



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE ZKUŠEBNÍ KOMORY PRO STUDIUM EMISE PEVNÝCH ČÁSTÍ Z KONTAKTU KOLA A KOLEJNICE

DESIGN OF A TEST CHAMBER TO STUDY THE EMISSION OF SOLID PARTICLES FROM THE WHEEL-RAIL
CONTACT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Rosecký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Omasta, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Vojtěch Rosecký
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Milan Omasta, Ph.D.
Akademický rok:	2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce zkušební komory pro studium emise pevných částí z kontaktu kola a kolejnice

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vedle opotřebení brzdových kotoučů pochází významná část emisí pevných částic v kolejové dopravě z kontaktu kola a kolejnice, a to jako důsledek jejich opotřebení a také rozptýlení produktů, které jsou do kontaktu cíleně aplikovány pro úpravu tření. Jedná se především o písek pro zvýšení trakce a různá maziva a modifikátory tření. To představuje hlavní zdroj znečištění ovzduší zejména v městské kolejové dopravě. Ke snížení těchto emisí je třeba pochopit proces vzniku částic v kontaktu kola a kolejnice a jejich rozptýlu do okolí. Pro účely tohoto výzkumu je potřeba vyvinout vhodné laboratorní zařízení.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je zkonstruovat zkušební komoru dvoudiskového zařízení pro studium procesu uvolňování pevných částic ze simulovaného kontaktu kola a kolejnice v důsledku opotřebení a aplikace materiálů pro úpravu tření v kontaktu.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- návrh koncepčních variant,
- konstrukce zařízení,
- příprava výrobní výkresové dokumentace,
- realizace zařízení.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

ABBASI, Saeed; OLOFSSON, Ulf; ZHU, Yi a SELLGREN, Ulf. Pin-on-disc study of the effects of railway friction modifiers on airborne wear particles from wheel–rail contacts. Tribology International. 2013, roč. 60, s. 136-139. ISSN 0301679x.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Za účelem studia prachových částic uvolňujících se z kontaktu kola a v důsledku opotřebení a aplikace materiálů upravujících tření v kontaktu bylo na Ústavu konstruování vyvinuto dvoudiskové zařízení simulující tento kontakt. Aby nedocházelo k úniku částic z dvoudiskového zařízení do okolí a mohly být analyzovány, bylo doplněno o zkušební komoru.

Hlavním cílem práce bylo tuto zkušební komoru zkonstruovat. Dílčí cíle pak zahrnovaly návrh konceptů, konstrukci, přípravu výrobní výkresové dokumentace a realizaci. Všechny požadované cíle byly splněny a funkční komora je připravena k experimentům i když u některých prvků komory budou ještě probíhat modifikace. Přínosem této práce je kompletace dvoudiskového tribometru, který může být použit pro výzkum emise pevných částic.

KLÍČOVÁ SLOVA

Emise částic, vzduchem nesený, zkušební komora, pískování, železnice

ABSTRACT

In order to study dust particles released from the contact of the wheel and as a result of wear and the application of friction-modifying materials in the contact, a two-disk device simulating this contact was developed at the Institute of Design. A test chamber was added to prevent particles from escaping from the twin-disc device into the environment and to allow their analysis.

The main goal of the thesis was to construct the test chamber. Sub-goals included the concept design, construction, preparation of the production documentation and implementation. All required objectives have been met and the working chamber is ready for experiments, although some elements of the chamber would be modified in the near future. The benefit of this work is the completion of a twin-disc tribometer, which can be used for solid particle emission research.

KEYWORDS

Particle emission, airborne, test chamber, sanding, railway

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ROSECKÝ, Vojtěch. *Konstrukce zkušební komory pro studium emise pevných částic z kontaktu kola a kolejnice*. Brno, 2024, 51 s. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157657>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Milan Omasta.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce, panu Ing. Milanu Omastovi, Ph.D., za vstřícný a odborný přístup, panu Ing. Šimonu Szabari za spolupráci týkající se dvoudiskového zařízení a kolegovi Václavu Sedlákovi za obětavou pomoc s 3D tiskem.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Milana Omasty, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Motivace pro zkoumání emise pevných částic v kolejové dopravě	14
2.2	Úvod do problematiky pískování	18
2.3	Laboratorní výzkum	20
2.3.1	Laboratorní zařízení pro studium emise pevných částic	20
2.3.2	Laboratorní zařízení pro studium pískování	23
2.3.3	Dvoudiskové zařízení vyvíjené na Ústavu konstruování	25
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	28
3.1	Analýza problému	28
3.2	Cíl práce	28
3.3	Dílčí cíle	28
3.4	Požadavky na technické parametry zkušební komory	29
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	31
4.1	Koncept 1: Vana s víkem	32
4.2	Koncept 2: Násuvná komora	32
4.3	Koncept 3: Dělená komora	33
4.4	Koncept 1 & 3	34
4.4.1	Varianta A – komora se zasouvací vanou	34
4.4.2	Varianta B – komora s příklopnou vanou	35
4.5	Koncept vybavení komory	35
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	36
5.1	Sestava bez vybavení	36
5.2	Kompletní sestava	37
5.2.1	Plechové díly	39
5.2.2	Obráběné díly	39
5.2.3	Díly tištěné na 3D tiskárnách	40
5.2.4	Ostatní díly	40
5.3	Náklady	41

6	DISKUZE	42
7	ZÁVĚR	44
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	45
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	48
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	49
11	SEZNAM TABULEK	51

1 ÚVOD

Každá společnost je v důsledku rozvoje technologií vystavena nejen novým příležitostem, ale i novým rizikům. V problematice kolejové dopravy je např. dnes obvyklé oproti nedávné minulosti cestovat nízkopodlažními soupravami s Wi-Fi připojením a klimatizací. To zvyšuje požadavek na automatizaci všech procesů, bezporuchovost a spolehlivost systému jako celku. Možnost cestovat pomocí kolejové dopravy, jež od 19. století zaznamenala velký rozvoj, s sebou nese rizika, která nebyla dříve ve vidině pokroku a s ohledem na palčivější problémy reflektována. Takovým rizikem je bezpochyby i vznik částic unášených vzduchem v kolejové dopravě, kvůli jejich negativnímu vlivu na zdraví člověka. Proto se tématem bude zabývat výzkum, na němž právě tato práce participuje.

Budoucí výzkum by měl lépe popsat vznik vzduchem nesených částic, zejména při pískování (míněně proces sypaní písku mezi kolo a kolejnici za účelem zvýšení adheze). Nabyté znalosti ideálně naleznou své technické využití a zároveň přispějí k určení míry závažnosti jevu s ohledem na organismus.

Aby bylo možné jev zkoumat, je zapotřebí speciální aparatury, která umožní simulaci třecího kontaktu a klasifikaci uvolněných částic. K výzkumu bude použit dvoudiskový tribometr, jehož disky budou představovat kolo a kolejnici. Každý z disků má svůj vlastní pohon. Nastavitelnost přítlaku mezi nimi je umožněna díky lineárnímu vedení jednoho z ložiskových domků. Samotné zařízení bez relativně utěsněného prostoru okolo disků neplní požadovanou funkci, proto by součástí měla být zkušební komora zabraňující úniku částic a umožňující věrohodný sběr dat. Realizace této komory je vrcholem, k němuž vlastní práce směřuje.

Zkušební komora musí umožnit posuv disků vůči sobě, zároveň musí zajistit průtok filtrovaného vzduchu a průhled do kontaktu disků. Látky aplikované v komoře by neměly ve větší míře unikat do prostor laboratoře. Komora by taktéž měla být uživatelsky přívětivá na údržbu, montáž a obsluhu. Veškerá práce s komorou by měla být bezpečná, rychlá a intuitivní, aby experimenty probíhaly hladce a nebyly rušeny nečekanými komplikacemi způsobenými konstrukcí komory. Vše je podmíněno přiměřenými náklady využitými na výrobu a provoz zkušební komory.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Motivace pro zkoumání emise pevných částic v kolejové dopravě

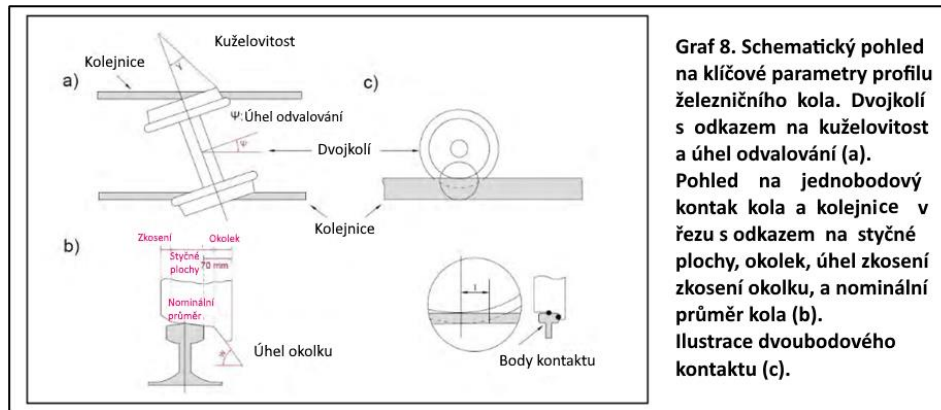
Kolejová doprava se za dobu své existence stala nedílnou součástí velkých měst, obcí a stala se i krajinnotvorným prvkem. Tedy součástí všedního dne mnoha lidí. Vlaky, metro i tramvaje prošly a stále procházejí řadami změn, které mají vést k jejich zdokonalování. V důsledku rozvoje jiných forem dopravy (zejména silniční) byl význam kolejové dopravy v ČR poněkud utlumen, avšak vzhledem k reakci na probíhající klimatické změny, opět roste.

Fenomén kolejové dopravy se projevuje kromě oblasti technické i v oblasti kulturní a má také zásadní vliv na hospodářský růst v mnoha zemích světa. S rychlým rozvojem se objevují nové výzvy a cíle. Do popředí se dostává nejen otázka komfortu a bezpečnosti, ale i vlivu provozu dané technologie na zdraví člověka. Proto probíhají výzkumy, které se těmto problematikám věnují [1],[2].

Komfort jízdy, nebo komfort bydlení poblíž kolejí bývá negativně poznamenán například nadměrným hlukem, který vzniká třením okolků a kolejnice, zejména při průjezdu obloukem (obr. 1). Hluk lze minimalizovat, pokud je snížen součinitel tření mezi okolkem a kolejnicí. V zásadě existují dvě možnosti snížení koeficientu tření. První možnost je mazání okolků (například tyčinkou s tuhým mazivem, kde nanášení probíhá automaticky). Tato varianta ovšem při snižování dynamického součinitele tření ovlivňuje negativně koeficient adheze, který zkracuje brzdovou dráhu. Proto lze mazat jen takovým způsobem, aby koeficient adheze zůstal v rozmezí 0,1 - 0,3. Druhou možností je mazání boku kolejnice (např. nástřikem kapalného maziva). O tom, zda je vhodné mazací medium použít rozhoduje také zatížení. Do 800 až 1000 MPa mazací film chrání oba povrchy, ale při vyšším zatížení do 1500 MPa naopak pomáhá vzniku a šíření trhlin [2].

Opačným problémem je nedostatečná adheze, která způsobuje potíže při rozjezdu a brždění, ale také má nepříznivý dopad na trakci. To má za následek sníženou bezpečnost jízdy i případné zpoždění spoje. Aby se adheze zvýšila, jsou kolejová vozidla vybavena pískovacími zařízeními (obr. 2), která nanášejí písek do kontaktu kolo-kolejnice [3].

Z již zmíněných příkladů je zřejmé, že při provozu dochází ať už opotřebením nebo nanášením různých chemických látek ovlivňujících jízdní vlastnosti k uvolňování pevných částic, které se následně šíří do okolí.



Obrázek 1 Schematický pohled na klíčové parametry profilu jízdního kola. Převzato a upraveno z [2].

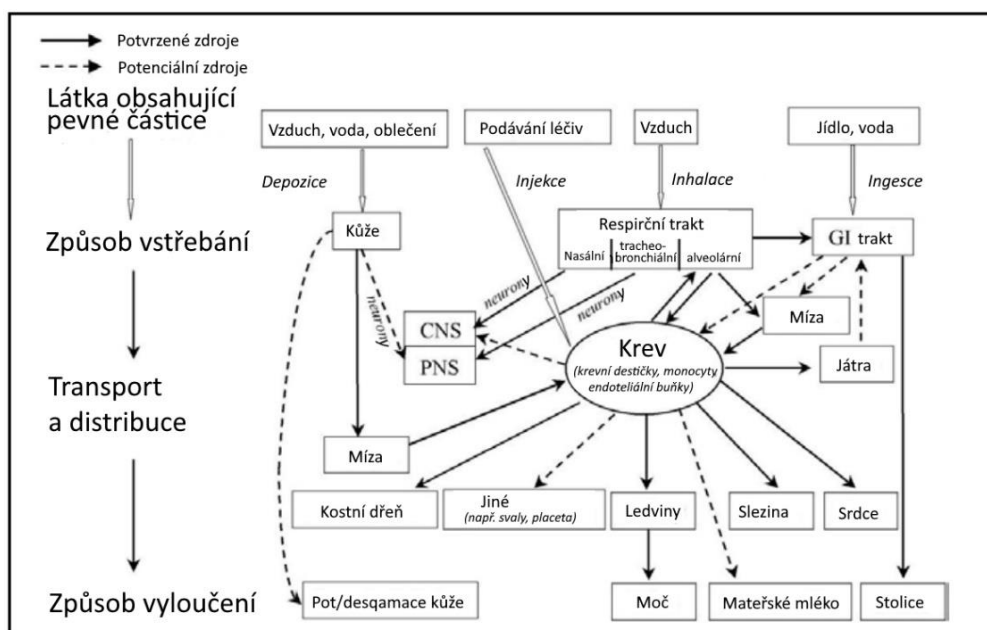


Obrázek 2 Detail pískovacího zařízení na lokomotivě Škoda řady 362. Foto: autor.

