosti a drsnosti. K tomuto se využívá nejčastěji metoda nejmenších čtverců. Výsledkem je tvar, který se rozměrově shoduje s výkresovou dokumentací obrobku. [30][31]

4.3.1 Vlnitost povrchu

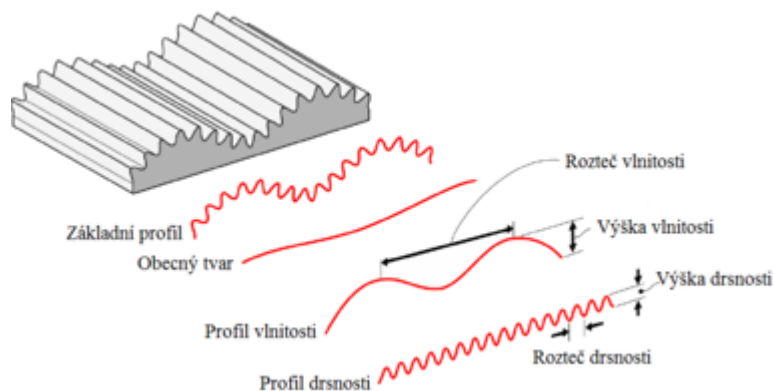
Vlnitost povrchu je část textury, na které je nanášena drsnost. Je dána makronerovnostmi, které mohou být způsobeny například chvěním nebo vibracemi celé obráběcí soustavy. Tento negativní systematický vliv je možné eliminovat například pravidelnou kalibrací stroje, vyvážením brousícího kotouče nebo vhodně navrženou životností obráběcích nástrojů. Vlnitost lze odfiltrovat Gaussovým filtrem. [31]

4.3.2 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu se vyznačuje minimální roztečí nerovností. Je obrazem zvolené technologie obrábění. Stopy, které nástroj na povrchu zanechá, se řadí do kategorie mikronerovností. Na drsnost povrchu má přímý vliv charakter úběru materiálu, tvorba třísky (vytrhávání částic z povrchu) a způsob jejího odvádění z obrobku, ale také materiál obrobku nebo použitá technologie. Patří sem ojediněle se vyskytující trhlínky nebo důlky. Drsnost se posuzuje v podélném a příčném směru. [30; 31]

4.4 Filtrace výsledků

Filtrace se využívá k získání finální drsnosti povrchu odfiltrováním tvaru a vlnitosti. Filtrací jsme schopni rozlišit nerovnosti způsobené rozdílnými roztečemi a jaký mají nerovnosti vliv na funkci povrchu. Pomocí filtrace rozdělujeme profily na krátkovlnné a dlouhovlnné složky.



Obrázek 16 Filtrace výsledků struktury povrchu [30]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Hlavním cílem bakalářské práce je statisticky porovnat a analyzovat rozdíly mezi novým kotoučem a opotřebovaným kotoučem při běžném provozu.

1. Příprava měřených a referenčních vzorků
2. Pozorování povrchů opotřebovaného kotouče a rotoru nového, jejich následný popis a vzájemná komparace.
3. Stanovení rozdílů v jakosti povrchu pomocí digitálního výškoměru
4. Experimentální určení drsnosti povrchu

6 MĚŘENÝ A REFERENČNÍ VZOREK

6.1 Referenční vzorek

Jako referenční vzorek byl vybrán brzdový kotouč od výrobce TOPRAN zakoupený na e-shopu autorozvody.cz pod objednávacím číslem 109 522, rozměry a parametry dle tabulky. Jedná se o náhradní neoriginální díl pro automobil Škoda Fabia I vyráběná v letech 1999 až 2007, v modifikaci sedan 6Y3 s motorizací 1,9 SDI. U tohoto automobilu bývá běžné osazení přední nápravy právě kotoučovou brzdou z důvodu uložení pohonného agregátu, tedy větší váhy působícího na čelní část vozidla. Zadní nápravy už bývají běžně osazené bubnovou brzdou.

Tabulka 3 Parametry referenčního disku [32]

Montovaná osa	Přední osa
Typ brzdového kotouče	Větráno
Vnější průměr [mm]	239
Průměr náboje [mm]	137
Centrovací průměr [mm]	65
Síla brzdového kotouče [mm]	18
Výška [mm]	34,9
Počet děr ráfku kola	5
Kruhový vývrt [mm]	100

6.2 Měřený vzorek

Opotřebovaný kotouč z automobilu jeví značné nerovnoměrné opotřebení, je tomu tak z důvodu špatného instalování brzdného obložení a nedodržení postupů předepsaných výrobcem automobilu. Při výměně obložení brzd nedošlo k očištění vodících ploch na třmenech a následné aplikaci maziva pro rovnoměrný pohyb třecích elementů, tím nedošlo k rovnoměrnému přitlaku na celou plochu kotouče. Po dodatečném seřízení se tento jev lehce zmírnil. Z důvodů bezpečnosti byla provedena výměna třecích segmentů i samotného brzdového kotouče. Vše proběhlo v souladu s dílenskou příručkou [33].



Obrázek 17 Příprava výměny brzdné soustavy



Obrázek 18 Demontovaný třmen



Obrázek 19 Rub demontovaného kotouče



Obrázek 20 Montáž nového disku

6.2.1 Příprava vzorku před měřením

Vzorek byl lehce mechanicky očištěn od hrubých nečistot jemným kartáčem. Poté byl zbaven hrubých nečistot z dutiny pro odvětrávání. Následně byly aplikovány odrezovače Kittfort Rozsdamaro extra (na obrázku vlevo) a forte (na obrázku vpravo) na měřený povrch. Došlo tak k odstranění povrchové rzi a částečnému naleptání povrchu kyselinou fosforečnou, jež byla obsažena v obou odrezovačích. Volba odrezovačů a jejich efektivita byla sledována v práci Ing. Lipovského [34].



Obrázek 21 Kotouče po působení odrezovačů a stabilizaci po dva dny.

7 POROVNÁNÍ VZORKŮ NA METALOGRAFICKÉM MIKROSKOPU

Pro pohled na detailní strukturu může být použito rozličných metalografických mikroskopů. K zjištění různorodých povrchových vad například trhliny, praskliny atd.

Pozorování bylo provedeno metalografickým inverzním mikroskopem LEICA DMI3000 M s čočkou zvětšující 10x a snímky pořízené digitální kamerou LEICA DFC295.

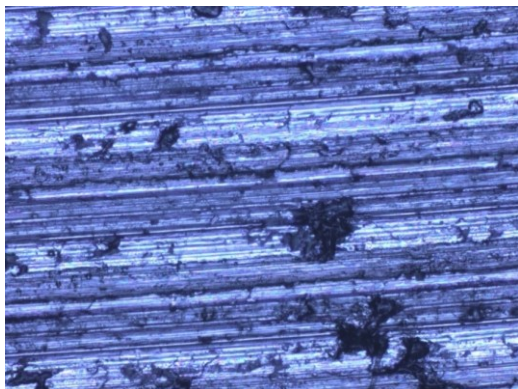


Obrázek 22 Produktová fotografie inverzního mikroskopu [35]

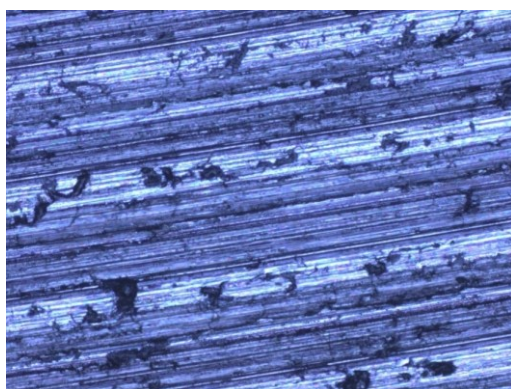
Některé snímky byly pořízeny i pomocí digitálního mikroskopu.

7.1 Referenční vzorek

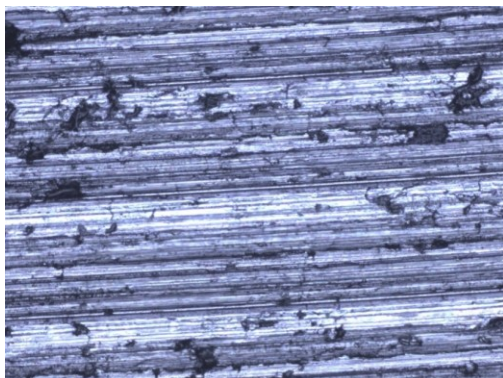
Na novém kotouči byl očekáván nález stop obráběcího nástroje, který povrch upravil, sjednotil a připravil funkční plochy po odlití a vyjmutí z formy. Očekávané dráhy v podobě soustředných kružnic se potvrdilo spolu s nepřekvapivým nálezem trhlin z důvodů rostoucího opotřebení nástroje, nebo vznikajícím tepelnou deformací při formaci třísky.



