



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

Hodnocení výkonosti top-of-rail produktů

Evaluating of performance of top-of-rail products

PhD projekt

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Martin Valena

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

BRNO 2019

ANOTACE

Předkládaná práce pojednává o hodnocení výkonnosti top-of-rail produktů. Výkonností se zde myslí: adheze, výdrž maziva v kontaktu a redistribuce. Nejprve se zpracovala obecná rešerše, ze které vyplynulo rozdělení top-of-rail produktů podle základního média na modifikátory tření a top-of-rail maziva. Následující část obsahuje stěžejní články pro práci. Obecně se věnují parametrům ovlivňující adhezi ať již v laboratorním nebo terénním prostředí a experimentálním zařízením. Z analýzy článků vyplynulo, že nejpoužívanější zařízení je twin disk, dále se pak využívá ball-on-disk, pin-on-disk, full-scale a v neposlední řadě reálné vozidlo, které dává nejpřesnější představu o výkonnosti top-of-rail produktů. Závěrečné kapitoly jsou věnovány vytyčení cílů, stanovení vědeckých otázek a odůvodnění potřeby práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

koeficient adheze, skluz-lpění tření, tribologie kola-kolejnice, modifikátor tření

KEYWORDS

Adhesion coefficient, rolling-sliding friction, Rail-wheel tribology, Friction modifiers

OBSAH

OBSAH6

1	ÚVOD	5
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	6
2.1	Obecný přehled problematiky	6
2.1.1	Kontakt kola kolejnice	6
2.1.2	Řízení tření (Friction management)	8
2.1.3	Parametry ovlivňující adhezi	10
2.2	Klíčové studie	10
	Rolling–sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel–rail contacts (Arias-Cuevas, 2009) [12]	10
	Recent developments in coefficient of friction measurements at the rail/wheel interface (Harrison, 2002) [13]	11
	A comparison of friction modifier performance using two laboratory test scales (Buckley-Johnstone, 2018) [14]	13
	Effect of humidity, temperature and railhead contamination on the performance of friction modifiers - Pin-on-disk study (Lewis S.R., 2012) [15]	14
	The role of constituents contained in water–based friction modifiers fortop–of–rail application (Galas, 2017) [16]	15
	Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface (Galas, 2016) [17]	16
	Tribological studies for developing friction modifiers in the wheel-rail systém (Zakharov, S. M., 2015) [18]	18
	The influence of initial surface topography on tribological performance of the wheel/rail interface during rolling/sliding conditions (Lundmark, 2009) [19]	19
	Assessment of lubricant applied to wheel/rail interface in curves (Chen, 2014) [20]	20
	Measurements of friction coefficients between rails lubricated with a friction modifier and the wheels of an IORE locomotive during real working conditions (Lundberg, J., 2015) [21]	22
3	ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ	24
3.1	Testovací zařízení	24
3.2	Metodologie experimentu	26
3.3	Klíčové parametry ovlivňující výsledky experimentů	27
3.4	Bílé místo	27
4	PODSTATA, CÍLE A PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE	29
4.1	Podstata disertační práce	29

4.2	Cíle práce	29
4.3	Přínos práce	29
5	VĚDECKÉ OTÁZKY A PRACOVNÍ HYPOTÉZY	31
6	ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ VĚDECKÉ METODY ZKOUMÁNÍ	33
6.1	Plán experimentů	33
6.2	Využití experimentální zařízení	35
7	ČASOVÝ ROZVRH A ETAPY ŘEŠENÍ	37
8	ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI A POTŘEBNOSTI ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY	38
9	SPOLUPRÁCE S JINÝMI INSTITUCEMI	39
10	PŘEDPOKLÁDANÉ NÁKLADY SPOJENÉ S ŘEŠENÍM A JEJICH ZDROJE	40
11	CHARAKTERISTIKA PŘEDPOKLÁDANÉHO VÝSLEDKU	41
12	BIBLIOGRAFIE	42
13	VĚDECKÝ ŽIVOTOPIS	44

1 ÚVOD

V poslední době začíná mít v kolejové dopravě své místo tzv. řízení tření, které obstarává optimální adhezi v kontaktu kola a kolejnice. Pokud je adheze příliš vysoká, dochází k nadměrnému opotřebení. V případě velmi nízké adheze je zase problém s trakcí, a také vzrůstá bezpečnostní riziko v podobě zvýšení brzdné vzdálenosti. Švédská národní železniční správa odhadla náklady spojené s nízkou adhezí na 90 milionů euro v rámci Evropy [1]. Problémy s nedostatečnou adhezí se řeší aplikací písku. Aplikuje-li se do kontaktu látka, která ustálí adhezi na optimální hladině, dochází ke snížení výskytu vlnkovitosti, snížení opotřebení a redukci hluku.

U těchto látek se hodnotí jejich výkonost, což znamená: výsledný součinitel adheze, trend trakční křivky, výdrž maziva a jeho redistribuce. Samozřejmě jsou zde i nepřímé parametry, jako je například výsledné opotřebení, vliv na kontaktní únavu, vlnkovitost atd. V současné době se používá několik testovacích zařízení na stanovení těchto parametrů. Nejspolehlivější výsledky dávají tzv. „field“ testy, ovšem jsou poměrně časově a hlavně finančně náročné, tedy není možné je využít pro hodnocení každého maziva, či dokonce pro jejich vývoj. Na druhou stranu, existuje několik typů laboratorních zařízení v různých měřících. Některé z nich měří závislost adheze na smykovém posunutí, což je celkem vzdálené reálným podmínkám. Další zařízení dokážou stanovit adhezi za různých hodnot skluzu, což je poměrně blízké skutečnosti. Data získaná v laboratoři a v reálném provozu se ovšem kvantitativně liší, ale kvalitativně si jsou podobné. Taktéž hodnoty mezi jednotlivými pracovišti se můžou lišit. To vše je způsobené absencí metodiky, kterou by se hodnotili top-of-rail produkty.

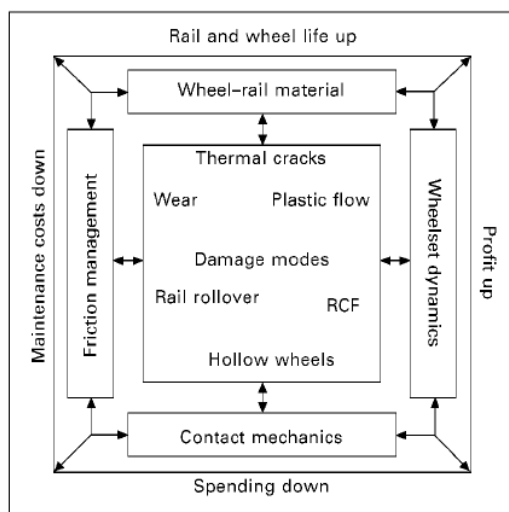
Vznikem metodiky hodnocení top-of-rail produktů by bylo umožněno jednoznačné porovnávání dat mezi pracovišti. Podmínky metodiky při testu by byly zvoleny na základě výsledku z laboratorního a reálného prostředí tak, aby tyto měření korelovaly. Metodika by taktéž ušetřila finanční prostředky, které by se jinak investovaly do výzkumu s reálnými vozidly.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Obecný přehled problematiky

2.1.1 Kontakt kola kolejnice

Kontakt mezi kolem a kolejnicí je poměrně složitý a velmi důležitý prvek kolejové dopravy. Jeho důležitost spočívá v přenosu vertikálních, příčných, trakčních a brzdných sil. Jedná se o otevřený tribologický systém, jehož složitosti nedosahuje skoro žádný kontakt strojních těles [1]. Nejbližší analogii jsou ozubená kola a kuličková ložiska, ale i tyto celky pracují za relativně stálých podmínek. Vzhledem k tomu je obtížné přenést znalosti z jiné oblasti. Pracovní podmínky kontaktu o velikosti typicky 1 cm^2 se za dobu jeho životnosti neustále mění. Jsou ovlivněny okolním počasím, tedy teplotou, vlhkostí, kontaminanty (např. vodou, oxidy atd.) a v neposlední řadě taktéž polohou kontaktu, která mění kontaktní tlak a oblast. Uvedené parametry se liší nejen mezi jednotlivými tratěmi a vozidly, ale dokonce i mezi jednotlivými nápravami.



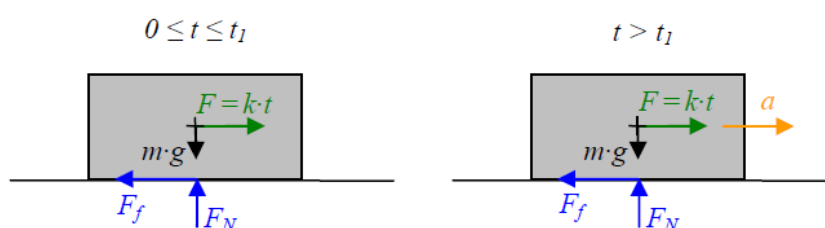
Obr. 2-1 Systémový přístup ke kontaktu kola a kolejnice [1]

Jako u všech strojních systémů je cena provozu na prvním místě. Z toho důvodu musí kontakt pracovat v optimálních podmínkách, ale při nízké ceně. Komplexnost celého problému zobrazuje Obr. 2-1 a jeho jednotlivé části jsou propojeny [1, 2]. Uprostřed se nachází poškozující mechanismy jako je např. opotřebení a kontaktní únava. Následují nástroje, kterými lze ovlivnit předchozí skupinu. Jako poslední je zobrazen finanční dopad. Obr. 2-1 také vyjadřuje spojitost mezi jednotlivými poškozujícími mechanismy. Například opotřebení a kontaktní únava je způsobena jinými mechanismy, ale vzájemně se ovlivňují. Vlivem opotřebení dochází ke zkrácení délky trhliny, a proto je pravděpodobné selhání materiálu právě na opotřebení. Při aplikaci top-of-rail- (TOR) produktů nebo maziv dochází

ke snížení opotřebení, nicméně trhlinka způsobená kontaktní únavou roste dále, což může vést až na selhání.

Tření, adheze, skluz

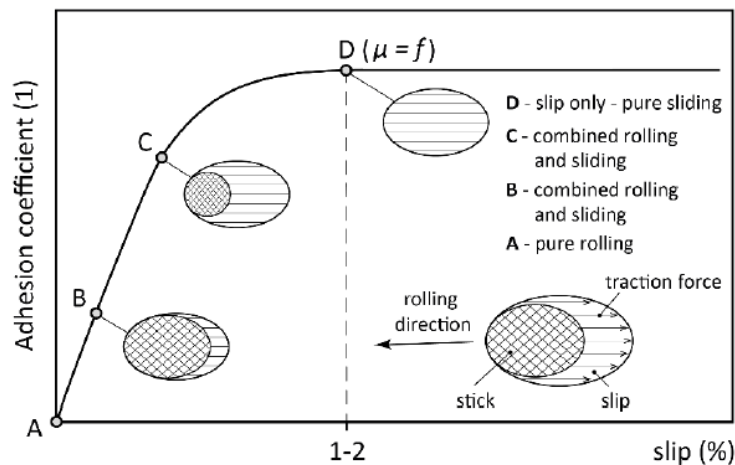
Na první pohled se může zdát, že mezi součinitelem tření a adheze není rozdíl. Ve skutečnosti se jedná o rozdílné parametry. Tření je definováno jako podíl normálové a třecí síly, která zamezuje pohybu (statické) nebo mu klade odpor (dynamické) [3]. Rozdíl mezi nimi je znázorněn na Obr. 2-2, kde F_N je normálová síla působící proti tíhové síle, F_f je zmíněná třecí síla a F je síla nutící těleso k pohybu, která roste v čase. V jistém okamžiku t_1 síla F dosáhne své kritické hodnoty a těleso se uvede do pohybu. Tření přítomné v kontaktu se do této doby nazývá statické, dále pak dynamické. Pro většinu materiálů má statické tření vyšší hodnotu než dynamické.



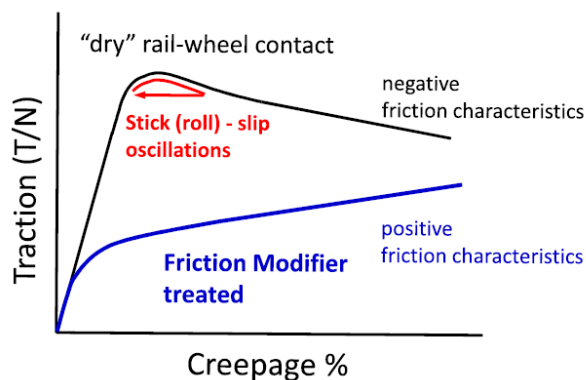
Obr. 2-2 Tření statické (vlevo) a dynamické (vpravo) [3]

Adheze v oblasti kolejové dopravy vyjadřuje poměr mezi trakční a normálovou silou, která přitlačuje kolo [3, 4]. Z toho důvodu je možné v literatuře narazit na označení jako součinitel trakce. Hlavní rozdíl oproti tření spočívá v tom, že působí u valíček se těles a dosahuje maximálně hodnoty statického tření. Pokud dochází k čistému valení, adheze je nulová. To ukázal ve své teoretické práci Carter [5]. Také teoreticky vysvětlil trakční křivku vyobrazenou na Obr. 2-3. Jedná se o závislost adheze na procentuálním skluzu – poměr skluzové rychlosti a střední rychlosti [3]. Kontaktní oblast se skládá ze zóny lpění (angl. stick) zmenšující se s rostoucím skluzem a od výstupu z kontaktu přechází do zóny skluzu (angl. slip). Trakce se přenáší právě touto oblastí. Je-li dosaženo plného skluzu v kontaktu, nastává bod saturace. Za ideálních podmínek adheze dále zůstává konstantní, což tvoří tzv. neutrální trakční křivku. Pokud adheze za bodem saturace roste, jedná se o pozitivní trakční křivku, v opačném případě jde o negativní trakční křivku.

