



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie

**KOEFICIENTY TŘENÍ V PRŮMYSLOVÝCH
APLIKACÍCH**

Diplomová práce

Autor: Bc. Jonáš Hajný

Vedoucí práce: doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.

Vedoucí specialista: Ing. Zdeněk Hazdra, Ph.D.

Studijní program: (N0715A270001) Výrobní inženýrství

Studijní obor: (N071TVIN) Bez specializace

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hajný** Jméno: **Jonáš** Osobní číslo: **484007**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Koeficienty tření v průmyslových aplikacích

Název diplomové práce anglicky:

Friction coefficients in industrial applications

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor problematiky tribologie
2. Kritická rešerše současného stavu výzkumu této problematiky
3. Návrh a realizace zařízení pro měření tribologických parametrů brzdících prvků
4. Ověření parametrů brzdících prvků a jejich materiálů, včetně diskuze výsledků

Seznam doporučené literatury:

1. Extreme Tribology: Fundamentals and Challenges (Ahmed Abdelbary, 2020)
2. Friction, Wear, Lubrication: A Textbook in Tribology, Second Edition (Kenneth C Ludema, Layo Ajayi, 2019)
3. Engineering Tribology (Gwidon W. Stachowiak, Andrew W. Batchelor, 2001)
4. Časopis Tribologia

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc. ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

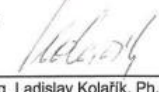
Ing. Zdeněk Hazdra, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

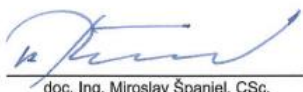
Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**


doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce


doc. Ing. Ladislav Kolafík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, s využitím informací poskytnutých vedoucími práce a podkladů, uvedených v seznamu použité literatury a zdrojů.

V Praze, 8.8.2023

Bc. Jonáš Hajný

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Viktoru Kreibichovi, CSc. a Ing. Zdeňkovi Hazdrovi Ph.D. za vedení diplomové práce, poskytnutí cenných rad, materiálů i zázemí při řešení otázek spojených s brzdnými materiály a koeficienty tření v průmyslových aplikacích.

Anotace

Název diplomové práce: Koeficienty tření v průmyslových aplikacích

Autor práce: Bc. Jonáš Hajný

Vedoucí práce: doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.

Vedoucí specialista: Ing. Zdeněk Hazdra, Ph.D.

Akademický rok: 2022/2023

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: 12133 – Ústav strojírenské technologie

Vedoucí ústavu: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Rozsah práce: 72 stránek

19 tabulek

44 obrázků

Annotation

Title of the thesies:	Friction coefficients in industrial applications
Author:	Bc. Jonáš Hajný
Supervisor:	doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
Supervisor specialist:	Ing. Zdeněk Hazdra, Ph.D.
Academic year:	2022/2023
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Extent of thesis:	72 pages
	19 tables
	44 pictures

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku brzdných materiálů a jejich využití. Zabývá se jejich zkoušením a požadavky, které jsou v dnešní době na tyto materiály kladeny. Teoretická část práce přibližuje základy tribologie, funkci brzdných systémů i v praxi využívané třecí materiály. Praktická část práce se zabývá návrhem a realizací zařízení, určeného k aplikačnímu zkoušení třecích materiálů a zároveň navrhuje metodiku měření těchto specifických materiálů. V neposlední řadě jsou v práci obsaženy výsledky měření základních parametrů brzdných materiálů vybraných vzorků a ekonomické zhodnocení výstavby zkušebního zařízení.

Klíčová slova

tribologie, tření, koeficient tření, opotřebení, brzdy, třecí materiály, emise

Abstract

This thesis focuses on the issue of brake materials and their applications. It deals with their testing and the requirements currently placed on these materials. The theoretical part of the thesis introduces the basics of tribology, the principles of braking systems, and the friction materials used in practice. The practical part of the thesis is concerned with a design and an implementation of a machine intended for an application testing of friction materials. Additionally, it proposes a methodology for measuring these specific materials. Lastly, thesis includes the measurement results of the basic parameters of brake materials from the selected samples and an economic evaluation of the construction of the testing machine.

Keywords

tribology, friction, coefficient of friction, wear, brakes, friction materials, emissions

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Tribologie.....	11
2.1	Tribologický systém.....	12
2.2	Tření	13
2.2.1	Dělení tření	13
2.2.2	Koeficient tření (μ)	14
2.2.3	Kluzné (smykové) tření	15
2.2.4	Valivé tření	16
2.3	Opotřebení.....	16
2.3.1	Mechanismy opotřebení.....	17
3	Brzdové systémy.....	19
3.1	Definice základních pojmů	19
3.2	Typy brzdných systémů	20
3.2.1	Bubnové brzdy	20
3.2.2	Kotoučové brzdy.....	21
3.3	Testování brzdných systémů	25
3.3.1	Test typu P (dynamický).....	25
3.3.2	Test typu F (tepelný).....	26
3.3.3	Test typu W (za vlhka).....	26
4	Třecí materiály	27
4.1	Brzdové kotouče.....	28
4.2	Organické brzdové destičky	29
4.3	Kovové brzdové destičky	29
4.4	Keramické brzdové destičky	29

4.5	Materiály, chemické prvky a jejich funkce	30
4.6	Ekologie – emise brzdových systémů	33
4.7	Testování třecích materiálů	35
5	Praktická část	39
5.1	Návrh zařízení	39
5.2	Realizace zařízení.....	48
5.3	Metodika měření	50
5.4	Měření parametrů brzdových členů	52
5.5	Ekonomické zhodnocení	60
6	Závěr	62
	Seznam použité literatury a zdrojů	63
	Seznam obrázků.....	68
	Seznam tabulek	71
	Seznam příloh	72

1 Úvod

Trendem moderní doby je neustálé zrychlování a zefektivňování procesů, kterými jsme obklopeni. Tento jev můžeme pozorovat rovněž v automobilovém průmyslu, kde jsou kladeny čím dál vyšší nároky na výkon, nízké odpory mechanismů, ekonomickou nenáročnost a v posledních letech také ekologii a udržitelnost.

Velmi důležitou funkci ve všech dopravních prostředcích plní brzdové systémy. Jejich úkolem je redukovat generovanou energii a zajistit tak bezpečné zpomalení či úplné zastavení vozidla. Klíčovou roli přitom hraje materiál, ze kterého jsou brzdící členy vyrobeny, kdy vlastnosti jednotlivých prvků určují výslednou funkčnost a efektivitu celého systému. Brzdné materiály musejí odolávat nejen okolnímu prostředí, vysokým tlakům a teplotám, které vznikají při procesu brzdění, ale rovněž vyhovovat z hlediska ekologie. Již v minulosti se několikrát prokázalo, že některé prvky, obsažené v těchto specifických materiálech, jsou v určitém stavu a množství pro lidský organismus nebezpečné. Vývoj nových, funkčních a ekologicky přijatelných třecích materiálů vede přes zkoušení nejen základních tribologických parametrů, ale rovněž přes aplikační zkoušky, které vystavují materiál reálným provozním podmínkám.

Tato práce je motivována stále se zvyšujícími funkčními i ekologickými nároky na brzdné materiály v automobilovém průmyslu, které přináší nové normy. Přesná definice zkoušek těchto materiálů a jejich okrajových podmínek ovšem není přesně specifikována, proto se můžeme setkat s odlišnými přístupy zkoušení. Práce je rovněž motivována myšlenkou zkoušení vlastností třecích materiálů na Fakultě strojní ČVUT a vybavením nově vzniklé tribologické laboratoře novým zkušebním zařízením.

Cílem teoretické části práce je popis problematiky brzdných systémů, třecích materiálů a jejich zkoušení. V praktické části je cílem návrh a realizace zařízení pro měření emisivity různých brzdných materiálů, v neposlední řadě také návrh metodiky měření základních tribologických i emisních parametrů a provedení některých z měření.

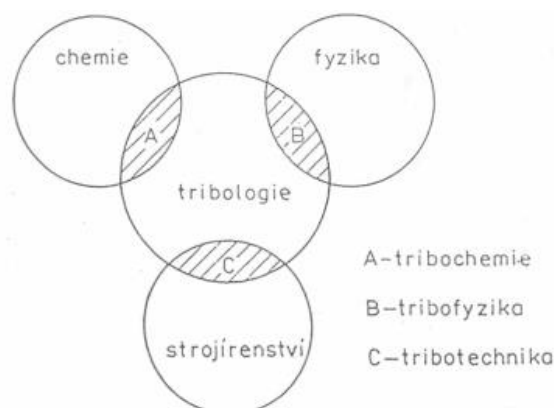
2 Tribologie

Tribologie je věda zabývající se třením, opotřebením i mazáním funkčních prvků. Její počátky datujeme od 60. let minulého století, kdy se do popředí dostávají otázky ochrany životního prostředí a s nimi spjaté šetření veškerých druhů energií. Již tehdy byla tribologie definována jako věda a technika vzájemného působení povrchů tuhých těles při jejich relativním pohybu a s praxí tím spojenou. I v pozdějších letech vzniklo mnoho definic pro tuto vědu, jejíž název byl odvozen z řeckého *tribos*, tedy tření. [1, 2, 3]

S vývojem vědy a technologie, zabývající se interakcemi materiálů a jejich povrchů, docházelo ke zvyšování provozní spolehlivosti strojů či zařízení, a také k navýšení jejich účinnosti i životnosti. Odhaduje se, že ztráty, způsobené nesprávnou aplikací základních tribologických zásad, se celosvětově pohybují až okolo 30 % vyrobené energie. Základními příčinami ztrát energie jsou:

- nevhodná volba třecích dvojic,
- zanedbání vlivu okolí,
- nevhodné mazivo či jeho aplikace,
- nesprávné tribologické konstrukční normy.

Samotný vědní obor, zabývající se aplikací tribologických zásad do konstrukce strojů a technických zařízení, je označován jako *tribotechnika*. Podobným způsobem byly odvozeny rovněž další vědní disciplíny popisující vzájemné působení povrchů v daném odvětví (fyzikální, chemické, biologické, nebo mechanické). Tyto vědní obory jsou nazývány *tribofyzika*, *tribochemie*, *tribobiologie* a *tribomechanika*. [1, 3]

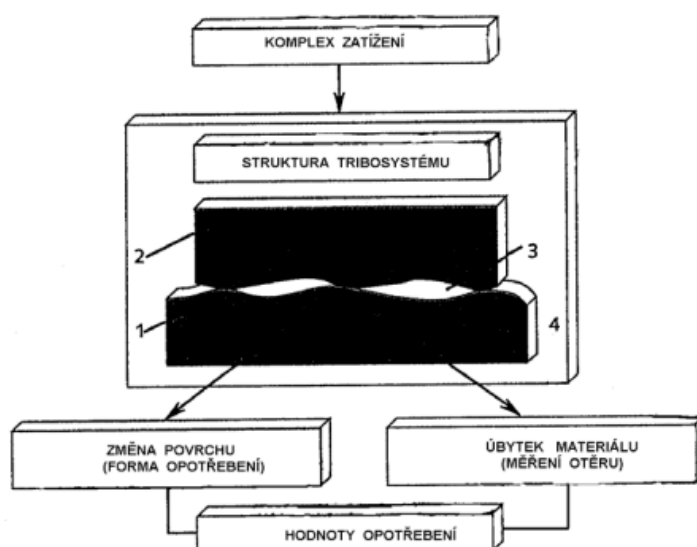


Obr. 1: Souvislost tribologie s odvozenými vědními obory [1]

2.1 Tribologický systém

Mluvíme-li o umělém či přirozeném systému, ve kterém na sebe působí dvě a více struktur systémových prvků, mezi kterými probíhá tření, nazýváme ho tribologickým systémem (tribosystém). Takový systém zpravidla obsahuje čtyři základní prvky. Pokud jeden z těchto prvků chybí, mluvíme o takzvaném redukovaném tribologickém systému.

1. Základní třecí těleso,
2. třecí těleso,
3. mezilátka,
4. okolí (v některých případech může splývat s jedním z prvků). [1, 2]



Obr. 2: Schéma tribologického systému

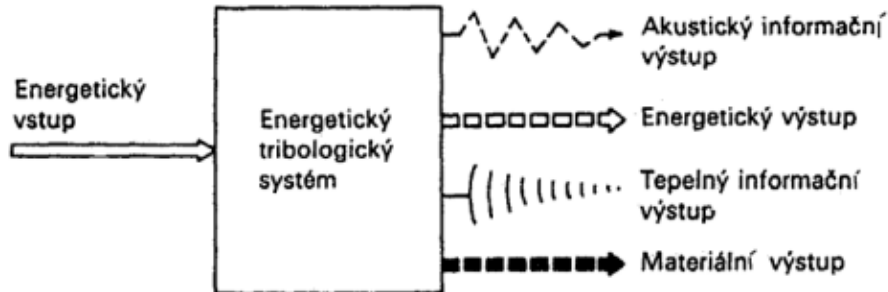
(1- základní třecí těleso, 2- třecí těleso, 3- mezilátka, 4- okolí) [1]

Princip úplného i redukovaného tribologického systému můžeme pozorovat na reálných systémech a aplikacích. Názorné příklady jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 1: Příklady tribologických systémů [1]

tribologický systém	základní třecí těleso	třecí těleso	mezilátka	okolí
převodovka	ozubené kolo 1	ozubené kolo 2	převodový olej	vzduch
kotoučová brzda	brzdová zdrž	brzdový kotouč	—	vzduch
lodní pohon	lodní šroub	voda	—	—

Charakteristickou vlastností tribologického systému je přeměna vstupní energie na jiný druh energie při výstupu. Setkáváme se s přeměnou mechanické energie na tepelný, akustický či materiální výstup, velmi častá je kombinace těchto druhů výstupu. [1]



Obr. 3: Schéma energetického systému s různými druhy výstupu [1]

2.2 Tření

Fyzikální jev, který je vázán na vzájemný pohyb více styčných ploch různých prvků v tribologickém systému, nazýváme tření. Tento proces lze definovat jako ztrátu mechanické energie na začátku, v průběhu či po ukončení relativního pohybu styčných oblastí různých těles. V podstatě se jedná o vznik adhezních a deformačních odporů, které zabraňují vzájemnému pohybu. [1, 4]

2.2.1 Dělení tření

- Vnější – charakterizováno stykem třecích ploch.
- Vnitřní – dochází k němu v materiálových vrstvách jednoho tělesa.

Dle třecího stavu

Tření lze dělit podle stavu či skupenství styčných ploch na:

- tření pevných těles,
- kapalinové tření,
- plynové tření,
- plazmatické tření.

V praxi se samostatně jednotlivé stavy vyskytují jen v omezené míře a daleko častěji se setkáváme s kombinací dvou či více třecích stavů zároveň, takové tření nazýváme smíšené.

Z funkčního hlediska

S třením se setkáváme téměř kdekoli. Efekt tření v technických aplikacích může zrovna tak dobře sloužit, jako způsobovat nechtěné ztráty. Z tohoto důvodu rozlišujeme tření na:

- potřebné – plní funkci v určitém systému či zařízení (brzdné systémy, spojky),
- nežádoucí – snižuje účinnost a životnost daného systému (ložiska, ozubená kola).

Z hlediska energie pohybu

- Pohybové (dynamické).
- Klidové (statické, adhezní).
- Nárazové (vibrační).