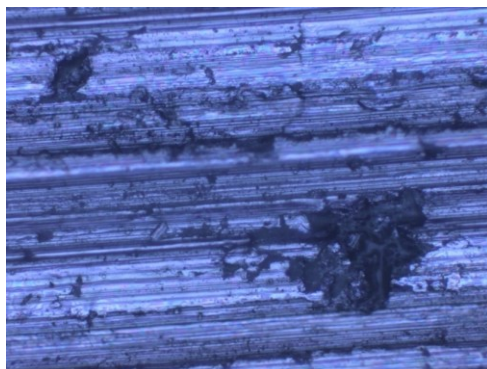
Obrázek 23



Obrázek 24

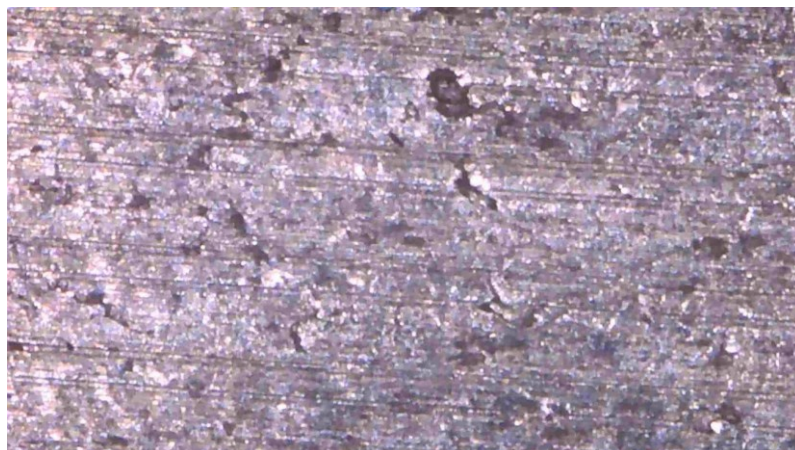


Obrázek 25



Obrázek 26 Detail trhliny

Z obrázků 23 a 24 je možné pozorovat, že výškový profil daného povrchu není zatížen značnými extrémami, tedy rozdíl mezi lokálním maximem a minimem je v rámci očekávání. Trhliny, které jsou dobře viditelné na obrázku 26 mohli vzniknout odtržením uhlíkové fáze slitiny.

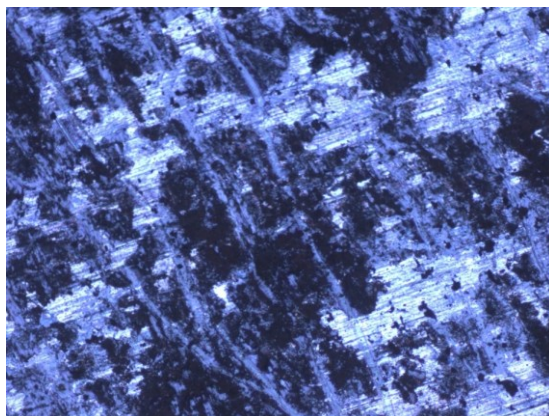


Obrázek 27 Obrázek z digitálního mikroskopu

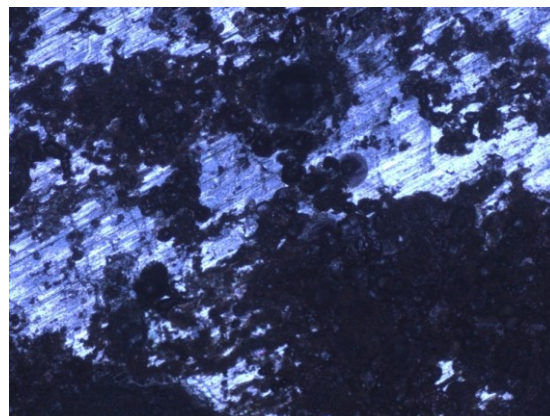
Zbarvení povrchu na obrázku 27 může být způsobeno tepelnými změnami při obrábění z důvodů nedostatečného ochlazování, nebo odrazem světla od zrn odlišných fází slitiny.

7.2 Měřený vzorek

Na měřených vzorcích níže se dá předpokládat výskyt větších povrchových defektů způsobených opotřebením a s tím spojený růst rozdílů extrémů. Jedná se například o ložiska oxidace a zbytků neodstraněné koroze, stop po působení třecích elementů, praskliny a povrchové vady.

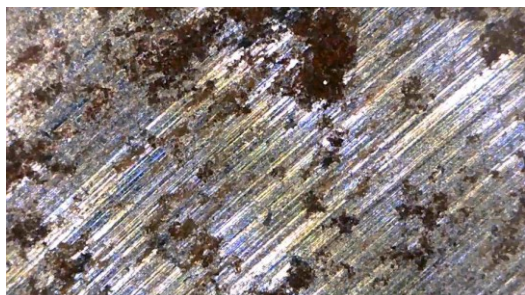


Obrázek 28

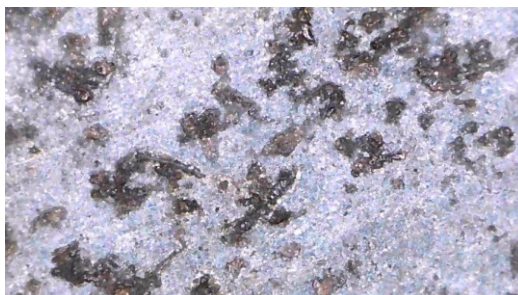


Obrázek 29

Stále jsou zde zjevné soustředné kružnice, které vznikaly třením brzdného obložení. Větší plochu snímků zabírá koroze v místech absence materiálu. Na obrázku 28 lze spatřit i příčné praskliny.



Obrázek 30



Obrázek 31

Z obrázků 30 a 31 pořízených pomocí digitálního mikroskopu s menším přiblížením, můžeme usuzovat následující: Na obrázku 30 jsou rýhy více patrné měřený vzorek vykazuje podobné povrchové zbarvení jako referenční vzorek. Na obrázku 31 již není, kromě ložisek koroze a trhlin, moc patrná struktura povrchu, jelikož jej zakrývá patina po předešlém působení odrezovače Kittfort Rozsdamaro Forte na Měřený vzorek 1.

8 MĚŘENÍ POVRCHU

Měření bylo provedeno na digitálním výškoměru Mitutoyo osazeným kuželovým hrotem s kulatou špičkou vhodným pro měření rovinných povrchů.



Obrázek 32 Digitální výškoměr



Obrázek 33 Hrot pro měření rovinných povrchů

8.1 Postup měření

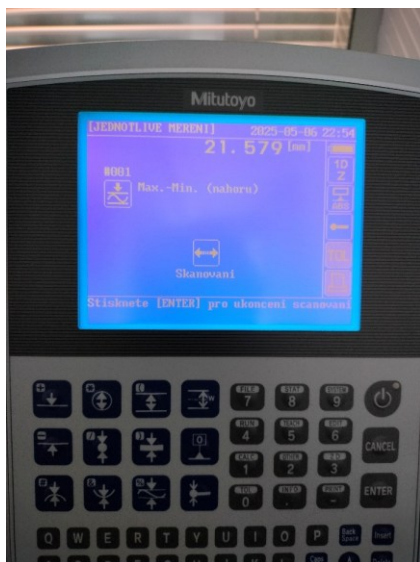
Prvním krokem bylo třeba zkalibrovat měřidlo, stanovit absolutní nulu a připravit měřené vzorky viz obrázek 34. Poté byl vybrán program měření (obrázek 35), který z měřeného povrchu zaznamená maxima a minima, ta od sebe odečte (obrázek 37). Na každém kotouči, jeden nový a dva použité, bylo náhodně zvoleno 10 míst, jež budou měřena.