Tyto částice mají různé chemické složení, velikost, kvantitu etc., ale hlavně mají nepříznivý dopad na zdraví člověka. Znečištění ovzduší je v ČR popisováno pomocí tří základních parametrů: hladina oxidu dusíku, oxidu siřičitého a hladina prachu. Hladina oxidu dusíku je spojená především s procesem spalování. Její hodnota celosvětově roste hlavně díky zvyšujícímu se počtu motorových vozidel. Hladina prachu a hladina oxidu siřičitého, které jsou výsledkem průmyslového znečištění klesá, a to v důsledku zdokonalování technologií, které je dokáží lépe eliminovat. Šířící se pro tělo cizí prvky, tzv. xenobiotika, se ze vzduchu dostávají do těla zvláště přes dýchací cesty. Částice, které jsou větší než 10 μm , jsou zadrženy v nose a nosohltanu, částice mezi 5 až 10 μm jsou zachyceny hlenem a odvedeny z těla. Pouze xenobiotika menší než 5 μm putují do alveolů. Zde je pohltny makrofágy, které se přes mízní (lymfatickou) soustavu dostávají do lymfatických uzlin. Na venek se potíže způsobené cizorodými partikulami (částicemi) projevují kašlem a dušností. Usazující se prach, kromě toho, že zbarvuje tkáně, může

způsobit pneumokoniózu¹. Tato nemoc postihuje obvykle jedince, pohybující se často v prašném prostředí (např. z profesních důvodů) [4], [5].

Existují i jiné cesty, kterými se prachové částice dostávají do těla. Zde se buď usazují, nebo jsou přenášeny tělními tekutinami, nebo jsou vyloučeny. To názorně popisuje následující obr. 3. Při kontaktu s očima, nebo pokožkou můžou partikule prachu způsobit podráždění [6].



Obrázek 3 Schéma oběhu pevných částic v organismu. Převzato a upraveno ze zdroje [6].

Jelikož uvolňující se částice můžou způsobit zdravotní potíže, je snaha popsat jejich genezi a eliminovat je pokud možno tak, aby se jejich koncentrace ve veřejném prostoru snížila. Hustota částic je zvýšená nejen v ulicích měst, ale i tam, kde se kolejová vozidla pohybují v relativně uzavřeném prostoru. To proto, že je zde rozptyl částic omezený.

Jakýkoliv proces, kde dochází ke tření, je zdrojem potenciálně nebezpečných pevných částic. Především se jedná o kontakt kola a brzdy (obr. 4), kola a kolejnice (obr. 2), kontakt sběrače a troleje (obr. 5), nebo kontakt s třetí kolejnicí.

Výše jmenované zdroje znečištění vzduchu v okolí kolejí nejsou jediné a jmenovitý seznam všech zdrojů by byl velmi rozsáhlý. To dokládá i tabulka č.1, která tyto zdroje kategorizuje. Takto roztríděnými jevy se pak zabývá výzkum, který určí jejich rozsah a závažnost.

Budoucí výzkum, s nímž je spjatá i tato práce, se bude zabývat pouze kontaktem kola a kolejnice. Tento kontakt je charakteristický vysokým tlakem, který vede taktéž na vyšší

¹ „Onemocnění plic, které vzniká ukládáním prachových částic v plicní tkáni („zaprášení plic“) s následnou nadměrnou tvorbou vaziva (srov. fibróza), která zhoršuje funkci plic (plíce je tužší). Dělí se na p. kolagenní s výraznou tvorbou vaziva a progresí (silikóza, silikatózy, azbestóza, chronická berylióza, talkóza) a p. nekolagenní s mírnou a neprogredující fibrózou (zejm. antrakóza) [pneumo-; řec. konis prach].“ [20]

teploty v místě styku. Tyto veličiny ovlivňují počet a charakteristiku uvolňujících se částic [7]. Stejně tak má na částice vliv, jsou-li použity mazací přípravky ke snížení tření [8].



Obrázek 4 Detail brzdy a kola lokomotivy Škoda řady 362. Foto: autor.



Obrázek 5 Detail kontaktu polopantografu elektrické jednotky Škoda RegioPanter s trolejí. Foto: autor.

Tabulka 1 Zdroje pevných částic v kolejové dopravě. Převzato a upraveno ze zdroje [6].

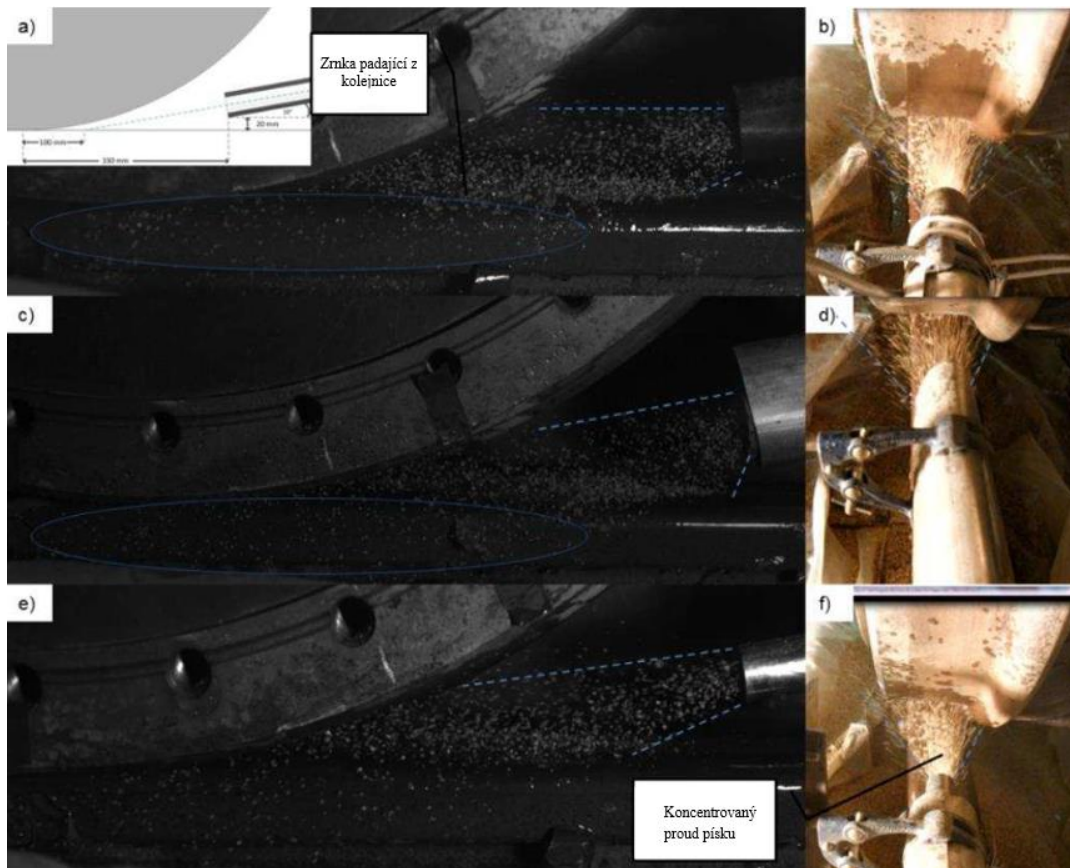
Zdroje	Subklasifikace	Příklady
Kolejová vozidla	Výfukové emise (emise motoru)	Dieselový motor
	Jiné než výfukové emise (emise motoru)	Kontakt kolo-kolejnice Proces brždění Interakce mezi třetí koleji a "kontaktní botou" Interakce sběrače s troleji Pískování za účelem zvýšení adheze Eroze vzdušnými turbulencemi, způsobenými jízdou kolejového vozidla (efekt pistu)
Jednorázové procesy (Údržba & výstavba)	Přímé	Výstavba tunelu Řezání kolejnic Svařování kolejnic Pěchovací proces
	Nepřímé	Vypařování oleje a jiných mazacích prostředků Vypařování čisticích prostředků
Cirkulace vzduchu	Přírodní proudění vzduchu	Víření a přenášení emise pevných částic ze silniční dopravy Přírodní eroze zdi
	Nucené proudění	Víření a přenášení emise pevných částic ze silniční dopravy
Cestující a personál	Činnost člověka	Kouření na nástupišti Kouření ve vlaku
	Ostatní	Odpad částic z oblečení cestujících Degradace kazivých materiálů a odpadu

2.2 Úvod do problematiky pískování

Prašnost v blízkosti kolejí úzce souvisí s pískováním, tedy procesem nanášení písku do kontaktu kolo kolejnice za účelem zvýšení adhezního koeficientu.

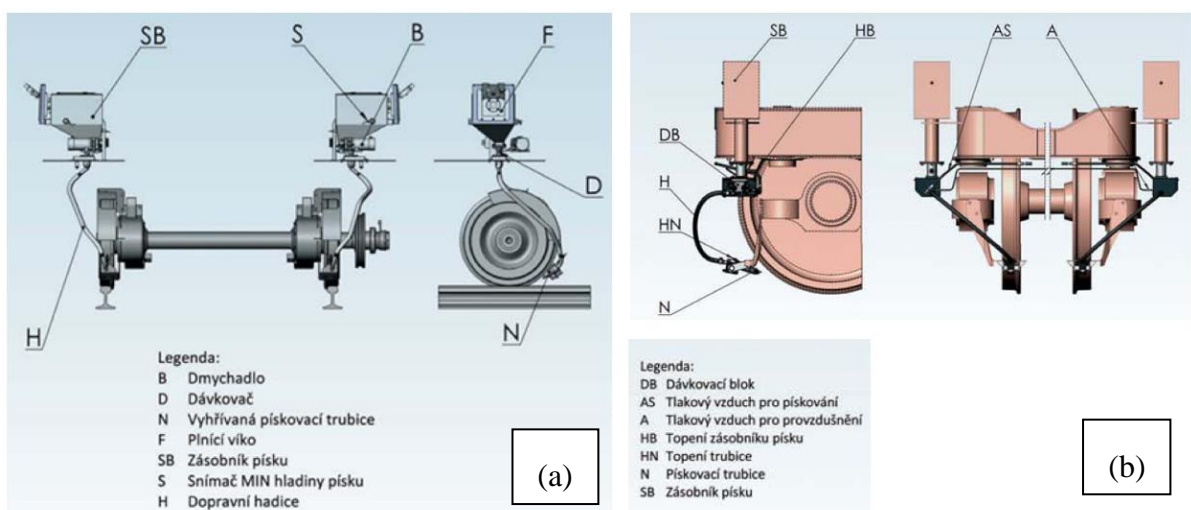
Aby se do prostředí uvolnil co nejmenší počet částic, měla by být dávka písku nutná pro dosažení požadovaného adhezního efektu nanášena efektivně. Z obr. 6, který ilustruje jev pískování, je patrné, že ne všechny částice procházejí kontaktem, tzn. nepřispívají ke zvýšení adheze.

Pískovací systémy jako celek bývají navrženy a optimalizovány na konkrétní podvozek, nebo vozidlo, přičemž jejich konstrukce a uspořádání odpovídá druhu kolejového vozidla [9], [10]. Příklad takových systémů je na obr. 7 a, 7 b. Pro pískování se používá vysušený křemičitý písek předepsaných zrnitostí.



Obrázek 6 Fotografie pořízená vysokorychlostní kamerou během 3 testů s pískováním. Převzato a upraveno ze zdroje [11].

Popis obrázku 6: Hadice zacílená na kontakt pod úhlem 10°: a) boční pohled, průtok 2 kg/min; b) pohled zepředu, průtok 2 kg/min; c) boční pohled, průtok 1,5 kg/min; d) pohled zepředu, průtok 1,5 kg/min; e) boční pohled, průtok 2 kg/min, hadice s tryskou; b) pohled zepředu, průtok 2 kg/min, hadice s tryskou; Všechny testy byly provedeny za zvýšené vlhkosti a při větru o rychlosti 48 km/h v podélném směru [11].



Obrázek 7 Pískovací systém společnosti TRIBOTEC (a) pro tramvaje a (b) pro železniční vůz. Převzato a upraveno (a) ze zdroje [10], (b) ze zdroje [9].

