

Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

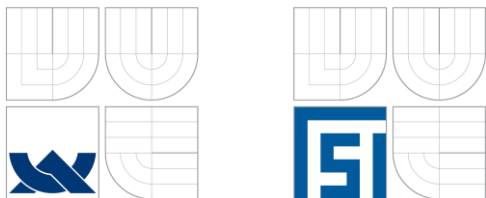
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design / Department of Machine Design

Modifikace tření v kontaktu kola a kolejnice

[Pojednání ke státní doktorské zkoušce]
[Thesis Type]

Autor práce: **Ing. Radovan Galas**
Author

Vysoké učení technické v Brně
Brno University of Technology



Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design / Department of Machine Design

Modifikace tření v kontaktu kola a kolejnice

[Pojednání ke státní doktorské zkoušce]
[Discourse on the Dissertation Thesis]

Autor práce: **Ing. Radovan Galas**
Author

Vedoucí práce: **prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.**
Supervisor

Brno 2015



OBSAH**OBSAH**

1 ÚVOD.....	6
2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	7
3 SHRUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	9
3.1 Třecí vrstva mezi tělesy.....	9
3.2 Složení modifikátorů tření	14
3.3 Modifikátor tření v kolejové dopravě.....	15
4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE.....	34
5 VYMEZENÍ CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ	36
5.1 Vymezení cíle práce	36
5.2 Vědecká otázka a pracovní hypotéza	36
5.3 Způsob řešení a použité metody	37
5.4 Plán publikací	38
6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE.....	40
6.1 Modifikace experimentální aparatury.....	40
6.2 Verifikace experimentálního přístupu	42
6.3 Modifikátory tření na olejové bázi	44
6.4 Modifikátory tření na vodní bázi	47
7 ZÁVĚR	49
LITERATURA	50
SEZNAM OBRÁZKŮ	53
SEZNAM TABULEK	55
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	56

1 ÚVOD

Jeden z klíčových faktorů kolejové dopravy představuje kontaktní plocha, která vzniká v důsledku deformace kola a kolejnice. Právě prostřednictvím této velmi malé plochy (přibližně 2 cm^2) jsou přenášeny veškeré trakční síly z kola na kolejnici, přičemž efektivita tohoto přenosu je zpravidla vyjadřována pomocí tzv. součinitele adheze. Je však nutné poznamenat, že velikost této bezrozměrné veličiny je významně ovlivňována provozními a okolními podmínkami. Riziko představuje zejména období podzimu, kdy dochází ke kontaminaci tohoto kontaktu vodou a spadeným listím, což má za následek kriticky nízké hodnoty adheze v kontaktu, následkem čehož dochází k prodloužení brzdných vzdáleností a problémům s rozjezdem vozidla. Tomuto problému se již několik desítek let předchází pomocí pískování. Jedná se o jednoduchý a spolehlivý způsob pro okamžité navýšení adheze mezi kolem a kolejnicí. Nicméně tento proces je doprovázen řadou negativních efektů (prašnost, hluk, opotřebení aj.). Naproti tomu během letních měsíců může adheze nabývat velmi vysokých hodnot, což je sice z hlediska trakce pozitivní, na druhou stranu však dochází k nadměrnému opotřebení kontaktních těles.

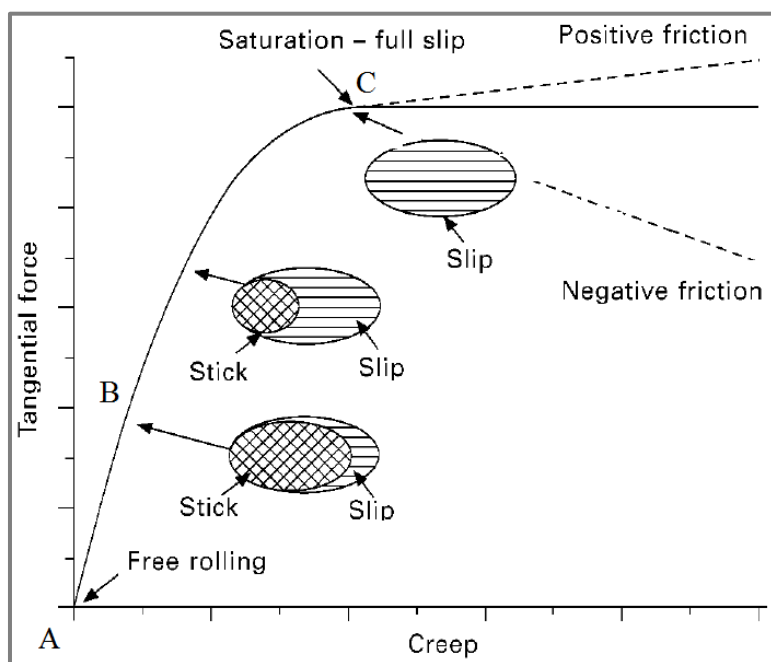
Konvenční metody pro modifikaci tření v kolejové dopravě, jako jsou pískování či mazání okolků, však neposkytují řešení některých základních problémů souvisejících s kolejovou dopravou, jakými jsou např. hluková emise, vlnkovité opotřebení či kontaktní únava. Na základě těchto podmětů byla během poslední dekády vyvíjena snaha o návrh kompozice, která by při aplikaci do kontaktu vedla na optimalizaci trakce a k minimalizaci výše zmíněných nežádoucích jevů. Tyto kompozice jsou v odborné literatuře zpravidla označovány jako modifikátory tření. Právě potenciál těchto látek může hrát významnou roli v budoucím rozvoji a konkurenceschopnosti kolejové dopravy.

Předložené pojednání ke státní doktorské zkoušce se zabývá modifikací tření v kontaktu kola a kolejnice. Motivací této práce je především významné postavení kolejové dopravy v přepravě osob a materiálu, a také skutečnost, že kolejová doprava patří k nejvíce environmentálním způsobům dopravy.

2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE 2

Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, jedním z klíčových faktorů kolejové dopravy je přenos trakčních sil z kola na kolejnice. Míra tohoto přenosu je vyjadřována pomocí tzv. součinitele adheze, který se běžně vyjadřuje jako podíl tečné a normálové síly působící v kontaktu. Jedná se tedy o jakousi analogii k Coulombovu tření. Rozdíl mezi těmito zdánlivě stejnými součiniteli lze vysvětlit pomocí tzv. *trakční křivky*, která popisuje závislost součinitele adheze popř. trakční síly na skluzu popř. na skluzové rychlosti. Na obr. 2.1 je vykreslena trakční křivka společně s třemi situacemi kontaktní plochy. Kontaktní oblast v počátku souřadného systému (A) je tvořena pouze oblastí tzv. *lpění*, což znamená, že mezi tělesy nejsou přenášeny žádné tečné síly, takže se v podstatě jedná o prosté valení. V praxi je však přenos trakčních sil vždy doprovázen existencí tzv. *skluzu*, což demonstruje na trakční křivce bod B, ve kterém je kontaktní plocha již rozdělená do dvou oblastí a dochází zde již k přenosu trakčních sil. S narůstající skluzovou rychlostí dochází k postupnému zánikání oblastí lpění resp. k nárůstu skluzové oblasti, což je doprovázeno růstem součinitele adheze v kontaktu. Tento trend platí až do bodu C, kde dochází již k úplnému zániku oblasti lpění a kontaktní plocha je již tvořena pouze skluzem, což znamená, že kontaktní oblast se nachází ve stavu *prokluzu* neboli smyku. V tomto bodě se tedy jedná o klasické smykové tření, takže zde součinitel adheze nabývá hodnoty součinitele tření. Tento bod je v kolejové problematice označován jako *bod saturace*.

První publikace, která přinesla hypotézu o tomto rozdělení kontaktní plochy do dvou oblastí, byla práce „*On the Action of a Locomotive Driving Wheel*“, kterou publikoval již v roce 1926 anglický vědec F. W. Carter [1]. Carterova hypotéza o rozdělení kontaktu byla potvrzena až začátkem 60. let Ollertonem a Hainesem [2], kteří pomocí fotoelasticimetrie zformulovali vztah o rozdělení kontaktní plochy.



Obr. 2.1 Trakční křivka a tři situace kontaktní oblasti

Z předchozích odstavců vyplývá, že adheze v kontaktu kola a kolejnice je limitována hodnotou součinitele tření. Vzhledem k tomu, že kontakt kola a kolejnice je otevřený tribologický systém, je nutné poznamenat, že adheze, stejně jako samotný tvar trakční křivky, je silně ovlivňován nejen provozními podmínkami, ale především okolním prostředím. Jedny z prvních publikací zabývajících se kontaminací kontaktu kola a kolejnice publikoval v polovině osmdesátých let Beagley [3-6]. Beagley se ve svých pracích postupně zabýval vlivem maziva, vody a otěrových částic na adhezi v kontaktu. Na tyto publikace během následujících dekád navázalo nemalé množství autorů. Postupně byl intenzivně zkoumán vliv jak provozních parametrů (vliv zatížení, rychlosti, vibrací, drsnosti, orientace drsnosti aj.), tak okolních podmínek (vliv vody, teploty vody, maziva, vlhkosti aj.) na míru adheze v kontaktu [7-11].

Další významnou publikační oblastí jsou publikace zaměřené na kontaminaci kontaktu listím [12-15]. Vlivem vysokého kontaktního tlaku dochází k stlačení listí, což je doprovázeno uvolňováním pektinu, který v kombinaci s vodou vede na extrémně nízké hodnoty adheze. Tento problém je poměrně intenzivně řešen především v Anglii a Nizozemsku, kde během podzimu představuje kontaminace kontaktu listím jeden z hlavních problémů kolejové dopravy. Jednou z možností, jak lze tomuto problému předcházet je pískování, což je proces, při kterém je do kontaktu kola a kolejnice přiváděna směs vzduchu a písku. Vzhledem k jednoduchosti a efektivnosti tohoto procesu se jedná o nejvyužívanější metodu zajišťující navyšování trakce, přičemž účinnost pískování byla ověřena pomocí experimentálního výzkumu [15,16]. Je však nutné podotknout, že nadměrné pískování může vést k úplnému oddělení třecích povrchů kola a kolejnice (tzv. odizolování), což může mít za následek znemožnění detekce vozidla na trati. Touto problematikou se ve svých publikacích zabýval Cuevas [17,18], který se snažil najít optimální zrnitost písku, která by zajišťovala dostatečnou trakci a současně by nezpůsobovala výše zmíněnou izolaci kola a kolejnice. Odizolování povrchů však není jediný negativní dopad pískování. K dalším negativním faktorům patří zejména nadměrné opotřebení kontaktních těles, poškození traťových obvodů, prašnost a negativní sklon trakční křivky po dosažení bodu saturace (obr. 2.1).

Z předešlého odstavce je zřejmé, že ačkoliv pískování je efektivní způsob pro navýšení adheze, vedlejší efekty tohoto procesu mají zásadní dopad na ekonomičnost a bezpečnost kolejové dopravy. Z tohoto důvodu je v posledních letech vyvíjena snaha o vývoj tzv. modifikátorů tření, jejichž úkolem je optimalizovat trakci a redukovat míru opotřebení či velikost hlukové emise. V odborné literatuře jsou tyto modifikátory tření často označovány jako HPF modifikátory tření (*High Friction Modifiers*). I přes významný potenciál, které modifikátory tření pro kolejovou dopravu představují, jsou dnes stále používány spíše výjimečně. Na trhu již sice existuje celá řada výrobců, kteří dodávají modifikátory tření jak pro off-board, tak pro on-board aplikaci, ale i přesto nejsou tyto systémy běžně využívány. Jedním z důvodů může být i skutečnost, že na poli experimentálního výzkumu doposud bylo publikováno jen velmi málo článků zabývajících se vlivem složení těchto látek, vlivem velikosti a tvrdosti částic obsažených v těchto kompozicích či optimálním množstvím a způsobem aplikace.