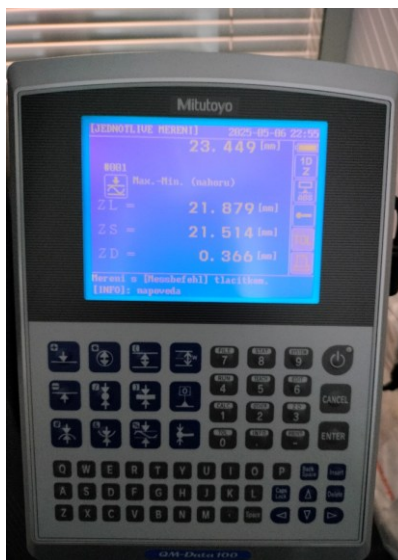
Obrázek 34 Stanovení nuly



Obrázek 35 Výběr programu pro měření



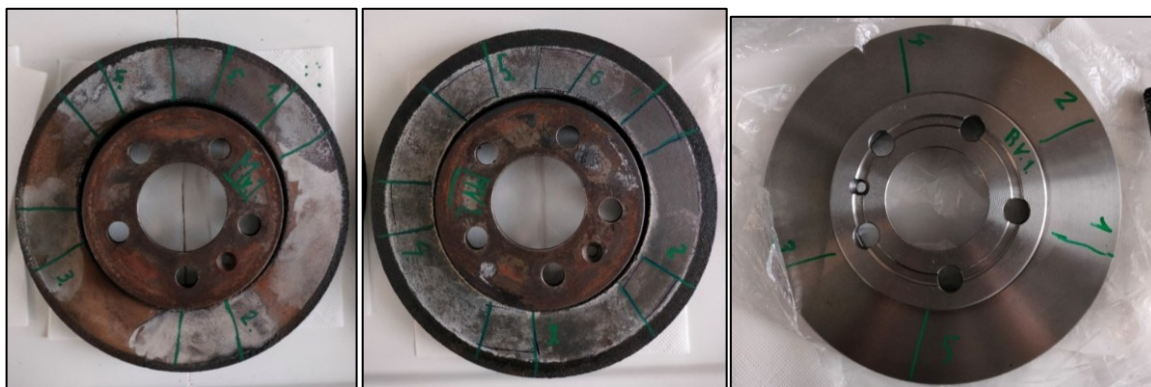
Obrázek 36 Pokyny pro provedení měření



Obrázek 37 První kontrolní měření

8.2 Měření vzorků.

První byl měřen opotřeбенý kotouč, následoval druhý opotřebovaný kotouč. Měření bylo zakončeno kotoučem novým (obrázek 38). V tabulce 4 jsou zaznamenány výsledky.



Obrázek 38 Popsané kotoúče 1

Tabulka 4 Souhrn naměřených dat.

měřený vzorek 1		měřený vzorek 2		referenční vzorek	
číslo měření	Δ [mm]	číslo měření	Δ [mm]	číslo měření	Δ [mm]
1	0,269	1	0,223	1	0,0190
2	0,241	2	0,236	2	0,0170
3	0,224	3	0,268	3	0,0210
4	0,217	4	0,245	4	0,0210
5	0,233	5	0,248	5	0,0180
6	0,227	6	0,250	6	0,0200
7	0,238	7	0,206	7	0,0190
8	0,243	8	0,263	8	0,0170
9	0,229	9	0,243	9	0,0160
10	0,239	10	0,244	10	0,0170

9 DESKRIPTIVNÍ STATISTICKÁ ANALÝZA

9.1 Analýza naměřených dat

Tabulka 5 Základní statistická analýza

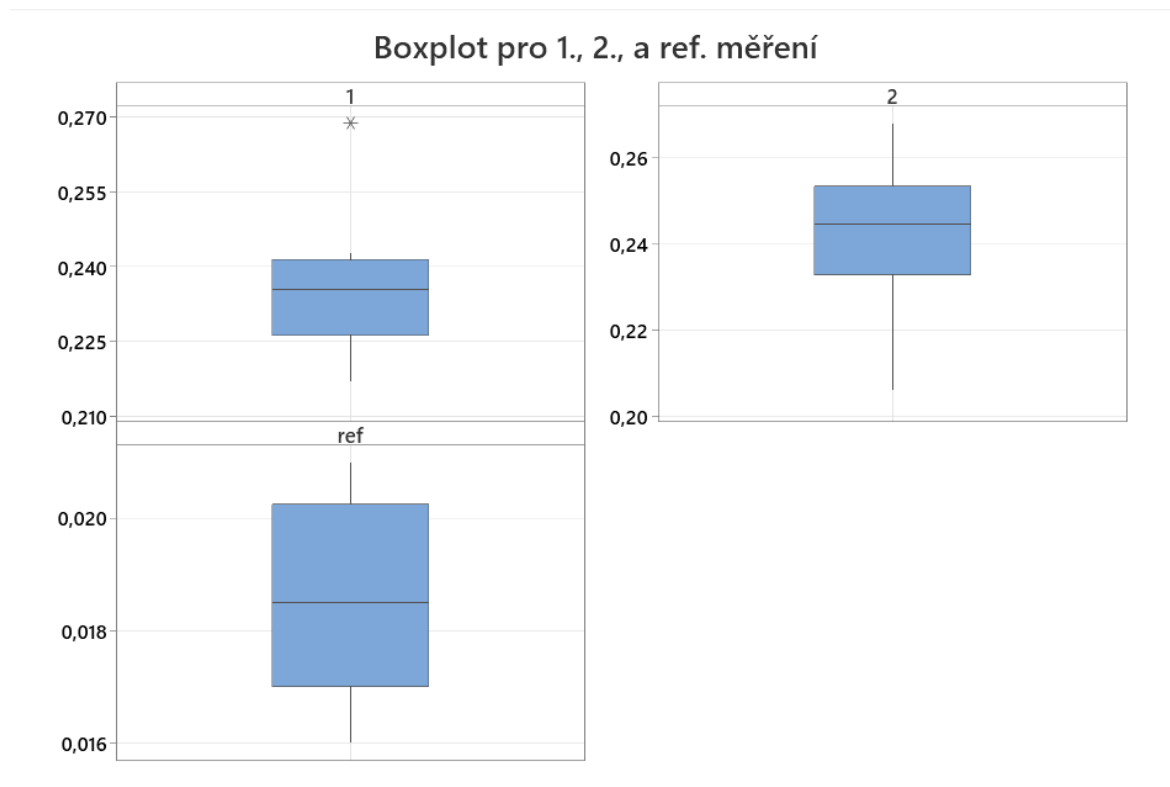
měřený vzorek 1		měřený vzorek 2		referenční vzorek	
číslo měření	Δ [mm]	číslo měření	Δ [mm]	číslo měření	Δ [mm]
1	0,269	1	0,223	1	0,0190
2	0,241	2	0,236	2	0,0170
3	0,224	3	0,268	3	0,0210
4	0,217	4	0,245	4	0,0210
5	0,233	5	0,248	5	0,0180
6	0,227	6	0,250	6	0,0200
7	0,238	7	0,206	7	0,0190
8	0,243	8	0,263	8	0,0170
9	0,229	9	0,243	9	0,0160
10	0,239	10	0,244	10	0,0170
průměr	0,236	průměr	0,2426	průměr	0,0185
směrodatná odchylka	0,0135	směrodatná odchylka	0,0171	směrodatná odchylka	0,0017
medián	0,236	medián	0,245	medián	0,019
maximum	0,269	maximum	0,268	maximum	0,021
minimum	0,217	minimum	0,206	minimum	0,016
parametr	0,052	parametr	0,062	parametr	0,005

Z každé sady dat získané měřením, byla určena průměrná hodnota, medián a směrodatná odchylka. Dále maximální a minimální naměřený rozdíl výšek Δ na měřeném úseku, rozdílem je parametr. Výsledné statistické hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 5.

Po základní analýze byly vykresleny boxplotové grafy a proveden Grubbsův test pro podezřelé odlehlé hodnoty.

9.2 Boxplotové grafy

Pro rychlou analýzu odlehlých hodnot můžeme použít boxplotové grafy, používají se i pro vizualizaci rozdělení a rozsahu dat, zobrazení extrémů, mediánu a průměru, viz obrázek 39.