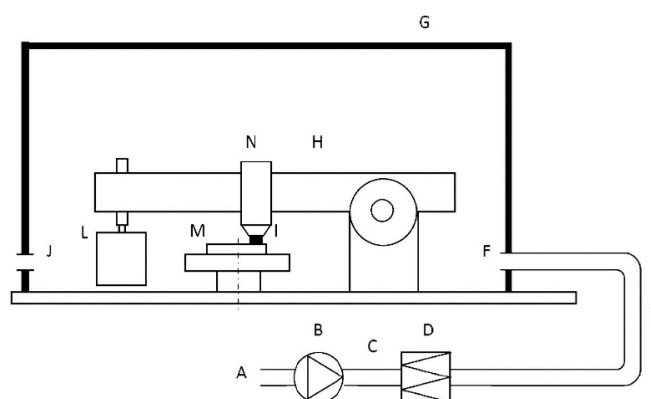
2.3 Laboratorní výzkum

Aby mohla být vytvořena zkušební komora pro budoucí výzkum zaměřený na vznik částic nesených vzduchem, zejména při pískování, jsou v následujících podkapitolách popsána některá z existujících zařízení.

2.3.1 Laboratorní zařízení pro studium emise pevných částic

Studium emise pevných částic vyžaduje příslušnou aparaturu. Vzhledem k tomu, že měření prováděné na pojezdu kolejového vozidla za provozu by bylo ovlivněno řadou vnějších vlivů, přistupuje se k laboratornímu zkoumání třecího kontaktu. Každé takové měřicí zařízení obsahuje část simulující požadovaný kontakt, případně okolní prostředí a část, která obsahuje měřicí techniku, zaznamenávající průběh experimentu.

Na Královském technologickém institutu ve Stockholmu, kde se tématem uvolňujících se částic dlouhodobě zabývají, ke svým experimentům bylo používáno zařízení [6], [7], [12], [13] typu „pin-on-disc“, které je popsáno na obr. 8. Pin-on-disc tribometry jsou určeny pro studium bodového třecího kontaktu.



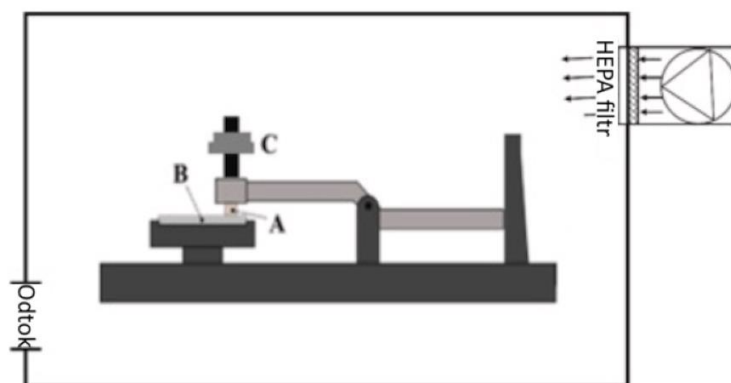
Obrázek 8 Schéma zařízení. A: Vzduch v místnosti; B: Ventilátor; C: Měření průtoku; D: Filtr; E: Ohebná hadice; F: Vstup čistého vzduchu, bod měření; G: Utěsněná komora; H: Pin-on-disc zařízení; I: Bodový kontakt; J: Výstup vzduchu z komory, bod měření; L: Závaží; M: Rotující disk; N: Vzduch v komoře. Převzato z [7].

Toto zařízení má stavitelný objemový průtok, který byl při měření nastaven na $7.7 \text{ m}^3/\text{h}$. Objem komory je 0.135 m^3 a objem částí uvnitř komory je cca 0.035 m^3 , takže přibližná rychlost výměny vzduchu je $77/\text{h}$. Jednotlivé vědecké práce využívaly těchto přístrojů:

- filtr H13 odpovídající normě EN 1822 s certifikovanou efektivitou sběru částic 99,95 % při maximální velikosti procházejících částic.
- Aerosolový spektrometr GRIMM Aerosol Technik model 1.109
- TSI P-TRAK Čítač ultrajemných částic 8525 – měří koncentraci částic unášených vzduchem mezi $0,02$ a $1 \text{ }\mu\text{m}$ v průměru (použito pro zjištění čistoty vzduchu před testem)

- SMPS (scanning mobility particle sizer)
 - Elektrostatický klasifikátor (TSI 3071) s čítačem částic (TSI CPC 3010)
- TSI DustTrak je čítač částic, jehož výstupem je hmotnostní koncentrace v mg/m^3 .
- SARTORIUS® ME614S and METTLER TOLEDO XP2003S
- Elektrický nízkotlaký impaktor ELPI+, vyvinutý v Dekati Ltd, měří koncentraci částic.

Z obr. 8 je patrné, že utěsněná komora obemyká celé měřicí zařízení, nikoliv pouze místo kontaktu. Stejný přístup byl zvolen i u zařízení The Nanovea (Nanovea SRL, Rivalta di Torino, Italy) POD, model T5 [14], jehož schéma je zobrazeno na obr. 9.

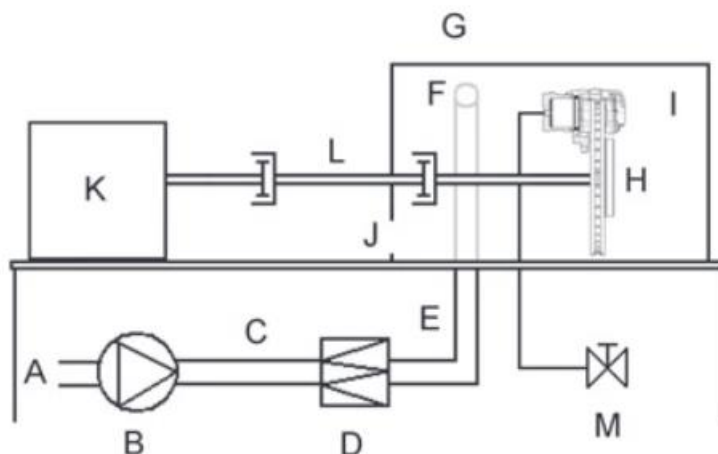


Obrázek 9 Schéma nastavení experimentu: Mrtvá váha (C) tlačí vzorek (A) proti rotujícímu disku (B). Převzato a upraveno z [14].

Konstantní průtok na vstupu byl nastaven na $4 \text{ m}^3/\text{h}$. Priváděný vzduch si následně odčerpávají použité přístroje dle potřeby. Pro měření byly použity tyto pomůcky:

- Čistič vzduchu Allentown EcoFlo™ model EFS120GR zajišťující konstantní ventilaci utěsněné kmory
- TSI® Dust Trak™ DRX, model 8533 Aerosol Monitor měří hmotnostní koncentraci pevných částic v mg/m^3 v reálném čase
- TSI® čítač kondenzačních částic (CPC) model 3775 slouží k vyčíslení koncentrace počtu částic (PNC), které nepřesahují velikost 4 nm, při průtoku $1,5 \text{ l}/\text{min}$

U zařízení [15] určeného pro výzkum pevných částic uvolňujících se z brzdového systému bylo zřejmě použito stejného vybavení jako u prvního tribometru. Zařízení se od sebe výrazně liší mimo jiné konstrukcí komory, která nekryje celé zařízení, nýbrž pouze brzdový systém (viz obr. 10).



Obrázek 10 Schematický diagram testovacího zařízení. A: vzduch v místnosti; B: ventilátor; C: Měření průtoku; D: Filtr; E: Ohebná hadice; F: Vstup čistého vzduchu; G: Utěsněná komora; H: pravá přední brzdová sestava; I: Vzduch v komoře, dobře promísený; J: Výstup vzduchu z komory, bod měření částic; L: Hnací hřídel; M: Pneumatický systém. Převzato z [15].

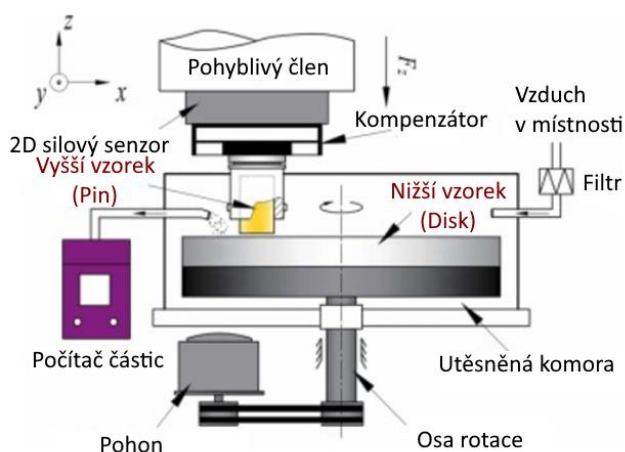
Rychlost proudění vzduchu je možno nastavit od 2 do 50 m³ h⁻¹. Dále byly použity tyto přístroje:

- Aerosolový spektrometr GRIMM 1.109 je optický čítač částic, měřící koncentraci částic o rozměrech 0,25 až 32 μm. Tyto částice jsou rozřazeny do 31 velikostních intervalů. Koncentrace částic je ukládána po 6 s.
- kondenzační jádro P-TRAK TSI přeměňuje číslo koncentrace částic unášených vzduchem. Velikost částic je od 0,02 do 1 μm.
- DustTrak aerosol monitor TSI kontroluje hmotnostní koncentraci in mg·m⁻³. Zařízení bylo použito bez pre-precipitátorů pro měření částic mezi 0,1 a 10 μm. Data byla ukládána každých 5 s.
- filtr H13 odpovídající normě EN 1822 s certifikovanou efektivitou sběru částic 99,95 % při maximální velikosti procházejících částic.

Na obr. 11 je vyobrazen tribometr typu pin-on-disc [16]. Toto zařízení sloužilo pro výzkum na Šanghajské dopravní univerzitě. Komora opět zakrývá pouze pracovní prostor a vzduch skrz ni proudí rychlostí 2,83 l/min.

Použitá zařízení:

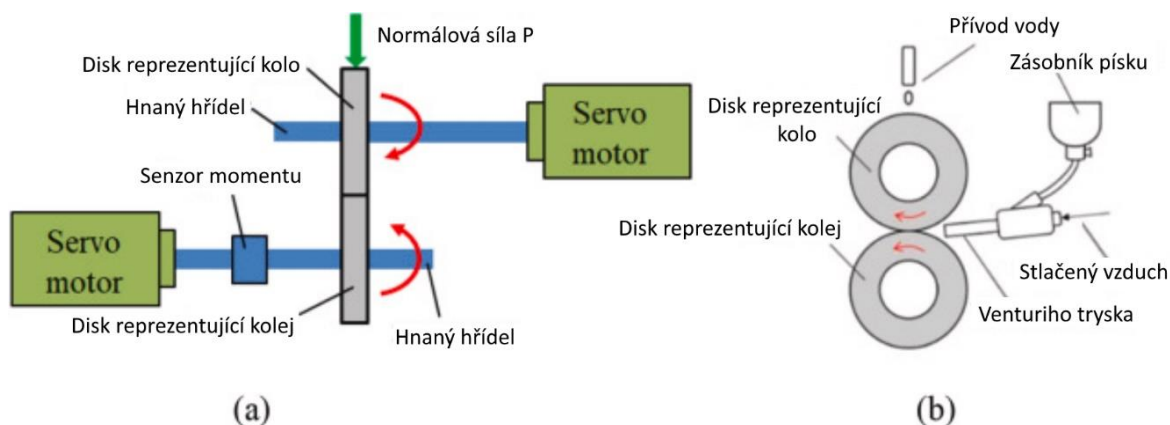
- HEPA filtr s průtokem 2,83 l/min.
- On-line čítač částic (OPC), CLJ-A3016, Sanfeng, je zobrazující velikost a množství částic na jednotku objemu v reálném čase.



Obrázek 11 Schematický diagram zařízení tribometru typu pin-on-disc. Převzato a upraveno z [16].

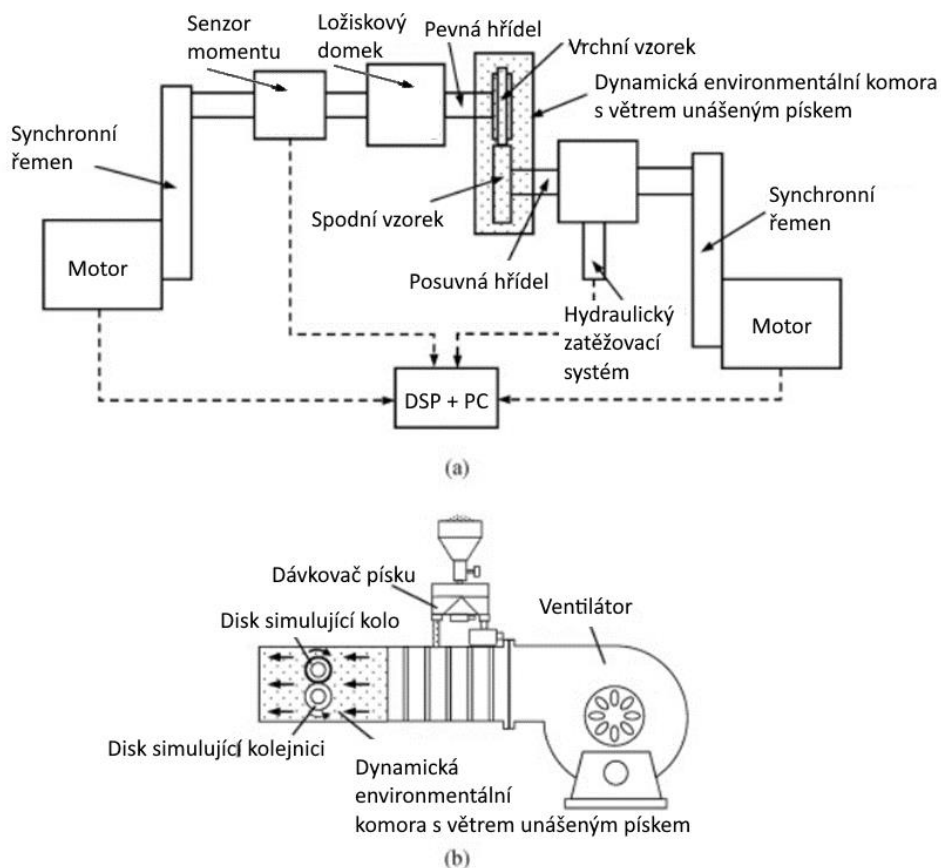
2.3.2 Laboratorní zařízení pro studium pískování

Tribometr SUROS (Sheffield University Rolling Sliding) [17] viz obr. 12 byl používán k testování adheze a opotřebení. Použity byly čtyři různé zrnitosti písku a rychlost skluzu byla postupně nastavena na tři různé hodnoty.