V případě kolejové dopravy bod saturace nastává přibližně při skluzu 1-2 %. Pokud kontaktní povrchy nejsou nijak ošetřeny ani kontaminovány, má trakční křivka zpravidla zápornou směrnici, jak je zobrazeno na Obr. 2-4. Klesající adheze má za následek vznik stick-slip oscilací, které jsou odpovědné za generování kvilivého hluku a rozvoj vlnkovitosti [6]. Charakter trakční křivky lze ovlivnit přidáním vhodných látek do kontaktu. Obecně se jedná o TOR produkty a podrobněji budou rozebrány v následující kapitole.



Obr. 2-3 Teoretická trakční křivka dle Cartera [4]



Obr. 2-4 Pozitivní a negativní trakční křivka [7]

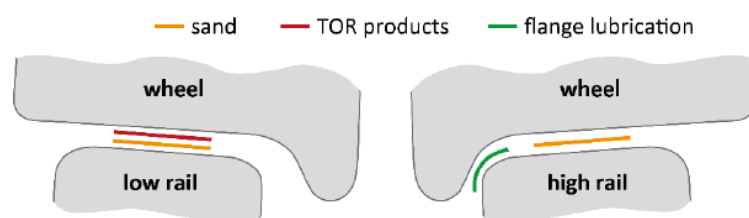
2.1.2 Řízení tření (Friction management)

Jedná se o celosvětově rozšířený soubor několika přístupů na ovlivnění adheze v kontaktu kola a kolejnice. Používají se hlavně pro zvýšení bezpečnosti, udržení adheze na optimální hodnotě, snížení spotřeby paliva a redukce hluku. Všechny uvedené parametry ovlivňují rentabilitu celého provozu. Na základě použití a výsledného součinitele tření lze produkty rozdělit do tří skupin [8, 9].

- **Lubrikanty** – jedná se o látky, které se aplikují typicky do kontaktu okolku s pojižděnou hranou a snižuje tření pod hodnotu 0,1. Snížením dojde k redukci opotřebení a hlukové emise. Obvykle dochází k nanesení na okolek nebo pojižděnou hranu před vznikem samotného kontaktu na vnější kolejnici, jak je vidět na Obr. 2-5.
- **TOR produkty** – slouží ke snížení tření na střední úroveň, která je dostatečná pro zajištění trakce a brždění, zároveň snižuje opotřebení a kontaktní únavu. Hodnoty spadají do intervalu 0,2 až 0,4. Vedle udržení tření na optimální hodnotě mají tyto

látky pozitivní trakční křivku, jež zamezuje stick-slip efektu. Většinou se aplikují na temeno hlavy vnitřní kolejnice, viz. Obr. 2-5.

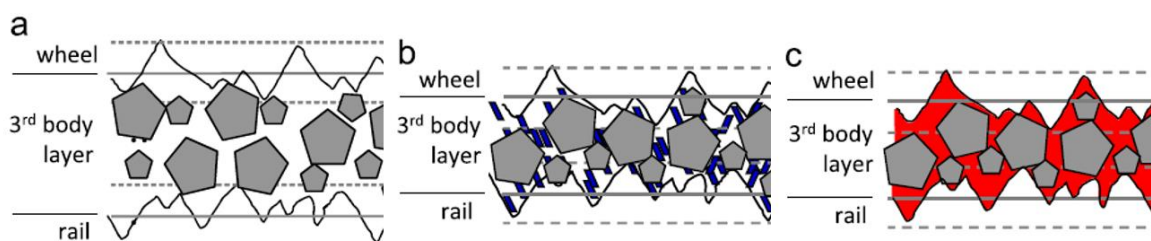
- **Zvyšovače trakce** – jak již z názvu plyne, jde o látky, jejímž úkolem je zvýšit tření v kontaktu při nedostatečné adhezi – deštivé počasí, vrstva listí atd. Typickým představitelem je písek, ale v současné době se vyvíjí nové látky založené např. na hliníkových částicích a objevují se také trakční gely. Z Obr. 2-5 je zřejmé, že dochází k aplikaci na obě kolejnice.



Obr. 2-5 Řízení tření v kolejové dopravě [4]

TOR produkty

TOR produkty lze dále dělit podle jejich chování při schnutí. První skupina se nazývá modifikátory tření (MT) („schnoucí“) a druhá TOR maziva („neschnoucí“) [7]. MT jsou látky, které obsahují vodu jako transportní médium, která se pod působením tlaku kol odpaří. Pokud ještě nedošlo k vyschnutí, částice MT jsou stále přenášeny mezi kolem a kolejnicí, čímž dojde k ošetření větší vzdálenosti. Po vyschnutí se vytvoří tzv. třecí vrstva, jež částečně pohlcuje stříhový posun. Matsumoto [10] udává, že tento mechanismus je odpovědný za optimalizaci adheze mezi kolem a kolejnicí. TOR maziva obsahují oleje nebo mohou být na hybridní bázi, což znamená kombinace vody a oleje. Za redukci tření u těchto látek je odpovědné mezní nebo smířené mazání [7]. Jelikož TOR maziva obsahují tekutou fázi stále, tak již malá změna množství dokáže významně ovlivnit výsledné tření, ať již zvětšit či zmenšit. Pokud bude maziva nadbytek, dojde k úplnému oddělení povrchů a přechodu do plného režimu mazání s výrazně nižším třením. Obr. 2-6 ukazuje kontakt s přítomností dalších těles (např. písek), MT bez vodní složky a TOR maziva.



Obr. 2-6 Kontakt kola a kolejnice s vrstvou třetích těles (písek, oxidy) a) bez TOR produktu, b) modifikátorem tření, c) s TOR mazivem (upraveno) [7]

2.1.3 Parametry ovlivňující adhezi

Chen a spol. [11] ukázal, že adhezi kromě běžných parametrů, jako jsou kontaminanty, ovlivňuje také rychlost vozidla ve spojitosti s drsností povrchů. Své teoretické poznatky potvrdil experimentem na twin disku. V obou případech uvažoval kontakt za mokrých podmínek. Jedním z hlavních zjištění bylo, že při vyšší drsnosti povrchu a rychlosti koeficient adheze roste se snižujícím se zatížením. Pokud se jedná o hladší povrch, adheze vykazuje klesající charakteristiku. Pravděpodobně existuje prahová hodnota drsnosti povrchu měnící se s rychlostí, podle které se určí, zda adheze při rostoucím zatížením bude mít pozitivní nebo negativní charakter.

2.2 Klíčové studie

Rolling–sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel–rail contacts (Arias-Cuevas, 2009) [12]

Cíl práce: Prozkoumat výkonnost dvou modifikátorů tření (MT) na vodní bázi za suchých a mokrých podmínek.

Testované hypotézy: Jak aplikace MT ovlivňuje adhezi, plastickou oblast, tvrdost a opotřebení.

Získané poznatky: Při aplikaci FMA za suchých podmínek došlo ke snížení adheze z 0,3–0,6 na 0,15–0,35. Tato hodnota vede na zmenšení opotřebení a kontaktní únavy při zachování odpovídajícího brzdného a trakčního výkonu. V porovnání se základním materiálem je také plasticky ovlivněná oblast menší včetně drsnosti povrchu disků po ukončení testů – celkem 12000 cyklů. Dále se vyhodnocovala tvrdost disků, která se zvýšila oproti stavu před testy, ovšem zvýšení bylo nejmenší v porovnání se základním materiálem a FMB. Naposledy se stanovoval hmotnostní úbytek, jež vyšel také nejlépe. Po přidání vody, čímž se simuloval déšť, došlo k dalšímu poklesu adheze přibližně o 30 % až 60 % v závislosti na skluzu. Hlavním sledovaným parametrem za mokrých podmínek byl čas obnovy adheze na hodnotu před aplikací vody. FMA má nejrychlejší čas obnovy, a přitom nezáleží na skluzu. Tento jev může být připisován k životnosti MT.

Použití FMB vede na hodnoty adheze v rozpětí 0,25 až 0,55. Jelikož se jedná o materiál obsahující poměrně velké částice písku, jsou povrchy kontaktních disků posety prasklinami a důlky, což má za následek větší drsnost a hmotnostní úbytek v porovnání s FMA, ale menší než základní materiál. Po aplikaci vody dochází také ke snížení adheze, ovšem stále je větší než u FMA. Za těchto podmínek dochází k velkému snížení životnosti, neboť rozdrčený písek odchází z kontaktní oblasti kvůli slabým vazbám s nosným gelem.

Tab. 2-1 Vlastnosti použitých disků

disk	ocel	tvrdost	drsnost
kolo	B5T	267 HV _{20kg}	1 μm
kolejnice	R260Mn	281 HV _{20kg}	1 μm

Testy byly prováděny na dvoudiskovém zařízení nazvaném SUROS s liniovým kontaktem. Zařízení využívá disky o šířce 10 mm, které jsou vyřezány z kola a kolejnice. Přesnější informace o discích jsou uvedeny v Tab. 2-1. Před každým experimentem jsou disky čištěny v ethanolu pomocí ultrazvukové čističky. Záběh trval 4 000 cyklů za suchých podmínek při skluzu 0,5 % a byl proveden pro každou novou dvojici disků. Po záběhu se na disk natřely MT v hmotnostech 0,4–0,5 g pro FMA a 0,7–0,8 pro FMB. Následoval samotný test – 2 000 cyklů pro suché podmínky 1 000 pro mokré. Mokřých podmínek se docílilo aplikací 0,04 g vody pomocí pipety v rámci jedné kapky na disk reprezentující kolejnici. Kontaminace vodou proběhla až po 20–50 cyklech, kde se ustálil skluz. Podmínky testů jsou uvedeny v Tab. 2-2.

Tab. 2-2 Provozní parametry

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	počet cyklů	aplikace MT
adheze	twin disk	1 200 MPa	1 m/s	0,5; 1; 2; 3 %	2000 a 1000	po záběhu, před pokusem

Význam a užitečnost: Autor ukázal, že MT konkrétně FMA snižuje opotřebení a zároveň udržuje dostatečnou adhezi. Při kontaminaci vodou dochází k snížení adheze pod požadovanou úroveň.

Recent developments in coefficient of friction measurements at the rail/wheel interface (Harrison, 2002) [13]

Cíl práce: Prozkoumat parametry, které způsobují rozkol mezi měřením adheze v laboratoři a reálných podmínkách použitím různých měřících zařízení.

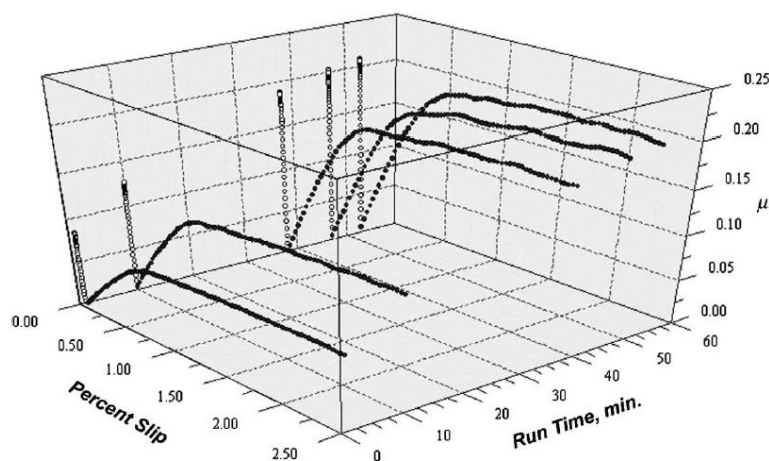
Testované hypotézy: Jak vybrané parametry ovlivňují změřenou adhezi.

Získané poznatky: Autoři článku provedli měření adheze v laboratorním a venkovním prostření pro několik produktů určených k úpravě tření v kontaktu kola a kolejnice. V obou případech použili dvě zařízení. První testy se provedli na reometru, který je navržen tak, aby měřil tření jako funkci posunutí v třecí vrstvě. Využívá se zde konfigurace dvou pinů na disk, jež jsou zatěžovány zavěšeným závažím. Disk je spojen s otočným stolem skrze snímače zatížení, který měří celkovou střížnou sílu mezi piny a diskem při pomalém otáčení stolu. Druhým zařízením pro testování v laboratorním prostředí byl stroj Amsler. Zde jsou

využita dvě válcová kola otáčející se vůči sobě se stejným převodovým poměrem. Při osazení odpovídajícími průměry kol dochází k fixnímu procentuálnímu skluzu, na základě čehož je možné sestavit závislosti součinitele tření, popř. adheze na procentuálním skluzu. Nevýhodou tohoto testeru je, že normálová síla není přímo měřena. Dále, válcová kola jsou uložena letmo na hřídeli a jejich elastická deformace může způsobit změnu typu kontaktu, čímž se také změní kontaktní tlaky.