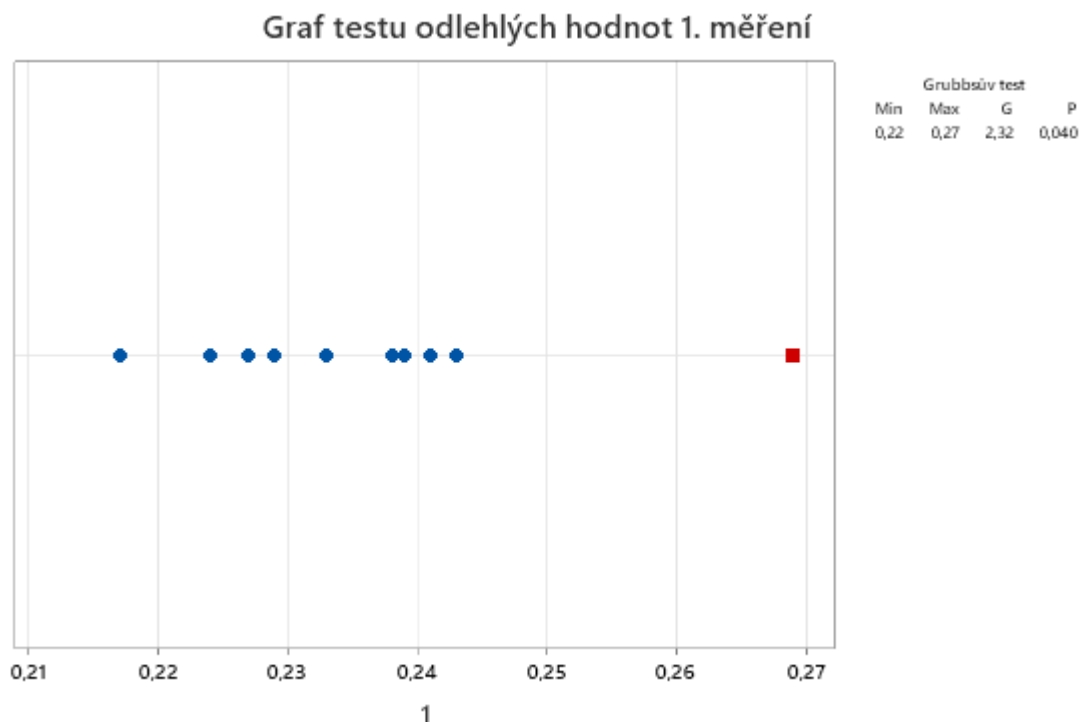


Obrázek 39 Boxplotové grafy jednotlivých měření

Vykreslené boxplotové grafy na obrázku 39 upozorňují na potenciální odlehlou hodnotu v sekci 1, pro potvrzení bude proveden Grubbsův test

9.3 Grubbsův test

Hypotézy byly stanoveny s hladinou významnosti $\alpha = 5 \%$, hypotéza nulová byla určena tak, že všechny hodnoty splňující podmínky Grubbsova testu pochází ze stejného souboru s normálním rozdělením. Hypotéza alternativní uvádí, že minimální nebo maximální hodnoty nesplňující podmínky Grubbsova testu jsou hodnoty odlehlé.

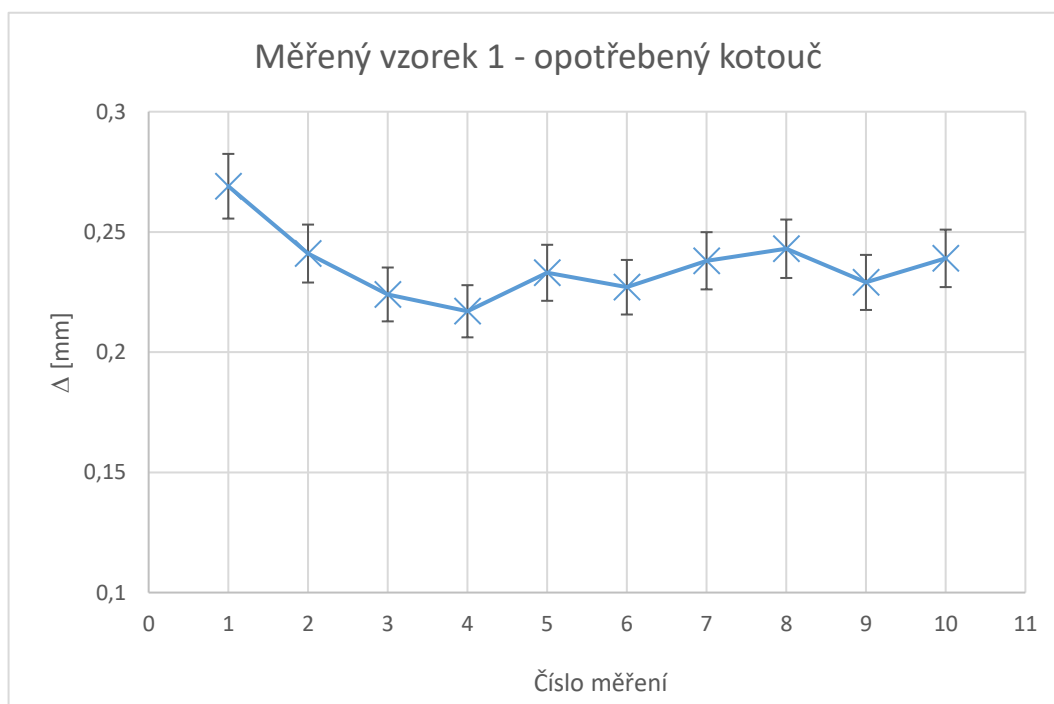


Obrázek 40 Vizualizace odlehlé hodnoty v prvním měření

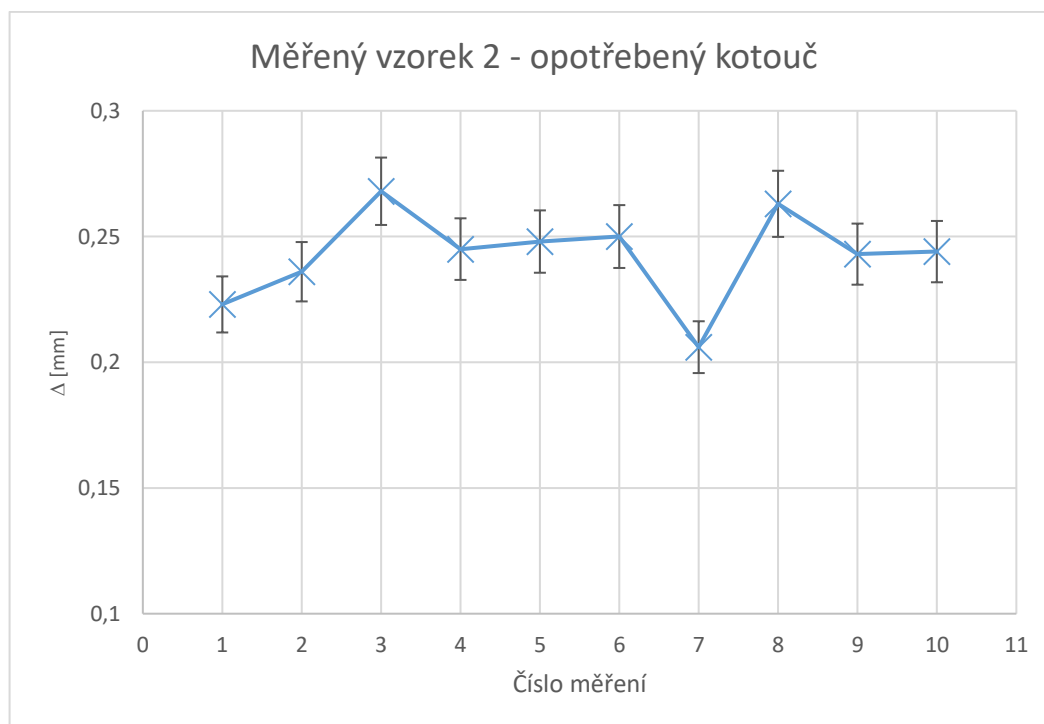
Grubbsův test využívá koeficient G k výpočtu p – hodnoty, která je srovnávána s velikostí hodnoty statistické významnosti α , tedy pokud $P \leq \alpha$, tak je možné zamítnout nulovou hypotézu H_0 , ve prospěch hypotézy alternativní a přiznat, že v daném souboru leží odlehlá hodnota. Při porovnání jednotlivých hodnot P , je zřetelné, že v měření prvního kotouče vznikla odlehlá hodnota, protože hodnota P je menší než hodnota $\alpha = 0,05$. V ostatních souborech takovéto hodnoty nalezeny nebyly.