Předběžným cílem dizertační práce je tedy poskytnout odpovědi na otázky související s mechanismy, které nastávají v kontaktu kola a kolejnice při aplikaci modifikátoru tření.

3 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

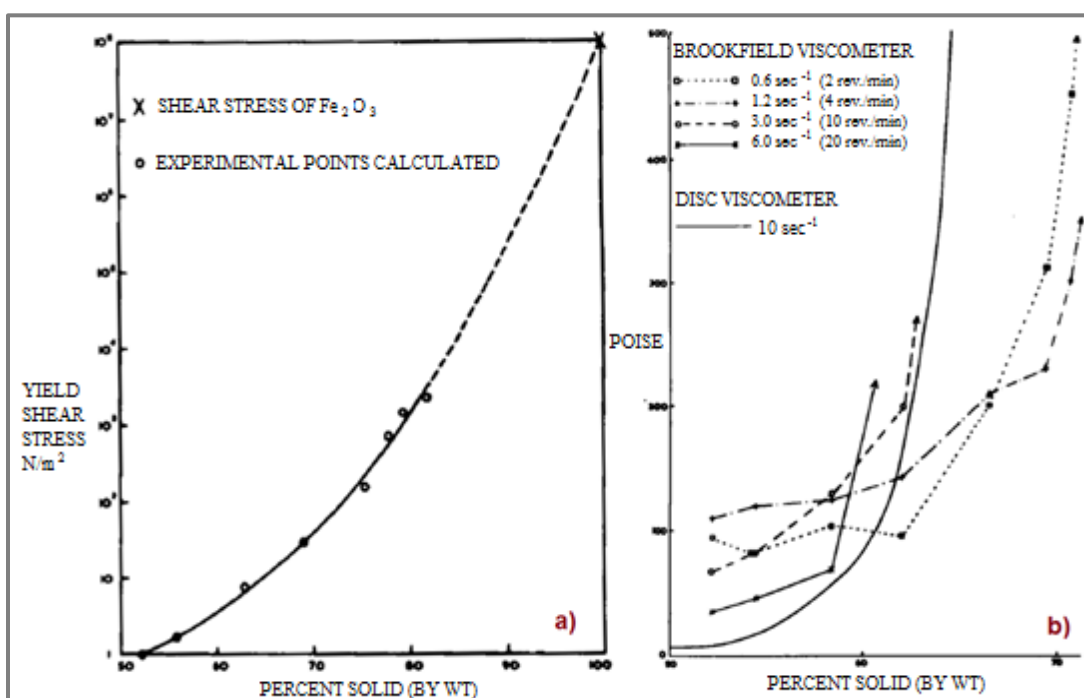
3

3.1 Třecí vrstva mezi tělesy

3.1

- [6] BEAGLEY, T M, I. J. MCEWEN a C. PRITCHARD, 1976-6-1. The rheological properties of solid rail contaminants and their effect on wheel/rail adhesion.

Publikace je zaměřena na popis reologických vlastností běžně se vyskytujících kontaminantů v kontaktu kola a kolejnice. Jako kontaminanty byly v této publikaci použity voda, olej, listí a oxid železitý, který představuje nejběžnější částice opotřebení kola a kolejnice. Z těchto kontaminantů byly vytvořeny směsi, u kterých byly následně studovány reologické vlastnosti a součinitel tření. Experimenty byly provedeny s využitím torzního zařízení a pomocí diskového a Brookfieldova viskozimetru.



Obr. 3.1 Závislost smykového napětí (a) a viskozity (b) na složení směsi

Výsledky

V článku byl nejdříve formulován vztah pro výpočet smykového napětí v třecí vrstvě (rov. 3.1). Výsledné smykové napětí přenášené vrstvou se určí v závislosti na mezi pevnosti tuhých částic σ_y a v závislosti na reologickém modelu směsi v kontaktu (U_i jsou rychlosti povrchů těles a h je tloušťka třecí vrstvy).

$$\sigma = \sigma_y + f \left[-\frac{U_1 - U_2}{h} \right] \quad (3.1)$$

První výraz v rovnici tedy popisuje chování související s chováním pevných částic v třecí vrstvě, zatímco druhý výraz vyjadřuje viskózní chování třecí vrstvy. Na

základě porovnání dat z obr. 3.1 bylo zjištěno, že při vyšších smykových spádech převažuje v třecí vrstvě viskózní chování nad chováním tuhých těles. Z průběhů křivek je patrné, že se třecí vrstva nechová newtonsky. V závislosti na složení třecí vrstvy mluvíme buď o chování pseudoplastickém (při nárůstu smykového spádu klesá viskozita) nebo o chování dilatantním (při nárůstu smykového spádu viskozita naopak roste). V tab. 3.1 je uvedena smyková pevnost a součinitel tření pro různé složení třecí vrstvy.

Tab. 3.1 Smyková pevnost a součinitel tření v závislosti na složení třecí vrstvy

Složení třecí vrstvy	Smyková pevnost (MPa)	Součinitel tření
Oxid železitý	100	0,3
Oxid železitý + olej (7,5 %)	42	0,13
Drcené listí	25	0,08
Oxid železitý + voda (10 %)	0,22	$6,6 \cdot 10^{-4}$

V případě samotného oxidu železitého v kontaktu dosahoval součinitel tření hodnoty 0,3. Následně byl tento oxid aplikován ve formě směsi s malým množstvím vody (hmotností koncentrace 10 %). Přítomnost vody ve směsi měla za následek výrazný pokles smykové pevnosti třecí vrstvy resp. pokles součinitele tření. Dále bylo prokázáno, že za určitých podmínek může třecí vrstva tvořená otěrovými částicemi a vodou vést až na hydrodynamicky mazaný kontakt. Závěrem těchto experimentů bylo tvrzení, že i velmi malé množství vody v kontaktu může způsobit velmi nízké hodnoty součinitele tření.

Závěr

Jedná se o pilotní studii zaměřenou na chování třecí vrstvy v kontaktu kola a kolejnice. Práce upozorňuje především na nutnost aplikace jiného přístupu u třecí vrstvy než v případě mezního tření. V závislosti na povaze směsi v kontaktu musí být pro predikci tření v kontaktu použitý model zohledňující jak viskózní chování, tak chování tuhých těles.

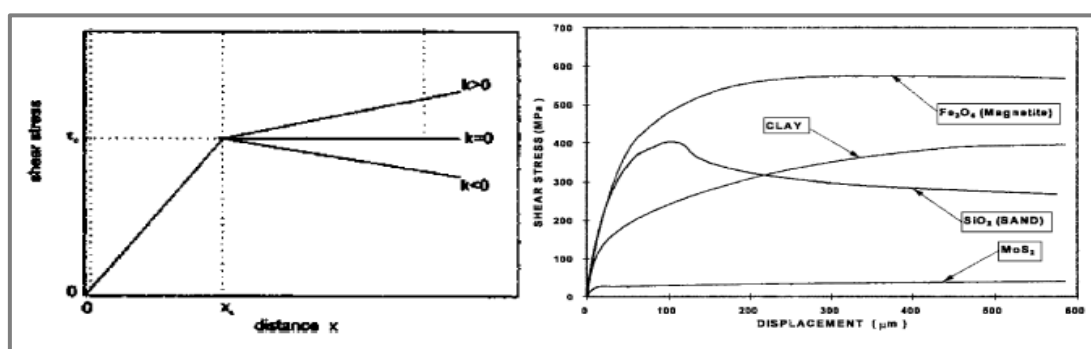
[19] HOU, Keping, J. KALOUSEK a E. MAGEL, 1997. Rheological model of solid layer in rolling contact.

Tento článek je zaměřen na popis utváření třecí vrstvy a na popis reologického modelu třecí vrstvy. Experimenty byly provedeny pomocí pin-on-disk reometru, přičemž cílem bylo sestavit reologický model. Za účelem sestavení reologického modelu byly postupně testovány ve formě prášku sulfid molybdeničitý ($< 1\mu\text{m}$), oxid křemičitý ($< 38\mu\text{m}$), jíl ($< 30\mu\text{m}$) a oxid železnatoželezitý ($< 1\mu\text{m}$). Vzhledem k aplikaci byly tyto látky nanášeny ve formě roztoku, kdy jako rozpouštědlo byl použit ethanol.

Výsledky

V první části práce Hou popisuje proces utváření třecí vrstvy. Vrstva mezi tělesy vzniká na základě existence skluzové rychlosti v kontaktu a nerovností, které jsou působením skluzu v kontaktu odtrženy, čímž vznikají částice opotřebené. Následkem

vysoké teploty uvnitř kontaktu dochází k postupné oxidaci těchto částic. Určitá část těchto oxidů je vlivem vysokého kontaktního tlaku vytlačena mimo kontakt, zatímco zbylá část zůstává uvnitř kontaktu, kde postupně dochází k úplné oxidaci a dalšímu drcení těchto částic. Postupně jsou tyto částice doplňovány nově vzniklými otěrovými částicemi. Vlivem narůstající tloušťky třecí vrstvy dojde k úplné separaci povrchů kontaktních těles, což Hou v práci experimentálně potvrdil. Při experimentu dosáhla tloušťka třecí vrstvy až 20 μm (třecí vrstva byla tvořena oxidem železnatoželezitým). Z průběhu křivek na obr. 3.2 je zřejmé, že třecí vrstva přenášela v tomto případě až 540 MPa. Nicméně s rostoucí tloušťkou vrstvy dochází současně k poklesu tuhosti vrstvy, což v kombinaci se smykovým napětím způsobí odtržení části této vrstvy. Odtržená část třecí vrstvy je pak následně vyloučena z kontaktu ve formě „vloček“. Následně se vlivem nově vzniklých otěrových částic celý proces opakuje.



Obr. 3.2 Křivka popisující reologické vlastnosti třecí vrstvy

Experimentální část práce byla provedena pomocí pin-on-disk reometru. Výsledkem těchto experimentů byla křivka popisující smykové napětí ve vrstvě v závislosti na skluzové vzdálenosti pro čtyři typy kontaminantů. Na základě těchto křivek byl sestaven následující reologický model třecí vrstvy:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad \tau \leq \tau_c \quad (3.2)$$

$$\tau = \tau_c + k \cdot (\gamma - \gamma_c) \quad \tau > \tau_c \quad (3.3)$$

Při pohledu na obr. 3.2 vlevo je zřejmé, že modul pružnosti třecí vrstvy G ovlivňuje počáteční sklon křivky. Po dosažení limitního smykového napětí třecí vrstvy τ_c rozhoduje o sklonu křivky modul plasticity ve smyku k .

Na základě tohoto reologického modelu byl v práci následně formulován vztah pro výpočet součinitele tření v liniovém kontaktu. Výsledky získané na základě této formule byly s dobrou shodou verifikovány s výsledky získanými na trati.