Z hlediska dráhy pohybu

- Kluzné (smykové).
- Valivé. [1, 2, 3]

2.2.2 Koeficient tření (μ)

Koeficient tření je určen *Coulombovým zákonem* (Rovnice 1) kdy představuje poměr mezi třecí silou, bránící pohybu styčných povrchů, vůči normálové síle, stlačující tyto povrchy k sobě. K jeho značení je obvykle využíváno řecké písmeno *mi* (μ), často se také můžeme setkat se zkratkou COF, vycházející z anglického "*Coefficient of friction*". Tento bezrozměrný parametr je zcela zásadní při určování tribologických vlastností materiálu a jeho povrchu. [1, 2, 5]

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} [-] \quad (1)$$

V praxi je koeficient tření závislý právě na materiálu styčných ploch, textuře povrchu, teplotě, okolním prostředí, či vzájemné rychlosti pohybu. Právě vzájemný pohyb styčných ploch napomáhá rozlišovat statický (μ_0) a dynamický (μ) koeficient tření, kdy statický koeficient zpravidla nabývá hodnot o dvacet až třicet procent vyšších, než je tomu u koeficientu dynamického. [1, 6]

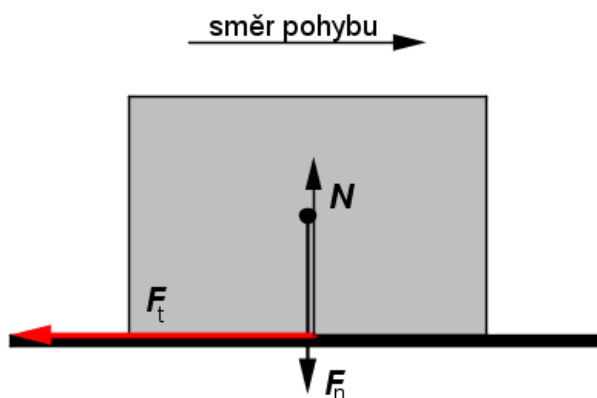
Příkladem můžeme uvést tažení cihly po dřevěném stole, kdy dynamický koeficient mezi povrchy nabývá hodnoty 0,5. To znamená, že pro překonání třecí síly, a tedy posouvání cihly po stole konstantní rychlostí, potřebujeme vyvinout sílu rovnou jedné polovině váhy dané cihly. Abychom cihlu přivedli k pohybu ze statické polohy, koeficient tření se bude rovnat přibližně hodnotě 0,6. [7]

Tab. 2: Příklady dynamického koeficientu tření v závislosti na materiálech [8]

dvojice matriálů	μ [—]
ocel – led	0,02
ocel – ocel	0,1
ocel – kůže	0,6
ocel – pryž	0,7

2.2.3 Kluzné (smykové) tření

Pokud se vzájemná pozice styčných ploch nemění a při pohybu dochází ke smýkání, pak hovoříme o kluzném neboli smykovém tření. Z fyzikálního hlediska lze vyjádřit tento typ tření v podobě třecí síly (F_t), ta je dána součinem síly normálové (F_n), tedy síly působící kolmo ke styčné ploše, a koeficientu tření (Rovnice 2). [1, 2, 6]

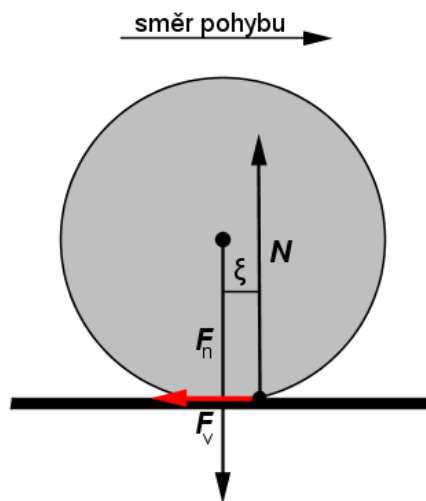


Obr. 4: Schéma kluzného tření [6]

$$F_t = F_n \cdot \mu [N] \quad (2)$$

2.2.4 Valivé tření

V případě, kdy dochází k odvalování kruhového, nebo jinak zaobleného tělesa po ploše cizího tělesa, mluvíme o valivém tření. Při porovnání třecích sil u valivého tření dostáváme hodnoty o deset až dvacet procent nižší, než je tomu u třecí síly při kluzném, chcete-li smykovém, tření. Výpočet síly nutné pro odvalování (F_v) zahrnuje součinitel valivého tření (ξ), který má délkový rozměr (Rovnice 3). Jeho hodnota je dána vzdáleností mezi vektorem síly (N), působící v místě prvního dotyku styčných ploch, a posunutým vektorem normálové síly, který prochází středem tělesa. [1, 2, 9]



Obr. 5: Schéma valivého tření [9]

$$F_v = \xi \cdot \frac{F_n}{R} [N] \quad (3)$$

2.3 Opotřebení

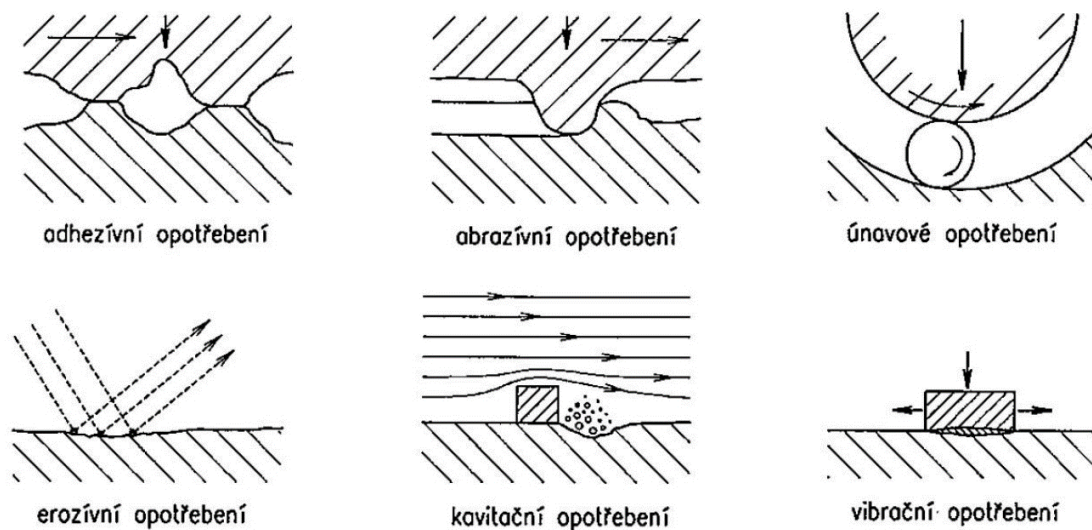
Projevem tribologického procesu v tribologickém systému je opotřebení. Jedná se o změnu povrchů a rozměrů těles, vzniklou vzájemným působením funkčních povrchů, případně funkčního povrchu a média, která je vyvolána při vzájemném relativním pohybu. Opotřebení lze dělit dle procesů, kterými je způsobeno, na *mechanické* a *chemické*. [1, 2]

Definice a míra opotřebení závisí na mnoha dílčích faktorech v tribologickém systému. Tyto faktory lze dělit na *vstupní* (základní vlastnosti třecích těles, mezilátky, či zatěžovací komplex), *vnitřní* (změny vlastností materiálu, přestup tepla) a *výstupní* (intenzita tření). [1, 2, 10]

2.3.1 Mechanismy opotřebení

Samotné opotřebení je důsledkem mechanismů probíhajících v tribologickém systému. Tyto mechanismy mohou probíhat samostatně i současně a jejich vliv na celkové opotřebení se může v průběhu procesu měnit. Mezi základní mechanismy opotřebení řadíme:

- abrazivní opotřebení,
- adhezivní opotřebení,
- erozivní opotřebení,
- únavové opotřebení,
- kavitační opotřebení,
- vibrační opotřebení,
- korozivní opotřebení. [1, 2, 3]



Obr. 6: Základní mechanismy opotřebení [2]

Adhezivní opotřebení

Mechanismus adhezivního opotřebení je založen na působení adhezních sil při dotyku funkčních povrchů a následném porušení povrchové vrstvy. V principu dochází ke kontaktu výčnělků na površích funkčních ploch a vzniku mikro-svářů mezi nimi. Následkem dalšího pohybu dochází k porušení vazeb v povrchové vrstvě a vytrhávání částic materiálu. Intenzivní forma adhezivního účinku je nazývána zadírání. K omezení

tohoto druhu opotřebení je využíváno mazivo, které se aplikuje mezi funkční plochy. Dále je také důležitý výběr materiálů funkčních dvojic, jejich zpracování i povrchová úprava. [1, 2, 10]

Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení je způsobeno tvrdými částicemi, které působí na měkčí materiál, čímž vytvářejí rýhy. Tyto částice se v tribologickém systému mohou vyskytovat ve vázaném i volném stavu. Právě abraze úzce souvisí s adhezivním opotřebením, kdy vylomená částice zůstává v mazivu a abrazivně působí na povrch. [1, 2, 10]

Erozivní opotřebení

Dalším mechanismem opotřebení je eroze. Stejně jako při abrazivním opotřebením, i zde hrají roli tvrdé částice, ty jsou unášeny proudem kapaliny nebo plynu a dopadají na povrch tělesa. Porušení materiálu je úzce spjaté s výskytem vířivých proudů, a tudíž je z pravidla nerovnoměrné. Míra opotřebení rovněž závisí na množství a charakteru částic, jejich energii nebo úhlu dopadu na povrch. [1, 2, 10]

Únavové opotřebení

Únavové opotřebení patří mezi nejčastější formy opotřebení a je vyvolané opakovaným, časově proměnným, namáháním povrchové vrstvy. Dochází ke tvorbě trhlin, následnému uvolňování částic z povrchu a tvorbě důlků. Z tohoto důvodu se rovněž můžeme setkat s označením dolíčkové opotřebení neboli “*pitting*“. [1, 2]

Korozní opotřebení

Nastává, pokud je třecí dvojice vystavena aktivnímu prostředí, kdy dochází k degradaci materiálu vlivem oxidace a následnému uvolňování produktů z povrchu. [1, 2, 10]

Vibrační opotřebení

Vibrační opotřebení vzniká za přítomnosti vibračního, nebo vratného pohybu s velmi malou amplitudou. Nejprve dochází k porušení adhezivní povrchové vrstvy, následně vzniklé odpadní produkty oxidují a abrazivně působí na povrch. [1, 2]

3 Brzdové systémy

Z hlediska bezpečnosti se brzdné systémy řadí k nejdůležitějším součástem nejen vozidel, ale strojů obecně. Zajišťují zamezení pohybu v klidovém stavu i plynulé zpomalení jejich pohybu. Drtivá většina takových systémů funguje na principu změny třecích odporů, a tedy přeměny pohybové energie na energii tepelnou. V návaznosti na předchozí kapitolu je třeba zmínit, že kromě samotné konstrukce, zde hraje klíčovou roli volba materiálu, u kterého se snažíme dosáhnout co nejvyššího koeficientu tření. Vysoký koeficient tření zajistí bezpečnější zastavení i využití výkonnějších systémů. Na druhou stranu s sebou přináší vyšší pracovní teploty a tlaky, se kterými se musíme vypořádat. [11, 12]

3.1 Definice základních pojmů

Ke stanovení základních pojmů z oboru silničních vozidel, a tudíž i brzdných systémů a brždění, slouží norma ČSN 30 0029 (Základní automobilové názvosloví – definice). Kromě dalších, norma popisuje i následující pojmy. [13]

Brzdná síla [N] – síla působící proti směru pohybu stroje. Brzdná síla je vyvozená účinky brzdové soustavy.

Ovládací síla brzdy [N] – síla na brždění vynakládaná obsluhou stroje či jiným zdrojem.

Brzdící síla [N] – síla, vzniklá přímo v brzdném systému, vyvolávající zpomalující sílu na brzděných prvcích.

Doba brždění [s] – časový úsek od počátku brždění po úplné zastavení stroje či pominutí brzdného účinku.

Dráha brždění [m] – dráha, po kterou přetrvává stroj v pohybu v době brždění.

Doba (dráha) prodlevy brzdy (t_1 – Obr. 7) – od okamžiku působení na brzdný systém do okamžiku, kdy se začne projevovat účinek brzdy.

Doba (dráha) náběhu brždění (t_2 – Obr. 7) – od okamžiku, kdy se začne projevovat účinek brzdy, do okamžiku, kdy dosáhne svého maxima.

Doba (dráha) doběhu brzdění (t_4 – Obr. 7) – od okamžiku kdy již není působeno na brzdňý systém po okamžik, kdy účinek brzdy pomine.



Obr. 7: Průběh brzdění [14]

Brzdňý výkon [W] – součin brzdňé síly [N] a rychlosti stroje [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Slábnutí brzdňého systému – zmenšování účinku brzd, způsobené jejich funkcí (zahříváním). Po určité době (vychladnutí) pomine.

Sílení brzdňého systému – zvýšení účinku brzd, způsobené vnějšími vlivy při provozu. [13, 14]

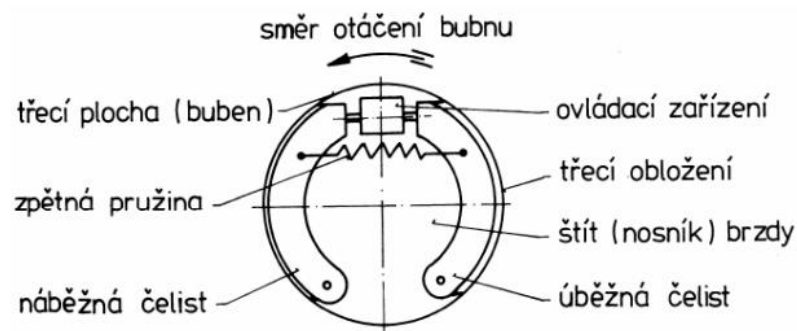
3.2 Typy brzdňých systémů

Z hlediska využití můžeme brzdňové soustavy rozlišovat na *provozní*, *nouzové*, *parkovací* a *zpomalovací*. Každá z těchto skupin nachází využití v různých situacích při provozu stroje, proto se také liší konstrukcí, ovládáním, nebo možnostmi regulace. Dále můžeme dělit brzdňové soustavy do tří kategorií dle zdroje energie na *přímochinné* (mechanické a kapalinové brzdy), *přímochinné s posilovačem* a *nepřímochinné* (strojní brzdy). Dle konstrukce můžeme rozlišovat brzdy *bubňové* a *kotoučové*. [15]

3.2.1 Bubňové brzdy

Bubňová brzda funguje na principu vyvolání brzdňého momentu pomocí tření mezi bubňem (rotační částí) a brzdňovými čelistmi s obložením (pevnou částí). Další důležitou komponentou je ovládací zařízení (hydraulický váleček), zajišťující rozpínání čelistí, nebo zpětná pružina, která naopak uvádí čelisti do výchozího stavu, tedy stavu bez

brzdného efektu. Všechny komponenty bubnové brzdy jsou uzavřeny samotným bubnem a štítem brzdy, celý systém je tímto způsobem chráněn před vnější atmosférou. [15, 16]

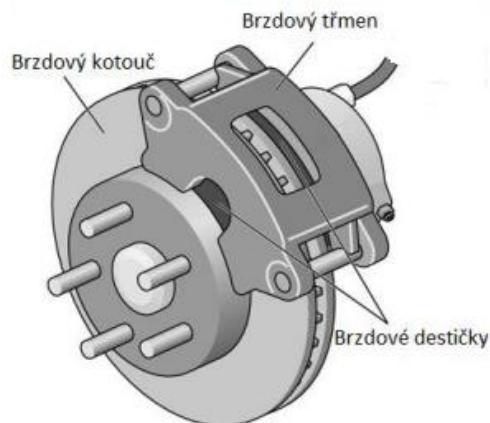


Obr. 8: Schéma bubnové brzdy [17]

Bubnové brzdy byly ještě do nedávna využívány především v automobilovém průmyslu, dnes se využívají pouze na zadních nápravách automobilů nižších tříd. Hlavní výhodou je jejich jednoduchost, dlouhá životnost a schopnost vyvolat poměrně velký brzdný moment při malé ovládací (přítlačné) síle. Naopak velkou nevýhodou je slábnutí brzd, které je vyvoláno dlouhodobým brzděním, a tedy zahřívání systému, což způsobuje pokles brzdného účinku. [16, 17]

3.2.2 Kotoučové brzdy

Stejně jako u bubnových brzd, i kotoučové brzdy fungují na principu mechanického tření. Zde je třecí plocha tvořena kotoučem (rotační částí) a třecími segmenty v podobě brzdových destiček (pevnou částí). Samotný efekt brzdění je tedy způsoben sevřením brzdového kotouče mezi destičky, které jsou společně s přítlačnými pístky uloženy ve třmeni. [15, 16, 17]

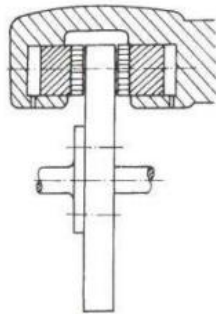


Obr. 9: Kotoučová brzda [18]

Kotoučové brzdy jsou využívány zejména v automobilovém průmyslu, kde se v dnešní době téměř nevyužívá jiného typu brzd. Na rozdíl od bubnových brzd nedochází k výraznému slábnutí při jejich dlouhodobém využívání a brzdná síla je lépe regulovatelná. Brzdný účinek nezávisí na směru otáčení kotouče, který ovšem není chráněn před vnějšími vlivy. Tato skutečnost se projevuje na nižší životnosti třecích segmentů, jejichž kontrola i výměna je poměrně jednoduchá. [15, 16, 17]

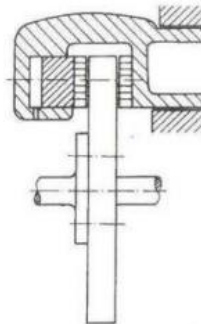
Kotoučové brzdy můžeme dále rozlišovat na základě konstrukčních vlastností, a to například podle počtu válečků (pístků) umístěných ve třmeni. Rozlišujeme soustavy *dvouválečkové (dvoupístkové)*, *čtyřválečkové (čtyřpístkové)*, a podobně. Dále můžeme kotoučové brzdy rozlišovat dle způsobu uchycení třmene na:

kotoučové brzdy s pevným třmenem – těleso třmene je nehybné a hydraulické válce jsou umístěny po obou stranách kotouče,



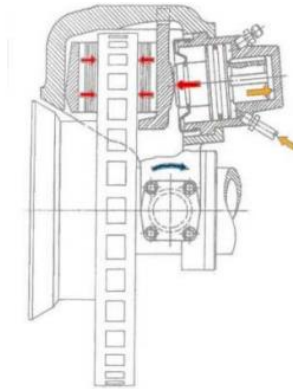
Obr. 10: Schéma kotoučové brzdy s pevným třmenem [17]

kotoučové brzdy s volným třmenem – těleso třmene je posuvné ve směru osy válce. Hydraulický válec je pouze na jedné straně kotouče, na druhé straně je napevno uchycený třecí segment. Při působení pístku na kotouč dojde k posunutí celého třmene a kotouč je brzděn z obou stran.