Pro měření ve venkovním prostředí byl použit ruční tribometr, který umožňoval zaznamenávat normálovou a třecí sílu, ale nikoli skluz. Pracoval na principu zvyšování brzdného momentu měřicího kola, dokud nedošlo k prokluzu. Adheze se následně vypočetla z maximálního momentu. TriboRailer, druhé zařízení, využívá k pohonu doprovodné vozidlo a dokáže pracovat až při 100 km/h. Na od ručního tribometru se zde vyhodnocuje laterální skluz s maximem 2,5 %. Obsahuje speciálně vyvinutou snímací jednotku o vysoké přesnosti.

Při porovnání výsledku z ručního tribometru a TriboRaileru lze dojít k závěru, že tribometr mírně nadhodnocuje součinitel adheze, což pramení ze zaznamenání hodnoty při vyšším skluzu, než je bod saturace. Zařízení neumožňuje měřit skluz. Dále byla pozorována nepřímá závislost mezi hodnotou adheze a kontaktním tlakem, tedy se zvyšujícím se tlakem klesá adheze. Také zde byla provedena měření, kde se sledoval vliv doby od aplikace na součiniteli adheze. Z Obr. 2-7 lze vyčíst rostoucí závislost adheze na čase od aplikace látky na upravu tření. Výsledky z reometeru slouží jako rychlé zhodnocení základních vlastností těchto produktů. Jednou z nevýhod je, že závislost tření na posunutí nelze dobře překloupat na závislost tření a skluzu, což znesnadňuje jejich porovnání. Nicméně laboratorní a venkovní testy ukazují podobné výsledky ovšem v jiné výkonostní části.



Obr. 2-7 Vliv doby od aplikace na trakční křivku [13]

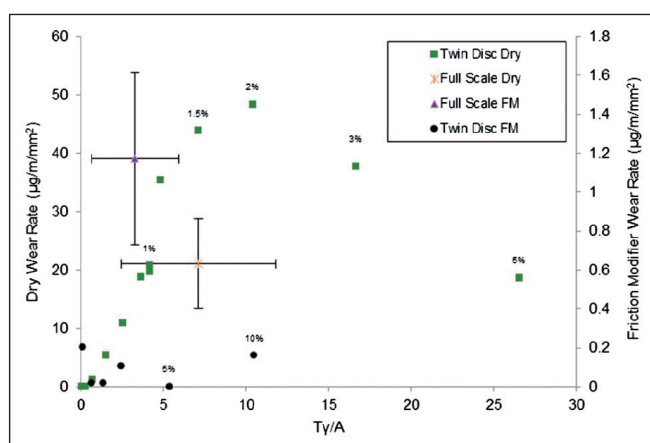
Význam a užitečnost: Článek představil čtyři metody pro hodnocení součinitele adheze jak v laboratoři, tak venku. Dále ukázal ovlivňující parametry, konkrétně: „stáří“ – čas od aplikace, oblast trakční křivky a Hertzovo kontaktní napětí. Obecně lze říci, že hodnota adheze bez těchto parametru není moc vypovídající.

A comparison of friction modifier performance using two laboratory test scales (Buckley-Johnstone, 2018) [14]

Cíl práce: Zhodnotit vliv měřítka testovacích zařízení při zkoumání výkonnosti modifikátoru tření.

Testované hypotézy: Jak ovlivňuje měřítka testovacího zařízení (twin disk a full scale) výsledky při hodnocení výkonnosti vodního modifikátoru tření?

Získané poznatky: Autor provedl dvojici testů na dvou různých zařízeních. V prvním případě testoval opotřebení, kde porovnal předchozí data pro suchý, mokrý a mazivem kontaminovaný kontakt s MT (modifikátor tření). Míra opotřebení byla nejmenší v případě MT. Z Obr. 2-8 je patrné, že full scale test s MT vykazuje větší opotřebení oproti twin disku. Autor to vysvětluje tím, že v reálném kontaktu ne všechno mazivo se dostane do kontaktu, ale část je vytlačena mimo.



Obr. 2-8 Porovnání opotřebení full scale a twin disku

Dále se testovala výdrž MT. V případě twin disku byla počáteční adheze 0,1 a po 17 500 cyklech se zvýšila na 0,3. Adheze odpovídající suchého kontaktu byl dosaženo po 23 000 cyklech. U full scale zařízení došlo k překonání hodnoty 0,3 po přibližně 220 cyklech. Test neběžel dostatečně dlouho, aby adheze překonala hodnotu odpovídající suchému kontaktu.

Využité procesní parametry jsou uvedeny v Tab. 2-3. MT se v první sérii testů aplikoval pomocí spreje, ve druhé pomocí štětce.

Tab. 2-3 Provozní parametry

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	počet cyklů	aplikace MT
opotřebení	full scale	23 t	–	± 0,5 %	10 000	každých 250 cyklů
opotřebení	twin disk	900 MPa	1 m/s	0–5 %	25 000	každých 250 cyklů
výdrž	full scale	1 500 MPa	40 mm/s	2 %	800	–
výdrž	twin disk	1 500 MPa	1 m/s	2 %	23 000	0,1 g

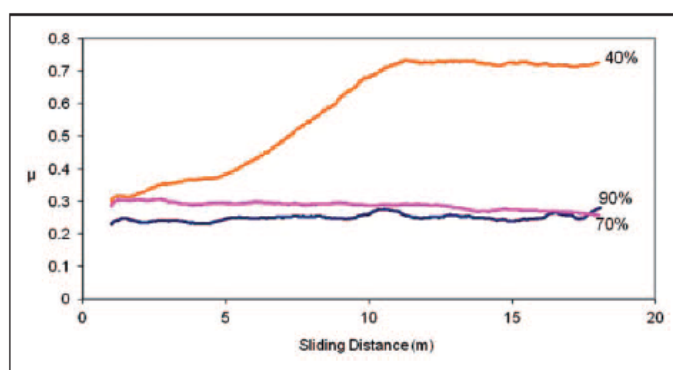
Význam a užitečnost: Článek demonstruje rozdíly v získaných datech pro dvě různá měřítka.

Effect of humidity, temperature and railhead contamination on the performance of friction modifiers - Pin-on-disk study (Lewis S.R., 2012) [15]

Cíl práce: Otestovat výkonnost MT v kombinaci s oxidy pro různé okolní podmínky.

Testovaná hypotéza: Jak relativní vlhkost, teplota, koncentrace oxidů a jejich typ ovlivňují adhezi při čistém skluzu?

Získané poznatky: Studie využívá dvě metody – pin-on-disk a GDOES analýzu (spektroskopie). Veškerá pozornost se věnuje první uvedené. Celkově se provedly tři série testů, které měly za úkol otestovat co nejvíce možných kombinací parametrů ovlivňující adhezi. Ukázalo se, že při nízké relativní vlhkosti dochází v průběhu testu ke zvyšování adheze, což autor přisuzuje vysoušení MT, a tedy omezení znovu zaplavování kontaktu. Toto chování je stejné pro oba testované oxidy, ovšem černý oxid vykazuje strmější nárůst mezi 5 a 10 m skluzové vzdálenosti – Obr. 2-9. Další série testů zkoumala vliv teploty při dvou koncentracích oxidů. Nižší procento oxidů a nízká teplota má pozitivní závislost adheze na skluzové vzdálenosti. V jiných případech nelze vypořádat žádná trend. Tento jev se dá vysvětlit tím, že absolutní vlhkost je funkcí teploty a relativní vlhkosti. Jinak řečeno, vzduch o jisté relativní vlhkosti a teplotě 20 °C obsahuje více vody, než při 10 °C. Autor dále stanovil tranzitní body pro relativní vlhkost a koncentraci. Při 10 °C se tyto body nachází v rozmezí 40–45 % relativní vlhkosti a kolem 37% koncentrace oxidů. Body se s různou teplotou budou lišit.



Obr. 2-9 Vývoj adheze při změně relativní vlhkosti [15]

Autor ve článku neuvádí, kolik MT použil při experimentech, pouze říká, že testy byly opakovány, jelikož metoda neumožňuje přesné dávkování. Zvolená rychlost je poměrně nízká proto, aby nedošlo k ovlivnění měření odstředivými účinky. Před každým testem se

připravila nová směs, čímž se předešlo jejímu vyschnutí. Aplikace probíhala přímo na pin. V Tab. 2-4 jsou shrnuty provozní parametry.

Tab. 2-4 Provozní parametry

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	délka testu	aplikace MT
adheze	Pin-on-disk	900 MPa	0,01 m/s	100 %	30 min	před testem

Význam a užitečnost: Autor ukazuje, jak testovat MT na zařízení pin-on-disk. Zařízení není zcela vhodné pro testování produktů na kolejnice, jelikož zde dochází ke 100% skluzu, a ten za provozu nastává ojediněle. Z uvedených grafů lze vypožorovat, že pokud dochází k vysoušení, mění se i součinitel adheze.

The role of constituents contained in water-based friction modifiers fortrop-of-rail application (Galas, 2017) [16]

Cíl práce: Popsat efekt jednotlivých složek vodních MT na adhezi a opotřebení.

Testovaná hypotéza: Jak jednotlivé složky ovlivňují adhezi, pokud jsou nanášeny samostatně nebo v komplexních směsích. Jaký vliv má přítomnost vody v substanci (mokré vs suché podmínky)? Jaká je životnost látek v kontaktu?

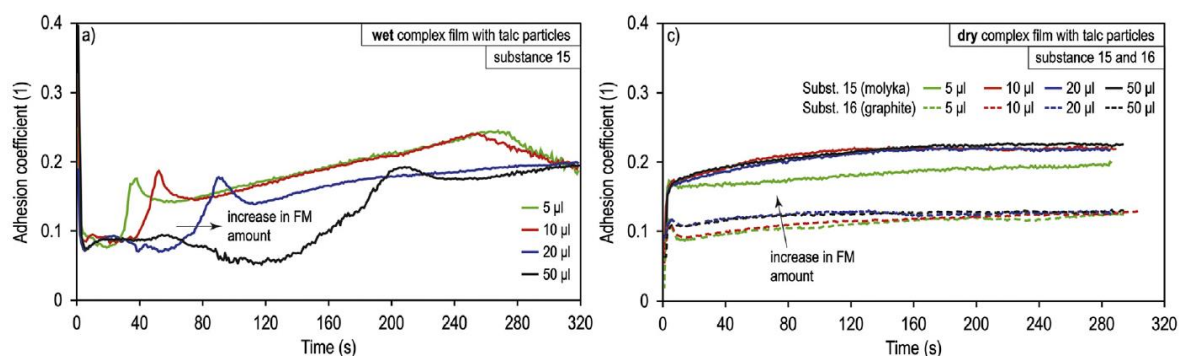
Získané poznatky: Článek popisuje vývoj adheze v čase pro různé látky s použitím ball-on-disk zařízení, konkrétně mini traction machine (MTM). Testy jsou prováděny s různými koncentracemi zkoumaných látek (zpravidla 5 až 15 hm%) a také se zkoumá vliv aplikovaného množství (5, 10, 20, 50 µl a 1 ml). Jeden mililitr simuluje předávkování kontaktu. Směs vody a bentonitu poskytuje střední hodnotu adheze, přičemž výdrž je ovlivněna aplikovaným množstvím. Přidáním dalších složek dochází k významnému ovlivnění adheze. V některých kombinacích dokonce pod hodnotu 0,1. Nejkomplexnější směs, jež obsahovala pevné mazivo, se testovala i po vyschnutí a vykazovala zcela odlišné trendy, viz. Obr. 2-10. Za mokrých podmínek byla adheze dlouho pod hodnotou 0,2. Oproti tomu, za suchých podmínek došlo k jejímu překročení relativně brzy, směs navíc vykazovala stabilní a vhodnou adhezi.

Tab. 2-5 Provozní parametry

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	délka testu	aplikace MT
adheze	ball-on-disk	750 MPa	0,3 m/s	5 % SRR	240 s, 320 s	před testem
opotřebení	ball-on-disk	750 MPa	0,3 m/s	5 % SRR	60 min	adheze > 0,4

Provozní parametry provedených testů jsou uvedeny v Tab. 2-5. Jelikož pro adhezní testy se použila ložisková ocel AISI 52 100 a na opotřebení ocel C45, parametry těles jsou zobrazeny

v Tab. 2-6. Před každým experimentem se tělesa očistila v ultrazvukové čističce s acetonem a následně proběhl záběh, dokud nedošlo k ustálení součinitele adheze. Drsnost kuličky po záběhu byla 0,1 μm a disku 0,25 μm . Samotný test započal po dokončení záběhové fáze a nanesení MT. V případě suchých podmínek se čekalo přibližně 5 min na vyschnutí za blíže nespecifikovaných podmínek. V případě testů na opotřebení neprobíhala žádná záběhová fáze, neboť zde by došlo k značnému opotřebení v porovnání s opotřebením po aplikaci substancí.