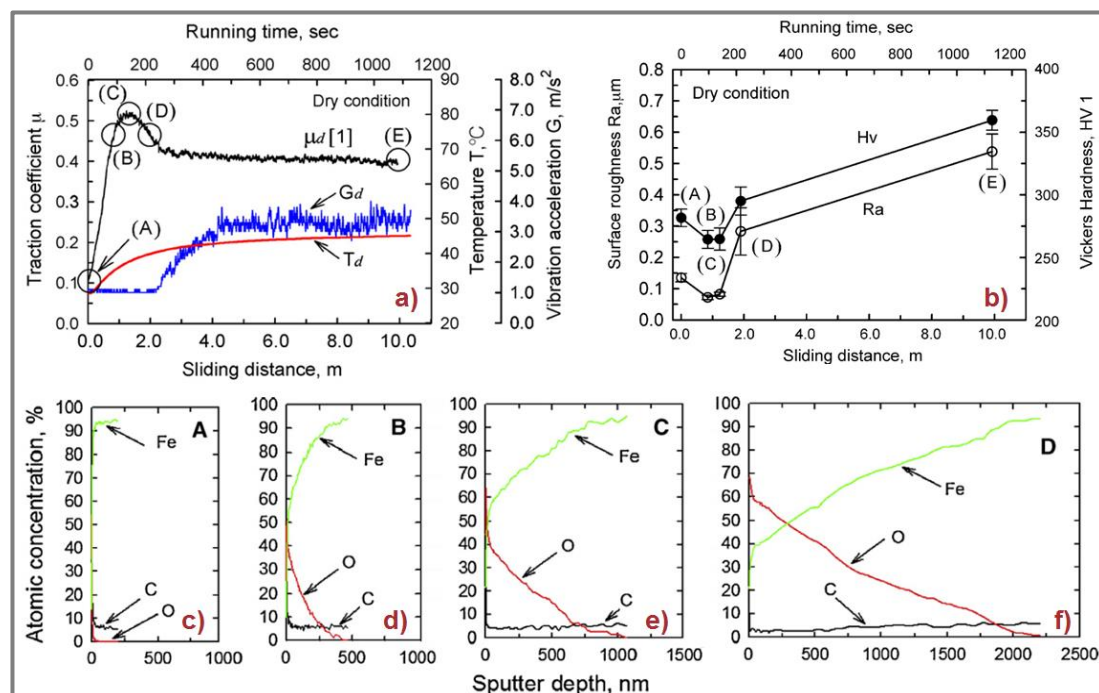
Závěr

Článek přináší popis procesu utváření třecí vrstvy, která vzniká v kontaktu kola a kolejnice. Sestavený reologický model třecí vrstvy potvrzuje hypotézu, že uměle vytvořená vrstva v kontaktu může řídit nejen maximální hodnotu tření, ale také jeho průběh po dosažení bodu saturace, což potvrzuje výskyt všech tří „typů“ tření v kontaktu (pozitivní, negativní a neutrální). Tento závěr je důležitý zejména pro design modifikátorů tření.

- [20] **BAEK, Koan-Sok, Keiji KYOGOKU, Tsunamitsu NAKAHARA a Makoto ISHIDA**, 2007. An experimental investigation of transient traction characteristics in rolling–sliding wheel/rail contacts under dry–wet conditions.
- [21] **BAEK, Koan-Sok, Keiji KYOGOKU, Tsunamitsu NAKAHARA a Makoto ISHIDA**, 2008. An experimental study of transient traction characteristics between rail and wheel under low slip and low speed conditions.
- [22] **NAKAHARA, Tsunamitsu, Koan-Sok BAEK, Hua CHEN a Makoto ISHIDA**, 2011. Relationship between surface oxide layer and transient traction characteristics for two steel rollers under unlubricated and water lubricated conditions.

Cílem výše zmíněných studií je popsat faktory související se změnami průběhu adheze v čase, ke kterým dochází ve valivě-skluzovém kontaktu pro suchý a vodou kontaminovaný kontakt. V případě studie [20,21] bylo cílem porovnat změny v průběhu adheze v závislosti na změně drsnosti a tvrdosti kontaktních těles. Současně je v těchto publikacích popsán vliv provozních parametrů (kontaktní tlak, rychlost a skluz) a okolních podmínek (teplota a relativní vlhkost) na součinitel adheze.

V případě článku [23] bylo cílem doplnit předešlé experimenty o informace související s formováním třecí vrstvy, zejména pak se vznikem oxidů na povrchu těles. Pro tyto analýzy byla využita Augerova elektronová a laserová Ramanova spektroskopie (AES a RS). Tyto analýzy byly dále doplněny o FTIR analýzu. Experimenty byly provedeny na dvoudiskovém zařízení při následujících podmínkách: kontaktní tlak 800 MPa, rychlost 1,26 m/s, skluz 0,7 %, teplota 30 °C a relativní vlhkost 60 %. Kontaktní tělesa byla vyrobena vyříznutím z reálné kolejnice z perlitické oceli.

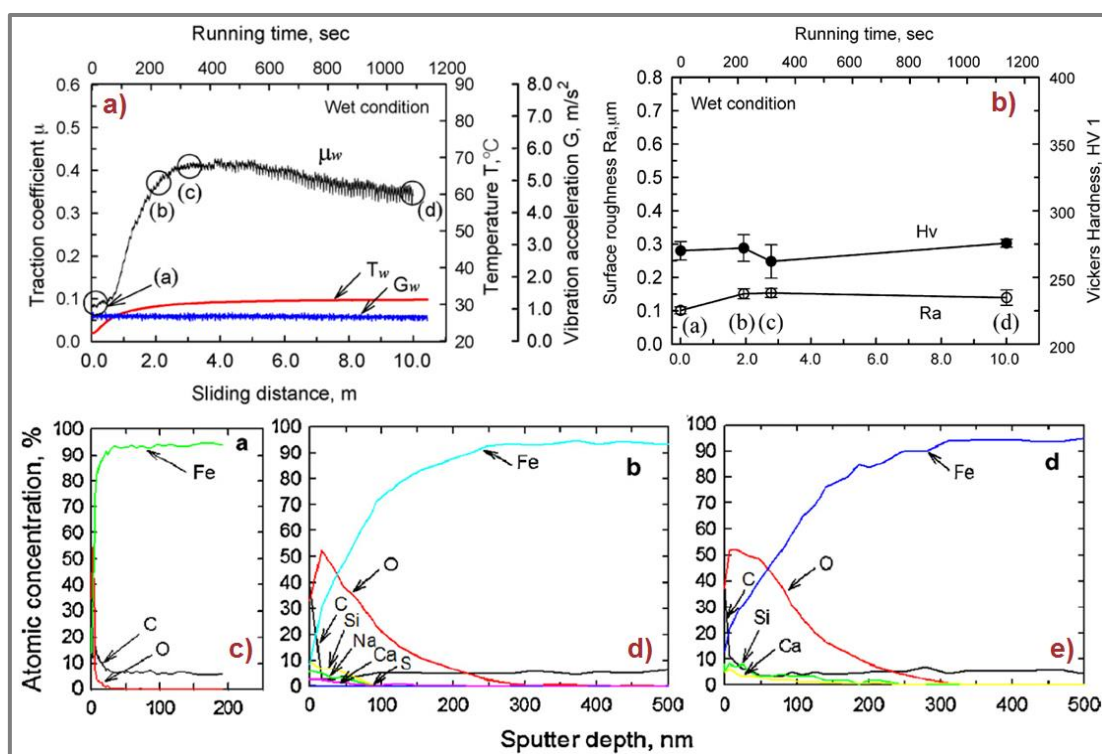


Obr. 3.3 Průběh adheze, teploty, vibrací, tvrdosti a drsnosti v čase a výsledky AES analýzy pro suchý kontakt

Výsledky

Na obr. 3.3a je vykreslen průběh součinitele adheze v závislosti na skluzové vzdálenosti pro suchý kontakt. Součástí tohoto grafu jsou také křivky popisující změnu teploty a míru vibrací v čase. Dalšími sledovanými parametry během experimentu byly drsnost a tvrdost (obr. 3.3b). Na základě AES analýzy byly získány informace o složení a koncentraci prvků obsažených v třecí vrstvě pro čtyři kontaktní situace (obr. 3.3c-f), které jsou vyznačeny na obr. 3.2a. Kromě AES analýzy byla v těchto bodech provedena také RS analýza, která poskytla informace o druhu a intenzitě oxidů obsažených v třecí vrstvě. Na základě výsledků experimentů pro suchý kontakt bylo zjištěno, že počáteční strmý nárůst adheze je doprovázen poklesem drsnosti a tvrdosti (body A-B). Přechod mezi body B-C je doprovázen nárůstem třecí vrstvy, především pak zvýšením koncentrace oxidu železitého, který vzhledem ke své tvrdosti způsobuje nárůst adheze v kontaktu. Následné zvýšení tvrdosti (C-D) bylo způsobeno v důsledku mechanického zpevnění materiálu. Stejný trend byl pozorován také u drsnosti, přičemž nárůst v tomto případě byl vyvolán adhezním opotřebením. Po překročení bodu C dochází k prudkému nárůstu tloušťky třecí vrstvy, především pak k tvorbě oxidu železatoželezitého v třecí vrstvě, což má za následek pokles adheze. V této části křivky také dochází k fluktuaci amplitudy zrychlení, což je způsobeno nadměrným opotřebením kontaktních těles.

Stejně analýzy byly provedeny také při přítomnosti vody v kontaktu (obr. 3.4). Strmý nárůst adheze mezi body (a) a (b) byl způsoben přítomností oxidu železitého v třecí vrstvě. Další růst adheze za bodem (c) je potlačen výskytem druhého oxidu (železatoželezitého) v třecí vrstvě. Z obr. 3.4b je zřejmé, že vlivem přítomnosti vody v kontaktu nedocházelo během testu k významné změně drsnosti ani tvrdosti, což potvrzuje konstantní průběh zrychlení v čase na obr. 3.4a.



Obr. 3.4 Průběh adheze, teploty, vibrací, tvrdosti a drsnosti v čase a výsledky AES analýzy pro vodou kontaminovaný kontakt

Závěr

Vliv provozních a okolních parametrů na adhezi popsaných v publikacích [20,21] nebyl výše v textu rozebírán, protože se jedná o poznatky, které nesouvisí s třecí vrstvou mezi tělesy. Naopak hlavní přínos práce představuje detailní rozbor složení třecí vrstvy pro různé fáze experimentu. Právě složení třecí vrstvy má společně s tvrdostí a drsností zásadní vliv na míru adheze v kontaktu. Pomocí spektrometrických analýz byly na povrchu těles detekovány dva typy oxidů: oxid železitý a oxid železnatoželezitý. Vzhledem k výslednému průběhu adheze bylo prokázáno, že prvně jmenovaný oxid způsobuje navýšení adheze, zatímco oxid železnatoželezitý způsobuje pokles adheze v kontaktu.

3.2 Složení modifikátorů tření

V této podkapitole bude popsáno složení tekutých modifikátorů tření, přičemž informace v této podkapitole vycházejí z publikací citovaných v tomto pojednání a zejména pak z dvou patentů [23,24] kanadské společnosti LB Foster, která je světovým lídrem na poli modifikace tření v kontaktu kola a kolejnice.