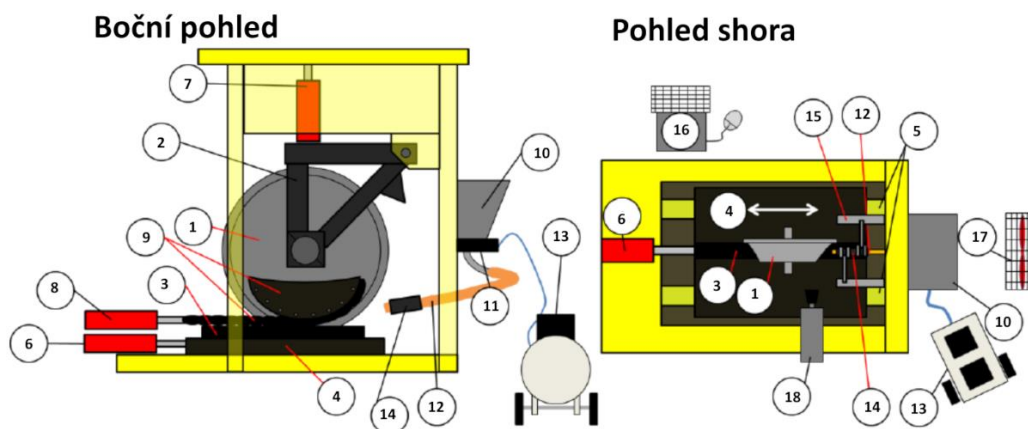
Obrázek 12 (a) Schéma tribometru. (b) Schéma Přívodu vody a písku. Převzato a upraveno z [17].

Tribometr [18] na obr. 13 sice primárně neslouží ke studiu pískování, ale účel je podobný. Železniční tratě prochází různými lokalitami včetně lokalit extrémní prašnosti, písečných bouří etc., kde dochází vlivem písku k zvýšenému opotřebenosti kol i tratě. Právě pro lepší popsání opotřebenosti v důsledku zmiňovaného jevu bylo použito toto zařízení. Rozdíl oproti předešlému je mimo jiné ve způsobu nanášení písku.



Obrázek 13 Testovací zařízení na únavu kontaktu disků (a) vybaveno simulací reálných podmínek (b).
Převzato a upraveno z [18].

Jiné zařízení vyvíjené British Rail research a používané skupinou vědců na Katedře strojního inženýrství na univerzitě v Sheffieldu [11] je určeno ke studiu nanášení písku na kolejnici, zejména pro hledání ideální polohy pro hadici s tryskou a vliv vnějších podmínek na pískování. Zestručněný popis zařízení s obrázkem obr. 14 viz dále.



Obrázek 14 Schéma zařízení vyvíjené British Rail research shora a z boku. Převzato a upraveno z [11].

Popis: Kolo s nominálním průměrem 1016 mm (1) je uložené v zatěžovaném rámu (2) a dosedá na kolejnici o délce 1010 mm (3). Ta je uložena v lineárním vedení (4), které klouže po mazaných PTFE pásech (5). Horizontální pohon (6) posouvá kolejnicí o max. vzdálenost 600 mm, což způsobuje rotaci kola. Vertikální pohon (7) simuluje zatížení kola a zvedá kolo po provedení experimentu. Horizontální pohon (8) kontroluje pohyb kola a působí prostřednictvím sestavy řetězu a řemene (9) na okolek.

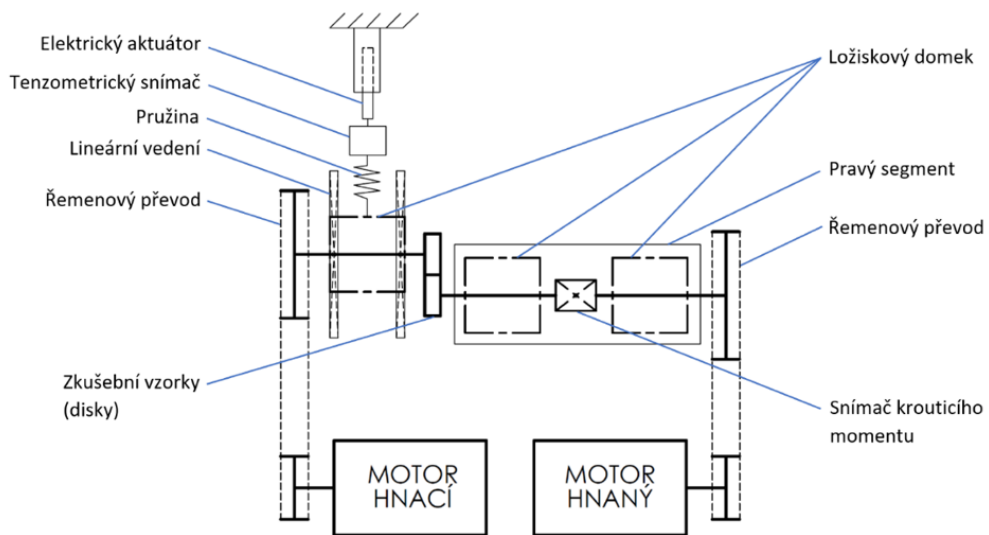
Písek je ukládán do zásobníku (10) nacházejícímu se na rámu zařízení. Písek je ventilem (11) pouštěn hadicí (12) do kontaktu kolo-kolejnice. K tomu je použit stlačený vzduch z kompresoru (13) respektive ze zásobníku vzduchu o kapacitě 50 l, jež dokáže vyvinout tlak až 8,1 baru. Tvar hadice je stavitelný díky hliníkovému plášti na konci hadice (14) Jejíž pozici přesně vymezuje rám (15) připojený k plášti připojený ve dvou bodech. Pohyb zařízení je řízen počítačem (16). Pro simulaci proudění vzduchu byl použit radiální ventilátor (17) s max. rychlostí vzduchu 96 km/h. Pro záznam bylo použito několika kamer, mimo jiné vysokorychlostní kamera (18).

2.3.3 Dvoudiskové zařízení vyvíjené na Ústavu konstruování

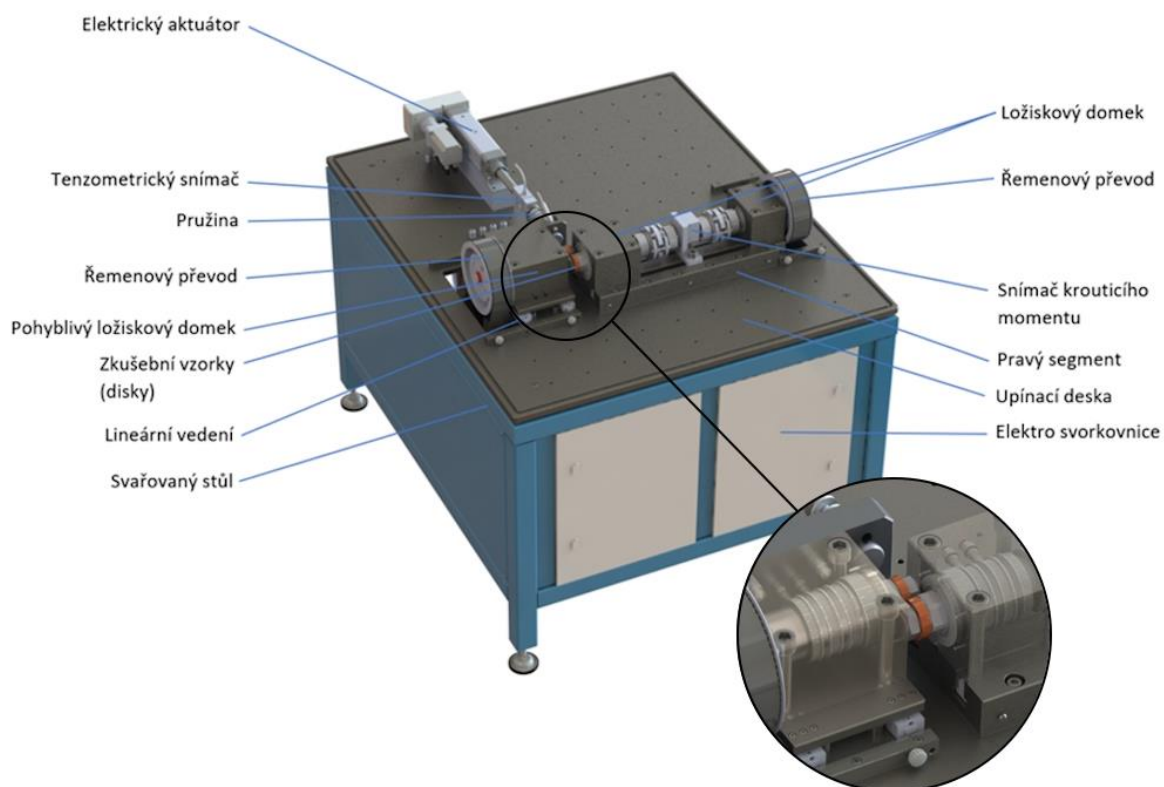
Pro studium tuhých modifikátorů, studium adheze a trakce, ale také pro studium emise pevných částic byl vyvinut dvoudiskový tribometr. Tyto disky jsou přes řemenový převod poháněny dvěma motory, takže je možné měnit rychlost jednotlivých disků vůči sobě. Elektrický aktuátor umožňuje posun jednoho z ložiskových domků po lineárním vedení, čímž dochází k nastavení vzájemného přitlaku disků. V místě kontaktu dochází ke skluzu. Aby byly podmínky průběhu experimentu stabilní, je součástí tribometru chladicí systém odebírající teplo z kontaktu.

Zařízení je schopno určit přenášený krouticí moment soustavy, součinitel adheze i trakční křivku.

Koncept i model sestavy jsou pro názornost vyobrazeny na obr. 15 a 16, technické parametry viz tabulka č. 2.



Obrázek 15 Zjednodušené schéma dvoudiskového zařízení. Zdroj [19].



Obrázek 16 Model dvoudiskového zařízení. Převzato a upraveno z [19].

Tabulka 2 Technické parametry tribometru. Zdroj [19].

Výkon hlavního pohonu	2 x 15 kW
Krouticí moment	194 Nm
Nominální otáčky	738 min ⁻¹
Převodový poměr	2
Hlavní napájecí napětí	3 x 400 V
Kontaktní tlak	1 GPa
Přítlační síla	max. 5 kN
Výkon chlazení	1,7 kW
Velikost zkušebních vzorků	46 mm / 56 mm / 66 mm
Hmotnost	610 kg
Rozměry	1080x1280x1063

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Na základě rozboru používaných zařízení, ať už pro měření částic uvolněných z třecího kontaktu, nebo pro studium pískování, lze konstatovat, že autorem nebylo zaznamenáno zařízení, které zkoumá částice uvolňující se při pískování. Proto je při návrhu komory vhodné se inspirovat některými řešeními, které alespoň částečně odpovídají požadavkům. Jedná se např. o zařízení zmíněná v kapitolách 2.3.1 a 2.3.2. Právě díky tomuto porovnávacímu procesu lze analyzovat použité laboratorní vybavení a následně zvolit vybavení, které vyhovuje možnostem a požadavkům Ústavu konstruování.

Nyní lze definovat cíle práce a specifikovat parametry komory.

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem je zkonstruovat zkušební komoru dvoudiskového zařízení pro studium uvolňování pevných částic ze simulovaného kontaktu kola a kolejnice v důsledku opotřebení a aplikace materiálů pro úpravu tření v kontaktu.

3.3 Dílčí cíle

Pro dosažení co nejlepšího celkového výsledku byly v následujícím pořadí stanoveny dílčí cíle:

1. Rešerše zkušebních komor již existujících zařízení, definování požadavků na technické parametry komory
2. Koncepční návrh skříně zkušební komory
3. Koncepce vybavení zkušební komory zajišťující správnou funkci
4. Konstrukční návrh zkušební komory
5. Konstrukční návrh vybavení zkušební komory
6. Realizace projektu – výroba zkušební komory

3.4 Požadavky na technické parametry zkušební komory

Cílem práce, jak již bylo naznačeno výše, je zkonstruovat a následně vyrobit zkušební komoru pro dvoudiskové zařízení pro studium emise pevných částí z kontaktu kola a kolejnice. Tedy utěsněný prostor, jenž je součástí pracovního prostoru zařízení z kapitoly 2.3.3. Skrz komoru bude zajištěn průtok vzduchu unášející částice, které budou následně sbírány a analyzovány. Komora musí zabránit úniku částic a jiných nečistot do místnosti.