9.4 Zpracování naměřených dat

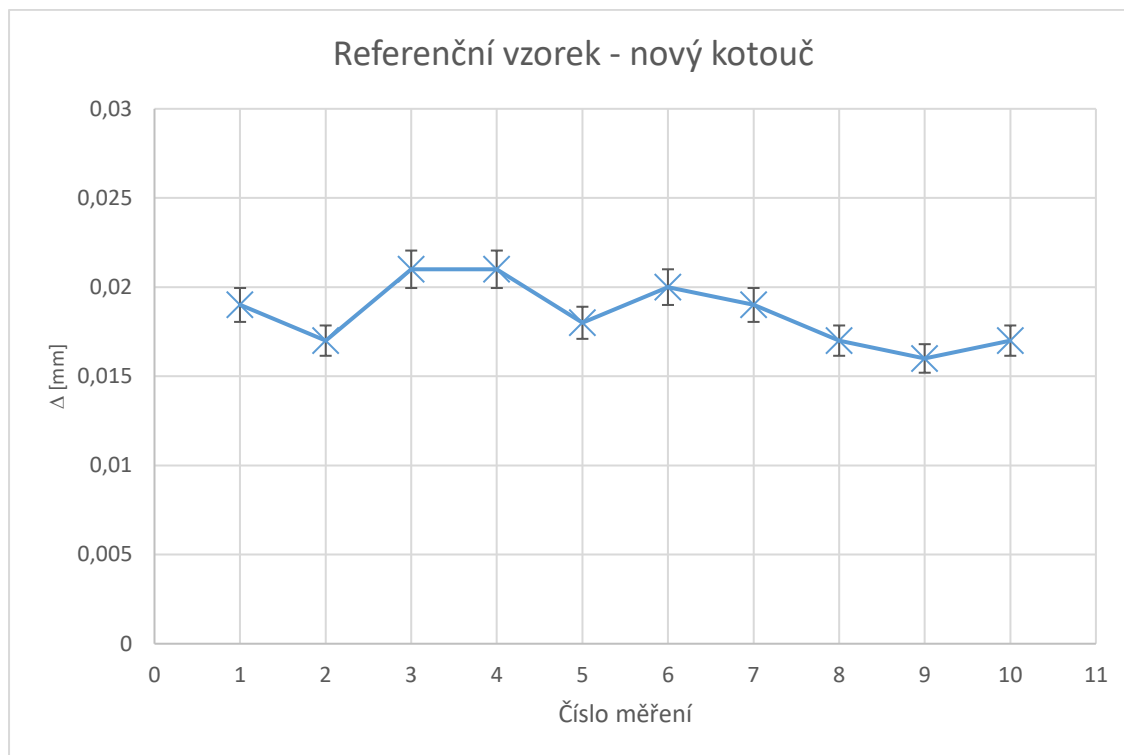
Naměřená data byla zaznamenána do následujících grafů. Grafy znázorňují časovou řadu jednotlivých měření včetně definované 5% nejistoty daných měření.



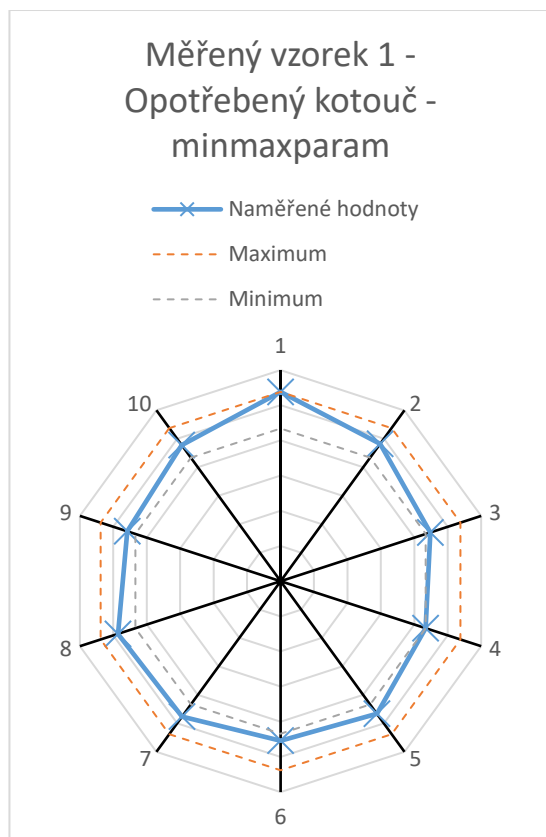
Obrázek 41 Graf zobrazující první měření



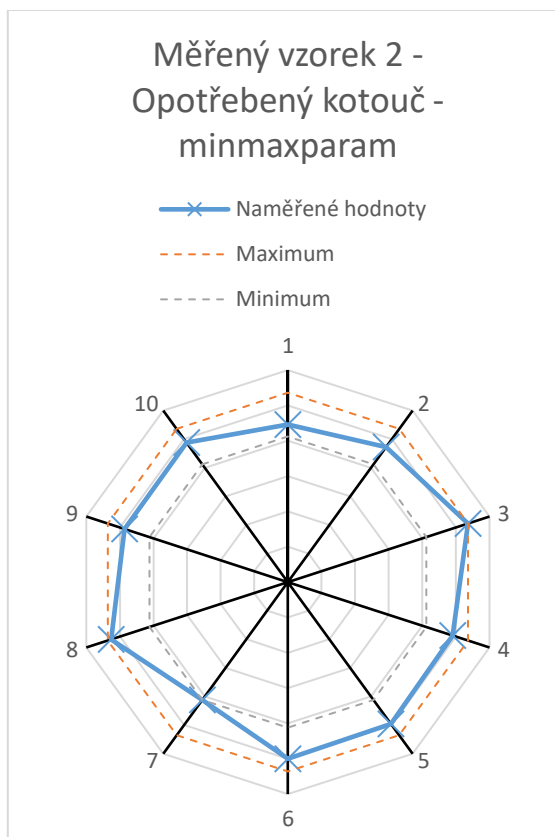
Obrázek 42 Graf zobrazující druhé měření



Obrázek 43 Graf zobrazující třetí měření



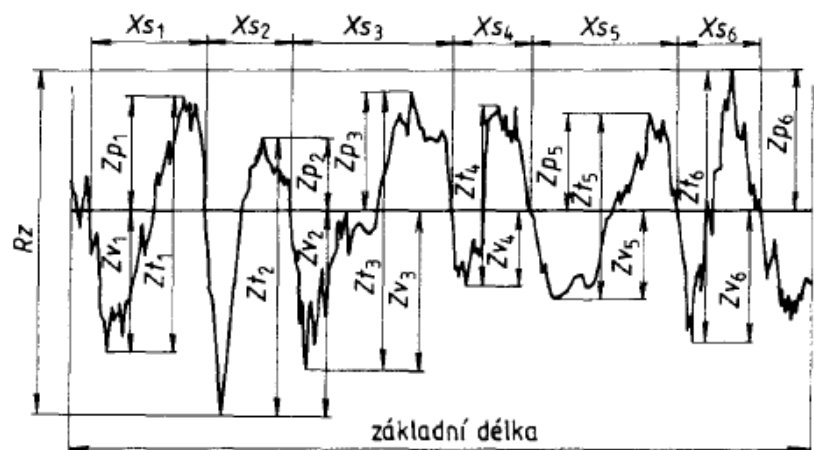
Obrázek 44 Graf MV1 – parametr



Obrázek 45 Graf MV2 – parametr

9.5 Aritmetické určení drsnosti povrchu

Z naměřených vzorků, můžeme usuzovat, že již bylo pomocí výškoměru na předem definovaných drahách kotoučů analyzován rozdíl mezi extrémy na příčných směrech plochy mezikruží. Je-li plocha mezikruží rozvinuta v obdélníkovou plochu, lze z těchto dat určit drsnost R_z sečtením kladných a záporných extrémů od nulové hodnoty, osy.