Obr. 11: Schéma kotoučové brzdy s volným třmenem [17]

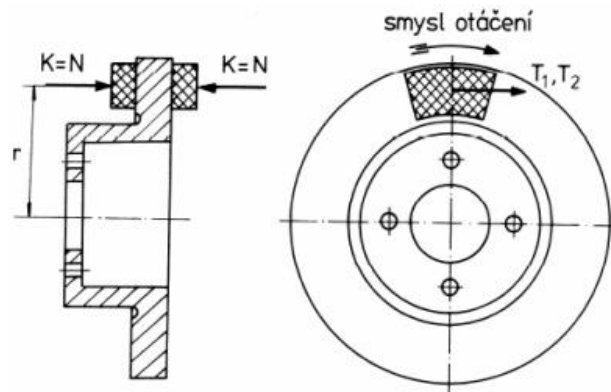
Kotoučové brzdy s výkyvným třmenem – hydraulický válec je umístěn na výkyvném systému pouze na jedné straně. Pístek v tomto válci následně tlačí na posuvný držák s brzdovými destičkami, které působí na kotouč. [17, 19]



Obr. 12: Schéma kotoučové brzdy s výkyvným třmenem [17]

3.2.2.1 Výpočet brzdného momentu

Jak je patrné z obr. 13, při brzdění kotoučovou brzdou vzniká třecí plocha na boku rotačního kotouče a zároveň na třecích plochách přitlačovaných brzdových destiček.



Obr. 13: Schéma kotoučové brzdy [17]

Pro výpočet třecího momentu platí rovnice 4, kde střední poloměr třecího obložení je značen (r) a třecí síly pak (T_1 a T_2).

$$M_B = (T_1 + T_2) \cdot r \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (4)$$

Pokud uvažujeme, že ovládací síla (K) je rovna přítláčné síle (N). A třecí síla (T_1) je rovna třecí síle (T_2). Můžeme využít vztah z rovnice 5. Po dosazení následně dostáváme vztah pro třecí moment (Rovnice 6).

$$T_i = N \cdot \mu \quad (5)$$

$$M_B = 2 \cdot \mu \cdot N \cdot r \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (6)$$

Pro vnitřní převod kotoučové brzdy platí vztah:

$$c^* = \frac{\Sigma T_i}{K} = 2 \cdot \mu \quad (7)$$

kdy závislost $c^*=f(\mu)$ je lineární, proto je třecí závislost $dc^*/d\mu$ konstantní. Z toho plyne malá citlivost kotoučové brzdy na změnu součinitele tření. [17, 19]

3.2.2.2 Konstrukční řešení

Výroba i technologie jdou neustále dopředu, proto rovněž u některých součástí brzdných systémů můžeme najít konstrukční detaily, které vylepšují výsledný efekt brzdění. [16]

Brzdový kotouč

Velmi častým problémem u kotoučových brzd bývá jejich slábnutí, tedy přehřátí a ztráta efektivity způsobena intenzivním brzděním. Částečné řešení přinášejí dělené či odvětrávané brzdové kotouče, které za pomoci drážek, děr či vnitřních kanálků lépe odvádějí teplo. Takto upravené kotouče zajišťují lepší brzdný výkon i lehký pokles hmotnosti brzdového mechanismu. Na druhou stranu mohou způsobovat vyšší opotřebení brzdových destiček, vyšší hlučnost, nebo náchylnost kotouče ke tvorbě trhlin. [16, 20]



Obr. 14: Brzdové kotouče s různými konstrukčními úpravami pro lepší odvod tepla [20]

Brzdové destičky

U brzdových destiček je zásadní především volba materiálu třecích segmentů. Konstrukční řešení pak spočívá ve funkčnosti, a bývá zaměřeno na docílení snadné a rychlé vyměnitelnosti. Součástí moderních brzdových destiček může být například senzor, který upozorní na potřebnou výměnu. [2, 16, 21]

3.3 Testování brzdných systémů

Testování brzdných systémů je velmi důležité a využívané nejen v automobilovém průmyslu, kdy zajišťuje správnou funkci a bezpečnost stroje. V dnešní době existuje několik druhů zkoušek, které jsou závislé na typu aplikace brzdného systému nebo okolních podmínkách cílové expozice. [22, 23]

Hlavní metody zkoušení v automobilovém průmyslu jsou řízeny normami Evropské ekonomické komise a normami pro bezpečnost motorových vozidel. Tyto metody mají za úkol porovnat především dva hlavní parametry, a tedy:

- **Čas potřebný k zastavení** – čas mezi prvním momentem, kdy je působeno na brzdový pedál, a momentem kdy vozidlo zcela zastaví.
- **Dráha potřebná k zastavení** – Dráha, kterou vozidlo ujede od momentu, kdy je započat proces brzdění, do úplného zastavení vozidla.

Oba parametry můžeme vyjádřit rovnicemi 8 a 9, kde (V_0) je počáteční rychlost a (D_x) představuje zpomalení způsobené bržděním. [22, 23]

$$\text{Čas potřebný k zastavení} = \frac{V_0}{D_x} \quad (8)$$

$$\text{Dráha potřebná k zastavení} = \frac{V_0^2}{2 \cdot D_x} \quad (9)$$

3.3.1 Test typu P (dynamický)

Test je prováděn za normami stanovených rychlostí, zatížení a dalších podmínek. Princip tohoto testu spočívá v uvedení vozidla lehce nad normou předepsanou rychlost a následném odpojení pohonu. Jakmile klesající rychlost dosáhne předepsané hodnoty, zahájí se plynulé brzdění do úplného zastavení. Cílem v této fázi testu je najít

neoptimálnější ovládací sílu, kdy ještě nedochází k úplnému zablokování kola. Pokud je taková síla stanovena, test se opakuje tolikrát, aby výsledkem byly alespoň čtyři vypovídající hodnoty. [22]

3.3.2 Test typu F (tepelný)

Cílem zkoušky na oteplení je posouzení chování brzdy při opakovaném použití, jelikož obecně platí, že brzdny účinek s narůstající teplotou klesá. Výchozí podmínky, jakými jsou ovládací síla, použití řazení, nebo ovládní spojky jsou dané normou. Vozidlo uvedené do předem stanovené rychlosti je po 1 000 metrech zcela zastaveno, po zastavení okamžitě znovu zrychluje na požadovanou rychlost. Po deseti zastaveních se provádí výše popsany test typu P, který stanovuje ovládací sílu. V tomto případě se test typu P provádí pouze jednou. [22]



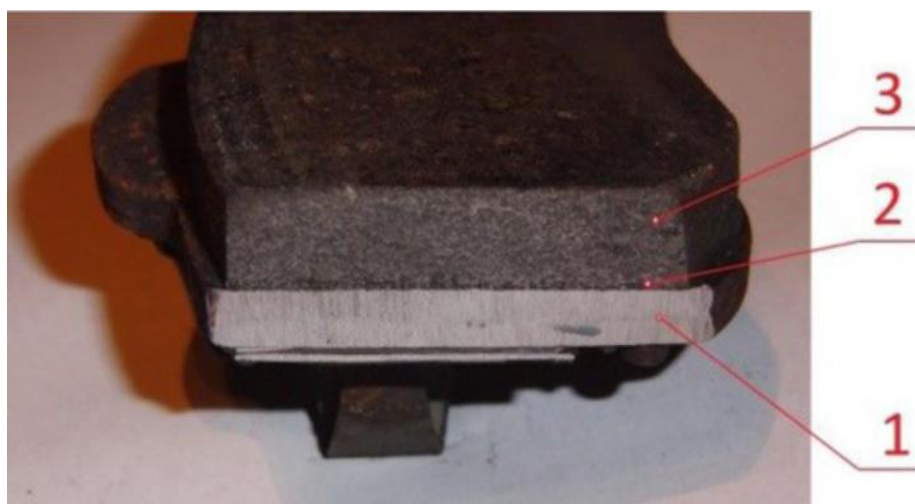
Obr. 15: Brzdový systém během testování [20]

3.3.3 Test typu W (za vlhka)

Tento typ testu hodnotí chování brzdnyho systém ve vlhkém prostředí. Zkouška vyžaduje suchou dráhu a zkoušené brzdy navlhčené normou stanoveným postupem, kdy teplota vody nesmí přesahovat 30 °C. Principem zkoušky je brždění vozidla stanovenou ovládací silou, a to celkem 15krát s intervalem 120 sekund mezi dvěma zastaveními. Z každého zastavení je vypočtena střední hodnota zpomalení, která je porovnána s hodnotami danými normou. [22]

4 Třecí materiály

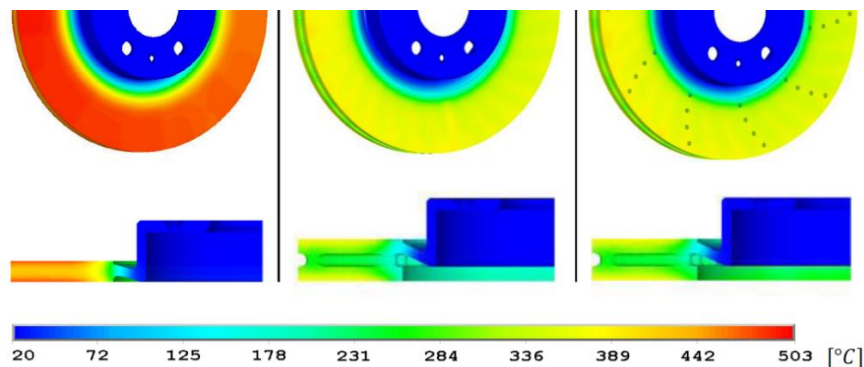
Při navrhování a použití brzdových systémů hraje zcela zásadní roli volba třecích materiálů. Tato volba závisí především na budoucím využití brzdného systému, a tedy požadovaných vlastnostech jako je brzdný výkon, tepelná vodivost, cenová dostupnost, životnost nebo ekologie. Obecně se však u těchto materiálů snažíme dosáhnout nízké hmotnosti, velkých třecích odporů za provozních teplot a dobré tepelné vodivosti pro odvod energie ze systému. K výrobě brzdových kotoučů bývají nejčastěji využívány slitiny kovů či kompozitní materiály, a brzdné vlastnosti ovlivňuje z velké části jeho konstrukční řešení. Brzdové destičky jsou oproti kotoučům složeny z několika částí. Jakousi základnu představuje podkladový plech, sloužící k uchycení destičky do brzdného systému. Materiálově se jedná většinou o vyžíhanou nízkouhlíkovou ocel. Další vrstvu představuje lepidlo přichycující poslední, ovšem velmi podstatnou, třecí vrstvu, obvykle vysokou 6–9 mm. Tato vrstva působí na kotouč a způsobuje samotný efekt brzdění. Třecí vrstvy jsou v dnešní době nejčastěji vyráběny práškovou metalurgií z řady různých prvků, kdy každý z nich nabízí specifické vlastnosti. V minulosti se jako brzdné materiály využívaly například tvrdá dřeva nebo kůže, později pak především materiály na bázi azbestu (osinku). [2, 24, 25]



Obr. 16: Řez brzdovou destičkou s vyznačenými vrstvami
(1- podkladový plech, 2- lepidlo, 3- třecí vrstva) [25]

4.1 Brzdové kotouče

S ohledem na funkci brzdového kotouče se pro výrobu jeví jako ideální materiál s vysokou tepelnou vodivostí, minimální roztažností a nízkou hustotou, ovlivňující výslednou hmotnost brzdové soustavy. Právě vysoká tepelná vodivost materiálu je velmi důležitá pro odvod tepla vytvořeného mařením pohybové energie pomocí tření. Pro dosažení lepších brzdících vlastností u daného materiálu, můžeme aplikovat konstrukčních řešení pro lepší odvod tepla, jak již bylo popsáno v kapitole 3.2.2.2. [20]



Obr. 17: Simulace teplotního pole na brzdových kotoučích s různým typem chlazení [20]

V praxi se velmi často setkáváme s litinovými kotouči, které jsou cenově dostupné, nepříliš náročné na výrobu a disponují dobrou tepelnou vodivostí i antivibračními vlastnostmi. Pro vylepšení materiálových vlastností litiny se využívají legující prvky jako například molybden (Mo), měď (Cu), chrom (Cr) nebo titan (Ti). Dále se můžeme setkat s kompozitními materiály vyskytujícími se na opačné straně cenového spektra, oproti litinám. Tyto materiály jsou využívány především pro sportovní účely a luxusní vozy, mají výborné vlastnosti za vysokých teplot a dlouhou životnost. Naopak při běžných provozních podmínkách nedosahují optimálního brzdného výkonu a mají sklony k pískání. [20, 21, 24]

Tab. 3: Srovnávací tabulka vybraných materiálů brzdových kotoučů [20]

materiál	hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	součinitel teplotní roztažnosti [$\times 10^6\cdot\text{K}^{-1}$]
šedá litina	7 800	62	10,0-13,0
Al-MMC	2 700	182	18,0-25,0
keramika + uhlíkový kompozit	1 700	300	0,1-1,5

4.2 Organické brzdové destičky

Organické brzdové destičky byly vyvinuty jako náhrada za dříve využívané azbestové destičky, z tohoto důvodu jsou rovněž známy jako NAO destičky (*non-asbestos organic*). Pro jejich výrobu jsou využívány různé typy vláken (skelná, uhlíková, pryžová nebo kevlarová) a pryskyřice, fungující jako pojivo. Tento typ brzdných destiček bývá velmi často využíván jako originální součást nových automobilů, a obvykle jsou rovněž nejlevnější alternativou při servisu brzdných systémů. Organické brzdové destičky jsou tiché, relativně měkké a šetrné k dalším komponentům brzdnému systému při vysoké variabilitě okolních podmínek, proto jsou vhodné ke každodennímu využití. Jejich nevýhodou je rychlé opotřebení a vysoká míra vyprodukovaných emisí v podobě prachu. Vzhledem k malé toleranci na přehřátí jsou nevhodnou volbou při sportovním nebo vysoko-výkonnostním využití. [24, 25, 26]