Požadované vlastnosti komory:

- víceúčelovost (adaptabilita na různá měření)
- možnost vizuální kontroly průběhu experimentu
- odvod nečistot z komory
- měření množství pevných částic unášených vzduchem
- měření vlhkosti v komoře
- měření teploty disků i teploty vzduchu v komoře
- rychlá montáž a demontáž
- bezpečnost
 - zamezení úniku nečistot do okolí
 - zamezení kontaktu obsluhy s rotujícími disky
- chemická odolnost vůči čistícím přípravkům např. aceton

Jiné požadavky:

- během zpracovávání návrhu byl vznesen požadavek možnosti optického měření teploty disků

Vnější podmínky při používání:

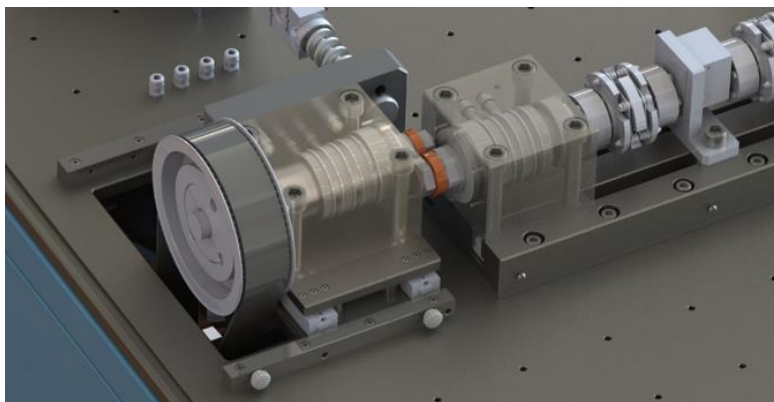
- pokojová teplota
- standardní vlhkost
- atmosférický tlak

Podmínky uvnitř komory:

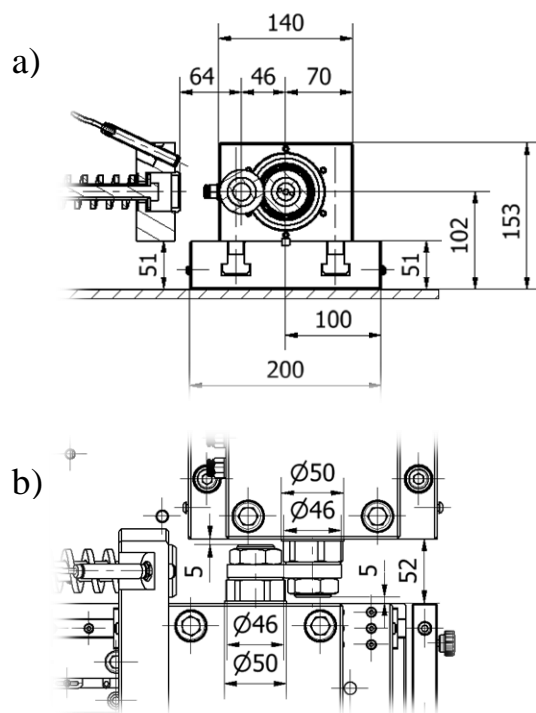
- teplota do 70 °C
- zvýšená vlhkost
- zvýšená prašnost a koncentrace chemických látek, různé mazací přípravky, voda

Rozměry prostoru:

- pracovní prostor viz obr. 17
- konstrukce komory musí umožnit snadný posuv disku o vzdálenost 100 mm
- rozměry viz obr. 18 a, 18 b



Obrázek 17 Pracovní prostor dvoudiskového zařízení. Upraveno ze zdroje [19].



Obrázek 18 Rozměry pracovního prostoru komory a) pohled ze strany b) pohled shora. Vlastní práce.

Zařízení, která jsou k dispozici:

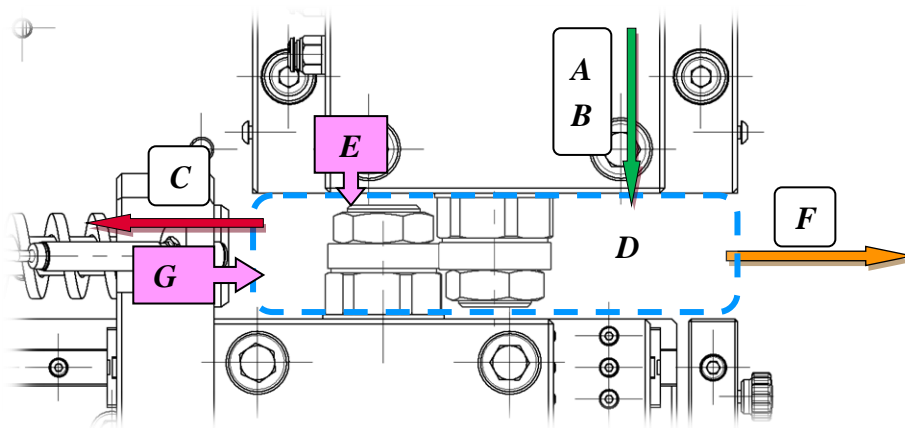
- čítač částic TROTEC PC220

Riziková místa:

- malá vzdálenost mezi rotujícími konci hřídelů a domky (5 mm).
- maximální šířka komory 52 mm

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Aby bylo docíleno úspěšného návrhu, bylo v počátku uvažováno s komorou jakožto pomyslným kvádrem. Tento kvádr byl následně tvarován a dělen s ohledem na předpokládanou funkčnost komory. Z toho vznikly tři základní koncepty neuvažující měřidla a jiné nezbytné součásti komory. Poté co koncept získal konkrétnější podobu (na základě výrobních možností, odhadu nákladů), bylo určeno rozvržení původně zanedbaných částí (viz obr. 19), čímž došlo k finalizaci koncepčního řešení. Jednotlivé části jsou: A) přívod vzduchu přes filtr, B) ventilátor, C) výstup vzduchu z komory přes HEPA filtr, D) Vzduch v komoře, E) Měřicí místo, F) Odvod kapalných nečistot, G) Optické měření teploty disků.

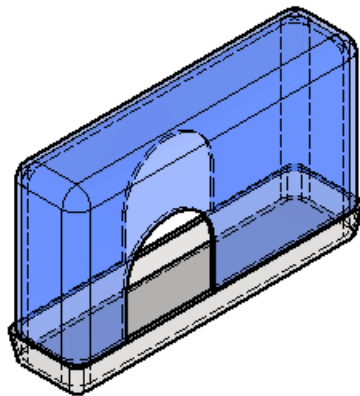


Obrázek 19 Schéma koncepčního řešení komory. Zdroj vlastní práce.

4.1 Koncept 1: Vana s víkem

Koncept *Vana s víkem* je založen na modelu skládajícího se z vysokého poklopu a nízké vany, která by pravděpodobně ležela na desce stolu – viz obr. 20.

- + Jednoduchost
- + průhledné stěny
- + snadnější výroba
- + rychlá montáž, demontáž
- + dobrý přístup do komory
- kolize při posuvu domku
- možné komplikace související s těsněním otvorů

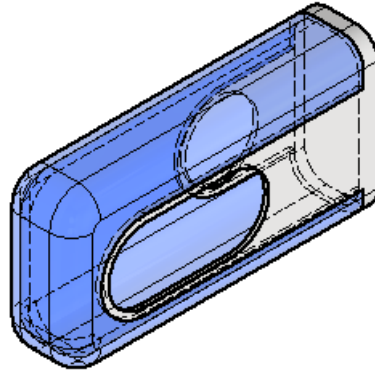


Obrázek 20 Koncept 1: Vana s víkem. Zdroj: autor.

4.2 Koncept 2: Násuvná komora

Koncept *Násuvná komora*, viz obr. 21, je tvořen zadní stěnou (šedá), která je připevněna k pohyblivému ložiskovému domku (průhledná), k této části se přisouvá zbylá část komory. Pro disky jsou do pevné části vytvořeny otvory. Kruhový přiléhá k pohyblivému domku, kdežto protáhlý otvor přiléhá k pevnému domku, vůči němuž se může pohybovat.

- + při posuvu domku nehrozí kolize
- + průhledné stěny
- + rychlá montáž, demontáž
- + dobrý přístup do komory
- těsnění drážkového otvoru je při zachování požadavku zachování pohyblivosti vůči domku netriviální
- možné komplikace a zvýšená náročnost realizace související s těsněním otvorů
- výsledný model může obsahovat díly problematické na výrobu

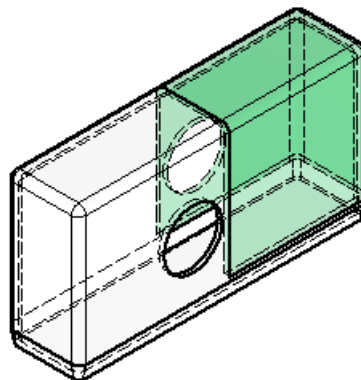


Obrázek 21 Koncept 2: Násuvná komora. Zdroj: autor.

4.3 Koncept 3: Dělená komora

V konceptu *Dělená komora* se komora rozděluje na dvě části, každá je součástí jednoho domku – viz obr. 21.

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> + průhledné stěny + nehrozí kolize při posuvu domku + při vhodném konstrukčním provedení velmi dobrá těsnost komory | <ul style="list-style-type: none"> - problémy s utěsněním (obzvláště spodní hrana) - složitější montáž a demontáž - špatný přístup do komory - může být obtížnější výroba |
|---|---|



Obrázek 22 Koncept 3: Dělená komora. Zdroj: autor.

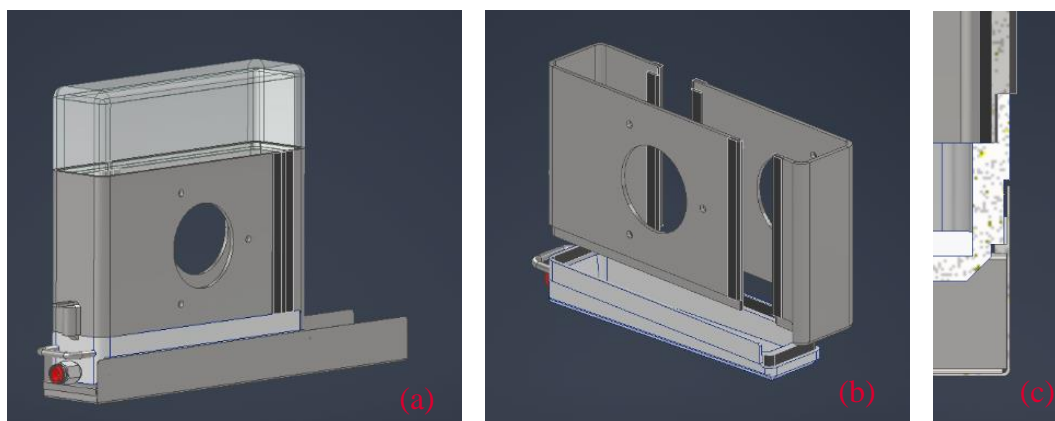
4.4 Koncept 1 & 3

Koncept 1 & 3 staví na konceptech 1 a 3. Z prvního byla převzata možnost jednoduše odklopit víko, kdežto z třetího byla převzata myšlenka bezkolizního odsunu dílů komory. Návrh byl nadále rozvíjen v několika variantách, které vykryštalizovaly do varianty A a B. Jejich základ je tvořen dvěma plechy. Plechem tvaru U a plechem tvaru L. Víko je transparentní.

4.4.1 Varianta A – komora se zasouvací vanou

Všechny předchozí návrhy vychází ze stereotypu horní vany, která je pevně spojená se zbytkem komory. Tento koncept zmíněný předpoklad opouští a přichází s myšlenkou položit horní vanu na vanu spodní, s tím, že vana by těsnila tvarově. Plechy jsou (podobně jako dva vagóny osobní přepravy) utěsněny dvěma páry těsnění, které při vzájemném dosednutí zabraňují vnikání a unikání látek do komory. Horní vana je navíc pojištěna západkou. Vše je vyobrazeno na obr. 23 a, b, c.

- | | |
|---|---|
| + uzavřenost a teoretická těsnost komory | - nutnost zajištění vany proti samovolnému odsunutí |
| + při posuvu nedochází ke kolizi | - dražší a komplikovaná výroba plechů a vany |
| + transparentní víko | - nejsou vyloučené problémy s těsností komory |
| + horní vanu netřeba připevnit k plechu U | |
| + dobrá smontovatelnost | |

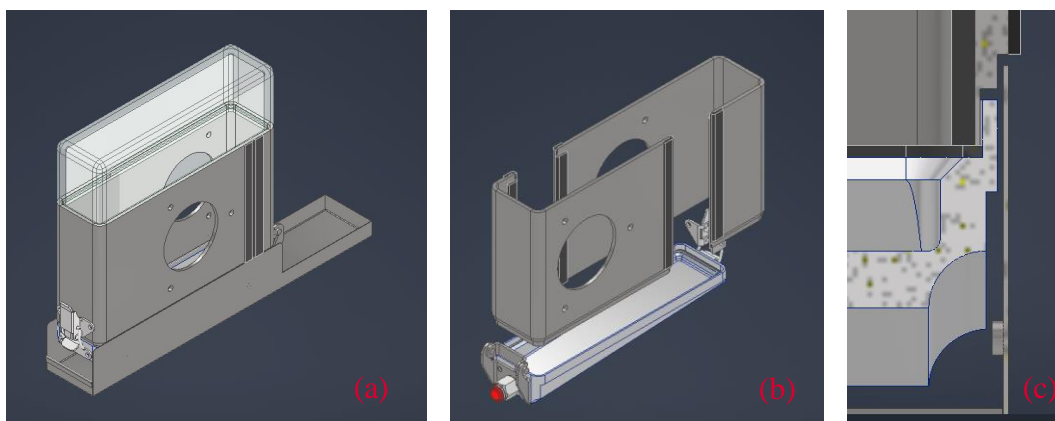


Obrázek 23 Koncept 1 & 3: Varianta A – komora se zasouvací vanou. a) složená komora; b) rozložená komora; c) detail vany. Zdroj: autor.