Přesné složení modifikátorů tření se může lišit v závislosti na požadovaných vlastnostech (zvýšení trakce, redukce hlukové emise, redukce vlnkovitosti či redukce opotřebení), klimatických podmínkách a charakteru dané trati (klesání, stoupání popř. traťové oblouky). Zásadní faktor pro vývoj modifikátoru tření je zejména složení třecí vrstvy, která vzniká mezi kolem a kolejnicí. Toto „*třetí těleso*“ se skládá z otěrových částic kontaktních těles, prachových částic, olejů, otěrových částic brzd apod. Problém však může představovat skutečnost, že složení této vrstvy se může v různých úsecích trati značně lišit. Z tohoto důvodu musí být modifikátor tření vhodně navržen tak, aby byl schopen plnit požadovanou funkci pro co nejrozmanitější složení třecí vrstvy. Tekuté modifikátory tření zpravidla obsahují následující složky (s ohledem na základní bázi):

- **Základní báze** - zpravidla voda nebo olej v koncentraci 20-90 %.
- **Částice pro modifikaci tření** - jejich úkolem je docílit pozitivního sklonu trakční křivky za bodem saturace. Zpravidla se jedná o minerální částice, jako jsou např.: uhličitán vápenatý (vápenec), uhličitán hořečnatý, křemičitan hořečnatý (mastek) aj., nebo se může jednat o částice kovu, jako jsou např.: měď, zinek, hliník aj. Velikost těchto částic se pohybuje zpravidla v rozmezí 0,5-10 μm , přičemž nejčastěji se jedná o velikosti 1-2 μm .
- **Zahušťovadlo (gelifikátor)** – používá se zejména u vodních modifikátorů tření. Jeho cílem je zajistit vhodnou konzistenci a reologické chování kompozice. Současně napomáhá k snazší aplikaci modifikátoru. Při kontaktu zahušťovadla s vodou dochází k bobtnání, což vede k zahuštění kompozice. Zgelovatění kompozice také zajistí, že pevné částice obsažené v modifikátoru tření jsou homogenně dispergovány v celém objemu kompozice. Jako gelifikátor se nejčastěji používají např.: montmorillonit sodný či kasein, a to v koncentraci 5-20 %.
- **Smáčedlo** – stejně jako v případě gelifikátoru se jedná o komponentu typickou pro vodní modifikátory tření, jejímž úkolem je snížit povrchové

napětí vodní kompozice, což napomáhá k tvorbě pravidelné disperze pevných částic v základní bázi. Smáčedlo současně napomáhá k lepšímu přilnutí maziva k třecím povrchům těles a také napomáhá vyplnit mikrotrhliny a nerovnosti na povrchu mazivem. Nejčastěji se jako smáčedlo využívá nonyl phenoxy-polyol při koncentraci do 0,1 %.

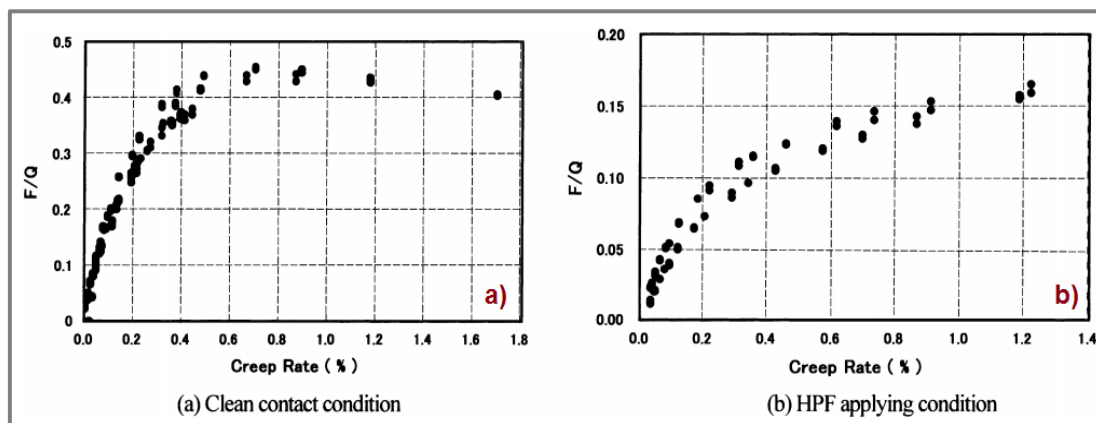
- **Pevné mazivo** (0-30 %; nejčastěji molybden, grafit).
- **Další přísady** např.: látky prodlužující životnost (polymerní látky), antioxidanty, protipěnovostní přísady, biocidy či kovové částice, které napomáhají detekci vlaku na trati.

3.3 Modifikace tření v kolejové dopravě

3.3

[25] MATSUMOTO, Akira, Yasuhiro SATO, Hiroyuki ONO, Yonjin WANG, Masayuki YAMAMOTO, Masuhisa TANIMOTO a Yasushi OKA, 2002. Creep force characteristics between rail and wheel on scaled model.

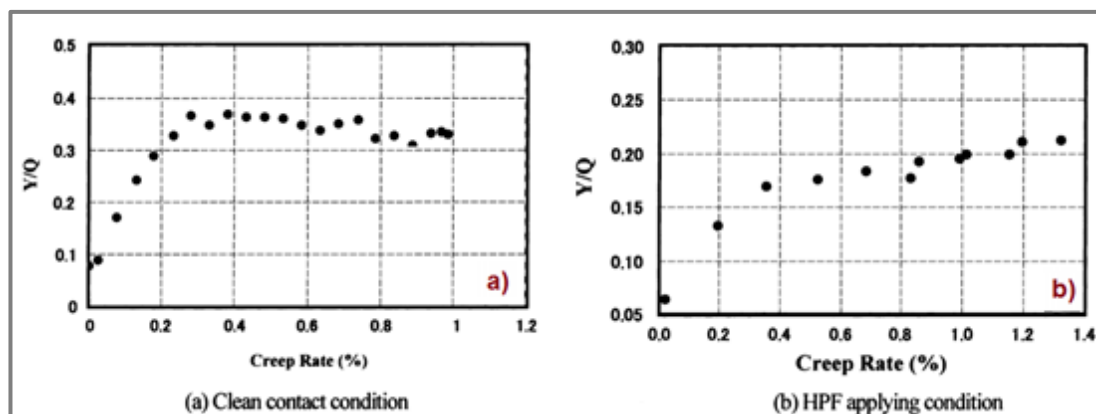
Publikace je zaměřena na popis chování modifikátoru tření v kontaktu kola a kolejnice. Experimenty byly provedeny na dvoudiskovém zařízení ve zmenšeném měřítku (1:5). Cílem experimentů bylo objasnit vliv modifikátoru tření na trend trakční křivky, a to jak v podélném, tak v příčném směru při dopředné rychlosti 50 km/hod a kontaktní síle 1 000 N. Trakční křivka v příčném směru byla zaznamenávána pro náběžný úhel $\pm 0,6^\circ$, čímž byl simulován průjezd vozidla traťovým obloukem. Během experimentů byl aplikován tekutý komerční modifikátor tření.



Obr. 3.5 Trakční křivky v podélném směru pro suchý kontakt (a) a pro kontakt s modif. tření (b)

Výsledky

Na obr. 3.5 a 3.6 jsou vykresleny trakční křivky v podélném a příčném směru při suchém kontaktu a kontaktu s modifikátorem tření. Z průběhů obou těchto křivek je zřejmé, že přítomnost modifikátoru tření potlačuje negativní sklon křivky za bodem saturace, což na reálné trati může vést k poklesu hlukové emise a redukci vlnkovitého opotřebení. Současně přítomnost modifikátoru tření vedla k poklesu maximální hodnoty adheze v kontaktu, a to jak v případě podélného, tak v případě příčného směru.



Obr. 3.6 Trakční křivky v příčném směru pro suchý kontakt (a) a pro kontakt s modif. tření (b)

Závěr

Jedná se o jednu z prvních publikací související s modifikátory tření v kolejové dopravě, čemuž odpovídá i poměrně krátký rozsah publikace. Nicméně i přesto byla v publikaci ověřena funkčnost jednoho z komerčních modifikátorů tření, a to z hlediska redukce součinitele adheze a z hlediska dosažení pozitivního tření v celém rozsahu trakční křivky. Je však nutné zmínit, že v případě podélného směru mohou být hodnoty adheze po aplikaci modifikátoru tření až příliš nízké, což by mohlo vést k problémům s trakcí popř. s brzděním vozidla.

[26] TOMEOKA, Masao, Naoji KABE, Masuhisa TANIMOTO, Eiji MIYAUCHI, Machi NAKATA, Masuhisa TANIMOTO a Yasushi OKA, 2002. Friction control between wheel and rail by means of on-board lubrication.

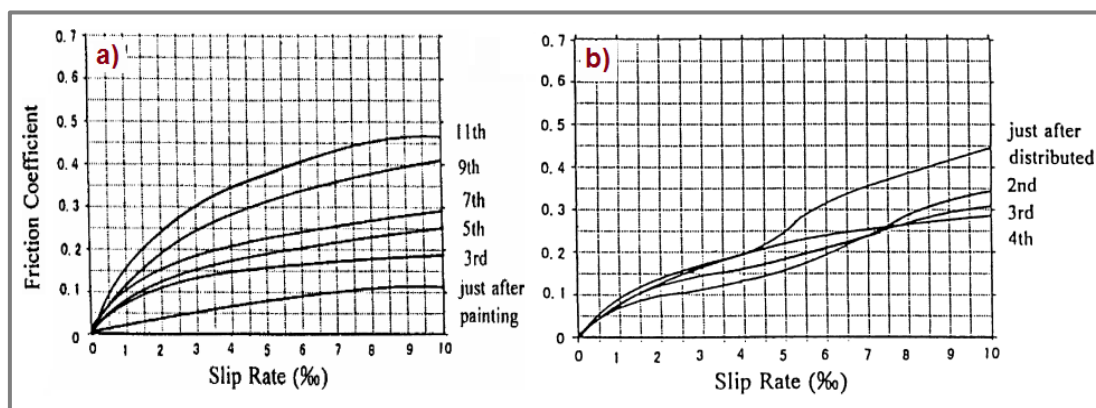
V porovnání s předchozí publikací se již jedná o rozsáhlejší článek, jehož cílem bylo ověřit funkci modifikátoru tření v traťových obloucích na reálné trati pomocí nově vyvinutého on-board systému. Právě v těchto částech trati je průjezd vozidla doprovázen značnou hlukovou emisí.

Před testováním modifikátoru tření na trati byly provedeny laboratorní experimenty s využitím dvoudiskového zařízení, a to za účelem ověření funkčnosti modifikátoru tření, a také s ohledem na optimalizaci způsobu dávkování. Během experimentů byly testovány dva typy modifikátoru tření, a to LCF modifikátor (*Low coefficient of Friction*) a modifikátor typu HPF (*High coefficient of Friction*). V případě prvně zmíněného modifikátoru tření (LCF) se jedná v podstatě o mazivo, jehož cílem je dosáhnout tření v kontaktu kolem hodnoty 0,1. Tyto modifikátory jsou zpravidla aplikovány na okolek kola před průjezdem vozidla traťovým obloukem. V případě HPF modifikátoru tření se již jedná o „klasický“ modifikátor tření, jehož cílem je dosažení pozitivní adhezní křivky a optimalizace adheze v kontaktu.

Výsledky

V první fázi experimentů byl pomocí dvoudiskového zařízení studován vliv výše zmíněných modifikátorů tření na adhezi v kontaktu. V případě obou modifikátorů

bylo dosaženo pozitivního průběhu trakční křivky, přičemž maximální hodnota adheze byla 0,24 pro HPF modifikátor a 0,1 pro LCF modifikátor tření.



Obr. 3.7 Závislost počtu průchodů modifikátoru tření kontaktem pro dva způsoby aplikace

Druhá fáze experimentů byla zaměřena na způsob aplikace modifikátoru tření do kontaktu. V prvním případě obr. 3.7a byl modifikátor tření HPF aplikován pouze rozetřením na disk. Z průběhů křivek je zřejmé, že mezi třetím a sedmým cyklem vykazoval kontakt s modifikátorem tření požadované hodnoty adheze. Během posledních cyklů se již hodnoty adheze blížily situaci odpovídající suchému tření. Ačkoliv byla pomocí těchto experimentů prověřena schopnost modifikátoru tření řídit adhezi v kontaktu, hodnoty adheze během prvního cyklu po aplikaci byly z hlediska požadavků na trakci a brzdění příliš nízké. Z tohoto důvodu byla následně testována také aplikace pomocí nástřiku v podobě mlhy (obr. 3.7b). Při tomto způsobu aplikace dochází k lepší distribuci částic v kontaktu, což nezpůsobuje nízké hodnoty adheze během prvních cyklů po aplikaci modifikátoru tření.