4.3 Kovové brzdové destičky

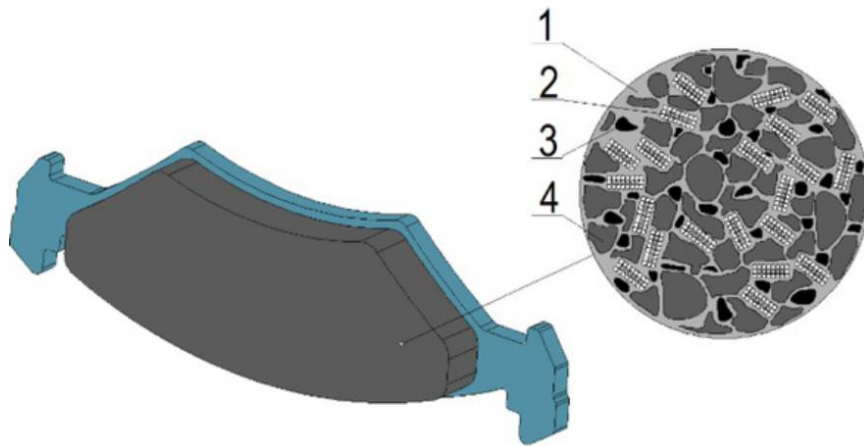
Jak již název napovídá, kovové brzdové destičky jsou vyráběny z kovových částic, především z mědi, oceli nebo mosazi. Kovová složka materiálu tvoří až 65 %, zbylý obsah představuje matrice společně s modifikátory tření. Kovové brzdové destičky mají rozmanitou škálu využitelnosti. Jsou vhodné jak ke každodennímu, tak vysoko-výkonnostnímu využití, což dáno především jejich vysokým rozsahem pracovních teplot a možností vyvinout vysokou brzdící sílu. Jejich životnost je delší, než je tomu u organických materiálů, avšak rovněž produkují poměrně vysoké množství emisních produktů. Nevýhoda spočívá ve vysoké hlučnosti a k tendenci k pískání. Rovněž jsou méně šetrné k ostatním součástem brzdného systému. [25, 26]

4.4 Keramické brzdové destičky

Vyvážený poměr pohodlí a výkonnosti nabízejí brzdové destičky s keramickými třecími materiály. Jsou tvořeny keramickými vlákny, které zajišťují dlouhou životnost. Vynikají nepříliš velkou emisivitou, nízkou hlučností a dobrou tepelnou odolností. Jejich účinnost je podmíněna teplotou, která se může lišit s konkrétním složením materiálu, obecně však platí, že keramické destičky fungují v intervalu vysokých teplot a nejsou vhodné k využití za extrémně nízkých teplot. Největší nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady, které značně převyšují dříve zmíněné typy brzdových destiček. [25, 26]

4.5 Materiály, chemické prvky a jejich funkce

Třecí materiály obsahují celou řadu prvků se specifickými vlastnostmi. Některé jsou nezbytné pro soudržnost materiálu, jiné mají nezastupitelnou funkci při samotném brzdění. Na základě funkce jednotlivých prvků v třecím materiálu je můžeme rozlišovat na pojiva, plniva, brusiva a přísady. [24, 25, 27]



Obr. 18: Struktura třecího materiálu (1- pojivo, 2- výztuž, 3- plnivo, 4- brusivo) [25]

Fenolové pryskyřice

Nejčastějším plnivem třecích materiálů jsou fenolové pryskyřice. Tyto materiály představují hmotnostní podíl 5 až 35 % celkového objemu, disponují vysokou mechanickou odolností, nízkou tepelnou roztažností a nízkou cenou. Nevýhodou fenolových pryskyřic je jejich náchylnost ke křehnutí při vyšších teplotách, která jde zmírnit přísadami ve formě oleje či silikonu. Při spojení fenolové s epoxidovou pryskyřicí dosahujeme lepších mechanických vlastností a odolnosti vůči vyšším teplotám. [24, 25]

Aramidová a skelná vlákna

Aramid, známý též jako kevlar, nabízí vysoký modul pružnosti v tahu, dobré chování za vysokých teplot i pozitivní dopad na opotřebení třecího materiálu, kde je využíván jako výztuž. Optimální zastoupení aramidových vláken byla odhadnuta na 6 % celkového hmotnostního objemu. Stejně jako aramid, i skelná vlákna mohou zastupovat roli výztuže, jsou velmi tvrdá a odolná proti oděru. Kombinace těchto dvou druhů vláken představuje velmi kvalitní hybridní materiál. [24, 25]

Baryt (BaSO₄)

Baryt je minerál s vysokou hustotou a tribologickými vlastnostmi, které se téměř nemění s rostoucí teplotou. Se zvyšujícím obsahem BaSO₄ se snižuje celková míra opotřebení a jeho přítomnost má kladný vliv na stabilitu koeficientu tření. Tyto vlastnosti z barytu dělají vhodnou výplň do třecích materiálů. [24, 25]

Měď (Cu)

Jednou ze základních součástí třecích materiálů je měď a v mnohých případech jsou tribologické vlastnosti spjaty právě s obsahem mědi, kdy při zastoupení vyšším jak 4 % hmotnostního objemu, dochází k navýšení koeficientu tření. I když se jedná o relativně měkký kov, je stále obvykle tvrdší a odolnější vůči otěru než pojivo. Při otěru měď vytváří tenký film, který zvyšuje tepelnou vodivost a odolnost brzdové destičky. Nevýhodou je s tlakem a teplotou se měnící koeficient tření. [2, 24, 25]

Bór (Br)

Velmi dobrými tribologickými i izolačními vlastnostmi disponuje bór. Jeho zastoupení obvykle nepřesahuje 2 % hmotnostního objemu ovšem i tak zvyšuje odolnost vůči opotřebení i koeficient tření za nižších teplot. Jeho nízká tepelná vodivost, bohužel, znesnadňuje odvod tepla z třecích uzlů. [24, 25]

Uhlík (C) ve formě grafitu

Velmi důležitou roli v třecích materiálech zastupuje grafit, tedy uhlík s šesterečně uspořádanou krystalickou mřížkou. Právě díky své krystalické mřížce představuje kluznou přísadu, která zabraňuje zadírání. Grafit je poměrně levný, zlepšuje odvod tepla z materiálu a má pozitivní vliv na hlučnost i opotřebení brzdových destiček. Jako náhrada grafitu může být využíván sulfid molybdeničitý (MoS₂). [24, 25]

Titan (Ti)

Titan je lehký, ovšem drahý kov. Projevuje dobré mazací vlastnosti, zejména při vyšších teplotách, což rovněž přináší snížení hluku při brzdění. Třecí materiály obsahující titan jsou také méně náchylné ke slábnutí. [24, 25]

Mosaz (Cu+Zn)

Mosaz je slitina mědi a zinku s dobrými mazacími vlastnostmi, zlepšující tepelnou vodivost. Dále má pozitivní vliv na změny koeficientu tření v měnicích se provozních podmínkách. Ve srovnání s jinými třecími prvky je mosaz poměrně těžká, což se projevuje na výsledné hmotnosti materiálu. [24, 25]

Ocel

Ocel má dobrou tepelnou vodivost a odolnost vůči vysokým teplotám, díky které také stabilizuje koeficient tření. Do brzdových destiček je nejčastěji přidávána ve formě ocelové vlny, vláken či prášku. Vysoká frakce oceli, bohužel, vede k nežádoucímu vytváření hlubokých škrábanců na disku. [24, 25]

Litina

Litina se vyznačuje vysokou odolností vůči oděru. Celkově má pozitivní vliv na tribologické vlastnosti kdy již podíl mezi 2-4 % zvyšuje koeficient tření. Litina je obvykle využívána ve formě drcených třísek o velikosti jednoho milimetru. [24, 25]

Cín (Sn), Olovo (Pb)

Další kluznou přísadu, tentokrát při vyšších teplotách, představuje ve třecích materiálech olovo. Společně s cínem jsou pak tyto prvky velmi dobře spojeny s matricí a nejsou náchylné k vytrhávání. [24, 25]

Křemík (Si), Hliník (Al)

Prvky jako je křemík a hliník se v brzdých materiálech vyskytují ve formě oxidů, konkrétně se může jednat o křemen a korund. Tyto přísady zajišťují především vysokou hodnotu koeficientu tření, a to hlavně díky tvaru jednotlivých částic, které jsou pravidelné a ostrohranné. Takové částice zaručují rovnoměrný otěr, přičemž jsou stále pevně zakotveny v matrici. [24, 25]

4.6 Ekologie – emise brzdových systémů

Některé materiály, které se dříve jevily jako zcela ideální pro výrobu brzdových segmentů nyní nemusí vyhovovat z ekologického hlediska a ve formě odpadních produktů mohou být zdraví škodlivé. V minulosti jsme tento scénář mohli pozorovat u **azbestových materiálů**, které byly v devadesátých letech zakázány kvůli karcinogenitě. Nebezpečí azbestu tkví v uvolňování vláken malých rozměrů, která po respiraci pronikají do plic. S odstupem i několika let mohou azbestová vlákna v plicních sklípcích způsobovat rakovinové bujení nebo jiná plicní onemocnění. Na začátku nového tisíciletí byly přidány na seznam zakázaných látek rovněž **těžké kovy**. S ohledem na třecí materiály se toto omezení týká prvků jako je olovo či bismut, které se v třecích materiálech využívaly jako kluzné přísady pro vyšší teploty. Nejaktuálnější ekologická omezení třecích materiálů se týkají **mědi**. Do nedávna se tento prvek jevil jako zcela nenahraditelný a zásadní pro výrobu brzdového obložení, kdy vytvářel 5-20 % hmotnosti organických brzdových destiček, a účinně snižoval opotřebení, hluchost i vibrace při provozu. Podle zprávy ministerstva životního prostředí ze státu Washington má velká část mědi, znečišťující vodní zdroje, původ právě v brzdových destičkách. Přebytek mědi v potravě a pitné vodě má přitom negativní vliv na lidské zdraví a může vyvolávat řadu zdravotních obtíží včetně anémie, astmatu, akné nebo rozvoje deprese. I proto jsou dnes materiály brzdových destiček omezeny obsahem mědi pod 5 %. V roce 2025, se zavedením nové euro-normy, by toto omezení mělo klesnout až na 0,5 %. [25, 28, 29]

Nebezpečí třecích materiálů ovšem nespočívá pouze v charakteru jednotlivých prvků a jejich modifikacích, které vznikají při vysokých teplotách a mohou mít negativní dopad na lidské zdraví. Velmi zásadní je rovněž množství, struktura a velikost vyprodukovaných částic. Hlavní roli zde hrají částice PM₁₀, tedy částice s průměrem stejným, nebo menším než 10 μm. Tyto částice jsou přenášeny vzduchem a při vyšších koncentracích v ovzduší mohou negativně ovlivňovat lidský organismus, zejména pak respirační a kardiovaskulární systém. [27, 30]

Výrobci brzdových destiček se musejí stále vypořádávat s ekologickými nařízeními a hledat vhodné, bezpečnější materiály. V mnohých případech vedou i taková omezení k vývoji nových materiálů, které nabízejí srovnatelné nebo lepší vlastnosti v porovnání s materiály staršími. Měď byla zastoupena kombinací grafitu a titanu. Azbestová vlákna

byla zdárně nahrazena skelnými či aramidovými vlákny. Moderní doba ovšem nabízí využití i dalších, zcela přírodních materiálů. Velký potenciál přinášejí různé zemědělské materiály, které jsou nejen šetrné k životnímu prostředí, levné a udržitelné, ale rovněž disponují vysokou pevností. Jako forma výztuže v brzdových destičkách se v nedávné době osvědčily například skořápky kakaových bobů, palmových jader nebo ulity měkkýšů. Dalším organickým prvkem využívaným pro výrobu třecích materiálů je například celulóza, která při výrobě zajišťuje dostatečnou porezitu materiálu. Při využití přírodních materiálů k výrobě brzdových destiček je velmi důležité sledovat jejich množství či velikost jednotlivých částic, tím dochází k zásadnímu ovlivnění mechanických i fyzikálních vlastností. Některé z bio-materiálů mohou být náchylné na teplotu a stejně jako u materiálů se syntetickým původem, je nutné věnovat pozornost změně základního elementu v závislosti na teplotě. [25, 28]

Tab. 4: Mechanické vlastnosti bio-materiálů [28]

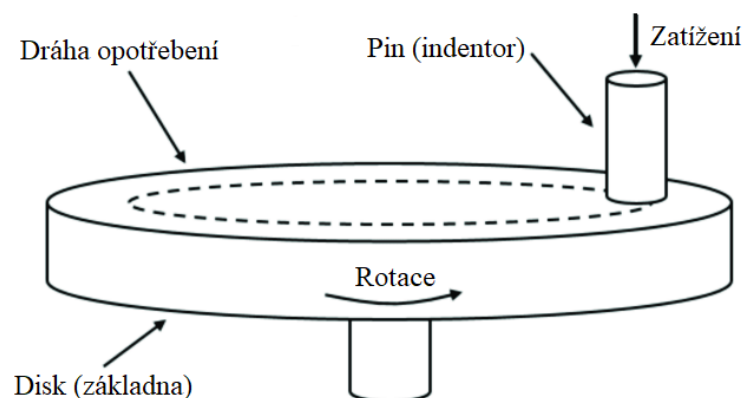
materiál	hustota [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	tažnost [%]	pevnost v tahu [MPa]	Youngův modul [GPa]
palmové jádro	0,93-2,30	2,1-5,0	227-278	2,7-3,2
rýžová sláma	0,86-,087	2,1-2,3	435-450	24,7-26,3
juta	1,3-1,46	1,5-1,8	393-800	10,0-30,0
konopí	1,48	1,6	550-900	70,0
kokosové vlákno	0,67-1,15	27,2-32,3	173-175	4,0-6,0
cukrová třtina	0,31-1,25	6,2-8,2	257-291	15,0-18,0
ananas	1,25-1,60	2,8-3,3	166-175	5,5-6,8
bambus	0,60-1,10	4,0-7,0	360-590	22,2-54,2
len	1,40-1,50	1,2-3,2	345-1 500	27,6-80,0
sisalové vlákno	1,30-1,50	2,0-14,0	400-700	9,0-38,0

4.7 Testování třecích materiálů

Tento druh testování může být orientován na měření tribologických vlastností materiálu a jeho složení, monitorování hmotnostního úbytku, emisivity jednotlivých prvků či kritických teplot a tlaků daného materiálu. Vzhledem k široké škále testovaných parametrů existuje rovněž celá řada přístupů, které lze při zkoušení využít. Můžeme se setkat jak s normalizovanými zkouškami, tak s experimentálními neboli aplikačními metodami. Volba druhu testování závisí především na požadovaných výstupech, složitosti či ekonomické náročnosti dané metody. Normalizované zkoušky mohou potvrdit teoretické vlastnosti materiálů, zatímco aplikační testování co nejvěrohodněji přibližuje reálné aplikace třecích materiálů a jejich dopady. [24, 27]

Pin on disk

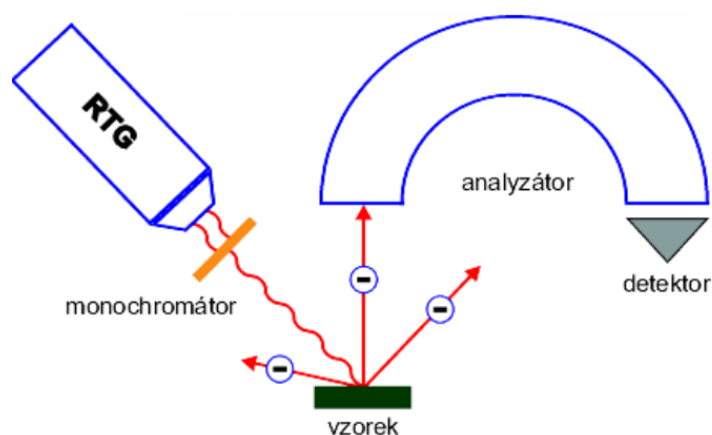
Jednou z nejběžnějších tribologických měřících metod je metoda pin on disk. Jedná se o jednoduchou a názornou zkoušku, která spočívá v pravidelném pohybu indentoru, obvykle ve tvaru kuličky či čocky, po kruhové dráze, při určitém zatížení. Tento mechanismus věrně napodobuje vzájemný pohyb brzdového kotouče a brzdových destiček, proto je vhodný k základnímu rozlišení brzdných materiálů. Další výhodou je nenáročnost a možnost měření tribologických vlastností při lubrikaci styčných ploch. Při měření typicky sledujeme dynamický koeficient tření (COF_D), třecí sílu, opotřebení a teplotu v závislosti na čase. Metoda pin on disk je popsána normami ASTM G 99, DIN 50324 a DIN ISO 7148-1. Dalšími tribologickými metodami zkoušek na stejném principu jsou například metody pin on ring, pin on plate nebo ball on flat. [31, 32, 33]



Obr. 19: Schéma metody pin on disk [34]