Obr. 2-10 Adhezni křivka pro mokré (vlevo) a suché (vpravo) podmínky [16]

Tab. 2-6 Parametry kontaktních dvojic

druh testu	ocel disk	ocel kulička	tvrdost disk	tvrdost kulička	drsnost disk	drsnost kulička
adheze	AISI 52 100	AISI 52 100	720–780 HV	800–920 HV	Ra 0,02	Ra 0,01
opotrebení	C45	AISI 52 100	245 HB	800–920 HV	–	Ra 0,01

Význam a užitečnost: V článku je ukázáno, že je velký rozdíl v chování vodních MT za mokrých a za suchých podmínek. Také jsou dobře popsány okolní podmínky experimentu včetně průběhu.

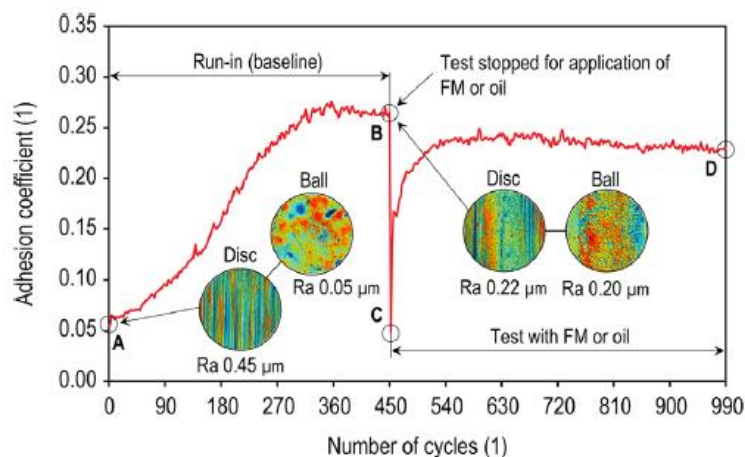
Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface (Galas, 2016) [17]

Cíl práce: Objasnit vliv olejových top-of-rail (TOR) maziv na adhezi a opotřebení za různých podmínek.

Testovaná hypotéza: Jak aplikované množství a skluz ovlivňují koeficient adheze a výdrž maziva v kontaktu?

Získané poznatky: Autor v článku porovnával dvě komerčně dostupná TOR maziva. První obsahuje větší počet kovových částic. Ukazuje se, že obsah těchto částic má velký vliv na adhezi a následné opotřebení. Obě TOR maziva jsou schopné udržet adhezi nad jistou minimální hodnotou, pouze při aplikaci dojde k poklesu adheze a doba obnovy je závislá na

skluzu. Byly provedeny testy, kde se měnila rychlost v intervalu 1–2500 mm/s, za plně zaplavených podmínek. Vzniklé křivky mají tvar Stribekovi křivky a již při velmi nízkých rychlostech dochází k EHD mazání. Dále se hodnotila výdrž maziva – počet cyklů, než dojde k překročení adheze suchého kontaktu 0,4. Ukázalo se, že hlavní parametr je aplikované množství (1–4 μl), v některých případech ani po 540 cyklech nedošlo k překročení této hodnoty. Při vyšších množstvích byla také dlouho detekována doba, kde adheze byla pod kritickou hodnotou.



Obr. 2-11 Průběh pokusu [17]

Pokusy proběhly na konfiguraci ball-on-disk, konkrétně zařízení MTM, za pokojové teploty 23 °C a relativní vlhkosti 35–40 %. Materiál disku byl C45 o tvrdosti 245 HB a drsnosti povrchu Ra 0,45 μm . Kulička je z AISI 1010, o tvrdosti 650 HB a kvalitě povrchu 0,05 μm . Po každém testu probíhalo čištění vzorků v ultrazvukové čističce. Pro odstranění vzniklých oxidů na povrchu byla před testy zařazena záběhová fáze, která byla ukončena po stabilizaci adheze na hodnotě odpovídající suchému tření. Podmínky záběhu byly voleny v závislosti na dalším testu. TOR maziva se aplikovala do dráhy kontaktu pomocí mikropipety a následně se provedlo několik cyklů s čistým valením za účelem roznesení maziva. Obr. 2-11 ukazuje průběh testu a vývoj drsnosti. Fáze roznesení maziva zde není zahrnuta. Provozní parametry zobrazuje Tab. 2-7.

Tab. 2-7 Provozní parametry

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	počet cyklů	aplikace MT
adheze	ball-on-disk	750 MPa	0,3 m/s	1, 3, 5, 10 %	540	před testem, 1 μl
stribek	ball-on-disk	750 MPa	1–2500 mm/s	10 %	–	před testem, zaplaveno
výdrž	ball-on-disk	750 MPa	0,3 m/s	10 %	540	před testem, 1–4 μl

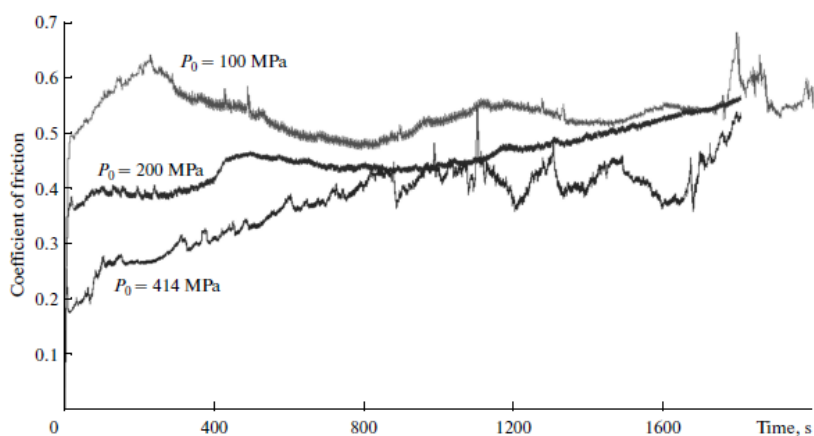
Význam a užitečnost: Ukázalo se, že v případě TOR maziv je hlavním parametrem pro výdrž aplikované množství. V případě předávkování nastává kriticky nízká adheze.

Tribological studies for developing friction modifiers in the wheel-rail system (Zakharov, S. M., 2015) [18]

Cíl práce: Vyvinout MT a následně hodnotit jeho tribologické vlastnosti s použitím několika metod.

Testovaná hypotéza: Jak se mění tření v závislosti na kontaktním tlaku?

Získané poznatky: Ve studii byly použity dvě zařízení na hodnocení tření/adheze. První má konfiguraci cylinder on plate a pracuje za čistého skluzu. Před experimentem se nastavilo konstantní zatížení a rychlost. Po spuštění se vykonával reciproční pohyb a celková skluzová vzdálenost závisela na parametrech MT. Experiment byl zastaven po překročení tření 0,35 nebo po čase 20–60 min. Disk je z ocele na kolejnici o tvrdosti 34–38 HRC a drsnosti Ra 0,01 μm . Válec má průměr 6 mm a délku 5 mm, tvrdost 36–38 HRC a drsnost Ra 0,2 μm . Pomocí tohoto testu bylo ukázané, že se průběh tření v čase mění při různých kontaktních tlacích, viz. Obr. 2-12.



Obr. 2-12 Vliv kontaktního tlaku na tření [18]

Druhé zařízení bylo použito pro hodnocení adheze při různých skluzech a také pro hodnocení výdrže. Oba kontaktní válce měly průměr 40 mm a byly vyřezány z kola/kolejnice. Vzorky reprezentující kolejnici a kolo měly šířku 10 mm a 6 mm. Počáteční koeficient adheze udával základní charakteristiku MT a byl použit ke konstrukci trakční křivky. Výdrž se zde hodnotila na základě poměru počtu otáček, než došlo k překročení prahové hodnoty, a počáteční tloušťky vrstvy, která variovala v rozmezí 5–10 μm .

Tab. 2-8 Provozní parametry

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	délka testu	aplikace MT
adheze	cylinder-plate	100, 200, 414 MPa	5 mm/s	100 %	20–60 min	–
adheze	twin disk	1200 MPa	1 m/s	1; 3,25; 10 %	–	–

Význam a užitečnost: Byl zde ukázán vliv kontaktního tlaku na tření při čistém skluzu. Autor popsál nový přístup na hodnocení výdrže MT.

The influence of initial surface topography on tribological performance of the wheel/rail interface during rolling/sliding conditions (Lundmark, 2009) [19]

Cíl práce: Objasnít vliv drsnosti povrchu na záběh, opotřebení, tření a výsledné poškození povrchu pro různé materiály.

Testovaná hypotéza: Jak materiál vzorků a jeho drsnost ovlivňuje opotřebení, výslednou drsnost a poškození povrchu.

Získané poznatky: Autor prováděl testy s dvěma materiály kola a kolejnice opracované na dva stupně drsnosti – drsné a hladké, viz Tab. 2-9. Nejvýznamnější vliv na opotřebení měl materiál kola a na tření drsnost kola. V případě testů na opotřebení se už čtyř kombinací vzorků provedlo opětovné měření z důvodu opakovatelnosti. Z výsledků vyplývá, že ocel UIC 1100 je citlivější na změny v provozních podmínkách. Všechny záznamy tření kromě jedné kombinace materiálů vykazují peak v oblasti do 2 000 s – jedná se o záběhovou oblast. Peak je typický pro nemazané kovy s vyšší počáteční drsností, která se následně obrousí a dojde k poklesu tření. Hodnoty tření se vyhodnocovaly v ustáleném stavu, tedy po 3 000 s. Testy s drsným kolem a hladkou kolejnicí vykazovaly nižší tření u všech kombinací materiálů.

Tab. 2-9 Materiály a drsnosti použitých vzorků

stupeň drsnosti	materiál kola		materiál kolejnice	
	blue light steel	bainitic steel	UIC 1100 steel	boron rail steel
drsný	Sa = 14 μm	Sa = 14 μm	Sa = 2.0 μm	Sa = 2.0 μm
hladký	Sa = 2 μm	Sa = 2 μm	Sa = 0.5 μm	Sa = 0.5 μm
tvrdost HV₃₀	380	325	324	525

Testy byly prováděny na dvou diskovém zařízení, které umožňuje oddělené řízení rychlostí disků. Ve článku nebyl přesně specifikován průměr použitých disků, uvádí se pouze

maximální možný rozměr disku. Vzorek reprezentující kolejnici byl broušen v axiálním směru, jak je tomu reálném provozu, a vzorek kola byl soustružen. Při testu se zvolila konfigurace hnacího disku reprezentující kolo a hnaného disku reprezentující kolej. Obě kontaktní tělesa byla před čištěna v ultrazvukové čističce a vážena před a po testu. Aby se předešlo kontaminaci, umístil se nad kontakt vysavač. Provozní parametry jsou uvedeny v Tab. 2-10.

Tab. 2-10 Provozní parametry

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	délka testu	aplikace MT
adheze, opotřebení	twin disk	810–880 MPa	200 r/min (≈450 mm/s)	1 %	5 h / 60 000 otáček	žádný

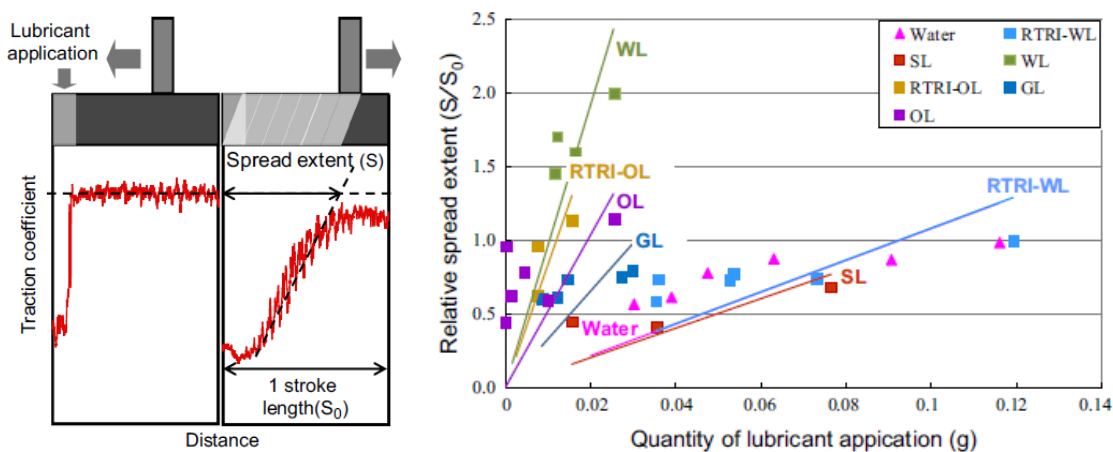
Význam a užitečnost: Článek ukazuje vliv drsnosti povrchu na změřené tření za suchých podmínek. V nejkritičtějších případech je rozdíl adheze mezi drsným a hladkým kolem 0,08.

Assessment of lubricant applied to wheel/rail interface in curves (Chen, 2014) [20]

Cíl práce: Objasnit základní charakteristiky (vliv na adhezi, roznesení po povrchu, laterální síly a brždění) vybraných produktů v laboratoři a na testovací trati.

Testovaná hypotéza: Jak ovlivňuje množství aplikované látky její roznesení po povrchu? Jak se nanesením látek změní adheze v závislosti na skluzu?