Na základě výše popsané validace způsobu aplikace modifikátoru tření byl vyvinut on-board systém, jehož cílem bylo ověřit funkci systému resp. HPF modifikátoru tření v traťových obloucích. Během experimentů na reálné trati byl při přítomnosti modifikátoru tření v kontaktu pozorován pokles sil působících v kontaktu kola a kolejnice a současně byl zaznamenán pokles hluku až o 20 dB.

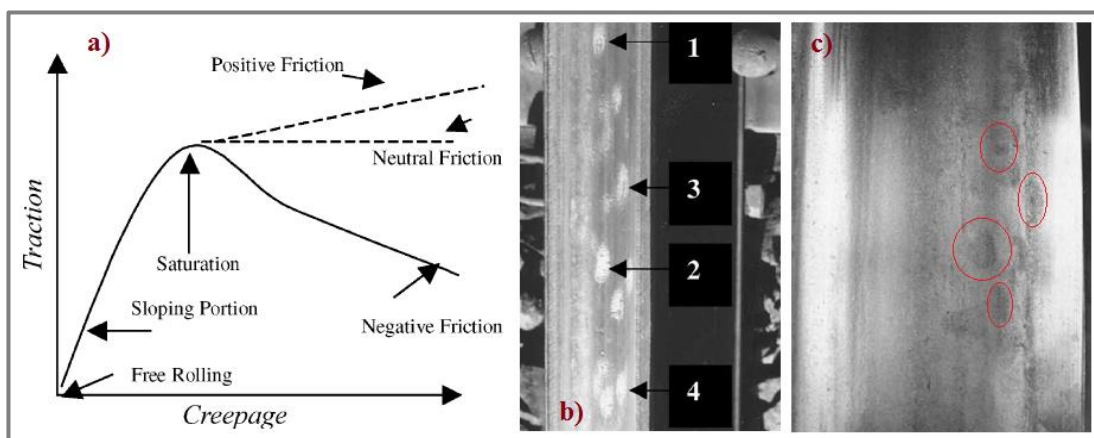
Závěr

Hlavní přínos této publikace představuje experimentální ověření funkce modifikátoru tření na reálné trati při průjezdu vozidla traťovým obloukem. Experimenty prokázaly schopnost modifikátoru tření redukovat síly působící v kontaktu a současně redukovat hlukovou emisi. Dalším přínosem práce bylo také porovnání dvou způsobů aplikace modifikátoru tření.

[27] EADIE, Donald T., Joe KALOUSEK a Kelvin C. CHIDDICK, 2002. The role of high positive friction (HPF) modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena

V podstatě se jedná o přehledový článek, jehož cílem je vysvětlit dopady negativního trendu adhezní křivky za bodem saturace, a to především z hlediska hlukové emise

a vlnkovitého opotřebení. Další významnou částí článku je popis třecí vrstvy, která se formuje mezi tělesy.



Obr. 3.8 Trakční křivka (a), lesklé plošky na kolejnici (b) a tmavé plošky na obvodu kola (c)

Výsledky

V první kapitole článku jsou popsány mechanismy, které vedou k iniciaci vlnkovitého opotřebení. Prvním mechanismem je fluktuace silového působení v kontaktu. Tato fluktuace sil je vyvolána nerovnostmi na površích kola nebo kolejnice, přičemž tento mechanismus je typický především pro nová nebo špatně přebroušená kola a kolejnice. Druhým mechanismem, který vede k rozvoji vlnkovitého opotřebení je negativní trend trakční křivky za bodem saturace (obr. 3.8a). Negativní trend tření za bodem saturace je doprovázen tzv. *stick-slipem*, který je v problematice kolejové dopravy označován jako *roll-slip*. Jedná se o jev, kdy se v kontaktní ploše opět začíná objevovat oblast lpění. Na obr. 3.8b je zobrazena kolejnice se čtyřmi opotřebovanými lesklými místy, které byly vytvořeny právě v důsledku roll-slipu. Obdobné stopy je možné pozorovat i na ploše kola (obr. 3.8c). Dojde-li ke sloučení těchto plošek, začnou se formovat prohlubně známé jako vlnkovité opotřebení. Kontakt takto opotřebovaných těles je doprovázen vibracemi a zvýšenou hlukovou emisí.

Druhá kapitola článku je věnována reologii třecí vrstvy formující se mezi tělesy. Autoři zde převážně čerpali z Houova článku [19], který je popsán výše (str. 10).

V další kapitole jsou specifikovány požadavky na chování modifikátoru tření. Především se jedná o již zmíněný požadavek na pozitivní sklon trakční křivky v celém jejím rozsahu a na optimalizaci velikosti tření v kontaktu, přičemž jako ideální se uvádí hodnota 0,35. Tato hodnota je dostatečná z hlediska přenosu sil mezi kolem a kolejnicí a současně nemá negativní dopad na trakci a brzdění.

V posledních dvou kapitolách je popsán pozitivní vliv modifikátoru tření na míru hlukové emise (související s roll-slipem) a na rozvoj vlnkovitého opotřebení. V článku je uvedeno, že při aplikaci modifikátoru tření na jedné z tramvajových linek došlo k průměrnému snížení hladiny hlukové emise v rozmezí 5-10 dB, přičemž maximální pokles v některých částech trati dosahoval až 20 dB. V případech vlnkovitého opotřebení jsou v publikaci uvedeny dva případy použití modifikátoru tření na reálné trati. V obou případech došlo vlivem aplikace modifikátoru tření ke značnému prodloužení doby, po kterou může být trať provozována bez přebrousování.

Závěr

Ačkoliv se nejedná o článek s experimentálními výsledky, je tento článek jednoznačně přínosem. Publikace přináší komplexní pohled na problematiku modifikátorů tření v kolejové dopravě. V článku byla vysvětlena problematika související s negativním trendem trakční křivky za bodem saturace a na základě předešlé publikace [19] jednoho ze spoluautorů, byla také popsána reologie třecí vrstvy v kontaktu.

[28] EADIE, D.T. a M. SANTORO, 2006. Top-of-rail friction control for curve noise mitigation and corrugation rate reduction.

Článek je zaměřen na vliv modifikátoru tření na hlukovou emisi a na formování vlnkovitého opotřebení. Experimenty byly provedeny na reálné trati pro pět dopravních systémů (tři tramvajové tratě, metro a městská dráha) viz tab. 3.2. Při experimentech byl používán tekutý modifikátor tření na bázi vody, který byl aplikován ručně nebo s využitím off-board systému.

Tab. 3.2 Testované trati a jejich charakteristiky

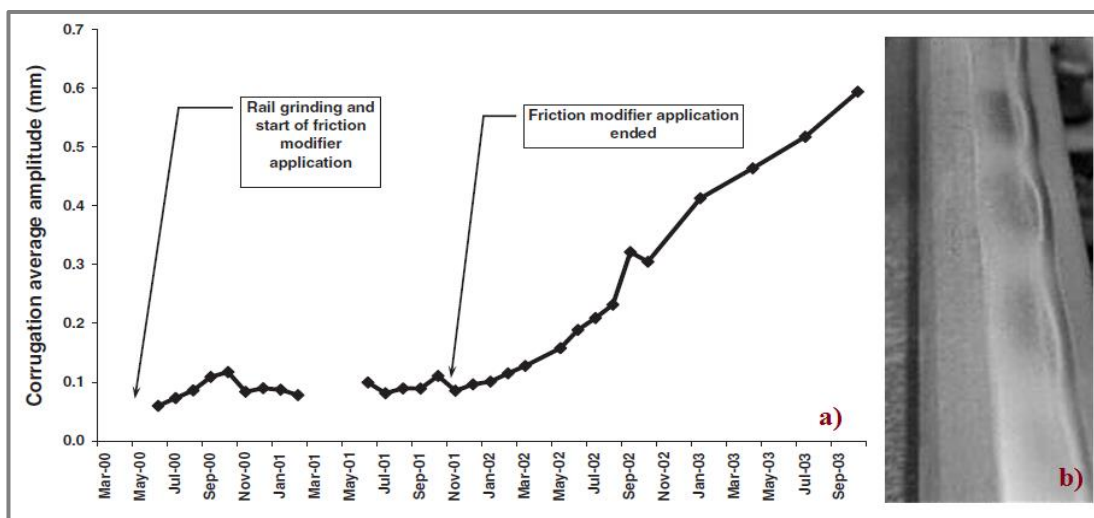
System number	1	2	3	4	5
Country	Spain	Italy	Spain	Netherlands	United Kingdom
System type	Metro	Tram	Light Rail	Tram	Tram
Curve radius (m)	220	25 (est.)	250	25	26
Speed (km/h)	50	5–10	65	10–15	15
Axle per car	4	8	4	8	6
Cars per train	6	1	6	1	1
Rail type/wt	UIC 54	AP4N Phoenix	UIC 54	RI 59	41G
Brake type	Disk	Type	Disk	Disk	Disk
Gauge face lubrication	Onboard oil	Onboard oil	Onboard oil	Trackside oil	Onboard oil
Friction modifier	Automatic trackside	Manual	Manual	Manual	Manual
Application method					
Ave L_{Aeq} baseline (dB)	101.4	92.9	80.4	86.7	98.2
Ave L_{Aeq} friction modifier (dB)	95.1	83.1	72.5	73.3	75.4
Track condition	Corrugated	Worn	Corrugated	Worn	New
Track structure	Concrete sleepers/ballast	Imbedded	Concrete sleepers/ballast	Imbedded	Imbedded

Výsledky

V tab. 3.2 jsou uvedeny průměrné hodnoty hlukové emise při suchém kontaktu a kontaktu s modifikátorem tření pro všechny výše zmíněné dopravní systémy. Na základě těchto dat je zřejmé, že absence modifikátoru tření v kontaktu vede k průměrnému zvýšení hlukové emise o 12 dB. Nejnižší redukce hluku nastala pro první testovaný systém, což bylo způsobeno výchozím stavem trati, která již vykazovala vlnkovité opotřebení. Naopak nejvyšší redukci hluku bylo dosaženo při aplikaci modifikátoru tření na nové trati ve Velké Británii. Experimenty navíc ukázaly, že modifikátor tření v kontaktu může redukovat míru hluku vycházející jak z kontaktu mezi běhounem kola a temenem hlavy kolejničky, tak také hluk související s kontaktem okolku kola a pojížděnou hranou kolejničky. Redukce hluku mezi běhounem kola a temenem hlavy kolejničky je způsobena pozitivním třením třecí vrstvy mezi tělesy. Současně však přítomnost modifikátoru v kontaktu vede

k redukci sil působících v kontaktu, což má za následek redukci hluku, který je emitován z kontaktu mezi okolcem kola a pojižděnou hranou kolejnice.

Experimenty související s monitorováním vlnkovitého opotřebení byly provedeny pouze pro systém 1 (tab. 3.2). První fáze experimentu probíhala přibližně deset měsíců, kdy byl na testovaném traťovém oblouku v pravidelných intervalech s využitím on-board systému aplikován modifikátor tření. V tomto časovém intervalu nedošlo k výraznému nárůstu amplitudy vlnkovitého opotřebení. Prakticky ihned po zastavení aplikace modifikátoru tření došlo k přibližně lineárnímu nárůstu amplitudy vlnkovitého opotřebení v čase (obr. 3.9). Během následujících měsíců tak narostla amplituda o stovky procent, což může vést ke zvýšení hluku až o 20 dB.