4.4.2 Varianta B – komora s přiklopnou vanou

Varianta B obr. 24 a, b, c byla zvolena jako výchozí pro konstrukci komory i když samotné konstrukčního provedení se liší. Zejména se jedná o umístění háčku a odtokové hadice, tvar spodní i horní vany. Výrazně byly zjednodušeny plechové dílce.

- | | |
|--|--|
| + uzavřenost a teoretická těsnost komory | - při posuvu dochází ke kolizi – nutno ošetřit |
| + transparentní víko | - dražší výroba plechů a vany |
| + dobrá smontovatelnost | - nejsou vyloučené problémy s těsností komory |
| + jednoduché uchycení horní vany | |



Obrázek 24 Koncept 1 & 3: Varianta B – komora s přiklopnou vanou. a) složená komora; b) rozložená komora; c) detail vany. Zdroj: autor.

4.5 Koncept vybavení komory

Všechny předchozí návrhy neuvažují jednak průtok vzduchu komorou a neumožňují připojení měřicí techniky, filtry, ventilátor aj. Tím vším je potřeba komoru vybavit, aby byla zajištěna funkčnost a univerzálnost.

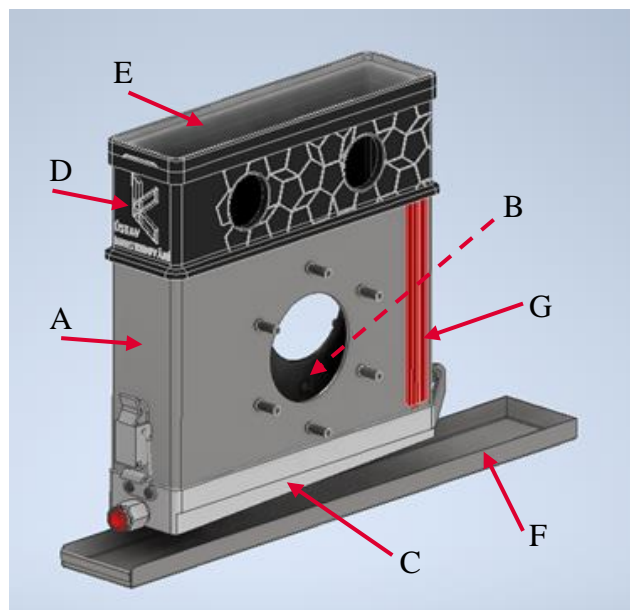
Při těchto požadavcích se nabízí použití FDM technologie 3D tisku. Proto bylo víko v konceptu 1&3 B nahrazeno prosklenou pokličkou a nástavcem, k němuž se pomocí redukci připojí požadované komponenty. Tisk z plastu je cenově dostupný a umožňuje snadno a rychle vytvořit, nebo modifikovat tvar přípojek, popřípadě celého nástavce.

Co se pískování týče, zatím je počítáno s ruční aplikací písku po odkrytí víka, v budoucnu může být nástavec modifikován pro připojení pískovací jednotky.

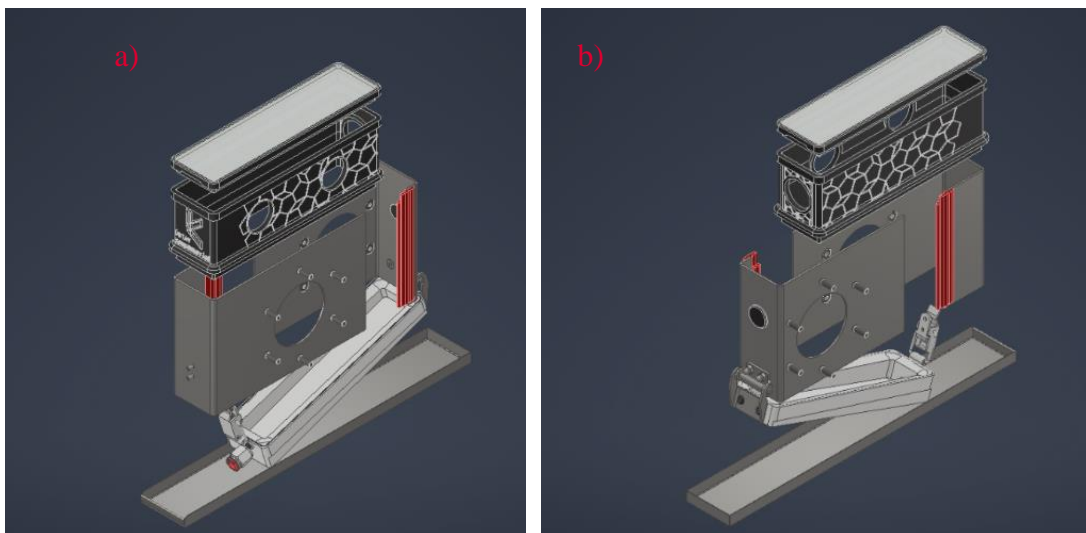
5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

5.1 Sestava bez vybavení

Pro konstrukční řešení byl vybrán koncept 1 & 3, varianta B, který byl modifikován a upraven, aby maximálně vyhovoval kladeným požadavkům. Varianta B působila oproti variantě A realizovatelněji, co se těsnění vany týče, proto byla upřednostněna. Finální podoba komory je na obr. 25, v rozloženém stavu na obr. 26 a, 26 b. Většina popisovaných dílů zkušební komory je vyobrazena v následující kapitole na obr. 30.



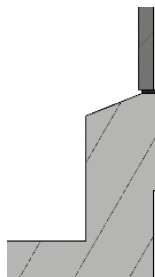
Obrázek 25 Konstrukční řešení komory bez vybavení. Zdroj: autor.



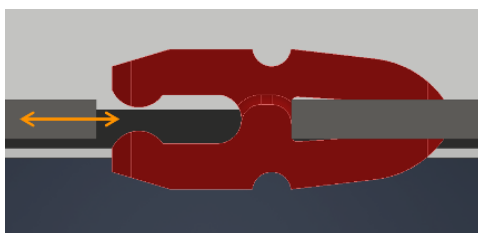
Obrázek 26 Rozložený model komory a) přední pohled a b) zadní pohled. Vlastní práce autora.

Základní kostru tvoří plech U (A), připevněný k nepohyblivému ložiskovému domku a plech L (B) připevněný k posuvnému ložiskovému domku. Za plech L je zavěšena vana s těsněním (C), která je za pomoci upínací spony dotažena k plechu U. Detail vany dosedající na plech je na obr. 27. Na plechy je nasazen nástavec (D) s možností úpravy pro konkrétní experiment, na nějž dosedá transparentní víko (E). Pod vanou je umístěn tácek (F) zachycující nečistoty, je-li vana odebrána.

Plechys jsou těsněny od domků pomocí plochého těsnění s otvory pro šrouby a mezi sebou jsou těsněny na principu zasunutí plechu do speciálně tvarovaného tištěného těsnění (G) (obr. 28).



Obrázek 27 Detail těsnění vany a plechu. Zdroj: autor.

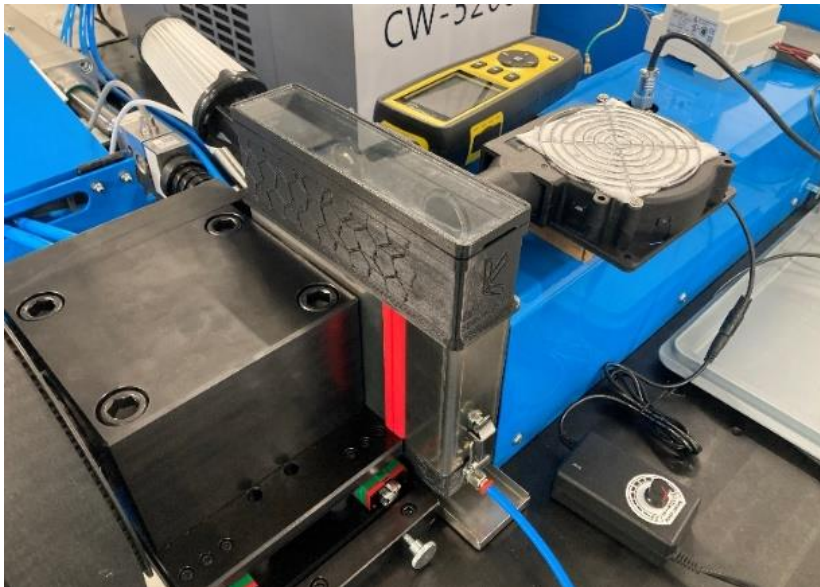


Obrázek 28 Detail způsobu těsnění plechů. Zdroj: autor.

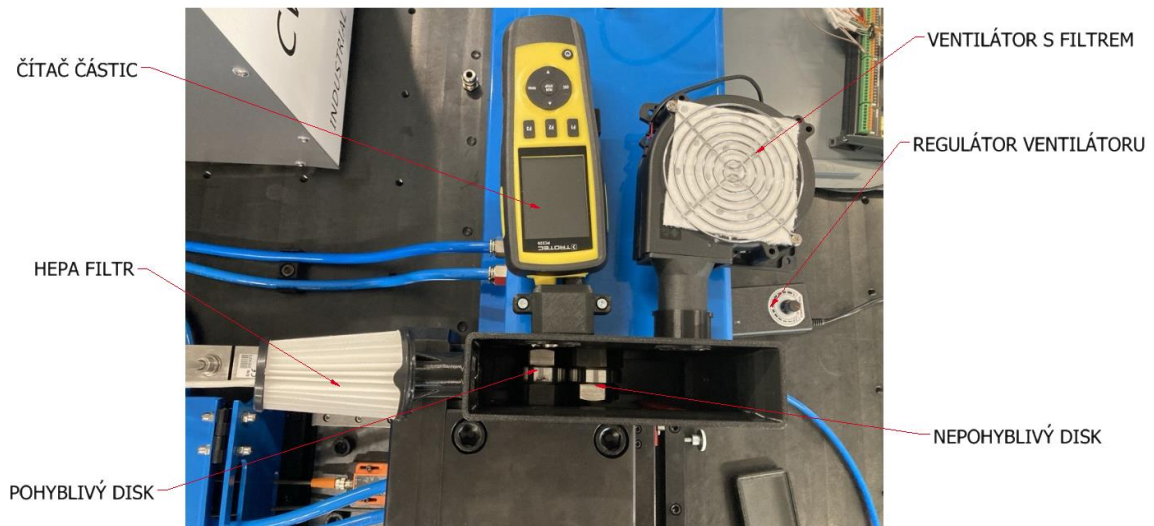
5.2 Kompletní sestava

Na obr. 29 je fotografie vyrobené komory. Funkce odpovídá zvolenému rozvržení z obr. 19. Jednotlivé díly jsou popsány v podkapitolách 5.2.1. až 5.2.4, většina z nich je také na obr. 30 až 32.

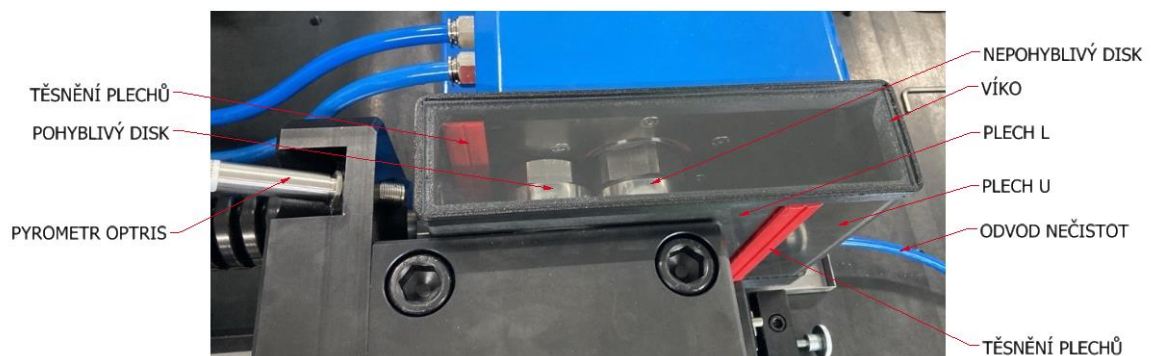
Co se pískování týče, zatím bude dostačující ruční aplikace písku po odkrytí víka. Bude-li v budoucnu potřeba zařízení doplnit o pískovací jednotku, nabízí se vytisknout vhodný nástavec, nebo stávající nástavec provrtat.