Fotoelektronová spektroskopie

Fotoelektronová spektroskopie je experimentální metoda, určená k detekci různých prvků v materiálu. Funguje na principu ozáření vzorku vysoce energetickým zářením, většinou ve formě UV (ultrafialového) nebo rentgenového paprsku a následném zachycení emitovaných fotoelektronů pomocí analyzátoru. Na základě vazebné energie a intenzity emitovaných fotoelektronů ze vzorku jsme schopni určit prvek, jeho chemický stav, či obsažené množství. Fotoelektronová spektroskopie je nejpoužívanější technickou analýzou povrchu, a to především díky relativně jednoduchému použití a interpretaci dat. Typickým výstupem je graf zobrazující závislost relativního počtu elektronů na vazebné energii, kdy jednotlivé vrcholky “píky“ představují vrstvy elektronového obalu specifického atomu. [35, 36]

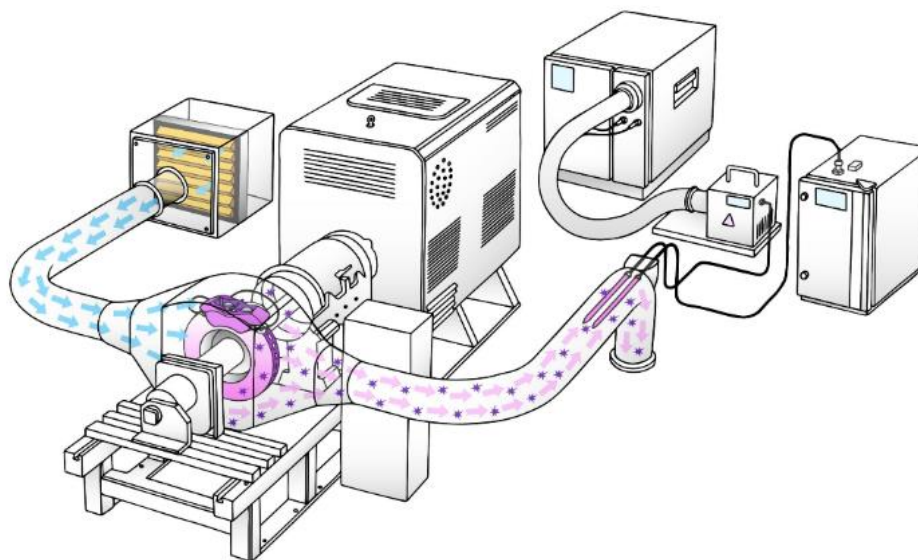


Obr. 20: Schéma fotoelektronové spektrografické analýzy [36]

Emisivita částic

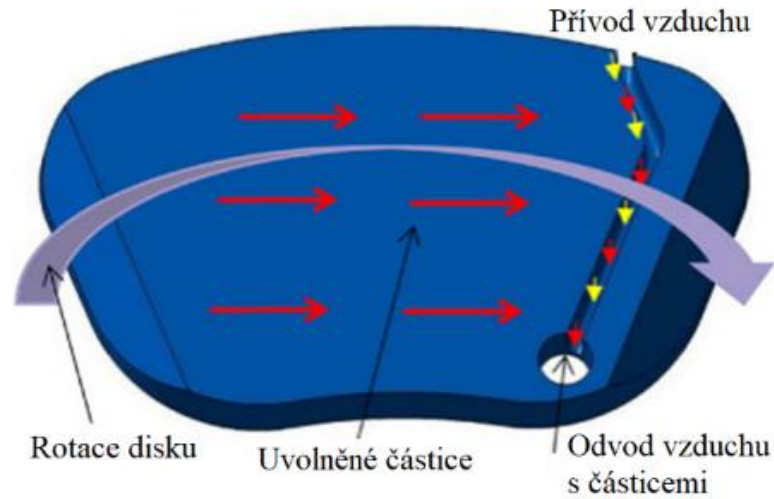
Velmi aktuálním tématem dnešní doby je měření nevýfukových zplodin dopravních prostředků. Zatímco výfukové plyny byly v minulých letech razantně regulovány a redukovány, emisní produkty třecích systémů nepodléhaly žádným regulacím. Do této kategorie řadíme odpadní produkty z pneumatik, spojky a samozřejmě brzd. Právě třecí materiály přispívají velkou částí ke znečištění okolí dopravních úseků a některé studie uvádí, že množství těchto emitovaných částic je srovnatelné s množstvím emisí v podobě výfukových plynů. V městském prostředí může opotřebení brzd způsobovat až 55 % emisí o velikosti částic PM_{10} . Množství, charakter i velikost vyprodukovaných částic brzdovým systémem závisí na mnoha faktorech, kdy mezi hlavní můžeme zařadit hmotnost dopravního prostředku či charakter brzdění. [30, 37, 38]

Při měření emisivity třecích materiálů hrají klíčovou roli okolní podmínky a stanovené meze měření. Je zapotřebí přesně definovat brzdny tlak, rychlost, nebo teploty jednotlivých brzdových členů. Tyto parametry mají velký vliv na množství i charakter odpadních částic, jejich stanovení závisí na konkrétním subjektu provádějícím měření, proto se velmi často liší. Různé mohou být rovněž metody zachytávání odpadních částic, a tedy i jejich efektivita. Většina dostupných přístrojů funguje na principu odsávání zplodin z uzavřeného okolí brzdneho mechanismu a jejich následném zachycení pomocí filtrů pevných částic. Při odsávání uvolněných částic dochází k měření teploty, nebo rychlosti proudění vzduchu. Po zachycení dochází k vyhodnocení množství, velikosti či charakteru částic. Dále mohou být pozorovány změny chemického složení uvolněných částic v závislosti na teplotě, nebo nauhličení jednotlivých brzdnych segmentů. K tomu dochází vzájemným působením styčných ploch s rozdílným chemickým složením a následným přenosem základních prvků mezi nimi. [30, 37, 39]



Obr. 21: Model zařízení pro měření emisí brzd [39]

Další variantou zachytávání emitovaných částic je jejich odsávání přímo z brzdových destiček. S tímto návrhem pracovali ve studii [40], kdy bylo dosaženo zachycení až 80 % uvolněných částic. Nevýhodou této varianty může být nutná a velmi přesná mechanická úprava všech testovaných vzorků. [30, 40]



Obr. 22: Brzdová destička se zabudovaným odsávacím mechanismem [40]

5 Praktická část

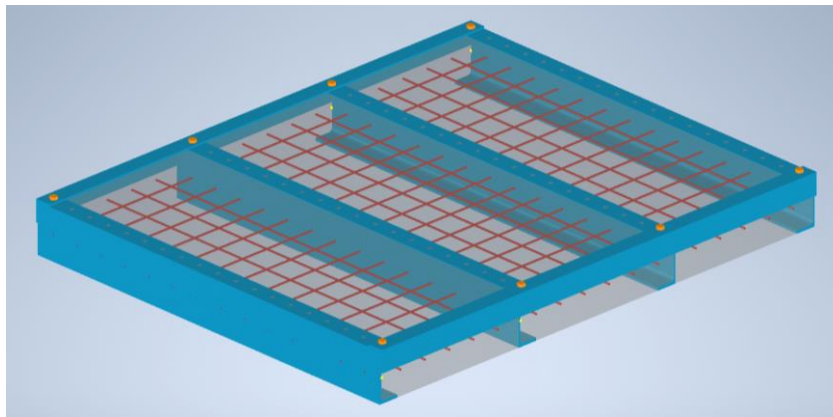
Úkolem praktické části této diplomové práce je návrh a realizace zařízení pro měření emisí brzdových členů pro automobily. Motivací pro vytvoření tohoto zařízení jsou stále se zvyšující nároky na funkčnost i ekologii brzdových materiálů. Tento přístroj je určen pro účely Fakulty strojní ČVUT a bude umístěn v nově vzniklé tribologické laboratoři. Dalším úkolem praktické části práce je návrh metodiky měření nejen emisních parametrů na daném zařízení, ale také parametrů tribologických u různých druhů brzdových materiálů. V neposlední řadě budou některá tato měření provedena a vyhodnocena. Pro přiblížení ekonomické náročnosti praktické části v podobě sestavení měřícího zařízení, bude vypracováno základní ekonomické zhodnocení projektu.

5.1 Návrh zařízení

Zařízení pro měření emisí brzdových členů bude složeno z několika dílčích částí a mechanismů. Jedním z hlavních úkolů při budování měřícího zařízení je zajištění přesnosti a opakovatelnosti měření. Toho se budeme snažit dosáhnout především využitím normalizovaných dílů a zajištěním stabilních funkčních i okolních podmínek. Hlavním prvkem zařízení bude část zadní nápravy automobilu Škoda Fabia první generace s příslušným brzdovým mechanismem v podobě brzdového kotouče a třmene, připojeného na hydraulický brzdový systém. Otáčení brzdového kotouče bude zajišťovat elektromotor, který bude společně s nápravou upevněn na robustní víceúčelové základně. K měření uvolněných částic z brzdových materiálů bude sloužit odsávací systém s filtračním mechanismem.

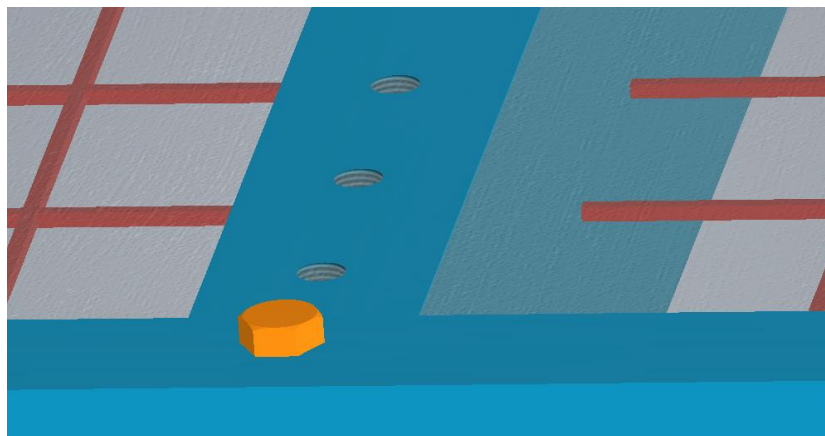
Základna

Pro zajištění bezpečnosti a přesnosti měření je nutné zajistit tuhé upnutí všech částí testovacího zařízení. Za tímto účelem byla navržena víceúčelová základová deska, která zajistí tuhost systému a zabrání pohybu zařízení či přenosu vibrací. Základna je tvořena ocelovou konstrukcí a betonovou výplní s výztuží v podobě kari sítě. Při uvážení hustoty betonu $2500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, a objemu konstrukce přibližně $0,4 \text{ m}^3$, byl stanoven potřebný objem betonu na 1000 kg.



Obr. 23: Model základové desky

Maximální rozměry desky jsou 1575 x 1500 x 180 mm. Základna rovněž disponuje upínacím systémem, tvořeným soustavou děr se závitem M16, do kterých je možné upevnit přípravky či zcela jiná zařízení. Díry jsou umístěny na čtyřech ocelových pásech, přičemž vzdálenost mezi jednotlivými dírami na stejném páse je 80 mm, vzdálenost mezi dírami na sousedících pásech je 500 mm. Zvolené rozložení děr zajistí potřebnou variabilitu uchycení přístrojů a součástí.



Obr. 24: Model základové desky – upínací mechanismus

Elektromotor

Pro pohon zařízení, a tedy dosažení požadovaných rychlostí na brzdovém kotouči, bude využit elektromotor. Volba elektromotoru je závislá především na výkonu, otáčkách a rychlostech, které budeme chtít na zařízení simulovat. Abychom co nejvěrněji napodobili skutečnost, vycházíme z reálných rozměrů a hodnot zadního kola automobilu Škoda Fabia. Zde uvažujeme průměr disku 15 palců, tedy 381 mm. Pro přepočtení otáček kola v reálném provozu je nutné stanovit dynamický poloměr pneumatiky, tedy vzdálenost mezi středem otáčejícího se kola a rovinou vozovky. Tento průměr je zpravidla menší než reálný průměr pneumatiky, a to především kvůli zatížení a deformaci pneumatiky při provozu automobilu. Výpočet dynamického poloměru pneumatiky (Rovnice 10) je stanoven z ujeté vzdálenosti (o), kdy je předpokládáno nejvyšší dovolené zatížení pneumatiky a její nahuštění na předepsaný tlak.

$$o = 2\pi \cdot r \rightarrow r = \frac{o}{2\pi} \quad (10)$$

V našem případě volíme pro výpočet reálný poloměr kola. Pokud tedy uvažujeme pneumatiku označenou 185/60 R15, jejíž výška je 111 mm, společně s diskem o poloměru 190,5 mm, činí poloměr kola 301,5 mm. Z toho vyplývá:

$$o = 2\pi \cdot 301,5 = 1894,3 \text{ mm} \quad (11)$$

Pro výpočet potřebných otáček (n) pro dosažení požadované simulované rychlosti (v) rovněž využijeme poloměru kola, respektive jeho dvojnásobku, který určuje průměr kola na 603 mm. Po úpravě a dosazení do následujícího vztahu získáváme otáčky odpovídající stanoveným rychlostem (Tabulka 5).

$$v = \pi \cdot d \cdot n \quad (12)$$

$$n = \frac{v}{\pi \cdot d}$$

Výpočet pro rychlost 50 km·h⁻¹:

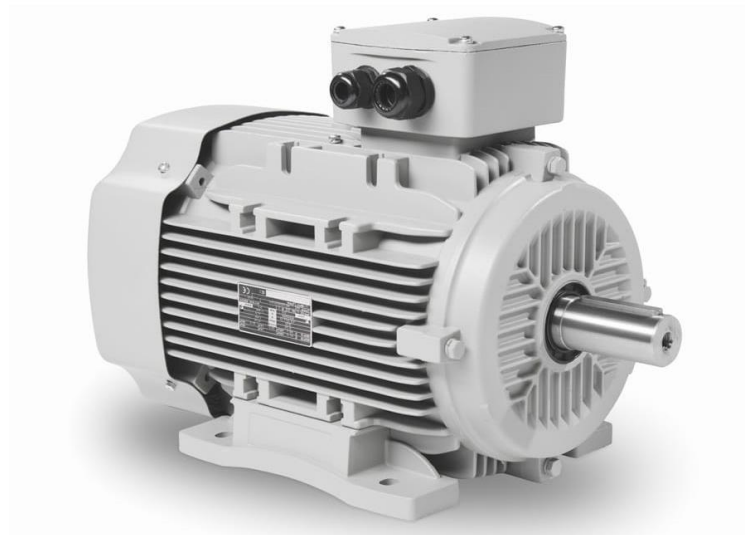
$$n = \frac{50}{3,6 \cdot \pi \cdot 0,603} = 7,33 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1} \quad (13)$$

Tab. 5: Potřebné otáčky pro stanovené rychlosti a poloměr kola 603 mm

rychlost (v)		otáčky (n)	
[km·h ⁻¹]	[m·s ⁻¹]	[ot·s ⁻¹]	[ot·min ⁻¹]
30	8,33	4,40	263,9
50	13,89	7,33	439,9
90	25,00	13,20	791,8
130	36,11	19,06	1143,7

Při návrhu zařízení uvažujeme testovací rychlosti až kolem 130 km·h⁻¹, což odpovídá necelým 1144 otáčkám kotouče za minutu. Při uvážení hmotnosti kotouče 6 kg volíme elektromotor o výkonu 3 kW a točivém momentu 9,91 N·m. Tento elektromotor vyvine až 2891 ot·min⁻¹, což by mělo zcela dostačovat pro danou aplikaci. Pro přepočet otáček na rychlost brzdového kotouče byl vytvořen výpočtový vzorec (Příloha 1).

Energie generovaná elektromotorem bude přenášena pomocí klínového řemene a řemenic. Po dosažení požadovaných otáček bude elektromotor odpojen pomocí elektromagnetické spojky. Tím přejde sestava na volnoběžnou a bude zahájen proces brzdění.