Obr. 3.9 Vývoj amplitudy vlnkovitého opotřebení v čase (a), vlnkovité opotřebení (b)

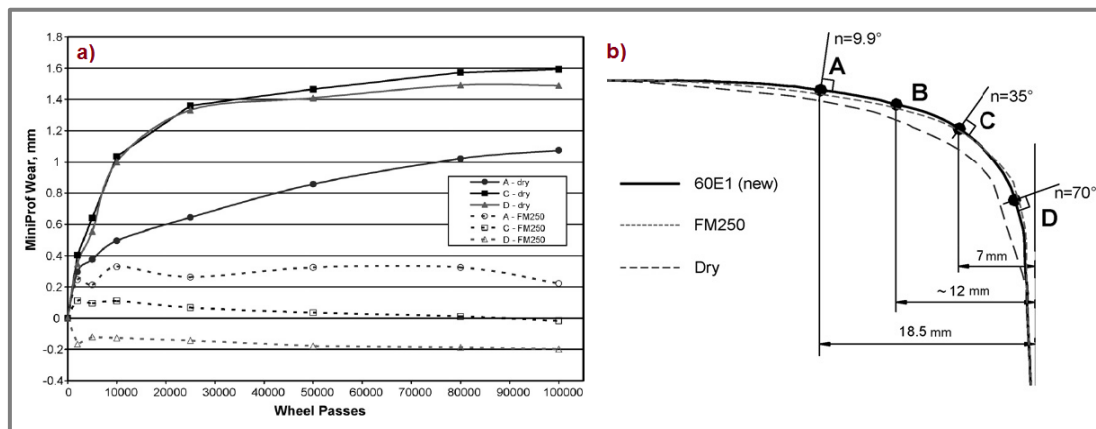
Závěr

Experimenty potvrzují pozitivní vliv modifikátoru tření na redukci hlukové emise a na redukci vlnkovitého opotřebení. Článek v podstatě navazuje na předchozí publikaci [27], nicméně v tomto článku byl modifikátor tření testován pro široké spektrum podmínek (pět dopravních systémů), díky čemuž lze výsledky považovat za zcela věrohodné. Schopnost modifikátoru tření potlačit rozvoj vlnkovitého opotřebení potvrzuje publikace Egany [29], který pozoroval pro stejný systém obdobný trend vývoje amplitudy vlnkovitého opotřebení při přítomnosti modifikátoru tření a při suchém kontaktu.

- [30] EADIE, Donald T., Dave ELVIDGE, Kevin OLDKNOW, Richard STOCK, Peter POINTNER, Joe KALOUSEK a Peter KLAUSER, 2008. The effects of top of rail friction modifier on wear and rolling contact fatigue: Full-scale rail-wheel test rig evaluation, analysis and modelling.

Publikace je zaměřena na studium kontaktní únavy, opotřebení a plastického tečení kola a kolejnice při aplikaci modifikátoru tření. Experimentální výzkum byl prováděn v laboratorních podmínkách, nicméně s využitím reálných kontaktních těles. Experimenty probíhaly při rychlosti 1 m/s a vertikálním zatížení 230 kN.

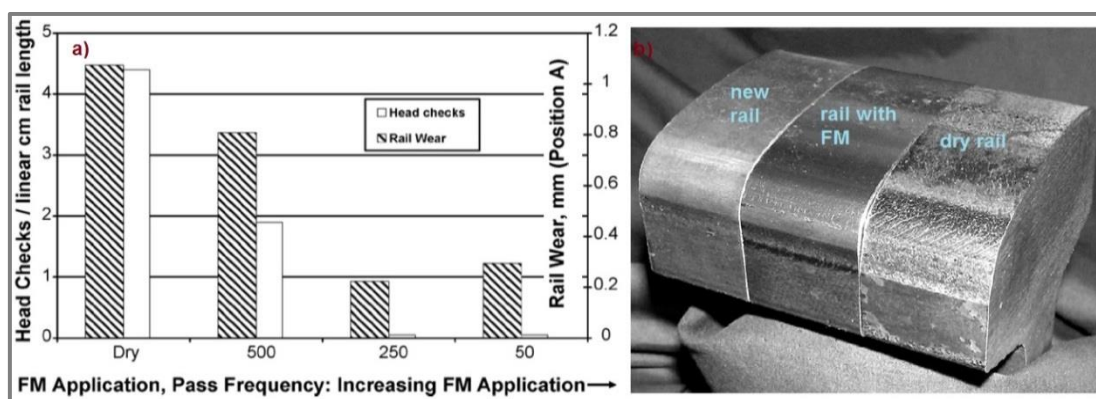
Velikost zatížení byla úmyslně volena vyšší, než běžně dosahuje na trati, a to z důvodu absence dynamických sil, které mají nezanedbatelný vliv na iniciaci a růst trhlin. Jako modifikátor tření byl použit komerčně dostupný modifikátor na vodní bázi, který byl během experimentu aplikován jak do kontaktu mezi běhounem kola a kolejnice, tak do kontaktu mezi okolkem kola a kolejnice.



Obr. 3.10 Porovnání opotřebení kolejnice pro kontakt s a bez modifikátoru tření u kolejnice R260 (a), změna profilu kolejnice při aplikaci modifikátoru tření (b)

Výsledky

Hodnocení opotřebení bylo prováděno pro tři místa kolejnice. Na obr. 3.10 je porovnání míry opotřebení pro suchý kontakt a pro kontakt s modifikátorem tření. Z průběhů je zřejmé, že při aplikaci modifikátoru tření dochází k výrazné redukci opotřebení a profil kolejnice (obr. 3.10b) je takřka shodný s profilem nové kolejnice. Záporné hodnoty ve směru osy y u křivky D-FM250 vypovídají o plastickém tečení materiálu. Další část experimentů byla zaměřena na optimalizaci intervalu, při kterém je modifikátor tření aplikován do kontaktu. Na obr. 3.11a je graf popisující počet trhlin na 1 cm délky kolejnice a míry opotřebení v závislosti na třech různých intervalech aplikace modifikátoru tření. Z grafu je zřejmé, že modifikátor tření může výrazně redukovat iniciaci trhlin na hlavě kolejnice a současně výrazně redukovat míru opotřebení, což potvrzuje i obr. 3.11b. Současně je z grafu patrné, že optimální interval aplikace modifikátoru tření je mezi hodnotami 250 a 500 cyklů. Intenzivnější interval aplikace by již neznamenal další redukci opotřebení, ale naopak by docházelo k podporování růstu trhlin.



Obr. 3.11 Vliv modifikátoru na míru opotřebení a iniciaci trhlin (a), porovnání povrchu kolejnic (b)

V další části publikace byl popsán vliv modifikátoru tření na výslednou drsnost povrchu a na míru plastické deformace. Na obr. 3.11b je porovnání nové kolejnice a kolejnice po 100 000 cyklech, a to jak pro suchý kontakt, tak pro kontakt s modifikátorem tření (modifikátor byl aplikován každých 250 cyklů). Z porovnání je zřejmé, že aplikace modifikátoru tření vede na hladší povrchy kolejnice, což může být významné z hlediska iniciace trhlin, protože vyšší drsnost může působit jako koncentrátor napětí. Během experimentů byl tak prokázán pozitivní vliv modifikátoru tření na redukci plastického tečení kolejnice, který může být jedním z faktorů vyvolávající vlnkovité opotřebení – dlouhé vlny.

Závěr

V práci bylo prokázáno, že modifikátor tření může výrazně redukovat míru opotřebení, iniciaci a šíření trhlin, výslednou drsnost kontaktních těles a rozsah plastického tečení materiálu. Přínosem práce bylo také zhodnocení vlivu intervalu aplikace modifikátoru tření s ohledem na opotřebení a na iniciaci či růst trhlin. Vzhledem k reálné konformitě kontaktních těles a reálnému zatížení, lze výsledky považovat za věrohodné.

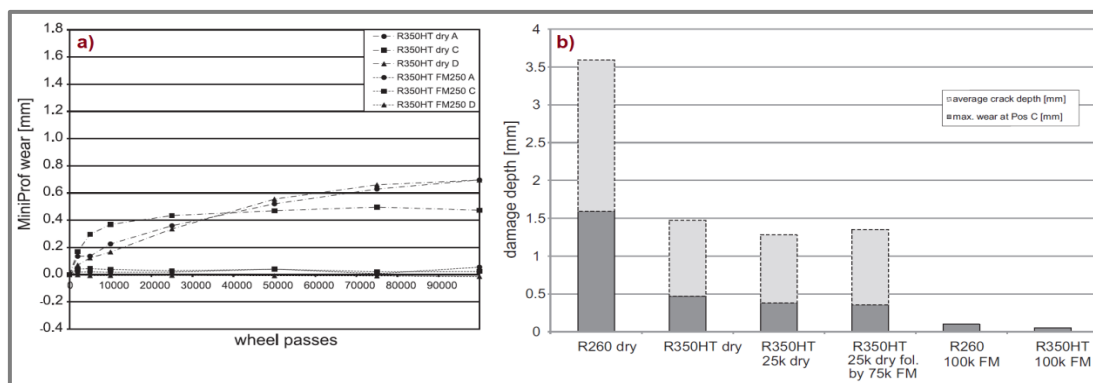
[31] STOCK, Richard, Donald T. EADIE, Dave ELVIDGE a Kevin OLDKNOW, 2011. Influencing rolling contact fatigue through top of rail friction modifier application – A full scale wheel–rail test rig study.

Článek navazuje na předchozí studii [30], přičemž hlavním cílem článku je vyšetřit vliv modifikátoru tření na míru opotřebení, plastické tečení a na kontaktní únavu kolejnice pro dva kolejnicové materiály. Prvním testovaným materiálem byla nejběžnější kolejnicová ocel R260. Druhým testovaným materiálem byla ocel s označením R350HT, která se vyznačuje vyšší ořezuvzdorností. Veškeré podmínky experimentu (rychlost, zatížení, typ modifikátoru tření aj.) byly totožné jako v předešlé publikaci [30].

Výsledky

Na základě porovnání obr. 3.10a a 3.12a je zřejmé, že ocel R350HT vykazuje výrazně nižší opotřebení než nepoužívanější kolejnicová ocel R260, a to jak při suchých podmínkách, tak při aplikaci modifikátoru tření.

Další experiment byl proveden za účelem porovnání odolnosti vůči kontaktní únavě u těchto dvou materiálů. Porovnání míry opotřebení a průměrné délky trhlin v závislosti na stavu kontaktu a materiálu kolejnice popisuje obr. 3.12b. Na základě těchto dat je zřejmé, že nejnižší opotřebení nastává u kolejnice R350HT při aplikaci modifikátoru tření. Dále bylo prokázáno, že při aplikaci modifikátoru tření (bez ohledu na materiál kolejnice) nebyly po ukončení testu (100 000 cyklů) pozorovány na hlavě kolejnice žádné trhliny. Kromě toho bylo zjištěno, že přítomnost modifikátoru tření na kolejnici 350HT nepodporuje další růst již existujících trhlin. Experimenty při suchých podmínkách potvrzují již zmíněnou vyšší ořezuvzdornost u oceli R350HT. Navíc tato ocel vykazuje taktéž vyšší odolnost vůči kontaktní únavě. Vyjma nejnižší míry opotřebení, vykazuje kolejnice 350HT s modifikátorem tření v kontaktu také nejnižší míru plastického tečení.