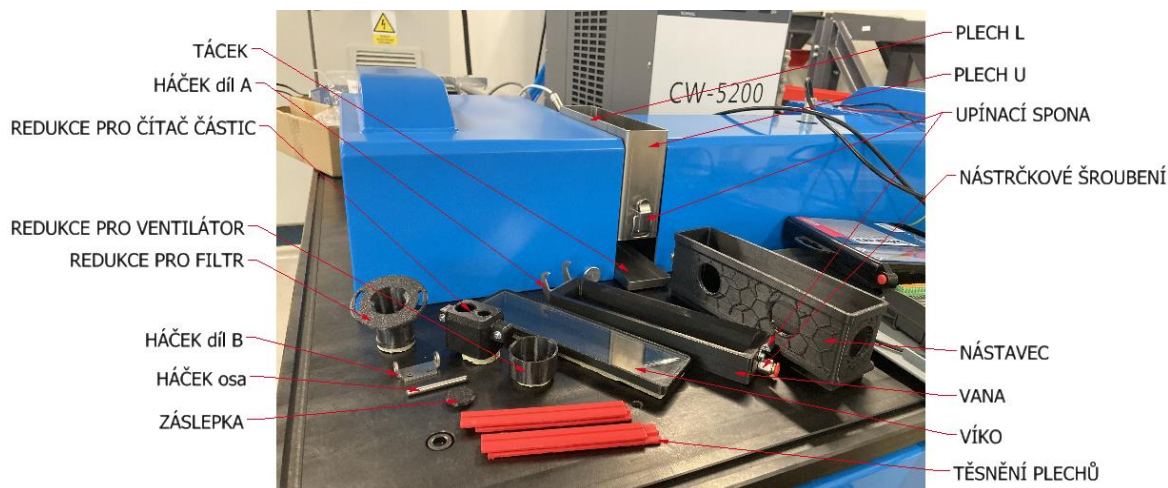
Obrázek 29 Realizovaná komora včetně vybavení. Foto: autor.



Obrázek 30 Vybavení nástavce komory. Foto: autor



Obrázek 31 Zkušební komora bez nástavce. Foto: autor.



Obrázek 32 Rozložená zkušební komora bez vybavení. Foto: autor.

5.2.1 Plechové díly

Pro všechny plechové díly byl zvolen plech tloušťky 2 mm a materiál 1.4305, ale pro nedostupnost došlo ke změně na 1.4301. Díly jsou vypalovány laserem.

Plech U a plech L jsou každý pomocí 6 šroubů M5 se zápustnou hlavou chyceny přes těsnění k domkům. Veškeré šrouby, které spojují tyto plechy s jinými komponentami mají rovněž zápustnou hlavu, aby nepřecházely rovnou plochu a umožnily snazší čištění komory. V plechu L je vypálená rovněž díra pro pyrometr Optris OPTCSLT15. Tento otvor je uzavíratelný záslepkou.

Háček se skládá ze dvou plechových dílů a osy. Ta měla být původně zajištěna proti axiálnímu posunutí dvěma pojistnými kroužky, ale nakonec bylo přistoupeno k použití válcového kolíku DIN 6325-5M6-45-ST, který je nepohyblivě zasazen do příslušného plechu. V případě rozvolnění budou obě součásti splepeny.

Táček je ohýbaný, nesvařovaný. Pro bezpečnější manipulaci je čelo osazeno lemem. V případě, že by bylo nečistot zachycováno větší množství, je doporučeno táček svařit.

5.2.2 Obráběné díly

Jediným obráběným dílem je vana z materiálu EN AW-6060 (AlMgSi) T6. Ta má obdélníkový tvar a zešíkmené dno, tak aby kapalné nečistoty mohly lépe odcházet ven. K tomu je určen otvor s nástrčkovým šroubením. Mezi vanou a plechy je nalepeno těsnění.

U vany bylo rozhodnuto nejprve ji otestovat pomocí 3D tištěného modelu. Tento model odhalil nedostatky týkající se těsnění, ale zároveň ověřil smontovatelnost. Proto ještě před výrobou bude návrh vany pravděpodobně osazen drážkou pro O kroužek, který nahradí současné těsnění, tj. ploché tvarované těsnění přilepené k vaně. K výrobě bude přistoupeno, bude-li první experiment se zkušební komorou úspěšný.

5.2.3 Díly tištěné na 3D tiskárnách

Konstrukční řešení komory počítá s řadou dílů vyrobených 3D tiskem. Jedná se o nástavec na plechy, redukce pro filtr, redukce pro ventilátor, redukce pro čítač pevných částic, testovací model vany, záslepka a 2x těsnění.

Protože by díly měly dobře odolávat acetonu, připadaly v úvahu pouze dva materiály: polyamid a polypropylen. Po několika neúspěšných pokusech s FDM tiskem polypropylenem, bylo rozhodnuto, že všechny díly budou nejprve vyrobeny z PETG. Bude-li jejich aplikace úspěšná, přistoupí se k tisku z nylonu za pomoci lépe vyhovující, ale nákladnější SLS technologie. To se netýká vany, která bude kovová, a těsnění. U těsnění bylo od počátku počítáno s materiálem s komerčním názvem „FLEX“. Při ponoření těsnění do acetonu červená barva mírně zbledla, nicméně jiné kvalitativní změny materiálu pozorovány nebyly. Materiál byl proto posouzen jako vyhovující.

5.2.4 Ostatní díly

Čítač částic PC220; TROTEC

- Kalibrační certifikát je součástí produktu.

Regulovatelný dmychadlový ventilátor s výstupní trubicí GDSTIME

- Průtok vzduchu je 32,6 CFM.
- Na sání ventilátoru je třeba umístit filtrační tkaninu.

Filtr EF150; ELECTROLUX

Sklo FGLKF3-196-48; MISUMI

- Jedná se o čiré plavené sklo 48x196 mm a tloušťce 3 mm.

Upínací spona TLV.SST; ELESA+GANter

- Z celé řady dostupných spon byla vybrána tato nerezová spona jako jedna z mála vyhovujících. Ostatní spony byly buď příliš rozměrné, nebo nezapadaly do celkové vizáže.

Nástrčkové šroubení AIGNEP 50020 00 005

- Konstrukční řešení bylo navrhováno s tímto produktem, ale je možno použít i alternativu od jiných výrobců.
- Druhý konec hadice umístěné do šroubení by měl být ponořen v nádobě s vodou, aby nedocházelo k úniku vzduchu.

5.3 Náklady

Celkové náklady na výrobu komory včetně DPH činí přibližně 40 000 Kč. V částce nejsou zahrnuty položky v cenové relaci desítek Kč, které byly na Ústavu konstruovány k dispozici a nebylo je třeba objednávat. Není rovněž zohledněna cena za spotřebovanou energii na 3D tisk a za dopravu zboží. Nejvíce nákladnými položkami jsou: čítač částic (25 499 Kč) a hliníková vana (předběžný odhad 4 000 až 5 000 Kč). Podrobnější informace viz tab.3.

Tabulka 3 Náklady na výrobu komory. Zdroj: autor.

Položka	Množství	Cena (za množství)
plech U	1	757 Kč
plech L	1	753 Kč
háček část A	1	190 Kč
háček část B	1	259 Kč
tácek	1	431 Kč
vana (odhad ceny)	1	5 000 Kč
těsnění vany	1	-
těsnění domků	2	200 Kč
nástavec	1	
redukce ventilátor	1	
redukce počítadlo částic část A	1	1 500 Kč
redukce počítadlo částic část B	1	
redukce filtr	1	
víko	1	
těsnění FLEX	2	-
HEPA filtr 2ks	1	299 Kč
ventilátor	1	1 273 Kč
počítadlo částic PC220 TROTEC	1	25 499 Kč
upínací spona	1	178 Kč
nástrčkové šroubení	1	-
osa	1	11 Kč
sklo	1	989 Kč
nákup spojovacího materiálu	-	106 Kč
náhradní a testovací díly	-	3 689 Kč
-	Celkem:	41 134 Kč

6 DISKUZE

Veškeré cíle i dílčí cíle, které jsou definovány v zadání bakalářské práce se povedlo splnit. Koncepční varianty byly předloženy, zařízení je zkonstruováno a taktéž na základě výkresů i vytvořených modelů komponent úspěšně proběhla realizace komory, která ověřila její funkčnost.

Všechny požadavky kladené na komoru byly splněny:

- Víceúčelovost (adaptabilita na různá měření) ✓
- Možnost vizuální kontroly průběhu experimentu ✓
- Odvod nečistot z komory ✓
- Měření množství pevných částic unášených vzduchem ✓
- Měření vlhkosti v komoře ✓
- Měření teploty disků i teploty vzduchu v komoře ✓
- Rychlá montáž a demontáž ✓
- Bezpečnost ✓
 - Zamezení úniku nečistot do okolí. ✓
 - Zamezení kontaktu obsluhy s rotujícími disky ✓
- Chemická odolnost vůči čistícím přípravkům např. Aceton ✓
- Možnost optického měření teploty disků ✓
- Konstrukce komory musí umožnit snadný posuv disku o vzdálenost 100 mm. ✓
- Odolnost vůči vnějším a vnitřním podmínkám ✓
- Dodržení požadovaných rozměrů ✓

Dále je nezbytné určit míru úspěšnosti splnění dílčích cílů z kapitoly 3.3.

Dílčí cíle:

1. *Rešerše komor již existujících zařízení, definování požadavků na technické parametry komory*
2. *Koncepční návrh skříně komory*
3. *Koncepce vybavení komory zajišťující správnou funkci*
4. *Konstrukční návrh komory*
5. *Konstrukční návrh vybavení komory*
6. *Realizace projektu – výroba komory*

Prvnímu dílčímu cíli se věnovaly kapitoly 2.3 a 3.4. lze jej tedy považovat za splněný. Nutno podotknout, že zpracování rešeršně-syntetické práce ještě před výrobou dvoudiskového zařízení by bylo přínosem.

V druhém dílčímu cíli bylo postupováno sice logicky, nicméně to, že se návrhová

a konstrukční část práce překrývá, je z hlediska kvality postupu diskutabilní. Pro přehlednost by bylo lépe tyto dvě části od sebe oddělit.

Vzhledem k rozměrům zástavbového prostoru vyhrazeného pro komoru viz obr. 18 b se lze domnívat, že nebylo při navrhování dvoudiskového zařízení uvažováno s těsněním plechů komory, což se později ukázalo značně limitující.

Třetí dílčí cíl lze považovat za splněný, protože pokud by zvolené rozvržení nebylo vyhovující, stávající koncept umožňuje jednoduchou modifikaci nástavce dle potřeby.

U čtvrtého dílčího cíle se nepodařilo zajistit, aby při odjezdu pohyblivého disku nedošlo k poškození. Tento problém by mohla vyřešit buď optická závora, která by neumožnila posuv ložiskového domku za přítomnosti vany, nebo úprava programu, který by před posuvem zobrazil uživateli varování, aby zkontroloval, zda došlo k odstranění vany. Taktéž je zmíněn konstrukční nedostatek, kterým je chybějící drážka pro těsnění vany. Ostatní části fungují dle očekávání. Navíc se povedlo odstranit některé nedostatky Konceptu 1&3 Varianta B.

- | | |
|----------------------------------|--|
| + Uzavřenost a těsnost komory | - Při posuvu disku dochází v případě neodstranění vany ke kolizi – nutno ošetřit |
| + Transparentní víko | |
| + Dobrá smontovatelnost | |
| + Jednoduché uchycení horní vany | |

Zda byl naplněn i pátý dílčí cíl lze s jistotou rozhodnout až po úspěšných testech na zařízení, nicméně celý nástavec je úspěšně sestavený a nebyl shledán žádný závažný nedostatek, který by nasvědčoval nefunkčnosti zkušební komory.

Šestý dílčí cíl se podařilo i přes drobné komplikace doprovázející proces výroby splnit a zkušební komora je připravena na testování.

Do budoucna lze a bylo by vhodné vytisknout nové nástavce a testovat různá rozvržení komory. Dále bude nezbytné ověřit, zda pyrometr Optris OPTCSLT15 funguje spolehlivě i v prašném prostředí.

7 ZÁVĚR

V přehledu současného stavu poznání, který předchází kapitolám věnovaným konstrukci zkušební komory pro studium emise pevných částic z kontaktu kola a kolejnice, bylo nejprve poukázáno na důležitost řešené problematiky, s odkazem na zdravotní následky, jež pevné částice můžou způsobit. Dále bylo uvedeno několik zařízení, která slouží k výzkumu buď pískování (proces nanášení písku do kontaktu kolo-kolejnice), nebo částic uvolňujících se z třecích kontaktů. Není evidováno, že by byl proveden výzkum emise částic při pískování. K tomu má sloužit dvoudiskové zařízení, zkonstruované na Ústavu konstruování, pro něž byla zkušební komora vytvořena. O tom, že se nejedná o izolovaný počín, svědčí i fakt, že se uvolňování částic věnují vědecké týmy po celém světě, jak vyplývá z rešerše. Zmíněný tribometr je uveden až v závěru v kapitole 2.3.3, aby na něj plynule navázala kapitola *Analýza problému a cíl práce*.