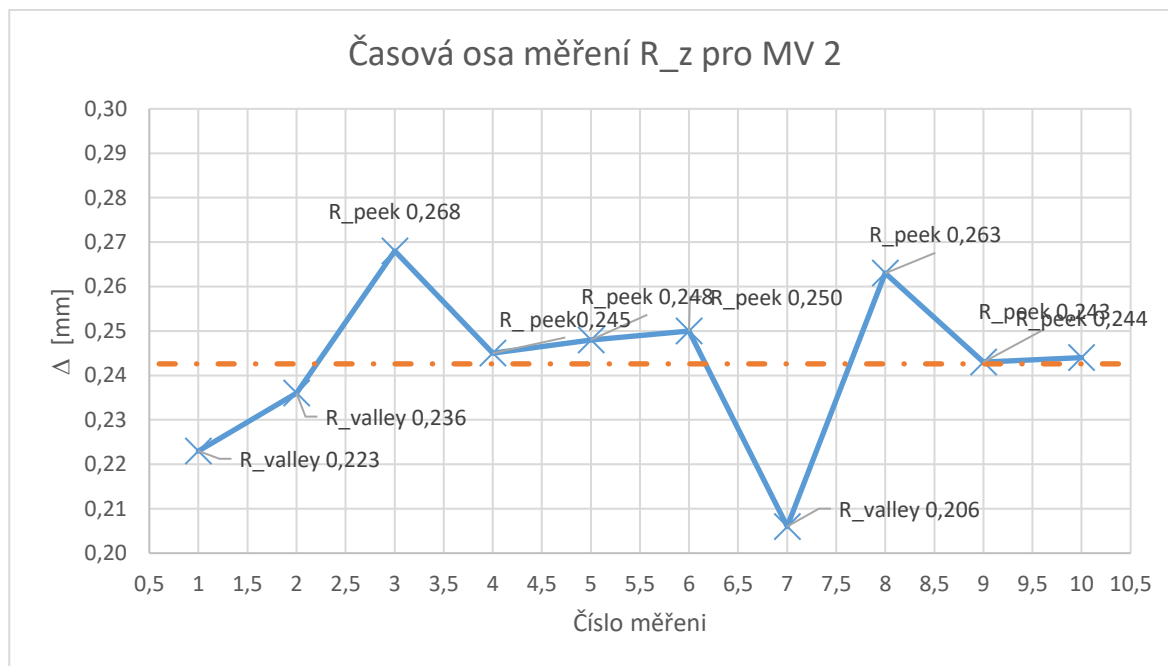


Obrázek 46 Struktura povrchu; profilová metoda [36]

Osou je vypočtený průměr hodnot s velikostí 0,2426 mm (v případě MV2), všechny hodnoty jsou poté určeny vzhledem k ose průměru a označeny za R_{peek} tedy kladný extrém, opačně pak R_{valley} . Extrémy jsou následně od sebe odečítány a průměr rozdílů definuje R_z . Rozdělení hodnot a určení R_z je zobrazeno v tabulce 6 a grafu, obrázek 47. R_z určovat u MV1 by bylo zavádějící skrze výskyt odlehlé hodnoty

Tabulka 6 Určení R_z pro MV2

číslo měření	Δ [mm]	rozdělení
1	0,223	R_{valley1}
2	0,236	R_{valley2}
3	0,268	R_{peek1}
4	0,245	R_{peek2}
5	0,248	R_{peek3}
6	0,250	R_{peek4}
7	0,206	R_{valley3}
8	0,263	R_{peek5}
9	0,243	R_{peek6}
10	0,244	R_{peek7}
Průměr R_{peek} [mm]		0,252
Průměr R_{valley} [mm]		0,222
R_z [mm]		0,237

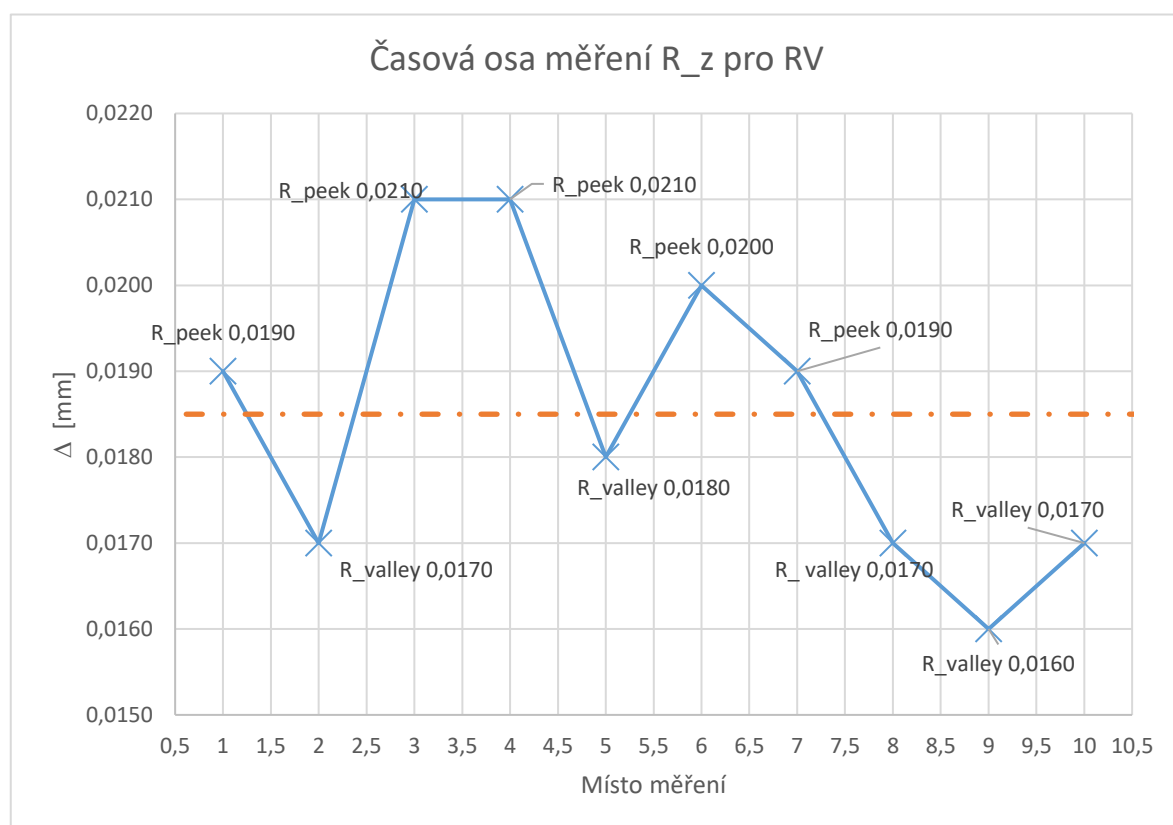


Obrázek 47 Časová osa měření R_z pro MV2

Konečná hodnota R_z pro MV 2 je 0,237 mm, standartní drsnost povrchu se uvádí v μm , po převedení jednotek je $R_z = 237 \mu\text{m}$ po převedení podle [37] R_a nabývá hodnot do $50 \mu\text{m}$. Ve strojnických tabulkách [36] je navržené označení pro povrch s takovou drsností hrubý nebo neobrobený povrch.

Tabulka 7 Určení R_z pro RV

číslo měření	Δ [mm]	rozdělení
1	0,0190	R_peel1
2	0,0170	R_valley1
3	0,0210	R_peek3
4	0,0210	R_peek3
5	0,0180	R_valley2
6	0,0200	R_peek4
7	0,0190	R_peek5
8	0,0170	R_valley3
9	0,0160	R_valley4
10	0,0170	R_valley5
Průměr R_{peek} [mm]		0,0200
Průměr R_{valley} [mm]		0,0170
R_z [mm]		0,019

Obrázek 48 Časová osa měření R_z pro RV

Pro nový kotouč je $R_z = 0,019$ mm, tedy $19 \mu\text{m}$. Po převodu podle [37] na $R_a = 3,2$. Povrchy s takovou drsností jsou vhodné pro stykové plochy bez vzájemného pohybu a bez velkých požadavků na přesnost nebo těsnost styku [36].

ZÁVĚR

Konstrukční vývoj brzdných systému se dnes zaměřuje spíše na zvýšení spolehlivosti již velmi efektivních konstrukcí například představením antiblokačních systémů. Bubnové i kotoučové verze těchto aktivních bezpečnostních systému na dopravních prostředcích v posledních letech zaznamenávají stálý vývoj v používaných materiálech.

Použití šedé litiny jako materiálu pro kotouče je stále výhodné hlavně u osobních automobilů pro své vlastnosti a cenu, ve vyšších cenových hladinách a prémiových vozech se můžeme setkat s hliníkem případě karbon-keramickým kompozitem, který zaručí funkčnost i v extrémním použití.

Trend v brzdném obložení vykazuje snahu o ekologičtější náhrady za azbestové a měděné složky v kompozitní směsi. Využití odpadní biomasy pro abrazivní komponentu, která má za cíl snížit emise škodlivých částic do prostředí je stále zkoumanou oblastí pro materiálové inženýry.