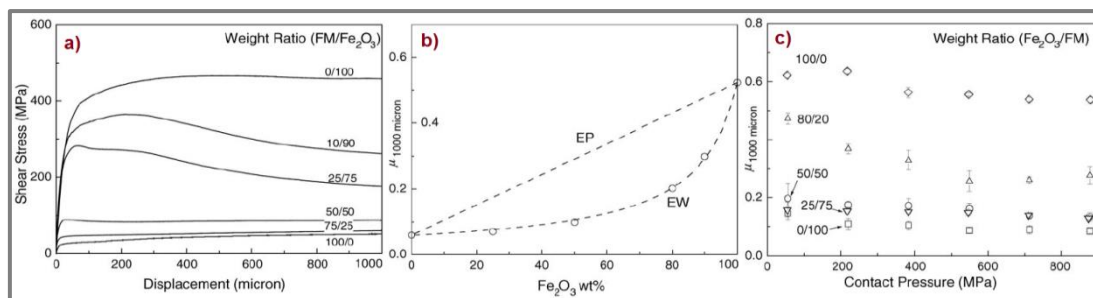
Obr. 3.12 Porovnání opotřebení pro kontakt s a bez modifikátoru tření u kolejnice R350HT (a), vliv modifikátoru tření a materiálu kolejnice na plastické tečení (b)

Závěr

Z výše uvedených výsledků je zřejmé, že ocel 350HT má skutečně vyšší otěruvzdornost a vyšší odolnost vůči kontaktní únavě. Z tohoto důvodu je vhodné tento materiál využívat zejména v extrémně namáhaných částech tratí, jako jsou traťové oblouky s malým poloměrem křivosti. Za nejdůležitější závěr článku lze však považovat především fakt, že testovaný modifikátor nepodporuje růst již existujících trhlin. Tento klad je pravděpodobně způsoben odpařením vodní báze z modifikátoru tření, takže prochází-li trhlina kontaktem, nedochází k jejímu růstu vlivem tlaku kapaliny. Právě tuto vlastnost lze označit za jednu z nejdůležitějších předností modifikátorů tření na vodní bázi.

[32] LU, X., J. COTTER a D.T. EADIE, 2005. Laboratory study of the tribological properties of friction modifier thin films for friction control at the wheel/rail interface.

Publikace se zabývá interakcí mezi modifikátorem tření, oxidem železitým a plastickým mazivem používaným pro mazání okolků (jeho hlavními složkami jsou: minerální olej, grafit a sulfid molybdeničitý). V případě modifikátoru tření se opět jedná o komerční modifikátor tření na vodní bázi. Oxid železitý byl do kontaktu aplikován v podobě prášku s průměrnou velikostí zrn $5 \mu\text{m}$. V práci byly využívány dvě experimentální zařízení, a to zařízení typu pin-on-disk a dvoudiskové zařízení. V případě prvního zařízení byly tedy experimenty prováděné pro čistý prokluz, zatímco u dvoudiskového zařízení byl využíván 3% skluz.



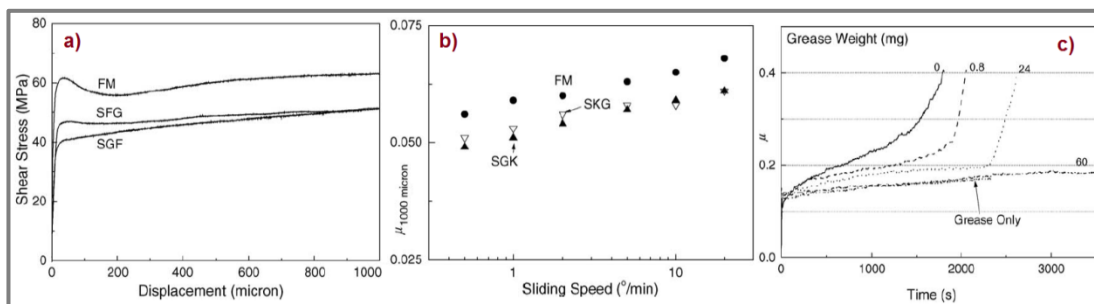
Obr. 3.13 Smykové napětí ve vrstvě v závislosti na skluzové vzdálenosti pro různé složení třecí vrstvy (a), součinitel adheze pro různé koncentrace oxidů (b), závislost součinitele adheze na kontaktním tlaku pro různé složení třecí vrstvy (c)

Výsledky

V první části práce byl využíván zejména pin-on-disk reometr, a to za účelem stanovení smykového napětí ve vrstvě v závislosti na koncentraci oxidu železitého a modifikátoru tření v třecí vrstvě (obr. 3.13a). Závěrem těchto experimentů je tvrzení, že nárůst koncentrace oxidu železitého v třecí vrstvě je doprovázen nárůstem smykového napětí. Dále bylo prokázáno, že je-li třecí vrstva tvořena pouze oxidem železitým, pak je třecí vrstva schopna přenášet extrémně vysoké smykové napětí (až 500 MPa). Obdobné výsledky byly již dříve publikované Houem [19].

Na obr. 3.13b je vykreslen součinitel adheze v závislosti na koncentraci oxidu železitého a modifikátoru tření ve vrstvě. Součástí tohoto grafu jsou dva modely popisující predikci adheze pro vícefázové složení vrstvy, a to konkrétně model EP (*Equal Pressure*) a model EW (*Equal Wear*). Experimentální data vykazují velmi dobrou shodu s modelem EW, který při predikci adheze bere v úvahu také odolnost částic vůči opotřebení. To znamená, že částice obsažené v modifikátoru tření mohou díky své vyšší odolnosti vůči opotřebení mít dominantní vliv na výslednou hodnotu adheze, a to i v případech, kdy je třecí vrstva tvořena převážně z oxidu železitého. Tato hypotéza je v souladu s experimentálními daty, protože i v případech, kdy je vrstva tvořena až 80 % oxidu železitého, nedochází k výraznému nárůstu adheze. V tomto rozsahu (0-80 % oxidu železitého) mají tedy na adhezi dominantní vliv především částice modifikátoru tření, které vykazují vyšší odolnost vůči opotřebení.

Graf na obr. 3.13c popisuje závislost součinitele adheze na kontaktním tlaku pro různé koncentrace oxidů a modifikátoru tření. Z grafů je patrné, že především pro třecí vrstvu s nízkým obsahem oxidu železitého je součinitel adheze relativně necitlivý na změnu kontaktního tlaku. Naopak, je-li třecí vrstva tvořena pouze oxidy, pak s rostoucím tlakem dochází k poklesu adheze. Tento trend také dokazuje, že při nárůstu tlaku dochází současně ke změně mechanismu deformace částic.



Obr. 3.14 Smykové napětí ve vrstvě v závislosti na skluzové vzdálenosti (a), závislost součinitele adheze na skluzové rychlosti (b), časový test pro různé koncentrace modifikátoru tření a plastického maziva ve vrstvě (c)

Další část práce byla zaměřena na kontaminaci kontaktu plastickým mazivem, které se využívá pro mazání okolků (obr. 3.14a). Během těchto experimentů byly rozlišovány dva případy, a to na SGF (Steel-Grease-FM) a SFG (Steel-FM-Grease). Tyto varianty se lišily v pořadí aplikace plastického maziva a modifikátoru tření. Z průběhů křivek je zřejmé, že po dosažení určité skluzové vzdálenosti vykazují křivky již stejnou hodnotu smykového napětí. V tomto případě došlo k poklesu smykového napětí resp. adheze přibližně o 30 %. Současně bylo zjištěno, že tyto kompozice vykazují pozitivní trend tření v celém rozsahu křivky (obr. 3.14b).

V závěru publikace byl proveden experiment na dvoudiskovém zařízení Amsler. Během tohoto experimentu bylo na jeden z disků aplikováno 2-3 mg modifikátoru tření, zatímco na funkční plochu druhého disku bylo aplikováno plastické mazivo v rozsahu 0-60 mg (obr. 3.14c). Na základě výsledných průběhů lze křivky rozdělit na tři části. V první části křivky dochází ke strmému nárůstu adheze (záběhová část křivky – formování třecí vrstvy). V druhé části křivky je již vytvořený kompaktní film, jehož výsledkem je takřka stabilní hodnota adheze v čase. V poslední části křivky naopak dochází opět k prudkému nárůstu adheze, což je způsobeno protržením třecí vrstvy neboli kontaktem kov-kov. Z grafů je patrné, že s nárůstem aplikovaného množství plastického maziva dochází především ke změně sklonu křivky v její druhé části (část relativně stabilní adheze) a současně dochází k prodloužení intervalu, kdy je dosaženo tzv. střední hodnoty adheze.

Závěr

Práce byla zaměřena na chování třecí vrstvy v závislosti na koncentraci oxidu železitého a modifikátoru tření. V první části práce bylo zjištěno, že smykové napětí, které je třecí vrstva schopna přenést, je závislé na koncentraci oxidu železitého ve vrstvě. Za nejvýznamnější závěr práce však lze považovat zjištění, že velikost adheze v kontaktu není závislá pouze na samotné koncentraci oxidu železitého resp. modifikátoru tření, ale jako nejvýznamnější parametr lze označit odolnost částic vůči opotřebení. Tento poznatek je důležitý především pro návrh modifikátoru tření a pro volbu intervalu aplikace. Dalším významným závěrem je zjištění, že přítomnost plastického maziva v kontaktu nemusí nutně vést na nepříznivé hodnoty adheze, ale naopak v určitém množství může mít plastické mazivo dokonce pozitivní vliv na stabilizaci adheze v kontaktu.

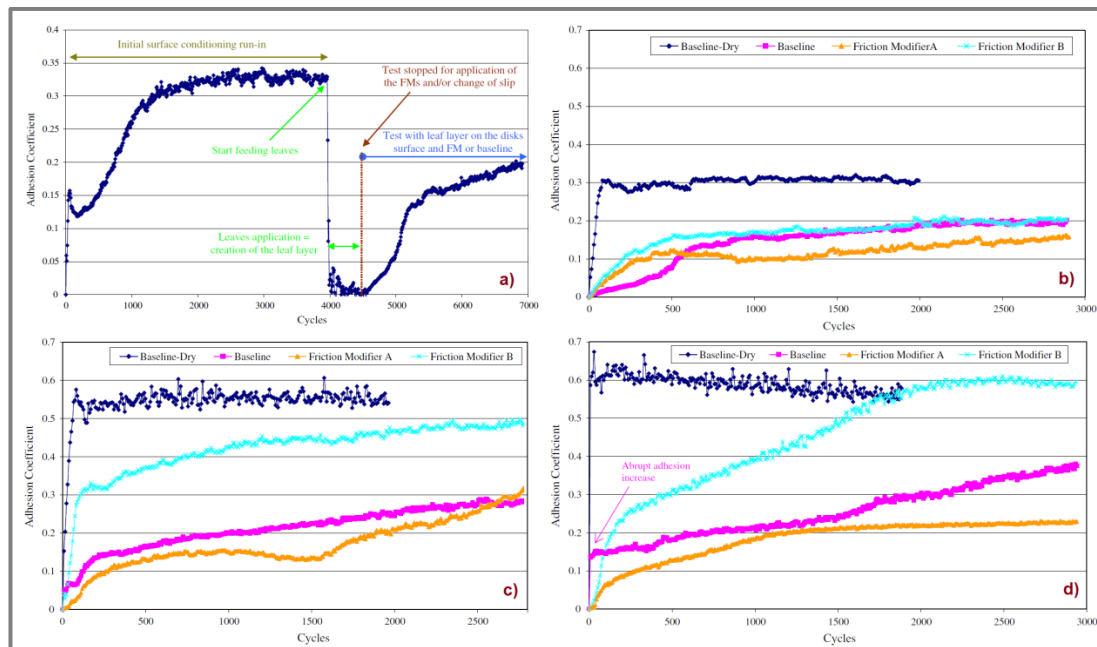
[33] LI, Z., O. ARIAS-CUEVAS, R. LEWIS a E. A. GALLARDO-HERNÁNDEZ, 2009. Rolling–Sliding Laboratory Tests of Friction Modifiers in Leaf Contaminated Wheel–Rail Contacts.