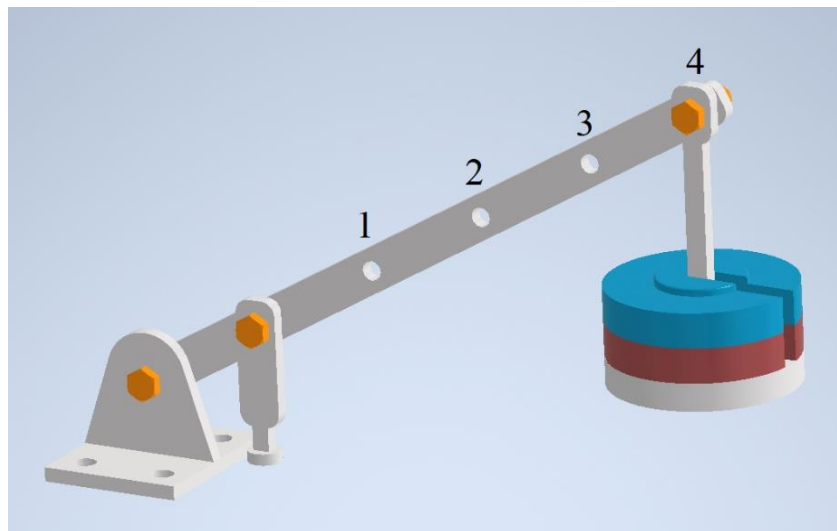
Obr. 25: Elektromotor 3kW, 2891ot. 1AL100L-2 [41]

Zatěžovací mechanismus

Vytváření brzdného účinku na brzdovém kotouči bude zajišťovat třmen s upnutým vzorkem v podobě brzdové destičky, napojený na hydraulický mechanismus s brzdící pákou. Na páce bude zatížení nastavováno pomocí sady závaží o hodnotách 1, 2, 3 a 5 kilogramů. Závaží bude možné upnout v různé vzdálenosti od pevného bodu, čímž navýšíme variabilitu měření. Hydraulický systém bude na vstupu (zatěžovací mechanismus) vybaven pístkem o průměru 18 mm, na výstupu (třmen) pístkem o průměru 35 mm, tím bude zajištěn přenos přibližně dvojnásobné síly na brzdový mechanismus.

Literatura uvádí [42], že průměrný člověk dokáže na brzdový pedál vyvinout sílu až 300 N. Pokud uvažujeme, že hydraulický mechanismus přenáší sílu v poměru 1:4, síla na brzdový kotouč se může pohybovat až kolem 12000 N. Vzhledem k této hodnotě byl také navržen pákový mechanismus, který dokáže vyvinout zatížení až 300 N.

Pro přepočítání síly na páce byl vytvořen výpočtový vzorec v Excelovém dokumentu (Příloha 1), který po zadání hmotnosti závaží a zvoleného uchycení na pálce stanoví vytvořenou sílu. Pro zjednodušení nastavení byla rovněž vytvořena přehledová tabulka s vybranými hodnotami (Tabulka 6).



Obr. 26: Model zatěžovacího mechanismu s označenými místy pro upnutí závaží

Tab. 6: Nastavení zatížení ($d=0,015$, $D=0,030$)

hmotnost závaží [kg]	upnutí závaží (1-4)	zatížení na páce [N] $d = 0,015$ mm	zatížení na brzdě [N] $D = 0,030$ mm
1	1	19,6	78,5
	2	29,4	117,7
	3	39,2	157,0
	4	49,0	196,2
2	1	39,2	157,0
	2	58,9	235,4
	3	78,5	313,9
	4	98,1	392,4
3	1	58,9	235,4
	2	88,3	353,2
	3	117,7	470,9
	4	147,2	589,0
4	1	78,5	313,9
	2	117,7	470,9
	3	157,0	627,8
	4	196,2	784,8
5	1	98,1	392,4
	2	147,2	589,0
	3	196,2	784,8
	4	245,3	981,0
6	1	117,7	470,9
	2	176,6	706,3
	3	235,4	941,8
	4	294,3	1 177,2
7	1	137,3	549,4
	2	206,0	824,0
	3	274,7	1 089,7
	4	343,4	1 373,4

Náprava

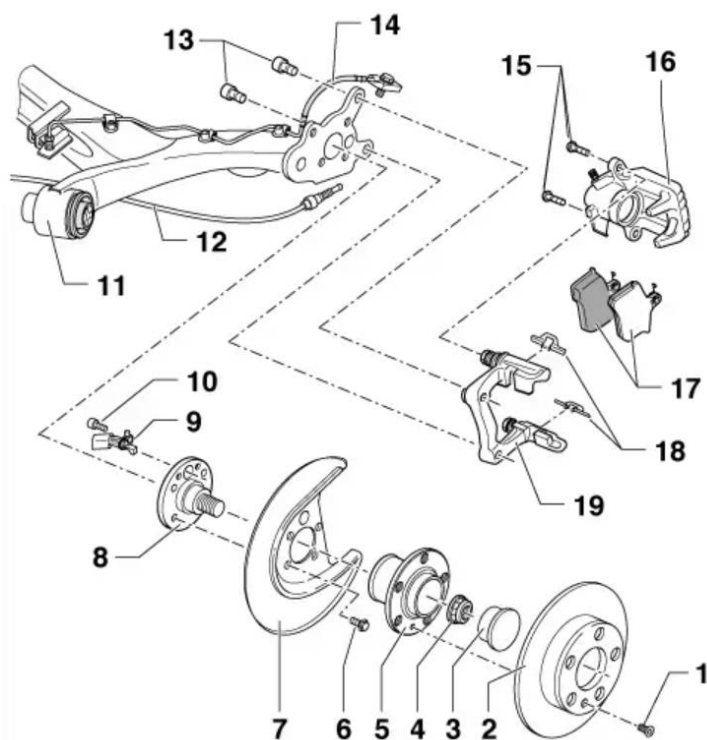
Stěžejní část navrhovaného měřicího zařízení bude představovat zadní náprava z automobilu Škoda Fabia první generace, respektive její část. Tato součást zajistí snadné, přesné a bezpečné upnutí brzdových členů, tedy brzdového kotouče a třmene s brzdovými destičkami. Využitím normalizovaných dílů bude dosaženo jejich zaměnitelnosti a přispějeme k opakovatelnosti celého procesu měření. Brzdové členy i další části nápravy, určené pro automobil Škoda Fabia, jsou ekonomicky i logisticky poměrně snadno dostupné, čímž předejdeme případným nákladným opravám zařízení. Snadná zaměnitelnost brzdových členů je pro konstrukci zařízení a následné měření klíčová, jelikož umožní testování širší škály materiálů. Náhradní díly v podobě brzdového kotouče a brzdových destiček rovněž pochází od celé řady výrobců, a tudíž se na trhu vyskytují výrobky různých kvalit i materiálových složení. Veškeré využití díly ke konstrukci měřicího zařízení jsou společně s OEM kódy, tedy originálními kódy výrobce, zaznamenány v tabulce 7.



Obr. 27: Model zadní nápravy automobilu Škoda Fabia I [43]

Tab. 7: Seznam využitých dílů nápravy z automobilu Škoda Fabia I s OEM kódy

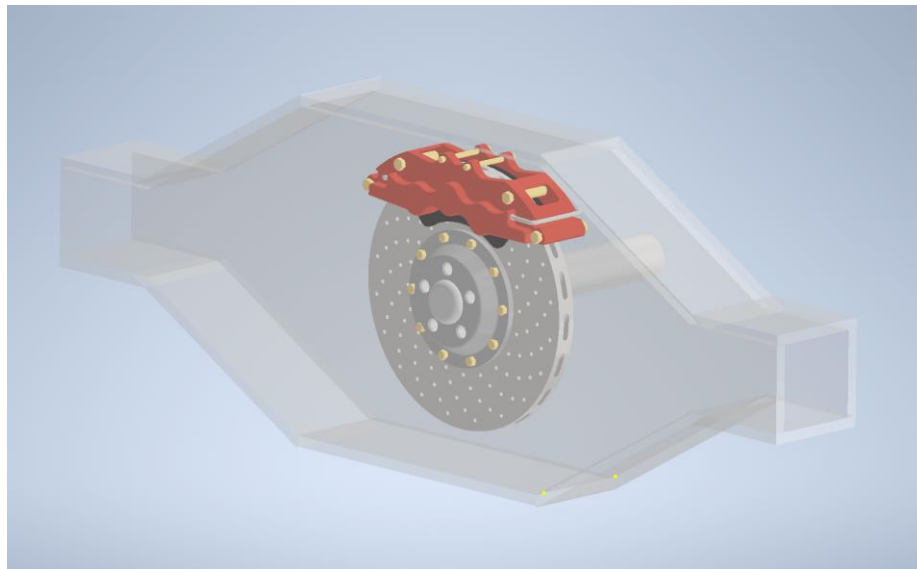
název dílu	OEM kód	označení na schématu (Obr. 28)
šroub uchycení brzdového kotouče	(N 106 483 01)	1
brzdový kotouč	(1J0 615 601)	2
náboj kola s ložiskem	(6Q0 598 611)	3, 4, 5
šroub ochranného plechu	(N90 305 304)	6
ochranný plech	(6Q0 615 612)	7
čep kola	(6R0 501 117)	8
snímač otáček	(6Q0 927 808 B)	9, 10
nápravnice	(1J0 500 051 K)	11
brzdová hadice	(6R0 611 701 H)	12
držák – brzdový třmen	(6QD 615 425)	13, 19
brzdové potrubí	(6Q0 611 763 C)	14
brzdový třmen	(1J0 615 424 F)	15, 16
brzdové destičky	(1E0 698 451)	17, 18



Obr. 28: Schéma uchycení zadního kola automobilu Škoda Fabia I [44]

Mechanismus pro měření zplodin

Měření vyprodukovaného odpadního materiálu bude prováděno metodou hmotnostního úbytku jednotlivých brzdových členů. Takové měření podá základní informaci o životnosti i odolnosti daných dílů a materiálů, nezajistí však podrobnější informace o vyprodukovaných zplodinách. Z tohoto důvodu bude rovněž použit odsávací systém s filtrací, který napomůže s rozlišením množství, velikostí, složením a charakterem jednotlivých částic. Systém se bude skládat z odsávací komory, která bude obklopotvat brzdový mechanismus. Aby byla zajištěna snadná zaměnitelnost brzdových členů, komora bude z jedné strany otvíratelná, dále zde budou umístěny senzory pro měření teploty a množství uvolněných částic. Za využití větráku, kterým vytvoříme v komoře podtlak, budou uvolněné částice usměrněny k filtračnímu mechanismu, kde budou následně zachyceny. Filtrační systém bude fungovat na principu sifonu, kdy bude docházet k postupnému zachytávání různých velikostí částic tak, aby bylo možné jejich další zkoumání.



Obr. 29: Model odsávací komory s brzdovými členy

Měření teploty

Pro zjištění reálné teploty vzniklé při brzdění, a případné zhodnocení tepelné vodivosti různých třecích materiálů, bude využito termokamery. Díky zaznamenávání teploty v čase, bude viditelný nárůst teploty během procesu brzdění i nejméně ovlivněné tepelné oblasti brzdového mechanismu.

Měření hmotnostního úbytku, COF a drsnosti povrchu

Měření hmotnosti vzorku, koeficientu tření a drsnosti povrchu jednotlivých vzorků bude probíhat před samotným procesem brzdění. Další měření těchto základních parametrů bude součástí vyhodnocování zkoušených vzorků, kdy dostaneme porovnání s výchozím stavem vzorku.

5.2 Realizace zařízení

V první fázi realizace bylo nutné zajistit potřebné díly a materiály. Stěžejní část zařízení, a tedy zadní náprava automobilu Škoda Fabia byla z ekonomických důvodů pořízena jako zánovní díl s určitými znaky opotřebení a stáří. Bylo proto nutné nápravu rozebrat na dílčí součásti, očistit od původního laku i rzi, a následně upravit do podoby vhodné k uchycení na základovou desku. Po rozebrání nápravy byla určena vhodnost jednotlivých dílů k použití. Následovala nutná mechanická úprava včetně otryskání dílů pomocí stolového tryskače od společnosti SAF, a to po dobu devíti minut, při využití ocelové drti jako abraziva.



Obr. 30: Zadní náprava automobilu Škoda Fabia I před mechanickou úpravou



Obr. 31: Části nápravy před otryskáním



Obr. 32: Části nápravy po otryskání

Z důvodu nedostatečných dílenských kapacit je realizace zařízení je stále v procesu. Pro ochranu materiálu a snazšího rozlišení jednotlivých částí zařízení bude následovat povrchová úprava otryskaných částí nápravy ve formě aplikace nátěrových hmot. Dále je nutné zajistit díly nápravy, které již nebyly vhodné k použití či byly poškozeny při demontáži. Po zmíněných krocích přijde na řadu opětovné sestavení nápravy.

V další fázi bude zkonstruován zatěžovací mechanismu s napojením hydraulického systému pro přenos brzdné síly. Odsávací komora bude zhotovena z plexiskla (PMMA), zejména kvůli cílené transparentnosti procesu, a napojena na filtrační systém. Posledním krokem bude svaření rámu základny a odlití betonové výplně již v prostorech tribologické laboratoře, kde bude zařízení umístěno. Po zhotovení základny bude následovat uchycení zrekonstruované části nápravy s odsávacím systémem, elektromotoru i zatěžovacího mechanismu.

5.3 Metodika měření

Pro kompletní měření třecích materiálů bude nutné připravit vzorky v podobě brzdových destiček a brzdového kotouče s rozměry vhodnými k uchycení na nápravě a třmení z automobilu Škoda Fabia. Výchozím krokem měření bude zaznamenání základních parametrů vzorku jako je hmotnost, drsnost povrchu, koeficient tření a chemické složení. **Hmotnost vzorků** bude stanovena na přesných digitálních vahách. **Drsnost povrchu** bude stanovena za pomoci drsnoměru, a to nejlépe v několika směrech pro zhodnocení vzájemného vlivu třecích segmentů. Statický i dynamický **koeficient tření** bude stanoven za využití přístroje TOP 3 a programu MATLAB. Pro stanovení **chemického složení** bude využit spektrometr, díky tomuto kroku můžeme hodnotit vliv jednotlivých prvků třecích materiálů, či vzájemné ovlivňování brzdových segmentů.

V další fázi bude vzorek upnutý do zkušebního zařízení, kde bude proveden proces brzdění. Před začátkem samotného brzdění je zapotřebí určit požadovanou rychlost a nastavit požadovanou brzdící sílu pomocí zatěžovacího mechanismu. Brzdový kotouč bude roztočen na dané otáčky a následně odpojen od zdroje. Po přechodu na setrvačný chod bude zabrzděn pomocí vzorků ve formě brzdových destiček. V tuto chvíli bude zapnuté odsávání uvolněných částic do filtračního systému, kde budou zachyceny. Dále bude měřena **teplota** třecích segmentů pomocí termokamery. Počet cyklů brzdění je nutné stanovit pro každé zkoušení, je však zjevné, že pro patrnou změnu drsnosti povrchu a hmotnosti vzorku bude nutné tento proces provést několikrát.

V poslední fázi budou u vzorků opět přeměřeny základní parametry, čímž vznikne porovnání s výchozím stavem. Bude stanoven hmotnostní úbytek, změna drsnosti povrchu a koeficientu tření, dále bude zhodnoceno vzájemné ovlivnění třecích segmentů. U emisních částic zachycených ve filtru bude stanoveno jejich množství, charakter, a chemické složení.

Metodika měření brzdových materiálů závisí na účelu zkoušky. Pokud například chceme porovnávat různé materiály brzdových destiček, je nutné stanovit stejné výchozí rychlosti, brzdná zatížení i počet brzdných cyklů, který v tomto případě nemusí být vysoký. Pokud chceme porovnávat vlastnosti stejné brzdové destičky, jednotlivé vzorky budou vystavovány různým zatížením, rychlostem i počtu cyklů.

Tab. 8: Metodika měření třecích materiálů

fáze měření vzorku	krok měření	parametr	přístroj
měření základních parametrů	1	hmotnost	digitální váhy
	2	chemické složení	spektrometr
	3	drsnost povrchu	drsnoměr
	4	koeficient tření	tribometr TOP 3
aplikační měření	5	množství emisí	senzor
	6	teplota	termokamera
porovnávací měření	7	hmotnost	digitální váhy
	8	chemické složení	spektrometr
	9	drsnost povrchu	drsnoměr
	10	koeficient tření	tribometr TOP 3
	11	chemické složení emitovaných částic	spektrometr
	12	charakter emitovaných částic	mikroskop

5.4 Měření parametrů brzdových členů

Pro získání reálných tribologických hodnot a představy o zastoupení jednotlivých chemických prvků v brzdových materiálech u motorových vozidel, byla provedena měření na čtyřech různých brzdových kotoučích a třech různých brzdových destičkách. K měření byly využity základní metody, jimiž byla stanovena chemická složení, drsnosti povrchu a statické i dynamické koeficienty tření. Vzorky brzdových kotoučů byly označeny písmeny A, B, C, D, vzorky brzdových destiček čísly 1, 2 a 3.