V praktické části práce bylo provedeno měření a porovnání nového kotouče a opotřebovaného páru kotoučů. Pozorování na mikroskopech přineslo možnost prohlédnout si strukturu povrchu před samotným měřením. Nový kotouč vykazoval předvídatelné povrchové defekty v podobě drah po nástrojích, překvapivě se také vykazovaly trhliny. Opotřebovaný disk kromě nerovnoměrně hlubokých soustředných kruhových drah po kontaktu s třecím obložením, poskytnul i bližší pohled na ložiska koroze na povrchu materiálu.

Po provedeném měření výškoměrem na styčných plochách mezikruží v příčném směru, byly stanoveny rozdíly mezi extrémy na daných místech. Na získaných datech byla provedena deskriptivní analýza. Na novém kotouči byl průměrný výškový rozdíl 0,019 mm. Provedena byla také analýza aritmetického profilu drsnosti povrchu, která danému povrchu přisuzuje v daném intervalu $R_a = 3,2$. V případě kotoučů opotřebovaných byl průměr rozdílů výšek pro MV1 0,236 mm a pro MV2 0,2426 mm. V souboru měřených dat MV1 byla odhalena odlehlá hodnota na základě Grubbsova testu, proto nebyla stanovena hypotetická drsnost povrchu R_a . V případě MV2 se povrch může označit $R_a = 50$ vlivem koroze a špatného seřízení brzdného obložení.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VÁŠA, Alois a VÁŠA, Vladimír. *Rukověť pro řidiče motorových vozidel*. 7. vyd. Velká knižnice motorismu. Praha: Naše vojsko, 1955. ISBN -. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:86ec1cd0-fc55-11e7-b1a1-005056827e52>.
- [2] SABHADIYA, Shivansh. *What Is Disc Brake?- Parts, Working, and Diagram*. Online. The Engineering Choice. C2021-2025. Dostupné z: <https://www.theengineeringchoice.com/what-is-disc-brake/>. [cit. 2025-02-25].
- [3] MALUF, Omar; ANGELONI, Mauricio; MILAN, M. T. a SPINELLI, Dirceu. Development of materials for automotive disc brakes. Online. *Minerva*. 2004, roč. -, č. -, s. 3-9. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/237710289_Development_of_materials_for_automotive_disc_brakes. [cit. 2024-11-19].
- [4] SABHADIYA, Shivansh. *Drum Brakes vs Disc Brakes: What's the Difference?* Online. The Engineering Choice. C2021-2025. Dostupné z: <https://www.theengineeringchoice.com/drum-brakes-vs-disc-brakes/>. [cit. 2025-02-26].
- [5] *Comparing Brake Disc Materials: Which One Offers The Best Performance?* Online. MAT foundry group. C2025. Dostupné z: <https://www.matfoundrygroup.com/products/comparing-brake-disc-materials>. [cit. 2025-04-24].
- [6] RANCSÓ, Bence. *Manufacture and examination of carbon ceramic brakes*. Online. 2015. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/308937291_Manufacture_and_examination_of_carbon_ceramic_brakes.
- [7] *Wholesale Bi-Metallic Brake Discs*. Online. In: Frontech. C2025. Dostupné z: <https://img.yfisher.com/m4829/1710490559020-16/jpg100-t3-scale100.webp>. [cit. 2025-05-15].
- [8] *Bimetallic Brake Rotor (USA)*. GM GLOBAL TECHNOLOGY OPERATIONS, INC. Přihl.: 8. 9. 2009. Uděl.: 10. 5. 2011. US20110056777A1. Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US20110056777A1/en>.
- [9] PARK, Soojin; LEE, Kibum; KIM, Sunwoo a KIM, Jinho. Brake-Disc Holes and Slit Shape Design to Improve Heat Dissipation Performance and Structural Stability. Online. *Applied Sciences*. 2022, roč. 12, č. 3, s. 3-11. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app12031171>. [cit. 2025-04-30].
- [10] BORAWSKI, Andrzej. Conventional and unconventional materials used in the production of brake pads – review: Science and Engineering of Composite Materials. 2020, roč. 27, č. 1, s. 374-396. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1515/secm-2020-0041>.
- [11] *Friction Materials*. Online. ASKEBONO. C2025. Dostupné z: https://www.akebono-brake.com/english/product_technology/product/automotive/friction_material/. [cit. 2025-04-30].
- [12] *Evolution of Brake Pads*. Online. Advics. C2024. Dostupné z: <https://www.advicsaftermarket.com/technical-resources/tech-tips/evolution-of-brake-pads/>. [cit. 2025-05-01].
- [13] GUPTA, Brijendra a MODI, Ashish Jashvantlal. REVIEW OF AUTOMOTIVE BRAKE FRICTION MATERIALS. Online. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*. 2015, vol. 2, no. 2, s. 281-223. ISSN 2348-6406.

Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/465687421/REVIEW-OF-AUTOMOTIVE-BRAKE-FRICTION-MATERIALS>. [cit. 2025-05-01].

[14] XIAO, Xingming; YIN, Yan; BAO, Jiusheng; LU, Lijian a FENG, Xuejun. Review on the friction and wear of brake materials. Online. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016, roč. 8, č. 5, s. 1-10. ISSN 1687-8132. Dostupné z:

<https://doi.org/10.1177/1687814016647300>. [cit. 2025-05-01].

[15] MENAPACE, C.; LEONARDI, M.; SECCHI, M.; BONFANTI, A.; GIALANELLA, S. et al. Thermal behavior of a phenolic resin for brake pad manufacturing. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2019, roč. 137, č. 3, s. 759-766. ISSN 1588-2926. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08004-2>.

[16] AFSHARI, Mehdi; SIKKEMA, Doetze J.; LEE, Katelyn a AND BOGLE, Mary. High Performance Fibers Based on Rigid and Flexible Polymers. *Polymer Reviews*. 2008/05/01, roč. 48, č. 2, s. 230-274. ISSN 1558-3724. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/15583720802020129>.

[17] ARANGANATHAN, N.; MAHALE, Vishal a BIJWE, Jayashree. Effects of aramid fiber concentration on the friction and wear characteristics of non-asbestos organic friction composites using standardized braking tests. *Wear*. 2016, roč. 354-355, s. 69-77. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.002>.

[18] GOPAL, P.; DHARANI, L.R. a BLUM, Frank D. Fade and wear characteristics of a glass-fiber-reinforced phenolic friction material. *Wear*. 1994, roč. 174, č. 1, s. 119-127. ISSN 0043-1648. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648\(94\)90093-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)90093-0).

[19] GWEON, Jae Hyun; JOO, Byung Soo a JANG, Ho. The effect of short glass fiber dispersion on the friction and vibration of brake friction materials. *Wear*. 2016, roč. 362-363, s. 61-67. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.004>.

[20] KIM, Seong Hwan a JANG, Ho. Friction and Vibration of Brake Friction Materials Reinforced with Chopped Glass Fibers. *Tribology Letters*. 2013, roč. 52, č. 2, s. 341-349. ISSN 1573-2711. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11249-013-0221-z>.

[21] IDRIS, U.D.; AIGBODION, V.S.; ABUBAKAR, I.J. a NWOYE, C.I. Eco-friendly asbestos free brake-pad: Using banana peels: Using banana peels. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 2015, roč. 27, č. 2, s. 185-192. ISSN 1018-3639. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.06.006>.

[22] BANU, Sugözü a DAĞHAN, Behcet. Effect of BaSO₄ on Tribological Properties of Brake Friction Materials. Online. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2016, roč. 5, č. 12, s. 30-35. ISSN 2319-8753. Dostupné z: https://www.ijirset.com/upload/2016/icetas/5_ICT_141_IJIRSET.pdf. [cit. 2025-05-02].

[23] MALHOTRA, V.M.; VALIMBE, P.S. a WRIGHT, M.A. Effects of fly ash and bottom ash on the frictional behavior of composites. *Fuel*. 2002, roč. 81, č. 2, s. 235-244. ISSN 0016-2361. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00126-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00126-0).

[24] ÖSTERLE, W.; PRIETZEL, C.; KLOSS, H. a DMITRIEV, A.I. On the role of copper in brake friction materials. *Tribology International*. 2010, roč. 43, č. 12, s. 2317-2326. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.08.005>.

[25] KUMAR, Mukesh a BIJWE, Jayashree. Role of different metallic fillers in non-asbestos organic (NAO) friction composites for controlling sensitivity of coefficient of friction to load and speed. *Tribology International*. 2010, roč. 43, č. 5, s. 965-974. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.062>.