Získané poznatky: Autor zkoumal osm látek, některé z nich byly určeny na okolek a jiné na TOR aplikaci. Jedná se o látky přijaté japonskými železnicemi a jsou klasifikované jako olejové (OL), plastické (GL), rozpustné ve vodě („water-soluble“) (WL) a pevné (SL). Výsledky z twin disku sloužily k sestavení trakčních křivek pro jednotlivé materiály. Překvapivým zjištěním je, že voda dosahovala nejvyšší adheze – 0,24, ze všech aplikovaných materiálů. Tuhé maziva měly rostoucí charakter, proto jsou vhodná na TOR aplikaci. Na testy na roznesení po povrchu bylo využito zařízení typu disk–válec. Výsledky ukázaly, že se relativní roznesení zvyšuje s množstvím maziva – Obr. 2-13 vpravo. Nejlepší hodnoty roznesení dosahovaly maziva typu WL, potom OL, GL, SL.



Obr. 2-13 Vyhodnocovací metoda roznesení (vlevo). vliv množství na relativní reznesení

Materiály disků pro twin disk jsou zhotoveny z ocelí, které se k běžně používají na výrobu železničních kol / kolejnic. Vzorek kola je poháněn a kolejnice je brzděna. Pro aplikaci maziv se použily dvě metody. V první se odpovídající množství látky rovnoměrně rukou nanese na vzorek kolejnice. Po dobu 60 s se s ním otáčelo rychlostí 5 km/h při zatížení 1 kN. Druhá metoda spočívá ve vstříknutí látky do kontaktu po dosažení požadované rychlosti. Parametry, při kterých se prováděly testy, jsou uvedeny v Tab. 2-11. Zařízení typu disk-válců slouží ke zkoumání roznesení maziva pomocí kol vozidla. Obr. 2-13 vlevo ukazuje metodu vyhodnocení. Jakmile se disk dostane do oblasti s mazivem, dojde k poklesu tření. Při zpáteční cestě je mazivo roznášeno, čím dochází ke zvyšování tření. Délka roznesení je definována jako S, která začíná v místě nízké adheze a končí v místě, kde dojde k obnově adheze na počáteční hodnotu, nebo jí blízkou. Hodnoty relativního roznesení byli normalizované za předpokladu, že jeden zdvih S₀ je roven jedné. Objevuje se zde také předpoklad, že koeficient adheze roste lineárně v oblasti S.

Tab. 2-11 Provozní parametry

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	délka testu	aplikace MT
adheze	twin disk	751 MPa	40 km/h	1–25 %	–	předem / po dosažení rychlosti
roznesení	disk-cylinder	650 MPa	60 mm/s	6 %	–	–

Testy v provozu se provedly na testovací trati Railway Technical Research Institute (RTRI), která se skládá z několika sekcí určených na měření: délky roznesení, laterálních sil a brzděné vzdálenosti. Výsledky z první sekce ukazují, že na vnitřní kolejnici látky dosahují rozdílných vzdáleností roznesení, oproti tomu na vnější není pozorován žádný rozdíl. Aplikovali se dvě množství maziva (2 ml a 5 ml) na hlavu vnitřní kolejnice za účelem, aby se zjistil jejich vliv na délku roznesení, která nakonec nebyla ovlivněna. Oproti tomu při aplikaci většího množství došlo ke snížení tření skoro po celé délce. Dále se provedla analýza zbylého množství maziva na kolejnici. Bylo potvrzeno, že mazivo se roznáší pomocí kola, ale množství ulpělé na kolejnici se zmenšuje se zvyšující se vzdáleností. Mazivo SL nebylo po

50 m skoro detekované. Brzdné testy se provedly za suchých a mokrých podmínek. Aplikací maziv došlo obecně ke snížení průměrného zpomalení, čímž se prodloužila i brzdná dráha. Procentuální hodnoty vůči nemazanému stavu jsou uvedeny v Tab. 2-12.

Tab. 2-12 Změny brzdného výkonu při aplikaci maziv v %

nanesené mazivo	podmínky	SL	RTRI-SL	WL	RTRI-WL
průměrné zpomalení	suché	11,7	5,5	23,8	16,2
	mokrý	18,9	17,3	21,1	6,1
průměrná brzdná vzdálenost	suché	4,7	2,1	16,8	9,0
	mokrý	18,1	18,2	20,9	7,2

Při všech testech se vozidlo pohybovalo rychlostí 40 km/h. Měření redistribuce se provádělo vyhodnocováním adheze pomocí tribometru ve vzdálenostech 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100 m od místa aplikace. Aplikovali se 2 ml maziva na vzdálenosti 2,7 m, pro RTRI-WL to bylo 30 ml. Následně se porovnával poměr adheze před a po aplikaci. Zbylé množství se analyzovalo setřením pojížděné hrany, popř. temena. gázou a následně se provedla analýza získaného oleje, popř. spektrální analýzou. V případě brzdných testů byly použity pouze vzduchové brzdy a aplikace probíhala na temeno vnitřní kolejnice. Pro docílení mokrých podmínek se nanášela voda na obě kolejnice s průtokem 4 l/min po celou dobu testu. Některé maziva se dávkovaly z vozidla po celou dobu testu, jiné po dobu ujetí 3 metrů a další pomocí postranních jednotek.

Význam a užitečnost: Článek ukázal zajímavé přístupy pro řešení redistribuce maziva, jak v laboratorním, tak reálném prostředí. Laboratorně získaná závislost většího roznesení maziva při aplikaci většího množství se na testovací trati nepotvrdila.

Measurements of friction coefficients between rails lubricated with a friction modifier and the wheels of an IORE locomotive during real working conditions (Lundberg, J., 2015) [21]

Cíl práce: Provést měření adheze pomocí lokomotivy s vagóny a pomocí ručního tribometru za účelem ověření důvěryhodnosti zjednodušeného systému (tribometr).

Testované hypotézy: Odpovídá adheze změřená pomocí ručního tribometru reálné hodnotě?

Získané poznatky: Pro účely tohoto testu byl využit plně naložený vlak ocelkové hmotnosti 8520 t a komerčně dostupný tribometr. První změřená adheze za suchých podmínek pomocí tribometru má hodnotu 0,35, která následně roste a ustálí se v rozmezí 0,6–0,7. Je-li stejný úsek měřen průjezdem vlaku, získají se přibližně poloviční hodnoty. Výrobce vodního MT udává nejmenší koeficient adheze 0,3, ale měření tribometrem udává hodnotu 0,18.

V případě lokomotivy dochází k prokluzu všech kol, což vede k výraznému zpomalení a následnému ukončení pokusu. Průměrná získaná adheze je v rozsahu 0,1–0,15. Ke zvýšení na 0,23 (poměrně stabilní) dojde, pokud se kolo obalené MT z předchozího měření odvaluje po neošetřené kolejnici, A. Při druhém najetí do oblasti s MT adheze znovu padá. Tyto rozdíly mohou být vysvětleny skrze vliv aplikovaného množství.

Teplota v době testů byla $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Měřený úsek měl 330 m s mírným stoupáním a nespécifikovanou drsností. Využila se lokomotiva, která měřila skluzovou rychlost a třecí sílu svých čtyř podvozků. Průměrná skluzová rychlost dosahovala 0,15–0,3 m/s. Za suchých podmínek vlak dokázal na zmíněném úseku zrychlit z 13 km/h na 20 km/h. MT se na kolejnici aplikoval ručně pomocí malířského válečku ve vrstvě o tloušťce 0,2–0,5 mm. První průjezd nebyl dokončen z důvodu nedostatečné adheze. Další měření proběhlo při návratu vlaku do počáteční pozice – 100 m před začátkem nanášení MT. Druhý průjezd byl posledním měřením. Ruční tribometr využívá ocelové kolo o průměru 89 mm a šířce 9,2 mm zatěžované pomocí pružiny. Kolo je připojeno skrze elektromagnetickou spojku k rámu. Skluz se ovládá pomocí ručně řízeného odporu. Získaná adheze odpovídá bodu, kdy došlo k proklouznutí kola. V průběhu experimentu šel operátor rychlostí 5 km/h. Měření ručním tribometrem bylo zařazeno před průjezd vlaku, aby nedošlo k ovlivnění výsledků, jelikož by se neměřily ty stejné vrstvy.

Význam a užitečnost: Článek ukazuje rozdíl mezi skutečným součinitelem adheze a změřeným pomocí tribometru. Některé ze zmíněných možných důvodů jsou: vliv měřítka, skluzové rychlosti a kontaktní zatížení.

3 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ

Z obecné části rešerše vyplývá, že se v poslední době začíná rozmáhat tzv. „friction management“ v oblasti kolejové dopravy. Aplikací vhodných látek do kontaktu železničního kola a kolejnice dojde k optimalizaci adheze. Podle výsledného součinitele tření lze produkty rozdělit do tří skupin: lubrikanty, TOR produkty a zvyšovače trakce [8, 9]. Disertační práce se bude zabývat pouze TOR produkty, které se dále rozlišují podle charakteru vysoušení na TOR maziva (olejová báze) a modifikátory tření (vodní báze) [7]. Obecně, aplikací TOR produktů na kolejnice dochází k významné redukci vlnkovitosti, v podstatě až k jejímu předejití, dále pak snížení opotřebení kola a kolejnice, redukce kontaktní únavy, hluku a v neposlední řadě ekonomičtější provoz železnice [2].

3.1 Testovací zařízení

Při hodnocení výkonnosti maziv se používá několik typů zařízení. První z nich je full-scale zařízení, které využívá ve většině případu reálné kolo a kolejnici. Buckley-Johnstone [14] na tomto zařízení provedl testy na opotřebení a výdrž maziva v kontaktu. Z Tab. 3-1 si lze všimnout, že při testu byla využita rychlost pouze 40 mm/s. Nízká rychlost je obecně problémem testovacích zařízení a nejenom full-scale.

Tab. 3-1 Provozní parametry full scale zařízení

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	počet cyklů	aplikace MT
opotřebení	full-scale	23 t	–	± 0,5 %	10 000	každých 250 cyklů
výdrž	full-scale	1 500 MPa	40 mm/s	2 %	800	–

Dalším využívaným zařízením je twin disk. Ten byl využit v řadě studií, jelikož provoz není tak finančně náročný a poměrně dobře reprezentuje kontakt kola s kolejnicí. Velikost disků se liší v závislosti na konkrétním zařízení, např. SUROS [12] využívá průměr 47 mm a twin disk využitý Chenem [20] průměr 300 mm. Také se zde objevuje jasný trend v použitých materiálech. Většinou se jedná o oceli používající se na výrobu kol a kolejnic, v některých případech se dokonce vyřezávají z těchto dílů [12, 14]. Pokud to není možné, snaží se vybrat ocel o podobných parametrech. Kontaktní oblast má tvar buď obdélníka (v nezátíženém stavu liniový kontakt) [12, 14, 18, 19] nebo elipsy, které se docílí vytvořením rádiusu na jednom z disků [20]. Tab. 3-2 ukazuje provozní parametry použité při experimentech. Lze si všimnout, že kontaktní tlak se pohybuje kolem hodnoty 1 000 MPa, která odpovídá lehkým soupravám, např. metro. Co se týče rychlosti, tak nejčastější hodnota odpovídá

1 m/s, což je pravděpodobně způsobené limity stroje a použitím malých průměrů disků. Chen [20] se dostal dokonce až na hodnotu 40 km/h, která se blíží reálným podmínkám. Skluz se většinou aplikuje v rozmezí 0–10 %, neboť v této oblasti se nachází bod saturace [3]. Délka samotného testu závisí na pozorovaných parametrech a charakteru experimentu. Problematika nanášení TOR produktů bude podrobněji rozebrána níže. Zařízení typu twin disk je vhodné pro zkoumání opotřebení a adheze při různých skluzech.

Tab. 3-2 Prvozní parametry používané na twin discích

autor	druh testu	kontaktní tlak	rychlost	skluz	počet cyklů	aplikace MT
Arias-Cuevas	adheze	1 200 MPa	1 m/s	0,5; 1; 2; 3 %	2000 a 1000	po záběhu, před pokusem
Buckley-Johnstone	opotřebení	900 MPa	1 m/s 400 (r/min)	0–5 %	25 000	každých 250 cyklů
Buckley-Johnstone	výdrž	1 500 MPa	1 m/s 400 (r/min)	2 %	23 000	0,1 g
Zakharov	adheze	1200 MPa	1 m/s	1; 3,25; 10 %	–	–
Lundmark	adheze, opotřebení	810–880 MPa	200 r/min (÷450 mm/s)	1 %	5 h / 60 000 otáček	žádný
Chen	adheze	751 MPa	40 km/h	1–25 %	–	předem / po dosažení rychlosti

Zařízení typu pin-on-disk bylo použito ve studiích Harrisona [13], Lewise [15]. Zakharov využil modifikovanou verzi, tedy místo pinu umístil válec. Obě tyto zařízení složí k výzkumu třecích vrstev. Jejich hlavním výstupem je závislost tření na posunutí. Harrison [13] využil konfiguraci dvou pinů a rotující desky, Lewis [15] pouze jeden. Zařízení, jež použil Zakharov [18], vykonává reciproční pohyb a zobrazuje křivku v závislosti na skluzové vzdálenosti. Tab. 3-3 ukazuje, že kontaktní tlak je nižší než u předchozího zařízení. Také je možné povšimnout si nižší rychlosti, která činí pouze jedno procento rychlosti používané u twin disku. Protože se jedná o čistý skluz, je jeho hodnota 100 %. Testery tohoto typu jsou hodně vzdálené reálnému kontaktu, neboť k čistému skluzu dochází pouze výjimečně.