Obr. 33: Brzdový kotouč – vzorek A



Obr. 34: Brzdový kotouč – vzorek B



Obr. 35: Brzdový kotouč – vzorek C



Obr. 36: Brzdový kotouč – vzorek D



Obr. 37: Brzdová destička – vzorek 1



Obr. 38: Brzdová destička – vzorek 2



Obr. 39: Brzdová destička – vzorek 3

Chemické složení

Chemické složení jednotlivých vzorků bylo stanoveno pomocí ručního rentgenového spektrometru DELTA PROFESSIONAL od společnosti INOV-X SYSTEMS. Tento přístroj stanovuje procentuální zastoupení jednotlivých prvků v materiálu, popřípadě porovná složení dvou různých materiálů.



Obr. 40: Ruční spektrometr DELTA PROFESSIONAL

Tab. 9: Chemické složení brzdových kotoučů

	vzorek A	vzorek B	vzorek C	vzorek D
Fe [%]	84,60	83,62	83,25	84,85
Cr [%]	12,08	11,80	11,92	1,27
Mn [%]	1,57	1,54	1,56	0,62
Si [%]	1,68	1,06	1,82	2,13
Cu [%]	1,96	—	2,45	0,19
Ni [%]	0,12	0,27	0,02	0,05

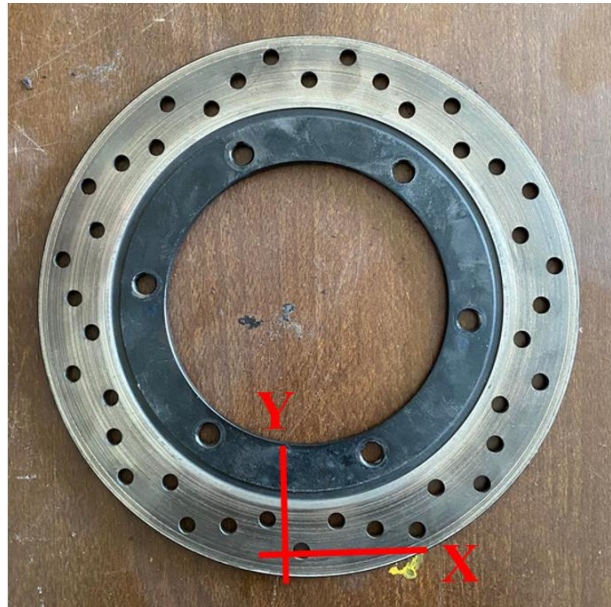
Tab. 10: Chemické složení brzdových destiček

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3
Cu [%]	46,42	48,80	57,06
Cr [%]	2,05	0,96	12,18
Mn [%]	3,40	0,09	0,18
Si [%]	5,62	3,24	7,48
Fe [%]	9,17	11,71	4,85
Ni [%]	22,22	21,71	0,06
Sn [%]	2,81	2,96	—
Ti [%]	0,13	—	9,61

Z měření chemického složení je patrné, že brzdové kotouče jsou tvořeny převážně prvkem železa. Dalším prvkem s výrazným zastoupením je chrom, který je u všech vzorků, s výjimkou vzorku D, zastoupen více jak z 11 %. U brzdových destiček hraje dominantní roli měď, která tvoří přibližně polovinu obsahu u všech vzorků. U vzorku 1 a 2 byl naměřen poměrně vysoký obsah niklu. U vzorku 3 byl naopak naměřen vyšší podíl titanu. Všechny zaznamenané prvky jsou typické pro brzdové materiály, kde zastávají specifickou roli. Složení prvků napříč vzorky je podobné, liší se pouze množstvím, což poukazuje na rozdílné výrobce či stáří jednotlivých dílů.

Drsnosti povrchu

Měření drsnosti povrchu brzdových členů bylo provedeno pomocí drsnoměru SJ 301. Na každém vzorku vždy ve dvou směrech, kdy směr X kopíroval směr rotace kotouče a směr Y byl kolmý na směr rotace. U vzorků A a C byla rovněž naměřena drsnost povrchu před použitím kotouče, u vzorků B a D měření drsnosti před použitím nebylo možné.



Obr. 41: Naznačení směrů při měření drsnosti brzdového kotouče

Tab. 11: Naměřené parametry drsnosti brzdového kotouče (vzorek A)

vzorek A	měření:	1.	2.	3.
před aplikací	Ra [μm]	1,11	1,62	0,93
	Rz [μm]	10,85	13,05	8,06
po aplikaci (směr X)	Ra [μm]	0,43	0,41	0,39
	Rz [μm]	3,64	3,15	3,12
po aplikaci (směr Y)	Ra [μm]	0,85	0,79	0,80
	Rz [μm]	5,95	5,67	5,88

Tab. 12: Naměřené parametry drsnosti brzdového kotouče (vzorek B)

vzorek B	měření:	1.	2.	3.
po aplikaci (směr X)	Ra [μm]	0,56	0,54	0,71
	Rz [μm]	4,70	3,67	5,38
po aplikaci (směr Y)	Ra [μm]	3,82	3,76	3,96
	Rz [μm]	19,77	18,58	21,13

Tab. 13: Naměřené parametry drsnosti brzdového kotouče (vzorek C)

vzorek C	měření:	1.	2.	3.
před aplikací	Ra [μm]	1,50	2,29	2,27
	Rz [μm]	11,28	20,88	20,24
po aplikaci (směr X)	Ra [μm]	0,40	0,38	0,33
	Rz [μm]	4,52	5,27	3,46
po aplikaci (směr Y)	Ra [μm]	0,45	0,32	0,38
	Rz [μm]	4,22	3,53	4,10

Tab. 14: Naměřené parametry drsnosti brzdového kotouče (vzorek D)

vzorek D	měření:	1.	2.	3.
po aplikaci (směr X)	Ra [μm]	1,33	1,24	1,49
	Rz [μm]	7,73	8,69	10,68
po aplikaci (směr Y)	Ra [μm]	4,09	3,79	4,30
	Rz [μm]	21,56	22,33	24,53



Obr. 42: Naznačení směrů při měření drsnosti brzdové destičky

Tab. 15: Naměřené parametry drsnosti brzdové destičky (vzorek 1)

vzorek 1	měření:	1.	2.	3.
po aplikaci (směr X)	Ra [μm]	4,97	4,79	4,64
	Rz [μm]	33,12	26,65	28,83
po aplikaci (směr Y)	Ra [μm]	4,11	4,24	4,35
	Rz [μm]	27,94	31,14	28,91

Tab. 16: Naměřené parametry drsnosti brzdové destičky (vzorek 2)

vzorek 2	měření:	1.	2.	3.
po aplikaci (směr X)	Ra [μm]	4,54	3,84	4,35
	Rz [μm]	30,85	23,86	31,07
po aplikaci (směr Y)	Ra [μm]	5,27	5,59	4,36
	Rz [μm]	43,07	40,32	36,22

Tab. 17: Naměřené parametry drsnosti brzdové destičky (vzorek 3)

vzorek 3	měření:	1.	2.	3.
po aplikaci (směr X)	Ra [μm]	6,72	6,04	5,69
	Rz [μm]	52,34	41,33	39,47
po aplikaci (směr Y)	Ra [μm]	9,20	9,56	9,65
	Rz [μm]	67,52	71,31	58,63

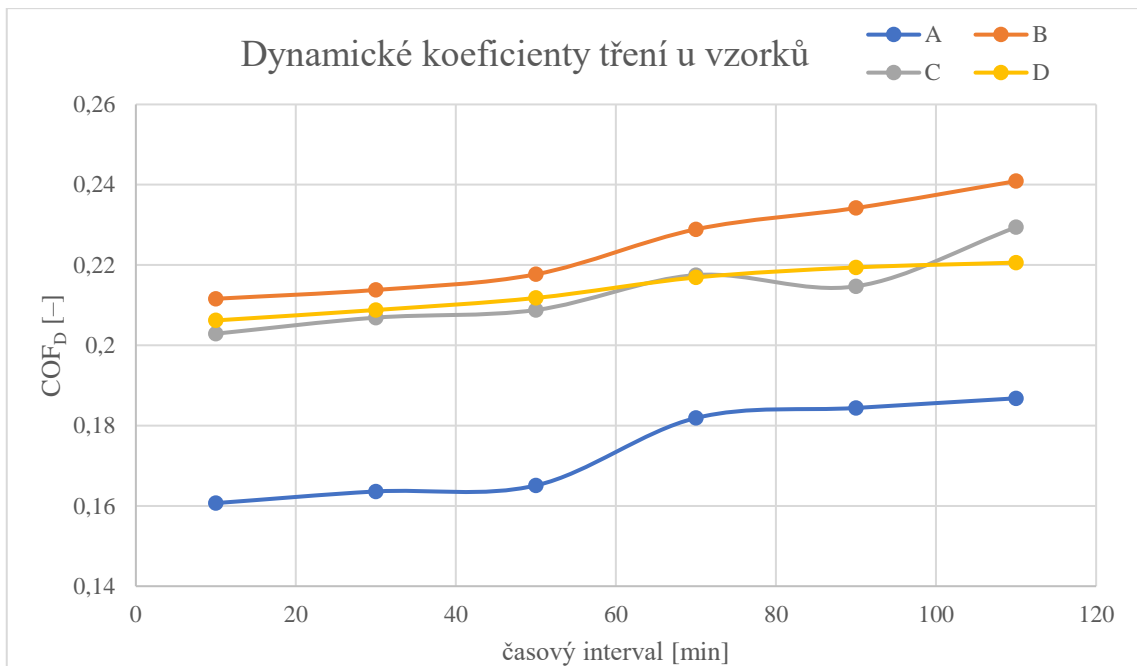
Z výsledků měření je patrné, že obecně vyšší hodnoty drsnosti zaznamenáváme ve směru kolmém na směr rotace (Y). Díky hodnotám naměřeným před použitím kotouče můžeme vidět, že samotným procesem brzdění dojde k vyhlazení povrchu, kdy hodnoty drsnosti povrchu po brzdění jsou až pětinašobně nižší, než je tomu u hodnot před opotřebením.

Koeficienty smykového tření

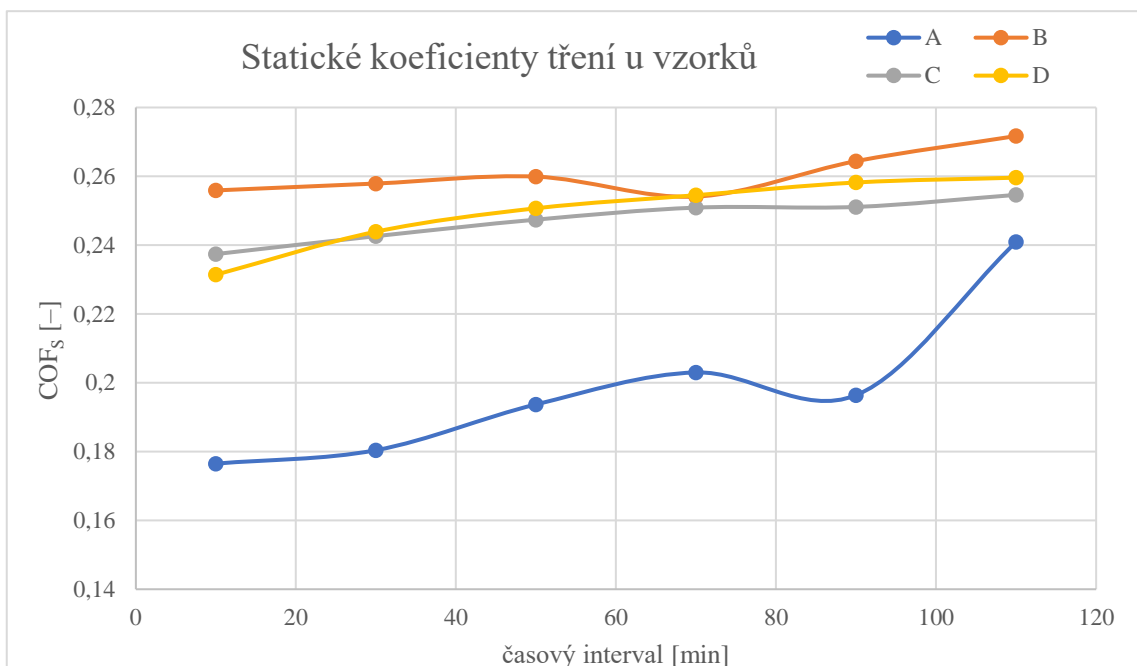
Pomocí přístroje TOP 3 a výpočtovému programu MATLAB, byly naměřeny a vyhodnoceny hodnoty statického i dynamického koeficientu tření u všech vzorků brzdových kotoučů. Pro všechny vzorky byl zvolen stejný třecí materiál v podobě brzdové destičky.

Tab. 18: Stanovené statické a dynamické koeficienty tření

vzorek	časový interval [min]	10	30	50	70	90	110
A	COF _D [-]	0,1607	0,1636	0,1651	0,1819	0,1844	0,1868
	COF _S [-]	0,1765	0,1804	0,1937	0,2030	0,1964	0,2109
B	COF _D [-]	0,2116	0,2138	0,2177	0,2289	0,2342	0,2409
	COF _S [-]	0,2559	0,2579	0,2599	0,2541	0,2644	0,2717
C	COF _D [-]	0,2029	0,2069	0,2088	0,2175	0,2147	0,2294
	COF _S [-]	0,2374	0,2426	0,2474	0,2509	0,2511	0,2546
D	COF _D [-]	0,2062	0,2088	0,2118	0,2169	0,2194	0,2206
	COF _S [-]	0,2314	0,2439	0,2507	0,2545	0,2582	0,2596



Obr. 43: Graf – dynamické koeficienty tření vzorků v závislosti na době zkoušení



Obr. 44: Graf – statické koeficienty tření vzorků v závislosti na době zkoušení

Z měření statických a dynamických koeficientů tření můžeme pozorovat, že všechny vzorky vykazují nárůst koeficientu tření s delším intervalem zkoušení. Nejvyšších hodnot jak statického, tak dynamického koeficientu tření, bylo dosaženo u vzorku B, naopak nejnižšími hodnotami se prezentoval vzorek A.

5.5 Ekonomické zhodnocení

Abychom získali představu o ekonomické náročnosti výstavby měřicího zařízení, bylo zhotoveno základní technicko – ekonomické zhodnocení. V tomto případě se veškeré výdaje týkají především materiálu a komponent. Ekonomické zhodnocení může sloužit rovněž jako přehled využitých dílů a jejich cenové náročnosti pro případné opravy.

Tab. 19: Přehled využitých dílů a materiálů s orientačními cenami

část zařízení	díl / materiál	cena (Kč)
náprava	šroub uchycení brzdového kotouče	90
	brzdový kotouč	530
	náboj kola s ložiskem	790
	šroub ochranného plechu	40
	ochranný plech	280
	čep kola	760
	snímač otáček	250
	nápravnice	6 500
	brzdová hadice	230
	držák – brzdový třmen	810
	brzdové potrubí	440
	brzdový třmen	2 530
	brzdové destičky	360
	spojovací materiál	100
	nátěrová hmota	650
	celkem:	14 360
základna	konstrukce	1 100
	kari síť	220
	beton	1 100
	spojovací materiál	100
	celkem:	2 520

pohon	elektromotor	5 800
	klínový řemen	300
	řemenice	420
	elektromagnetická spojka	3800
	spojovací materiál	200
	celkem:	10 520
zatěžovací mechanismus s hydraulikou	materiál na páku	300
	závaží	200
	hydraulika (pístek, hadičky, kapalina)	1000
	celkem:	1 500
měření emisí a teploty	plexisklo	1 200
	lepidlo	300
	spojovací materiál	100
	senzor měření teploty	300
	potrubí	500
	ventilátor	1 000
	sada filtrů	1 500
	celkem:	4 900
CELKEM:		33 800

Celkové náklady na materiál a komponenty potřebné pro zhotovení zařízení byly stanoveny na 33 800 Kč. Je nutné podotknout, že tato částka je pouze orientační, jelikož některé komponenty a materiály nabízejí poměrně vysokou rozmanitost z kvalitativního i cenového hlediska. Dále je možné, že některé položky budou k dostání z jiných než obchodních zdrojů.