- [26] CHO, Min Hyung; JU, Jeong; KIM, Seong Jin a JANG, Ho. Tribological properties of solid lubricants (graphite, Sb2S3, MoS2) for automotive brake friction materials. *Wear*. 2006, roč. 260, č. 7, s. 855-860. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.04.003>.
- [27] KIM, S.J.; CHO, M.H.; LIM, D.-S. a JANG, H. Synergistic effects of aramid pulp and potassium titanate whiskers in the automotive friction material. *Wear*. 2001, roč. 251, č. 1, s. 1484-1491. ISSN 0043-1648. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00802-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00802-X).
- [28] KIM, Yun Cheol; CHO, Min Hyung; KIM, Seong Jin a JANG, Ho. The effect of phenolic resin, potassium titanate, and CNSL on the tribological properties of brake friction materials. *Wear*. 2008, roč. 264, č. 3, s. 204-210. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.03.004>.
- [29] Předpis č. 90 Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK/OSN): Jednotná ustanovení pro schvalování typu náhradních částí s brzdovým obložením a náhradních obložení bubnových brzd pro motorová vozidla a jejich přípojná vozidla. In: *EUR-Lex 130/19*. 2010.
- [30] *Měření drsnosti povrchu*. Online. Elektronická učebnice. 2015. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/lekce/mereni-drsnosti-povrchu>. [cit. 2025-05-15].
- [31] PATA, Vladimír a KUBIŠOVÁ, Milena. *Statistické metody hodnocení jakosti strojírenských povrchů*. Vydání: první. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická, 2018. ISBN 978-80-7454-740-9.
- [32] *Brzdový kotouč TOPRAN 109522*. Online. In: Autorozvody.cz. C2009-2025. Dostupné z: <https://www.autorozvody.cz/cs/hledani/1/9/109522/brzdovy-kotouc/topran/109522/1399716>. [cit. 2025-05-15].
- [33] *Dílenská příručka Fabia 2000: Podvozek*. 08.99. 1999.
- [34] LIPOVSKÝ, Radek. *Vliv chemického prostředí na jakost kovových materiálů*. Diplomová práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2024.
- [35] *Wie-Tec | Refurbished Leica DMI3000M Inverted Microscope for Polarized Material Microscopy*. Online. In: Life science market. C2023. Dostupné z: https://www.google.com/search?sca_esv=87e46e2d1762fa07&sxsrf=AHTn8zotuaipY9o3WA_Gt5HP0N83GhARWQ:1746864739968&q=leica+dmi+3000+M&udm=2&fbs=ABzOT_CGHNgROzTrfye-u2LQKYbNdWbkClltR6IYiojW0lx3zH11t7qXKo1z7JOO1V8DdnHb33cM5wxfiSGkPQKWMJv5pTXOu7BFIXvicTc4I7gKa1My9b1TsoMrUymZ3oxG-UuI2cpxQH1gbsVRks4v0P2LvRlqxyp3we_DkWm9TWlwwegLoghV276mzjflrDIWGNIguF9U7SrfrrO4tUCm8cKJ4fB-iA&sa=X&ved=2ahUKEwi3p6-iupiNAXUEIf0HHRK0D6IQtKgLegQIHBAB&biw=2560&bih=1271&dpr=1#vhid=G4VAUHAQtreccM&vssid=mosaic. [cit. 2025-05-10].
- [36] LEINVEBER, Jan; ŘASA, Jaroslav a VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. 3. dopl. vyd. Praha: Scientia, 1999. ISBN 80-718-3164-6.
- [37] *Drsnosti povrchů a jejich značení a převodník*. Online. Mikon tools. C2025. Dostupné z: <https://www.mikon-tools.cz/drsnosti-povrchu-a-jejich-znacení-a-prevodník/>. [cit. 2025-05-15].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma vnitřní čelist'ové brzdy [1].	13
Obrázek 2 Schéma kotoučové brzdy [3].	14
Obrázek 3 Struktura litin [3].	17
Obrázek 4 Bimetalová brzda výrobce Frontech [7]	19
Obrázek 5 Vyobrazení bimetalické brzdy z patentu [8]	20
Obrázek 6 Model disku brzdy pro FEM analýzu. [9]	22
Obrázek 7 Průřez brzdou destičkou [10]	23
Obrázek 8 Příklady do směsi na brzdě destičky. [11]	24
Obrázek 9 Struktura brzdě kompozitu na destičce. [10]	25
Obrázek 10 Grafické shrnutí vlastností Fenolové pryskyřice [10]	26
Obrázek 11 Grafické shrnutí vlastností epoxidové pryskyřice [10]	26
Obrázek 12 Značka schválení [29]	31
Obrázek 13 Příklad označení celku s obložením. [29]	31
Obrázek 14 Princip kontaktního měření povrchu	32
Obrázek 15 Princip CLA snímače [30]	33
Obrázek 16 Filtrace výsledků struktury povrchu [30]	35
Obrázek 17 Příprava výměny brzdě soustavy	Obrázek 18 Demontovaný třmen39
Obrázek 19 Rub demontovaného kotouče	
Obrázek 20 Montáž nového disku	39
Obrázek 21 Kotouče po působení odrezovačů a stabilizaci po dva dny.	40
Obrázek 22 Produktová fotografie inverzního mikroskopu [35]	41
Obrázek 23	Obrázek 2442
Obrázek 25	
Obrázek 26 Detail trhliny	42
Obrázek 27 Obrázek z digitálního mikroskopu	43
Obrázek 28	Obrázek 2943
Obrázek 29	
Obrázek 30	Obrázek 3144
Obrázek 31	
Obrázek 32 Digitální výškoměr	45
Obrázek 33 Hrot pro měření rovinných povrchů	45
Obrázek 34 Stanovení nuly	Obrázek 35 Výběr programu pro měření46
Obrázek 35	
Obrázek 36 Pokyny pro provedení měření	Obrázek 37 První kontrolní měření46
Obrázek 37	
Obrázek 38 Popsané kotouče 1	47
Obrázek 39 Boxplotové grafy jednotlivých měření	49
Obrázek 40 Vizualizace odlehle hodnoty v prvním měření	50
Obrázek 41 Graf zobrazující první měření	51
Obrázek 42 Graf zobrazující druhé měření	51

Obrázek 43 Graf zobrazující třetí měření	52
Obrázek 44 Graf MV1 – parametr Obrázek 45 Graf MV2 – parametr	52
Obrázek 46 Struktura povrchu; profilová metoda [36].....	53
Obrázek 47 Časová osa měření R_z pro MV2	54
Obrázek 48 Časová osa měření R_z pro RV	55

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Porovnání materiálových vlastností. [6]	18
Tabulka 2 Vstupní parametry pužité ve FEM analýze [9]	21
Tabulka 3 Parametry referenčního disku [32].....	38
Tabulka 4 Souhrn naměřených dat.....	47
Tabulka 5 Základní statistická analýza	48
Tabulka 6 Určení R_z pro MV2	53
Tabulka 7 Určení R_z pro RV	55

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

EV Electic vehicle (anglicky: elektromobil)

C/SiC Karbon keramický kompozit

C Uhlík

SUV Sportovní užitkové vozidlo

FEM Metoda konečných prvků

kg Kilogram

$m \cdot s^{-1}$ Metr za sekundu

mm Milimetr

mm^2 Milimetr čtverečný

$kg \cdot m^{-3}$ Kilogram na metr kubický

Pa Pascal

k^{-1} Jednotka koeficientu teplotního roztažnosti

MPa Megapascal

°C Stupeň Celsia

BUNCp Uncarbonized banana peel (anglicky: dekarbonované banánové slupky)

BCp Carbonized banana peel (anglicky: uhlíkové banánové slupky)

ECE R90 Předpis číslo 90 evropské hospodářské komise

CLA Chromatic Lenght Aberration (anglicky: Chromatická délková aberace)

SDI Saugdiesel Direct Injection (německy: vznětových motorů s atmosférickým plněním a přímým vstřikováním)

Δ Rozdíl výšek

G Koeficient Grubbsova testu

p Hodnota pravděpodobnosti

α Hladina statistické významnosti

MV1 Měřený vzorek 1

MV2 Měřený vzorek 2

R_z Drsnost profilu

R_a Aritmetická odchylka profilu

R_{valley} Záporný extrém profilu

R_{peek} Kladný extrém profilu

μm Mikrometr