Tab. 3-3 Prvozní parametry používané pin-on-disku

autor	druh testu	kontaktní tlak	rychlost	skluz	délka testu	aplikace MT
Lewis	adheze	900 MPa	10 mm/s	100 %	30 min	před testem
Zakharov	adheze	100, 200, 414 MPa	5 mm/s	100 %	20–60 min	–

Galas ve svých pracích [16, 17] využil komerční ball-on-disk zařízení – mini traction machine (MTM). Materiál kontaktních těles je ložisková ocel AISI 52 100 a pro testy opotřebení se využila ocel C45 mající podobné vlastnosti jako ocel na železnice. V obou případech jsou tělesa leštěna alespoň na Ra 0,25 μm pro disk a Ra 0,1 μm pro kuličku. Parametry testů jsou uvedeny v Tab. 3-4. Lze si všimnout, že kontaktní tlak a rychlost jsou nižší než u twin disku. Rychlost je limitována konstrukcí samotného stroje a velikostí elementů. Skluz dosahuje hodnoty nejvýše 10 %. Zařízení je vhodné na získávání trakční křivky a případně na testy opotřebení.

Tab. 3-4 Provozní parametry ball-on-disk

druh testu	medium	kontaktní tlak	rychlost	skluz	počet cyklů	aplikace MT
adheze	TOR mazivo	750 MPa	0,3 m/s	1, 3, 5, 10 %	540	před testem, 1 μl
stribekova křivka	TOR mazivo	750 MPa	1–2500 mm/s	10 %	–	před testem, zaplaveno
výdrž	TOR mazivo	750 MPa	0,3 m/s	10 %	540	před testem, 1–4 μl
adheze	MT	750 MPa	0,3 m/s	5 % SRR	240s, 320s	před testem
opotřebení	MT	750 MPa	0,3 m/s	5 % SRR	60 min	adheze > 0,4

Tato část obsahuje zařízení, které se používají na měření v reálných podmínkách. V ojedinělých případech lze využít plně naložený vlak, jako to udělal Lundberg [21], v ostatních případech se využívají vozidla s lehkým zatížením nápravy [20]. Pro běžné měření jsou určeny ruční tribometry [13, 21] nebo vozidlem tlačené tribometry [13].

3.2 Metodologie experimentu

V některých člancích se autoři zmiňují o takzvané fázi záběhu. Jedná se o proceduru, která má ustálit drsnosti na kontaktních plochách a nastolit stejné počáteční podmínky, které vedou k větší opakovatelnosti měření. Arias-Cuevas [12] před každým experimentem provedl záběh čítající 4 000 cyklů při skluzu 0,5 %. Galas také vykonával záběh, ovšem konečné kritérium nebyl počet cyklů, ale ustálení adheze na hodnotě odpovídající suchému tření. Ve své práci [16] neuvádí, za jakých podmínek byl záběh proveden, pouze říká, že jej vynechal při testech opotřebení. Oproti tomu v práci [17] probíhá záběh za stejných podmínek jako následující experiment. Všechny práce řešící adhezi využívají pro testy nové dvojice kontaktních těles, což není zcela vhodný přístup. V prvotních fázích experimentu se mění topografie povrchu a konformita vzorků. Tyto změny můžou významně ovlivňovat vývoj součinitele adheze.

Nejvíce zmiňovaný způsob nanášení maziva je pomocí štětce na vzorek kolejnice [12, 14]. Lewis [15] pouze udává, že MT nanesl přímo na pin. Galas v případě vodních MT [16] provedl aplikaci podél kontaktní oblasti a následně čekal přibližně pět minut na vyschnutí a poté započal experiment. TOR maziva Galas [17] dávkoval pomocí mikropipety do kontaktní dráhy. Následně provedl několik cyklů při čistém valení, aby získal tenký jednotný film maziva. Chen [20] pro aplikaci MT použil dvě metody. V první ručně nanesl MT na vzorek kolejnice a následně spustil otáčky. Roznášení trvalo 60 s při rychlosti 5 km/h a zatížení 1 kN. V druhém případě počkal na dosažení požadovaných otáček a MT vstříknul do kontaktní oblasti.

Nejčastější způsob čištění vzorků je pomocí ultrazvukové čističky. Lundmark [19] a Galas [17] v článku blíže nespecifikovali, jaké rozpouštědlo či čistič použili. Arias-Cuevas své vzorky čistil v etanolu [12] a Galas ve své druhé analyzované práci uvádí, že použil aceton [16]. Zařazení záběhové fáze může posloužit také jako mechanická forma čištění, zejména před vzniklými oxidy [17].

3.3 Klíčové parametry ovlivňující výsledky experimentů

Objevuje se několik článků, které popisují rozdíly ve změřených hodnotách a jejich příčiny. Jedním z důvodů je velikost kontaktního tlaku. Tomu je věnováno hned několik publikací [11, 13, 18, 22]. Harrison [13] tento jev zkoumal pomocí ručního tribometru a zjistil, že s rostoucím tlakem klesá adheze. Také zkoumal výdrž maziva v kontaktu pomocí měření adheze v různých časech a mezitím přes pozorované místo projížděly vozidla. Z výsledků Chena [11] lze vyzdvihnout vliv rychlosti a drsnosti, i když to nebylo primární zaměření článku. Lu [23] popsal dopad skluzové rychlosti na adhezi. Lundmark [19] ukázal, že počáteční drsnost kontaktních těles ovlivňuje součinitel adheze v ustáleném stavu po záběhu. Dopad rozdílné teploty a vlhkosti zkoumal Lewis [15]. Achanta ukázal, jakým způsobem působí měřítko na měřený koeficient tření [24].

3.4 Bílé místo

TOR produkty jsou testovány pomocí celé řady experimentálních zařízení v různých kontaktních konfiguracích a za různých provozních či okolních podmínek. Výsledné třecí chování TOR produktů (adheze, výdrž maziva v kontaktu a schopnost redistribuce) je však silně závislá na provozních a okolních podmínkách. To znamená, že výsledky laboratorních studií popisují chování TOR produktů pro velmi omezený rozsah podmínek, který navíc nemusí být vhodně zvoleny a výsledky tak mohou být naprosto nerelevantní s ohledem na reálný kontakt.

Pro vyřešení tohoto komplexního problému se jeví jako nezbytné sestavit metodiku pro hodnocení TOR produktů v laboratorním prostředí. Pro sestavení této metodiky bude klíčové identifikovat nejdůležitější faktory ovlivňující výkonost TOR produktů (s ohledem na reálný kontakt). Mezi tyto faktory bude s největší pravděpodobností patřit topografie kontaktních těles, způsob aplikace produktů a způsob „vytvoření“ třecí vrstvy. Právě posledně jmenovaný faktor může hrát zcela zásadní roli, protože mechanismus vytváření třecí vrstvy u konvenčních laboratorních zařízení je zcela jiný než v případě mechanismu u reálného kontaktu. Doposud však neexistuje publikace, která by se tímto zabývala.

4 PODSTATA, CÍLE A PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE

4.1 Podstata disertační práce

Podstatou disertační práce je vyvinout metodiku pro hodnocení výkonosti TOR produktů v laboratorním prostředí. V současné době neexistuje žádný dokument, který by říkal, jak testovat maziva. Provozovatelé železnic si provádí vlastní nákladné testy s reálnými soupravami. Laboratorní testy jsou poměrně běžné, ovšem data na nich získaná nekorespondují s realitou, dokonce nejdou efektivně porovnávat mezi sebou. Budou provedeny měření za reálných podmínek, za účelem zjištění ovlivňujících parametrů, které bude také nutné zohlednit při vývoji metodiky. Pod pojmem výkonnost se v této práci myslí více vlastností TOR produktů – adheze, výdrž maziva v kontaktu, redistribuce.

4.2 Cíle práce

Hlavním cílem práce je vyvinout metodiku pro hodnocení TOR produktů v laboratorním prostředí. Výsledky experimentů s využitím této metodiky umožní predikovat třecí chování TOR produktů na reálné trati

Díličí cíle:

- inovace traťového tribometru,
- identifikace faktorů ovlivňující adhezi a opakovatelnost experimentu,
- testování TOR produktů v laboratorním prostředí s cílem nalezení vhodné metodologie,
- experimentální výzkum v reálných podmínkách s využitím traťového tribometru,
- porovnání výsledků laboratorního a terénního výzkumu a formulace podobnostních kritérií,
- sjednocení získaných poznatků a jejich publikace.

4.3 Přínos práce

Vznik metodiky hodnotící TOR produkty v laboratorním prostředí usnadní porovnání výsledků mezi jednotlivými pracovišti. Získaná data zároveň budou dávat představu o chování látek v reálném prostředí, čím dojde k úspoře nemalých finančních prostředků, které

by se jinak investovali do testů na reálných tratích. Ušetřené finance mohou být poté investovány do dalšího vývoje TOR produktů. Vznik metodiky usnadní a urychlí uvádění nových produktů na trh, neboť se zmenší potřebný počet reálných testů, což vede k další úspoře.

5 VĚDECKÉ OTÁZKY A PRACOVNÍ HYPOTÉZY

Vědecká otázka 1

„Jaká je role záběhu vzorků při měření v laboratorním prostředí?“

Pracovní hypotéza 1

V prvotních fázích experimentů dochází k významné změně topografie vzorků (drsnost těles a geometrie kontaktní oblasti) na základě čehož lze konstatovat, že tato fáze není vhodná pro testování třecích vlastností kapalin a materiálů aplikovaných do kontaktu. Při testování v této oblasti může mít samotný záběh těles větší vliv na změnu součinitele adheze než aplikovaný materiál. Po překlenutí této fáze nastane ustálený stav kontaktu, kde nedochází k významným změnám topografie povrchu. Právě tato ustálená fáze je vhodná pro testování TOR produktů a pro dosažení dobré opakovatelnosti výsledků.

Vědecká otázka 2

„Jaká je závislost mezi součinitelem adheze a tloušťkou vrstvy TOR produktu na kolejnici?“

Pracovní hypotéza 2

V blízkosti bodu aplikace TOR produktu dosahuje třecí vrstva tlouštěk větších než je drsnost povrchu těles, což způsobuje významný pokles adheze. Se vzrůstající vzdáleností od bodu aplikace dochází k postupné redukci tloušťky TOR produktu, čímž dochází k nárůstu součinitele adheze na tzv. střední úroveň tření. V jisté vzdálenosti od místa aplikace dosáhne vrstva TOR produktu kriticky nízké tloušťky a součinitel adheze nabývá hodnot blízkých suchému tření. Na základě znalosti tohoto bodu lze definovat délku ošetření kolejnice.

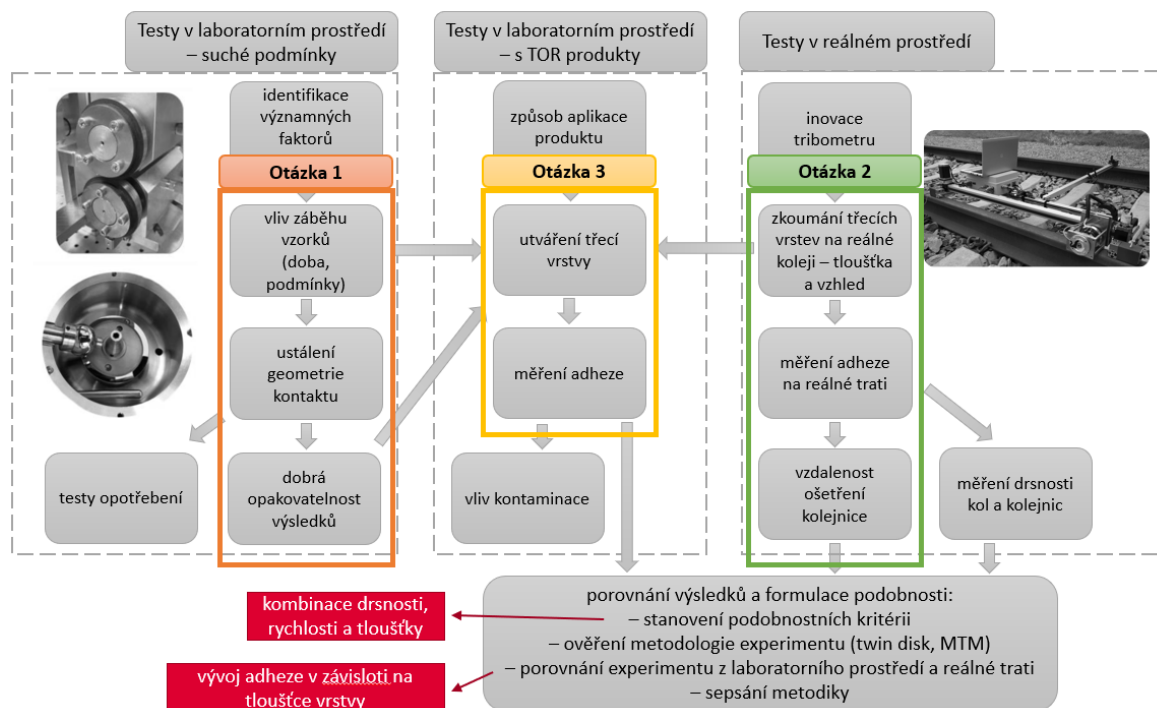
Vědecká otázka 3

„Jaká má být metodologie experimentu, aby výsledky TOR produktů byly přenositelné na reálnou trať?“