6 Závěr

V teoretické části této diplomové práce jsou přiblíženy základy tribologie se zaměřením na tření, jeho dělení i stanovení koeficientů tření. Dále jsou v této části popsány brzdové systémy a třecí materiály, které se využívají pro jejich výrobu. V neposlední řadě se teoretická část práce zabývá zkoušením třecích materiálů a otázkou ekologie a emisivity prvků, které jsou obsaženy v těchto materiálech.

V praktické části práce byl proveden podrobný návrh měřicího zařízení pro aplikační testování brzdových materiálů. Návrh obsahuje slovní popis i vytvořené modely jednotlivých částí zařízení (víceúčelová základna, mechanismus pro odsávání emisních prvků, zatěžovací mechanismus, pohon a konstrukce brzdného systému). Dalším krokem byla realizace samotného zařízení, kdy byla provedena mechanická úprava klíčové části zařízení, v podobě zadní nápravy automobilu Škoda Fabia I. Tato úprava zajistí funkčnost a bezpečnost upnutí brzdového mechanismu na základovou desku. Z důvodu chybějících dílenských kapacit a potřebných součástí, nebylo možné provést kompletní realizaci měřicího zařízení, proto byla praktická tribologická měření provedena na současném tribologickém zařízení. Právě v této oblasti práce se nabízí její pokračování ve formě konstruování a montáže dalších dílčích částí zařízení.

Ve spojení s měřicím zařízením byla navržena rovněž metodika měření brzdných materiálů, která zahrnuje jak měření základních parametrů v podobě hmotnostního úbytku, změny drsnosti povrchu, chemického složení a koeficientu tření, tak parametry vzešlé z aplikačních metod zkoušení, kam také řadíme emisivitu materiálů či tepelné ovlivnění brzdných segmentů. Pro ověření některých základních parametrů třecích materiálů byla provedena měření na čtyřech různých vzorcích v podobě brzdových kotoučů a třech různých vzorcích v podobě brzdových destiček.

Seznam použité literatury a zdrojů

1. HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER a Daniela MARASOVÁ. *Technická diagnostika a spolehlivost I.: Tribodiagnostika*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2000. ISBN 80-70-78883-6.
2. BEČKA, Jan. *Tribologie*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01621-8.
3. STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. *Engineering tribology*. Fourth edition. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-12-397047-3.
4. BLAŠKOVIČ, Pavel, Jozef BALLA a Marián DZIMKO. *Tribológia*. Bratislava: Alfa, 1990. Edícia strojárskkej literatúry. ISBN 80-05-00633-0.
5. BIRD, John. *Newnes Engineering Science Pocket Book*. 3. Great Britain: Routledge, 2001. ISBN 0 7506 4991 7.
6. KRÁLOVÁ, Magda. *SMYKOVÉ TŘENÍ* [online]. In: Plzeň: Techmania Science Center, 2007 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/sila/odporove-sily/smykove-treni>
7. GREGERSEN, Erik. *Britannica, The Editors of Encyclopaedia: coefficient of friction* [online]. In: 2020 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/coefficient-of-friction>
8. JULÍŠ, Karel a Rudolf BREPTA. *Mechanika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986. Technický průvodce (SNTL).
9. KRÁLOVÁ, Magda. *VALIVÉ TŘENÍ* [online]. In: Plzeň: Techmania Science Center, 2007 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/sila/odporove-sily/valive-treni>
10. WILEY, John. *Wear: materials, mechanisms and practice*. West Sussex: WILEY, 2005. ISBN 978-470-01628-2.
11. NOVAKOVIĆ, Borivoj, Mila KAVALIĆ, Sanja STANISAVLJEV, Marko VLAHOVIĆ a Slađana BORIĆ. *The Importance of Application and Maintenance of Braking System in Modern Automobile* [online]. In: Zrenjanin, Serbia: University of Novi Sad, Technical faculty, 2016 [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/328138098_The_Importance_of_Application_and_Maintenance_of_Braking_System_in_Modern_Automobile

12. JANOUŠEK, Marek. Co se děje při brždění. *Motorkari.cz* [online]. 2018 [cit. 2023-02-22]. ISSN 1214-7125. Dostupné z: <https://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/co-se-deje-pri-brzdeni-38617.html>
13. *Základní automobilové názvosloví. Údaje o vozidle. Názvosloví.* Československo, 1984.
14. VALA, Miroslav a Miroslav TESAŘ. *Teorie a konstrukce silničních vozidel I.* Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003. ISBN 80-7194-503-X.
15. NĚMEC, V. *Brzdy automobilu* [online]. In: 2012 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/Brzdy-automobilu-UT.pdf>
16. Understanding automotive braking system. *Studentlesson.com* [online]. 2023 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://studentlesson.com/automotive-braking-system-definition-functions-working/>
17. VLK, František. *Podvozky motorových vozidel.* 2. vyd. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-239-0026-9.
18. How important a component are rotors in a car's braking system? In: *Quora.com* [online]. 2016 [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.quora.com/How-important-a-component-are-rotors-in-a-cars-braking-system>
19. BRŮNA, Tomáš. *BRZDOVÝ SYSTÉM FORMULE SAE* [online]. Brno, 2009 [cit. 2023-02-26]. VUT v Brně. Vedoucí práce Ondřej Blaťák.
20. SAJDL, Jan. *Brzdový kotouč* [online]. In: autolexicon [cit. 2023-03-14]. ISSN 1804-2554. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/brzdovy-kotouc/>
21. FLEIŠMAN, Luděk. *Učební texty – Montáže – Brzdy: Brzdy* [online]. In: [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/Mont%C3%A1%C5%BEE-Brzdy-UT.pdf>
22. KUMBHAR, Bhau Kashinath, Satyajit Ramchandra PATIL a Suresh Maruti SAWANT. A Comparative Study on Automotive Brake Testing Stand. In: *Springer* [online]. India: Journal of The Institution of Engineers, 2017 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40032-016-0289-y>
23. *Acts adopted by bodies created by international agreements: Regulation No 13 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Uniform provisions concerning the approval of vehicles of categories M, N and O with regard to braking [2016/194].* In: 2016, číslo 2. Dostupné také z: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0a43f880-d612-11e5-a4b5-01aa75ed71a1/language-en>

24. DUFEK, Vladimír. *Kovokeramické třecí materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965.
25. BORAWSKI, Andrzej. Conventional and unconventional materials used in the production of brake pads – review. *Science and Engineering of Composite Materials* [online]. 2020, 27(1), 374-396 [cit. 2023-03-22]. ISSN 2191-0359. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/secm-2020-0041>
26. DANTE, Roberto C. Handbook of Friction Materials and their Applications. In: *Handbook of Friction Materials and their Applications: Types of friction material formulas* [online]. Woodhead Publishing, 2016 [cit. 2023-04-05]. ISBN 978-0-08-100619-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100619-1.00003-1>
27. GRIGORATOS, Theodoros a Giorgio MARTINI. Brake wear particle emissions: a review. In: *Environmental science and pollution research international*. 2014, 22(4), 2491–2504 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: [doi:10.1007/s11356-014-3696-8](https://doi.org/10.1007/s11356-014-3696-8)
28. PURNA IRAWAN, Agustinus, Deni FAJAR FITRIYANA, Cionita TEZARA, et al. Overview of the Important Factors Influencing the Performance of Eco-Friendly Brake Pads. *Polymers* [online]. 2022, 14(6), 1180 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: [doi:10.3390/polym14061180](https://doi.org/10.3390/polym14061180)
29. RSZ. Jak těžké je nahradit měď v brzdových destičkách? *Motofocus.cz* [online]. motofocus.cz, 2016 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://motofocus.cz/vyrobci/7050,jak-tezke-je-nahradit-med-v-brzdovych-destickach>
30. STOJANOVIC, Nadica, Jasna GLISOVIC, Oday I. ABDULLAH, Ali BELHOCINE a Ivan GRUJIC. Particle formation due to brake wear, influence on the people health and measures for their reduction: a review. *Environ Sci Pollut* [online]. 2022, (29), 9606–9625 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: [doi: https://doi.org/10.1007/s11356-021-17907-3](https://doi.org/10.1007/s11356-021-17907-3)
31. Pin on Disk Test. In: *Tribonet.org* [online]. 2022 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://www.tribonet.org/wiki/pin-on-disk-test/>
32. LI, Xinmin, Mario SOSA a Ulf OLOFSSON. Wear. In: *Wear: A pin-on-disc study of the tribology characteristics of sintered versus standard steel gear materials* [online]. 2015, s. 31-40 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.032>
33. Tribology Testing Standards. In: *Tribonet.org* [online]. 2023 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://www.tribonet.org/tribology-testing-standards/>

34. YAO, Yifeng a Yajun ZHOU. Effects of Deep Cryogenic Treatment on Wear Resistance and Structure of GB 35CrMoV Steel. *Metals-Open Access Metallurgy Journal* [online]. 2018, 8(7), 502 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: doi:10.3390/met8070502
35. Photoelectron spectroscopy. In: *Khanacademy.org* [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.khanacademy.org/science/ap-chemistry-beta/x2eef969c74e0d802:atomic-structure-and-properties/x2eef969c74e0d802:photoelectron-spectroscopy/a/photoelectron-spectroscopy>
36. MATĚJKA, Pavel. *Fotoelektronová spektroskopie ESCA, UPS spektroskopie Augerových elektronů* [online]. In: [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://adoc.pub/fotoelektronova-spektroskopie-esca-ups-spektroskopie-augerov.html>
37. BORAWSKI, Andrzej. Impact of Operating Time on Selected Tribological Properties of the Friction Material in the Brake Pads of Passenger Cars. *Materials* [online]. 2021, 14(4), 884 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: doi:10.3390/ma14040884
38. OROUMIYEH, Farzan a Yifang ZHU. Brake and tire particles measured from on-road vehicles: Effects of vehicle mass and braking intensity. In: *Atmospheric Environment: X* [online]. 12. Los Angeles, CA, 2021 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2021.100121>
39. Brake wear particles in focus: New test benches in Gifhorn. In: *Iav.com* [online]. Berlin: iav.com, 2022 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.iav.com/en/news/brake-wear-particles-in-focus-new-test-benches-in-gifhorn/>
40. HASCOËT, Matthieu a Loïc ADAMCZAK. At source brake dust collection system. *Results in Engineering* [online]. 5. 2020, (5) [cit. 2023-05-18]. ISSN 2590-1230. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100083>
41. VYBO electric: Elektromotor 3kW, 2891ot. 1AL100L-2. *Elektro-motor.cz* [online]. [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.elektro-motor.cz/obchod/elektromotor-3kw-2891rpm-1-al-100-1-2/>
42. *What is brake pedal ratio?* [online]. In: 2020 [cit. 2023-07-12]. Dostupné z: https://help.summitracing.com/app/answers/detail/a_id/5037/~what-is-brake-pedal-ratio%3F
43. Jednoduchá zadná náprava – nutné zlo či výhoda? A čo bezpečnosť? In: *Topspeed.sk* [online]. 2020 [cit. 2023-07-12]. Dostupné z: https://www.topspeed.sk/novinky/jednoducha-zadna-naprava-nutne-zlo-ci-vyhoda-a-co-bezpecnost-/17995#google_vignette

44. Skoda Workshop Service and Repair Manuals: Fabia Mk1 - Removing and installing rear brake - Disc brake. In: Workshop-manuals.com [online]. [cit. 2023-07-12]. Dostupné z: https://workshop-manuals.com/skoda/fabia-mk1/chassis/brake_brake_mechanics/repairing_rear_brake/removing_and_installing_rear_brake_disc_brake/?expand_article=1

Seznam obrázků

Obr. 1: Souvislost tribologie s odvozenými vědními obory [1]

Obr. 2: Schéma tribologického systému

Obr. 3: Schéma energetického systému s různými druhy výstupu [1]

Obr. 4: Schéma kluzného tření [6]

Obr. 5: Schéma valivého tření [9]

Obr. 6: Základní mechanismy opotřebení [2]

Obr. 7: Průběh brzdění [14]

Obr. 8: Schéma bubnové brzdy [17]

Obr. 9: Kotoučová brzda [18]

Obr. 10: Schéma kotoučové brzdy s pevným třmenem [17]

Obr. 11: Schéma kotoučové brzdy s volným třmenem [17]

Obr. 12: Schéma kotoučové brzdy s výkyvným třmenem [17]

Obr. 13: Schéma kotoučové brzdy [17]

Obr. 14: Brzdové kotouče s různými konstrukčními úpravami pro lepší odvod tepla [20]

Obr. 15: Brzdový systém během testování [20]

Obr. 16: Řez brzdovou destičkou s vyznačenými vrstvami

Obr. 17: Simulace teplotního pole na brzdových kotoučích s různým typem chlazení [20]

Obr. 18: Struktura třecího materiálu (1- pojivo, 2- výztuž, 3- plnivo, 4- brusivo) [25]

Obr. 19: Schéma metody pin on disk [34]

Obr. 20: Schéma fotoelektronové spektrografické analýzy [36]

- Obr. 21: Model zařízení pro měření emisí brzd [39]
- Obr. 22: Brzdová destička se zabudovaným odsávacím mechanismem [40]
- Obr. 23: Model základové desky
- Obr. 24: Model základové desky – upínací mechanismus
- Obr. 25: Elektromotor 3kW, 2891ot. 1AL100L-2 [41]
- Obr. 26: Model zatěžovacího mechanismu s označenými místy pro upnutí závaží
- Obr. 27: Model zadní nápravy automobilu Škoda Fabia I [43]
- Obr. 28: Schéma uchycení zadního kola automobilu Škoda Fabia I [44]
- Obr. 29: Model odsávací komory s brzdovými členy
- Obr. 30: Zadní náprava automobilu Škoda Fabia I před mechanickou úpravou
- Obr. 31: Části nápravy před otryskáním
- Obr. 32: Části nápravy po otryskání
- Obr. 33: Brzdový kotouč – vzorek A
- Obr. 34: Brzdový kotouč – vzorek B
- Obr. 35: Brzdový kotouč – vzorek C
- Obr. 36: Brzdový kotouč – vzorek D
- Obr. 37: Brzdová destička – vzorek 1
- Obr. 38: Brzdová destička – vzorek 2
- Obr. 39: Brzdová destička – vzorek 3
- Obr. 40: Ruční spektrometr DELTA PROFESSIONAL
- Obr. 41: Naznačení směrů při měření drsnosti brzdového kotouče

Obr. 42: Naznačení směrů při měření drsnosti brzdové destičky

Obr. 43: Graf – dynamické koeficienty tření vzorků v závislosti na době zkoušení

Obr. 44: Graf – statické koeficienty tření vzorků v závislosti na době zkoušení

Seznam tabulek

Tab. 1: Příklady tribologických systémů [1]

Tab. 2: Příklady dynamického koeficientu tření v závislosti na materiálech [8]

Tab. 3: Srovnávací tabulka vybraných materiálů brzdových kotoučů [20]

Tab. 4: Mechanické vlastnosti bio-materiálů [28]

Tab. 5: Potřebné otáčky pro stanovené rychlosti a poloměr kola 603 mm

Tab. 6: Nastavení zatížení ($d=0,015$, $D=0,030$)

Tab. 7: Seznam využitých dílů nápravy z automobilu Škoda Fabia I s OEM kódy

Tab. 8: Metodika měření třecích materiálů

Tab. 9: Chemické složení brzdových kotoučů

Tab. 10: Chemické složení brzdových destiček

Tab. 11: Naměřené parametry drsnosti brzdového kotouče (vzorek A)

Tab. 12: Naměřené parametry drsnosti brzdového kotouče (vzorek B)

Tab. 13: Naměřené parametry drsnosti brzdového kotouče (vzorek C)

Tab. 14: Naměřené parametry drsnosti brzdového kotouče (vzorek D)

Tab. 15: Naměřené parametry drsnosti brzdové destičky (vzorek 1)

Tab. 16: Naměřené parametry drsnosti brzdové destičky (vzorek 2)

Tab. 17: Naměřené parametry drsnosti brzdové destičky (vzorek 3)

Tab. 18: Stanovené statické a dynamické koeficienty tření

Tab. 19: Přehled využitých dílů a materiálů s orientačními cenami

Seznam příloh

Příloha 1: CD – výpočtový Excel