Analýza práce vypisuje požadavky na komoru a vymezuje jí prostor daný rozměry tribometru. Jakožto koncept byl použit *Koncept 1&3, Varianta B*, který sliboval nejsnazší realizovatelnost. Pro vybavení komory byl navrhnout adaptabilní nástavec, odpovídající zvolenému rozložení aparatury viz obr. 19.

Zjednodušením a rozpracováním zvolené koncepce vznikl současný konstrukční návrh. Ten je založený na dvou plechových dílech, připevněných k ložiskovým domkům. Zkušební komora obsahuje řadu tištěných dílů (většina z nich je součástí nástavce). Za zmínku stojí tištěné těsnění, jež je specifické právě použitou technologií výroby, která je umožňuje vytvářet a modifikovat na míru. Ze spodu plechů je zavěšena obráběná vana zachycující nečistoty a shora komoru uzavírá víko. Víko je univerzální velikosti, lze je nasadit jak na nástavec, tak i na plechy.

Výrobu komory provázely drobné potíže. Jedním z nich byla nedostupnost zvoleného materiálu plechů, pročež byla zhotovujícím podnikem navržena ekvivalentní náhrada. Kromě toho bylo nutné pozměnit tvar lemu u nerezového tácku, aby se lépe vyráběl, a místo původního plánu tisknout metodou FDM z PP bylo po neúspěších rozhodnuto tisknout metodou SLS z PA. Většina dílů je zatím vytištěna z PETG jako prototypy. Pouze plechový tácek nám nebyl dodán v předepsaných rozměrech, takže se bude znovu vyrábět.

Jelikož se realizace dvoudiskového zařízení opozdila, nebylo možné s časovým předstihem prakticky ověřit, že nebylo nic opomenuto a povede se tak komoru sestavit. To se kvůli dobrému teoretickému modelu a dobře vyrobeným dílům (vyjma tácku) úspěšně povedlo napoprvé.

Dílčí cíle i cíle práce ze zadání se podařilo úspěšně splnit.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SHI, L.B., Q. LI, D. KVARDA, R. GALAS, M. OMASTA, W.J. WANG, J. GUO a Q.Y. LIU. Study on the wheel/rail adhesion restoration and damage evolution in the single application of alumina particles. *Wear* [online]. LAUSANNE: Elsevier B.V, 2019, **426-427**, 1807-1819 [cit. 2024-02-14]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2019.01.021
- [2] WANG, Wenjian, Shengjie LI, Haohao DING, et al. Wheel/rail adhesion and damage under different contact conditions and application parameters of friction modifier. *Wear* [online]. Elsevier B.V, 2023, **523**, 204870 [cit. 2024-02-14]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2023.204870
- [3] OMASTA, Milan, Martin MACHATKA, David SMEJKAL, Martin HARTL a Ivan KŘUPKA. Influence of sanding parameters on adhesion recovery in contaminated wheel–rail contact. *Wear* [online]. LAUSANNE: Elsevier B.V, 2015, **322-323**, 218-225 [cit. 2024-02-17]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2014.11.017
- [4] NEČAS, Emanuel. *Obecná patologická fyziologie*. 3. vyd. Praha: Karolinum, 2009, 377 s. : il. ; 23 cm. ISBN 978-80-246-1688-9.
- [5] KOLEKTIV AUTORŮ, ZÁMEČNÍK, Josef, ed. *PATOLOGIE*. Praha: LD, s.r.o. – PRAGER PUBLISHING, 2019. ISBN 978-80-270-6457-1.
- [6] ABBASI, Saeed. *Characterisation of airborne particles from rail traffic*. S-100 44 Stockholm SWEDEN, 2011. ISBN 978-91-7501-056-4. Licentiate thesis. Department of Machine Design Royal Institute of Technology.
- [7] ABBASI, Saeed, Ulf OLOFSSON, Yi ZHU a Ulf SELLGREN. Pin-on-disc study of the effects of railway friction modifiers on airborne wear particles from wheel–rail contacts. *Tribology international* [online]. OXFORD: Elsevier, 2013, **60**, 136-139 [cit. 2024-05-09]. ISSN 0301-679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2012.11.013
- [8] EADIE, Donald T., Dave ELVIDGE, Kevin OLDKNOW, Richard STOCK, Peter POINTNER, Joe KALOUSEK a Peter KLAUSER. The effects of top of rail friction modifier on wear and rolling contact fatigue: Full-scale rail–wheel test rig evaluation, analysis and modelling. *Wear* [online]. Lausanne: Elsevier B.V, 2008, **265**(9), 1222-1230 [cit. 2024-05-10]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2008.02.029

- [9] TRIBOTEC, spol. s r. o. *Pískovací zařízení lokomotiv* [online]. 06/2017n. 1. [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://kolejovatechnika.tribotec.cz/wp-content/uploads/2021/03/piskovaci-zarizeni-lokomotiv.pdf?fbclid=IwAR01ENaqsxdQvK41L28JusvngvAXeuG3-PCVM6e3VfvduVptrxBKGPf2ng>
- [10] TRIBOTEC, spol. s r. o. *Pískovací zařízení tramvají* [online]. 06/2017n. 1. [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://kolejovatechnika.tribotec.cz/wp-content/uploads/2021/03/piskovaci-zarizeni-tramvaji.pdf>
- [11] LEWIS, S, S RILEY, D.I FLETCHER a R LEWIS. *Optimisation of a railway sanding system for optimal grain entrainment into the wheel–rail contact* [online]. Sage Publications, 2018 [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: doi:10.1177/0954409716656220
- [12] WAHLSTRÖM, Jens, Anders SÖDERBERG, Lars OLANDER, Anders JANSSON a Ulf OLOFSSON. A pin-on-disc simulation of airborne wear particles from disc brakes. *Wear* [online]. LAUSANNE: Elsevier B.V, 2010, **268**(5), 763-769 [cit. 2024-03-18]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2009.11.014
- [13] ALI, Nashit, Ulf OLOFSSON a Senad DIZDAR. Friction, wear, and airborne particle emissions from rail-wheel contact with laser clad overlays - A pin-disc tribometer simulation. *Wear* [online]. Elsevier B.V, 2023, **518-519**, 204635 [cit. 2024-03-18]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2023.204635
- [14] VARRIALE, Francesco, Davide CARLEVARIS, Jens WAHLSTRÖM, Vilhelm MALMBORG a Yezhe LYU. On the impact of pad material ingredients on particulate wear emissions from disc brakes. *Results in engineering* [online]. Elsevier B.V, 2023, **19**, 101397 [cit. 2024-03-18]. ISSN 2590-1230. Dostupné z: doi:10.1016/j.rineng.2023.101397
- [15] WAHLSTRÖM, Jens, Anders SÖDERBERG, Lars OLANDER a Ulf OLOFSSON. A disc brake test stand for measurement of airborne wear particles: A DISC BRAKE TEST STAND. *Lubrication science* [online]. Wiley, 2009, **21**, 241-252 [cit. 2024-03-20]. ISSN 0954-0075. Dostupné z: doi:10.1002/lis.87
- [16] SHEN, Ming-xue, Han-xin LI, Jun-hua DU, De-hui JI, Shao-peng LIU a Ye-long XIAO. New insights into reducing airborne particle emissions from brake materials: Grooved textures on brake disc surface. *Tribology international* [online]. Elsevier, 2022, **174**, 107721 [cit. 2024-03-20]. ISSN 0301-679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2022.107721

- [17] WANG, C., L.B. SHI, H.H. DING, et al. Adhesion and damage characteristics of wheel/rail using different mineral particles as adhesion enhancers. *Wear* [online]. Amsterdam: Elsevier B.V, 2021, **477**, 203796 [cit. 2024-04-28]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2021.203796
- [18] SHU, K., H.H. DING, A. MAZZÙ, Q. LIN, J. GUO, E. MELI, Q.Y. LIU a W.J. WANG. Effect of dynamic windblown sand environments on the wear and damage of wheel-rail under different slip ratios. *Wear* [online]. Amsterdam: Elsevier B.V, 2022, **500-501**, 204349 [cit. 2024-04-28]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2022.204349
- [19] Š. SZABARI, R. GALAS, M. OMASTA, P. ROSENDORF a M. VAŠÍČEK. *Dvoudiskové zařízení s liniovým kontaktem*. Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, 2023. Dostupné také z: <https://intranet.ustavkonstruovani.cz/file-download/get-project-pdf/476>.
- [20] Pneumokonióza. *Velký lékařský slovník* [online]. [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <https://lekarske.slovniky.cz/lexikon-pojem/pneumokonioza>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

<i>DSP</i>	digital signal procesing
<i>FDM</i>	fused deposition modeling – metoda 3D tisku
<i>PA</i>	polyamid (nylon)
<i>PETG</i>	polyethylentereftalát modifikovaný glykolem
<i>PP</i>	polypropylen
<i>SLS</i>	selective laser sintering – metoda 3D tisku

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obrázek 1 Schematický pohled na klíčové parametry profilu jízdního kola. Převzato a upraveno z [2].	15
Obrázek 2 Detail pískovacího zařízení na lokomotivě Škoda řady 362. Foto: autor.	15
Obrázek 3 Schéma oběhu pevných částic v organismu. Převzato a upraveno ze zdroje [6].	16
Obrázek 4 Detail brzdy a kola lokomotivy Škoda řady 362. Foto: autor.	17
Obrázek 5 Detail kontaktu polopantografu elektrické jednotky Škoda RegioPanter s trolejí. Foto: autor.	17
Obrázek 6 Fotografie pořízená vysokorychlostní kamerou během 3 testů s pískováním. Převzato a upraveno ze zdroje [11].	19
Obrázek 7 Pískovací systém společnosti TRIBOTEC (a) pro tramvaje a (b) pro železniční vůz. Převzato a upraveno (a) ze zdroje [10], (b) ze zdroje [9].	19
Obrázek 8 Schéma zařízení. A: Vzduch v místnosti; B: Ventilátor; C: Měření průtoku; D: Filtr; E: Ohebná hadice; F: Vstup čistého vzduchu, bod měření; G: Utěsněná komora; H: Pin-on-disc zařízení; I: Bodový kontakt; J: Výstup vzduchu z komory, bod měření; L: Závaží; M: Rotující disk; N: Vzduch v komoře. Převzato z [7].	20
Obrázek 9 Schéma nastavení experimentu: Mrtvá váha (C) tlačí vzorek (A) proti rotujícímu disku (B). Převzato a upraveno z [14].	21
Obrázek 10 Schematický diagram testovacího zařízení. A: vzduch v místnosti; B: ventilátor; C: Měření průtoku; D: Filtr; E: Ohebná hadice; F: Vstup čistého vzduchu; G: Utěsněná komora; H: pravá přední brzdová sestava; I: Vzduch v komoře, dobře promísený; J: Výstup vzduchu z komory, bod měření částic; L: Hnací hřídel; M: Pneumatický systém. Převzato z [15].	22
Obrázek 11 Schematický diagram zařízení tribometru typu pin-on-disc. Převzato a upraveno z [16].	23
Obrázek 12 (a) Schéma tribometru. (b) Schéma Přívodu vody a písku. Převzato a upraveno z [17].	23
Obrázek 13 Testovací zařízení na únavu kontaktu disků (a) vybaveno simulací reálných podmínek (b). Převzato a upraveno z [18].	24
Obrázek 14 Schéma zařízení vyvíjené British Rail research shora a z boku. Převzato a upraveno z [11].	25
Obrázek 15 Zjednodušené schéma dvoudiskového zařízení. Zdroj [19].	26

Obrázek 16 Model dvoudiskového zařízení. Převzato a upraveno z [19].	26
Obrázek 17 Pracovní prostor dvoudiskového zařízení. Upraveno ze zdroje [19].	30
Obrázek 18 Rozměry pracovního prostoru komory a) pohled ze strany b) pohled shora. Vlastní práce.	30
Obrázek 19 Schéma koncepčního řešení komory. Zdroj vlastní práce.	31
Obrázek 20 Koncept 1: Vana s víkem. Zdroj: autor.	32
Obrázek 21 Koncept 2: Násuvná komora. Zdroj: autor.	33
Obrázek 22 Koncept 3: Dělená komora. Zdroj: autor.	33
Obrázek 23 Koncept 1 & 3: Varianta A – komora se zasouvací vanou. a) složená komora; b) rozložená komora; c) detail vany. Zdroj: autor.	34
Obrázek 24 Koncept 1 & 3: Varianta B – komora s příklopnou vanou. a) složená komora; b) rozložená komora; c) detail vany. Zdroj: autor.	35
Obrázek 25 Konstrukční řešení komory bez vybavení. Zdroj: autor.	36
Obrázek 26 Rozložený model komory a) přední pohled a b) zadní pohled. Vlastní práce autora.	36
Obrázek 27 Detail těsnění vany a plechu. Zdroj: autor.	37
Obrázek 28 Detail způsobu těsnění plechů. Zdroj: autor.	37
Obrázek 29 Realizovaná komora včetně vybavení. Foto: autor.	38
Obrázek 30 Vybavení nástavce komory. Foto: autor	38
Obrázek 31 Zkušební komora bez nástavce. Foto: autor.	38
Obrázek 32 Rozložená zkušební komora bez vybavení. Foto: autor.	39

11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Zdroje pevných částic v kolejové dopravě. Převzato a upraveno ze zdroje [6].	18
Tabulka 2 Technické parametry tribometru. Zdroj [19].	27
Tabulka 3 Náklady na výrobu komory. Zdroj: autor.	41