Pracovní hypotéza 3

Pro zaručení přenositelnosti laboratorních výsledků na reálnou trať hraje zásadní roli příprava třecí vrstvy před experimentem. Přípravou třecí vrstvy se rozumí poměr mezi tloušťkou třecí vrstvy a drsnosti povrchu kontaktních těles. Pokud poměr drsnosti a tloušťky

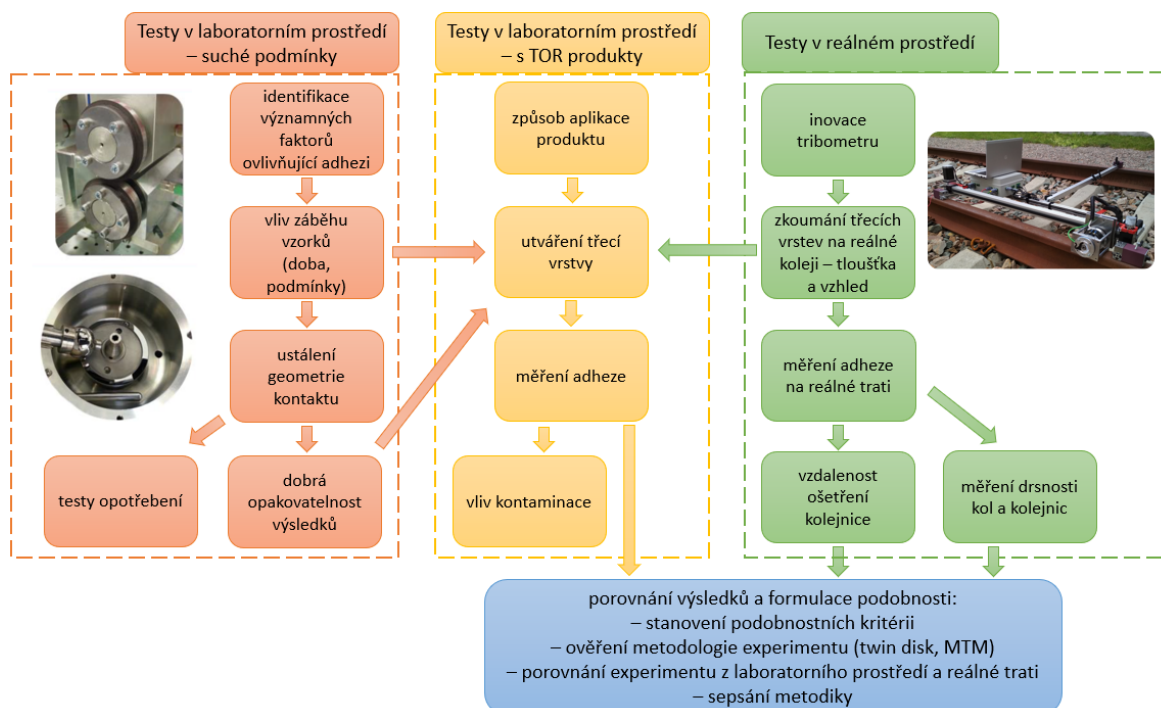
vrstvy odpovídá reálné situaci a současně je vhodně zvolená unášivá rychlost, pak lze očekávat podobný trend vývoje adheze v čase pro laboratorní i reálné podmínky.



Obr. 5-1 Zařazení vědeckých otázek a hypotéz do kontextu plánu experimentů

6 ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ VĚDECKÉ METODY ZKOUMÁNÍ

Aby bylo možné odpovědět na výše uvedené vědecké otázky, je nutné provést několik měření. Celá experimentální práce bude zprvu probíhat pouze v laboratorním prostředí kde se budou využívat zařízení twin disk a MTM – komerční tribometr typu ball-on-disk. Pro hodnocení topografie povrchu a jeho drsnosti se využije 3D optický profilometr. Po inovaci tribometru a verifikaci jeho měření se testování rozšíří i do reálného prostředí.



Obr. 6-1 Rozdělení experimentů

6.1 Plán experimentů

Nejprve dojde na základě rešerše ke stanovení, které ovlivňující parametry mají nižší dopad na adhezi (skluz, zatížení, mazivo, ...) a ty se zafixují po celou dobu práce. Experimenty se budou provádět nejprve na MTM s maximálním kontaktním tlakem 1,7 GPa. Dále se použije twin disk, který umožňuje kontaktní tlak 1 GPa, rychlost až 6 m/s a jeho předností je stabilita kontaktní oblasti.

Prvotní experimenty se provedou za suchých podmínek a budou mířit na stanovení zóny použitelnosti vzorků. Jedná se o oblast, kdy se bude minimální změna drsnosti a geometrie kontaktních těles, což ovlivňuje výslednou adhezi. Využitím suchých podmínek se dochází ke zjednodušení experimentu a odstranění potenciálních ovlivňujících parametrů. Testy budou probíhat tak, že se zaznamená vývoj součinitele tření a po předem stanovené době

dojde k zastavení testu a změření geometrie a drsnosti kontaktních těles. Následně se provede série stejných pokusů, kde se bude zaznamenávat součinitel tření. Získané data poslouží ke stanovení opakovatelnosti měření. Budou se měnit podmínky záběhu a doba chodu, dokud nedojde k dosažení dostatečné opakovatelnosti měření. Těmito experimenty se získá vliv záběhu a doba použitelnosti a stability vzorků. Za tímto účelem se primárně použije MTM a následně se získané poznatky ověří na twin disku.

Po stanovení vlivu záběhu na základě koeficientu tření se bude hodnotit míra opotřebení jednotlivých vzorků. Testy proběhnou taktéž za suchých podmínek. Bude sledován vývoj opotřebení při jednotlivých po sobě jdoucích pokusech za stejných podmínek a délce trvání. Série testů se provede s několika dvojicemi vzorků. Ze získaných hodnot opotřebení se stanoví trend a opakovatelnost. Vzniklé křivky se porovnejí s vývojem adheze, čímž se upřesní oblast použitelnosti vzorků.

Po inovaci traťového tribometru se experimenty rozšíří i do reálného prostředí. V první řadě dojde k vytipování míst na tramvajové trati Dopravního podniku města Brna (DPMB), kde se následně bude zkoumat třecí vrstva. Hodnocení se provede na základě vzhledu a změření tloušťky vrstvy. Tyto data budou využita při utváření třecí vrstvy v laboratorním prostředí, což bude podrobněji rozebráno níže. Na stejných místech se následně provede měření adheze pomocí ručního tribometru. Získané hodnoty se následně využijí při hodnocení třecí vrstvy v laboratorním prostředí.

V rámci reálného prostředí se bude hodnotit i vzdálenost ošetření kolejnice, které se provede na základě změřené adheze. Měřit se bude v pravidelných vzdálenostech od místa aplikace TOR produktu. Sběr dat na daném úseku se provede několikrát v různou dobu. Ze získaných hodnot adheze se stanoví její vývoj v závislosti na vzdálenosti od místa aplikace a také korelace mezi jednotlivými měřeními. Data poslouží hlubšímu porozumění problematice a využijí se hodnocení vývoje adheze při experimentech v laboratorním prostředí.

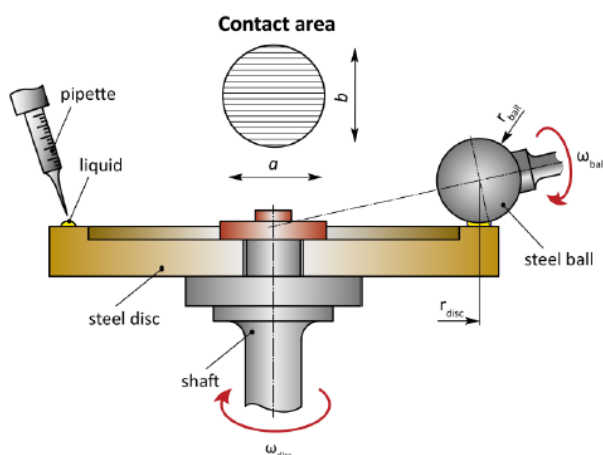
Jako poslední test v reálném prostředí se provede měření drsnosti kolejnic ve stejných místech, jako se zkoumala třecí vrstva. Nejprve dojde k odstranění vrstvy rozpouštědlem, aby nedošlo k ovlivnění výsledků. Následně proběhne samotné měření. Drsnost bude stanovena i pro běhouny tramvajových dvojkolí. Z hodnot se vykreslí histogram, který ukáže nejrozšířenější hodnotu. Drsnosti kol a kolejnice se použijí při návrhu parametrů laboratorního experimentu a také při stanovování podobnostních kritérií.

Poslední skupina testů využívá poznatků z předchozích dvou oblastí a bude se vykonávat s TOR produkty. Nejprve se na základě literatury a zkušeností stanoví použitelné metody aplikace maziva. Hlavním cílem experimentů v této oblasti je získat postup přípravy třecí vrstvy, která bude mít podobné vlastnosti jako vrstva na reálných kolejnicích. Tato vrstva by mohla vykazovat obdobné trendy, jako je tomu v provozu. Primárně se zde bude měřit adheze a stanovovat její opakovatelnost. Jednotlivé vrstvy budou porovnávány s reálnými pomocí vzhledu i tloušťky.

Po stanovení postupu utváření třecí vrstvy se změří adheze pro více maziv jak v laboratorním prostředí, tak reálném a získané výsledky se porovnají. Na základě získaných hodnot se stanoví vztah mezi nimi. Navržená metodika bude považována za funkční, pokud jedno mazivo bude vykazovat lepší vlastnosti než druhé v laboratoři i v reálném provozu.

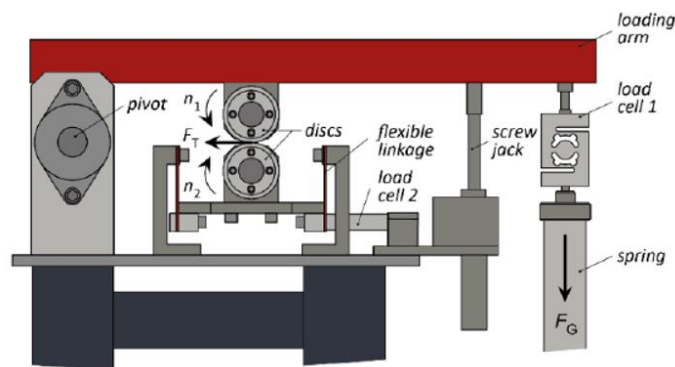
6.2 Využití experimentální zařízení

Jedno ze dvou laboratorních experimentálních zařízení, které se budou využívat, je MTM – konfigurace ball-on-disk. Kulička má průměr 19,05 mm a disk 46 mm. Je zde možnost použití několika typů materiálů na vytvoření kontaktní dvojice. V případě této práce budou vzorky z oceli C45, AISI 52 100 nebo oceli určené na výrobu kol a železnic. Disk i kulička jsou nezávisle řízeny dvojicí motorů, díky čemuž je možné plynule nastavovat skluz. MTM je vybaveno dvojicí snímačů zatížení – jeden snímá normálovou a druhý třecí sílu. Snímače pracují na frekvenci 1 Hz. Kontaktní oblast má tvar kruhu. Obr. 6-2 ukazuje schématické znázornění MTM.



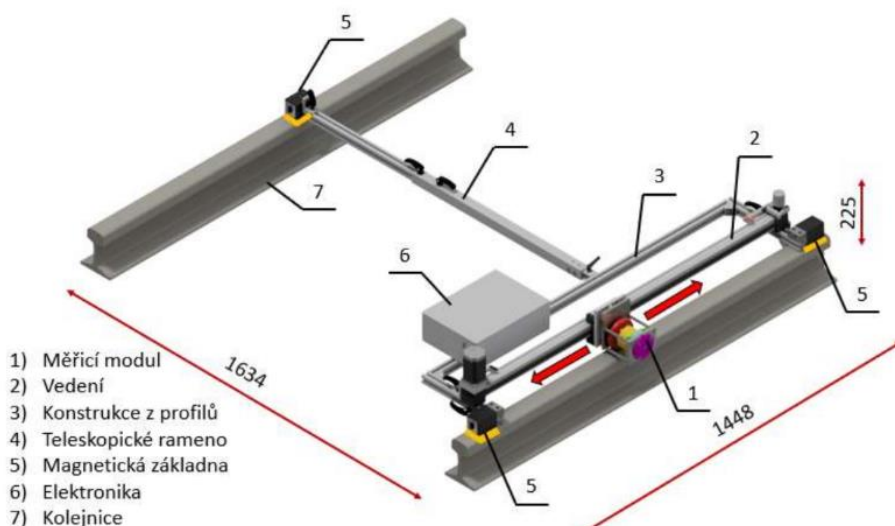
Obr. 6-2 Schéma ball-on-disk tribometru – MTM [4]

Twin disk na Obr. 6-3 je druhé laboratorní zařízení, které bude sloužit k objasnění výše uvedených vlivů. Využívá dva ocelové disky o průměru 80 mm tvořící elipsoidní kontaktní oblast o rozměrech 0,92 x 0,5 mm. Jako v případě MTM obsahuje nezávislé řízení disků. Disky jdou vůči sobě natočit až o 6 °, což simuluje průjezd traťovým obloukem. Horní disk reprezentuje kolo a dolní kolejnici. Zatížení se aplikuje pomocí šroubu s pružinou připojenou k ramenu pomocí siloměru. Další siloměr zachycuje trakční síly skrze flexibilně uložený domek spodního disku. Na základě dat ze siloměrů je vypočítáván a vykreslován součinitel adheze v reálném čase.



Obr. 6-3 Schéma twin disku [4]

Třetím využitým zařízením je ruční tribometr, který bude využit pro měření adheze v reálné prostředí. Jedná se o stacionární variantu s automatickým pojezdem měřícího vozíku. Celková délka je 1 448 mm a měřící dráha má 1 000 mm. Jeho hlavní komponenta je měřící modul, který se skládá z měřícího kola o průměru 100 mm, třecí elektromagnetické brzdy, senzoru momentu a enkodéru pro stanovení otáček. Další enkodér je umístěn na řemenici pohánějící měřící modul. Zařízení vytváří adhezní charakteristiku v celé délce dráhy. Ke vzniku této charakteristiky je potřeba vykonat několik průjezdů s různým brzdícím momentem. Celé zařízení je možné vidět na Obr. 6-4. Princip měření: Měřící kolo se odvaluje po kolejnici, brzda působí brzdící moment, jež se projevuje zvětšením tečných sil, tedy adheze. Brzdící moment je měřen momentovým senzorem a před známý průměr kola se stanoví tečné síly. Adheze se spočte podílem tečny a normálové síly. Zároveň pomocí dvojice enkodérů je možné stanovit skluz. Spojením skluzu a adheze se dostane bod na adhezní křivce.



Obr. 6-4 Traťový tribometr

7 ČASOVÝ ROZVRH A ETAPY ŘEŠENÍ

	2020				2021				2022				2023	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
řešení tématu														
inovace ručního tribometru														
identifikace faktorů ovlivňující adhezi														
první publikace														
experimenty s vodním MT														
SDZ														
úvodní testy v reálném prostředí														
druhá publikace														
experimenty s olejovým TOR mazivem														
třetí publikace														
testy v reálném prostředí														
sepsání disertace														

8 ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI A POTŘEBNOSTI ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY

Jedním z aspektů je výzva, aby se v Evropě zvýšil podíl kolejové dopravy až o 30 % do roku 2050. Pro splnění této výzvy je nutné zvýšit její konkurenceschopnost. To se může stát pomocí udržení cen nebo zvýšení množství přepravovaného nákladu. K udržení cen lze využít řízení tření v kontaktu kola a kolejnice, tzv. friction management. Pokud bude nastaven adekvátní součinitel adheze dojde ke snížení opotřebení, kontaktní únavy, což vede na prodloužení životnosti, s čímž je blízce spjatá cena provozu železnic. Predikcí chování TOR produktů dojde k zefektivnění celého řízení tření. Vznikem metodiky, která umožní získat data v laboratorním prostředí, jež budou přenositelná do provozu, se ušetří finanční prostředky, které by jinak byly použity na testování v reálných podmínkách. Metodika také umožní urychlit vývoj nových TOR produktů, jelikož nebude nutné dělat velké množství testů pro zjištění skutečných vlastností. Počet těchto experimentů se sníží pouze na verifikační průjezdy.

9 SPOLUPRÁCE S JINÝMI INSTITUCEMI

Navázaná spolupráce s výzkumnou organizací:

Southwest Jiaotong University, Chengdu, Čína

Navázaná spolupráce s průmyslovým partnerem:

TRIBOTEC, spol. s r.o., Brno, Česká republika

Potenciální spolupráce s výzkumnými organizacemi:

University of Sheffield, Sheffield, Spojené království

10 PŘEDPOKLÁDANÉ NÁKLADY SPOJENÉ S ŘEŠENÍM A JEJICH ZDROJE

Náklady na inovaci tribometru	50 000 Kč
Výroba vzorků	20 000 Kč
Spotřební materiál	5 000 Kč
Náklady spojené s účastí na konferencích	100 000 Kč
Mzda řešitele	900 000 Kč
celkem:	1 075 000 Kč

Náklady na disertační práci budou hrazeny u Česko-čínského projektu v rámci inter-excelence s identifikačním kódem LTACH19xxx.

11 CHARAKTERISTIKA PŘEDPOKLÁDANÉHO VÝSLEDKU

Vzhledem k tomu, že disertace bude mít přílohovou formu, je nutné publikovat minimálně tři recenzované články ve vědeckém časopise nebo ve více časopisech. Zaměření článků bude spadat pod téma disertační práce.

Součástí práce bude také vývoj ručního tribometru pro terénní měření. Výsledkem bude funkční vzorek tohoto zařízení.

Na základě kritické rešerše se jako vhodné články pro publikaci výsledků disertační práce jeví zejména následující odborná periodika:

- Wear (IF = 2.531),
- Tribology International (IF = 2.903),
- Tribology Letters (IF = 2,235)
- Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F-Journal of Rail and Rapid Transit (IF = 1,540)

12 BIBLIOGRAFIE

- [1] LEWIS, Roger a Ulf OLOFSSON. *Wheel-rail interface handbook*. 1st pub. Cambridge: Boca Raton: Woodhead ; CRC Press, 2009. ISBN 978-1-84569-412-8.
- [2] HARMON, M. a R. LEWIS. Review of top of rail friction modifier tribology. *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*. 2016, roč. 10, č. 3, s. 150–162. ISSN 1751-5831.
- [3] ARIAS-CUEVAS, Oscar. *Low Adhesion in the Wheel-Rail Contact*. B.m., 2010. Delft University of Technology.
- [4] GALAS, R. *Friction Modification within Wheel-Rail Contact*. B.m., 2017. Brno University of Technology.
- [5] CARTER, Frederick William. On the action of a locomotive driving wheel. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. 1926, roč. 112, č. 760, s. 151–157. ISSN 0950-1207.
- [6] EADIE, Donald T., Joe KALOUSEK a Kelvin C. CHIDDICK. The role of high positive friction (HPF) modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena. *Wear*. 2002, roč. 253, č. 1–2, s. 185–192 [vid. 13. únor 2020]. ISSN 00431648.
- [7] STOCK, R, L STANLAKE, C HARDWICK, M YU, D EADIE a R LEWIS. Material concepts for top of rail friction management - Classification, characterisation and application. *Wear*. 2016, roč. 366, s. 225–232. ISSN 0043-1648.
- [8] KALOUSEK, Joe a Eric MAGEL. Modifying and managing friction. *Railway Track and Structures*. 1997, roč. 93, č. 5, s. 31-X4. ISSN 00339016.
- [9] OLOFSSON, Ulf a Yezhe LYU. Open System Tribology in the Wheel-Rail Contact- A Literature Review. *Applied Mechanics Reviews*. 2017, roč. 69, č. 6, s. 1–10. ISSN 00036900.
- [10] MATSUMOTO, Akira, Yasuhiro SATO, Hiroyuki ONO, Yonjin WANG, Masayuki YAMAMOTO, Masuhisa TANIMOTO a Yasushi OKA. Creep force characteristics between rail and wheel on scaled model. *Wear*. 2002. ISSN 00431648.
- [11] CHEN, Hua, Akira NAMURA, Makoto ISHIDA a Tsunamitsu NAKAHARA. Influence of axle load on wheel/rail adhesion under wet conditions in consideration of running speed and surface roughness. *Wear*. 2016, roč. 366–367, s. 303–309. ISSN 00431648.
- [12] ARIAS-CUEVAS, O, Z LI, R LEWIS a E.A. GALLARDO-HERNÁNDEZ. Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel-rail contacts. *Wear*. 2010, roč. 268, č. 3–4, s. 543–551. ISSN 00431648.
- [13] HARRISON, H., T. MCCANNEY a J. COTTER. Recent developments in coefficient of friction measurements at the rail/wheel interface. *Wear*. 2002, roč. 253, č. 1–2, s. 114–123. ISSN 00431648.
- [14] BUCKLEY-JOHNSTONE, L, M HARMON, R LEWIS, C HARDWICK a R STOCK. A comparison of friction modifier performance using two laboratory test scales. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F-Journal of Rail*

- and Rapid Transit*. 2019, roč. 233, č. 2, s. 201–210. ISSN 0954-4097.
- [15] LEWIS, Stephen R, Roger LEWIS, Ulf OLOFSSON, Don T. EADIE, John COTTER a Xin LU. Effect of humidity, temperature and railhead contamination on the performance of friction modifiers: Pin-on-disk study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2012, roč. 227, č. 2, s. 115–127. ISSN 0954-4097.
- [16] GALAS, R, D KVARDA, M OMASTA, I KRUPKA a M HARTL. The role of constituents contained in water-based friction modifiers for top-of-rail application. *Tribology International*. 2017, roč. 117, s. 87–97. ISSN 0301-679X.
- [17] GALAS, R, M OMASTA, I KRUPKA a M HARTL. Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface. *Wear*. 2016, roč. 368, s. 230–238. ISSN 0043-1648.
- [18] ZAKHAROV, S. M., I. G. GORYACHEVA, A. P. KRASNOV, A. S. YUDIN, A. V. MOROZOV, D. P. MARKOV, A. V. NAUMKIN a A. V. OVECHKIN. Tribological studies for developing friction modifiers in the wheel–rail system. *Journal of Friction and Wear*. 2015, roč. 36, č. 6, s. 468–475. ISSN 19349386.
- [19] LUNDMARK, J., E. KASSFELDT, J. HARDELL a B. PRAKASH. The influence of initial surface topography on tribological performance of the wheel/rail interface during rolling/sliding conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2009, roč. 223, č. 2, s. 181–187. ISSN 09544097.
- [20] CHEN, H., S. FUKAGAI, Y. SONE, T. BAN a A. NAMURA. Assessment of lubricant applied to wheel/rail interface in curves. *Wear*. 2014. ISSN 00431648.
- [21] LUNDBERG, Jan, Matti RANTATALO, Christina WANHAINEN a Johan CASSELGREN. Measurements of friction coefficients between rails lubricated with a friction modifier and the wheels of an IORE locomotive during real working conditions. *Wear*. 2015, roč. 324–325, s. 109–117. ISSN 00431648.
- [22] AREIZA, Y. A., S. I. GARCÉS, J. F. SANTA, G. VARGAS a A. TORO. Field measurement of coefficient of friction in rails using a hand-pushed tribometer. *Tribology International*. 2015, roč. 82, č. PB, s. 274–279. ISSN 0301679X.
- [23] LU, X., J. COTTER a D. T. EADIE. Laboratory study of the tribological properties of friction modifier thin films for friction control at the wheel/rail interface. *Wear*. 2005, roč. 259, č. 7–12, s. 1262–1269. ISSN 00431648.
- [24] ACHANTA, S. a J. P. CELIS. On the scale dependence of coefficient of friction in unlubricated sliding contacts. *Wear*. 2010, roč. 269, č. 5–6, s. 435–442. ISSN 00431648.

13 VĚDECKÝ ŽIVOTOPIS

Osobní informace

Jméno: Ing. Martin Valena

E-mail: Martin.Valena.@vut.cz

Tel: +420 541 143 238

Adresa: Technická 2896/2, 616 69 Brno

Vzdělání

7/2019 – dosud **Doktorský studijní program** – Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, Technická 12, Česká republika, Konstrukční a procesní inženýrství

6/2017 – 6/2019 **Magisterský studijní program** – Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, Technická 12, Česká republika, Konstrukční inženýrství

9/2014 – 6/2017 **Bakalářský studijní program** – Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Technická 12, Česká republika – Základy strojního inženýrství

Pracovní zkušenosti

7/2019 – dosud Technický pracovník – Ústav konstruování, FSI VUT

7/2018 – 8/2018 Technický pracovník – Ústav konstruování, FSI VUT

9/2017 – dosud Pneumobil Racing Team Brno – člen

7/2017 – 8/2017 Konstruktor – ICSC, a.s. Brno, ČR

Tvůrčí aktivita a ocenění

2019 Cena průmyslového podniku 2019 – firma ENVITES, spol. s r.o.

3/2019 Funkční vzorek – GALAS, R.; VALENA, M.; OMASTA, M.; HARTL, M.: FV02; *Aplikační jednotka pro testování v reálném provozu.*

6/2018 Funkční vzorek – GALAS, R.; VALENA, M.; OMASTA, M.; HARTL, M.: FV01; *Aplikační jednotka pro experimentální vývoj v laboratorním prostředí.*

Ostatní relevantní informace

Jazyky: čeština (mateřský), Angličtina (B1)

Práce s PC: Word, Excel, PowerPoint, Autodesk Inventor, Autodesk AutoCAD, SolidWorks

Řidičský průkaz: skupina B