Práce je zaměřena na porovnání dvou komerčně dostupných modifikátorů tření na vodní bázi pro listím kontaminovaný kontakt. Experimenty byly provedeny na dvoudiskovém zařízení SUROS při maximálním Hertzově tlaku 1,2 GPa, rychlosti 1 m/s a pro různé hodnoty skluzu resp. skluzové rychlosti. Po ukončení experimentu byla pomocí FTIR spektroskopie analyzována třecí vrstva na povrchu disků. Část práce byla také věnována popisu složení modifikátoru tření a laserové analýze pevných částic obsažených v těchto modifikátorech.

Výsledky

Na obr. 3.15a je znázorněn kompletní průběh časového testu, ve kterém jsou popsány všechny fáze experimentu. První fází experimentu bylo provedení záběhu, jehož účelem je odstranění oxidických vrstev na obvodu disku. Po dosažení hodnot součinitele adheze odpovídající suchému tření bylo do kontaktu aplikováno 25 g suchého listí, které během několika cyklů vytvořilo na obvodu disků kompaktní třecí vrstvu, která způsobila pokles adheze až na hodnotu 0,01. Po zformování této vrstvy byl experiment zastaven a na obvod disků byl ručně rozetřen modifikátor tření. Po dokončení aplikace následovala nejvýznamnější část experimentu, při které byla

sledována odezva modifikátoru tření a třecí vrstvy na vývoj adheze v čase. Tento experiment byl proveden pro čtyři kontaktní situace (suchý kontakt, kontakt s listím, kontakt s listím a FMA modifikátorem, kontakt s listím a FMB modifikátorem) a pro tři různé velikosti skluzové rychlosti (obr. 3.14b-d).

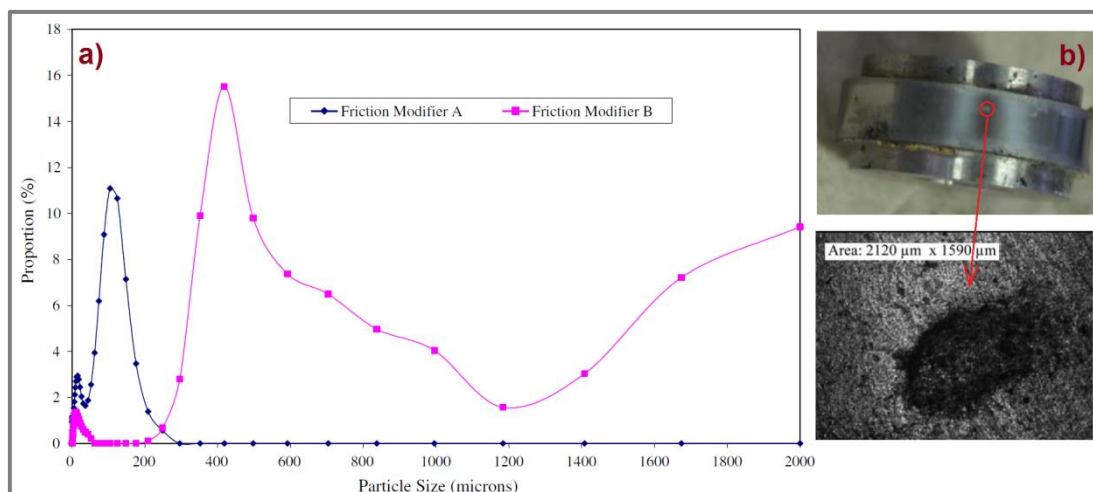


Obr. 3.15 Kompletní průběh testu: záběh, formování třecí vrstvy z listí a odezva vrstvy (a), časové testy pro čtyři kontaktní situace a tři hodnoty skluzu: 0,5 % (b), 1 % (c), 2 % (d)

Při experimentech bylo zjištěno, že vyšší hodnoty skluzu způsobují rychlejší prolomení a následné odstranění třecí vrstvy z kontaktu. Dále bylo zjištěno, že FMB modifikátor tření vykazoval nejrychlejší nárůst součinitele adheze. Nicméně v tomto případě nebyla pozorována tendence saturace adheze na hodnotách „středního“ tření. Vůbec nejpriznivější chování FMB modifikátoru bylo pozorováno při 1% skluzu, kdy prakticky ihned po jeho aplikaci došlo k dostatečnému nárůstu adheze z hlediska trakce¹, a současně byla tato hodnota příznivá i z hlediska opotřebení. FMA modifikátor vykazoval ideální chování při 2% skluzu, kdy bylo dosaženo střední úrovně tření (0,2), které zajišťuje dostatečnou trakci a nízkou míru opotřebení.

Pomocí laserové analýzy bylo získáno rozložení velikosti částic obsažených v modifikátoru FMA a FMB (obr. 3.16a). Z analýzy vyplývá, že FMB modifikátor tření obsahuje několikanásobně větší částice než FMA modifikátor. Současně s velikostí částic byla vyhodnocena také tvrdost částic. V případě modifikátoru FMB se jedná o kombinaci ocelových částic a zrn písku, u kterých byla naměřena tvrdost 320 HV resp. 1 500 HV. Tvrdost částic v FMA modifikátoru nebylo možné vzhledem k řádově menším rozměrům vyhodnotit. Kromě tvrdosti částic byla také vyhodnocena tvrdost povrchové vrstvy (po aplikaci listí), která v závislosti na stlačení vrstvy dosahovala průměrných hodnot 47 a 68 HV. Tloušťka této vrstvy se pohybovala v rozmezí 3-13 μm .

¹ Minimální hodnoty adheze z hlediska trakce a brzdění se liší v závislosti na typu soupravy. Pro dostatečnou trakci se však běžně udává hodnota 0,2 a pro brzdění 0,09.



Obr. 3.16 Analýza velikosti částice FMA a FMB modifikátoru (a), denty na povrchu disků způsobené částicemi FMB modifikátoru (b)

Na základě výše popsaných výsledků bylo konstatováno, že právě velikost a tvrdost částic jsou dva nejvýznamnější parametry z hlediska rychlosti nárůstu adheze. Nicméně výrazně vyšší tvrdost částic v porovnání s tvrdostí třecí vrstvy způsobuje denty na povrchu součástí (obr. 3.16b), které mohou vést k rozvoji kontaktní únavy. V případě FMA modifikátoru tření nebyla pozorována žádná výrazná degradace povrchu disků.

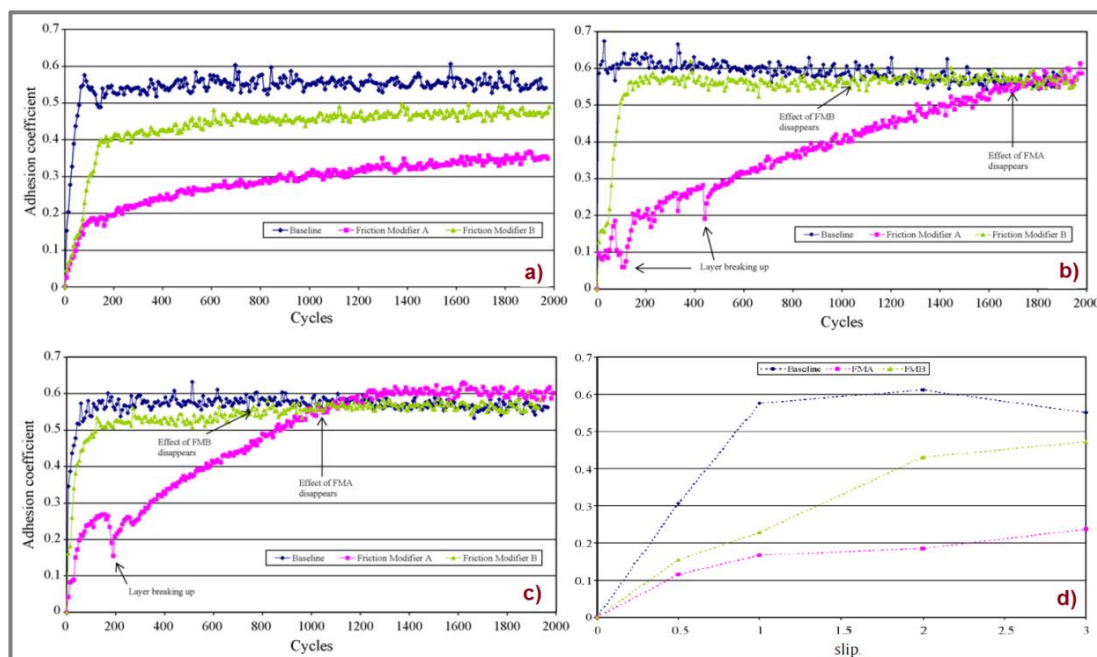
Závěr

Hlavní význam této práce představuje porovnání dvou modifikátorů tření z hlediska průběhu adheze v čase a z hlediska degradace povrchu disků, která je způsobena pevnými částicemi modifikátorů tření. Z výsledků je patrné, že velikost a tvrdost pevných částic v modifikátoru by měla být volena s ohledem na tvrdost třecí vrstvy, aby bylo dosaženo kompromisu mezi trakcí a opotřebením. Příliš vysoká tvrdost částic sice zajistí rychlé a spolehlivé odstranění třecí vrstvy, ale současně vede k významné degradaci povrchu. Naopak částice s nižší tvrdostí nemusí být schopny odstranit třecí vrstvu, což sice nemusí nutně vést k nízkým hodnotám adheze, ale mohou vzniknout problémy související s detekcí vlaku. Velikost částic hraje důležitou roli vzhledem k tloušťce třecí vrstvy. Příliš malé částice mohou zůstat „uvězněny“ v třecí vrstvě, čímž se stávají neefektivními. Další studie by tedy mohla být zaměřená na optimalizaci tvrdosti a velikosti částic modifikátoru s ohledem na složení třecí vrstvy (listí, oxidy, prachové částice, voda, plastické mazivo aj).

[34] ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI, R. LEWIS a E.A. GALLARDO-HERNÁNDEZ, 2010. Rolling–sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel–rail contacts.

Článek navazuje na předešlou publikaci Lia [33]. V práci jsou využívány stejné modifikátory tření, přičemž cílem této studie je popsat jejich chování v suchém a vodou kontaminovaném kontaktu. Současně je v publikaci studováno opotřebení.

Experimenty byly provedeny s využitím stejného zařízení a při stejných provozních podmínkách jako v předešlém případě [33].



Obr. 3.17 Časové testy pro tři kontaktní situace a tři hodnoty skluzu 1 % (a), 2 % (b), 3 % (c), trakční křivky pro tři kontaktní situace

Výsledky

První část článku byla zaměřena na chování modifikátorů tření v suchém kontaktu. Modifikátory tření byly testovány pro čtyři hodnoty skluzu (obr. 3.17a-c)². Na základě těchto průběhů byly následně sestrojeny adhezni křivky (obr. 3.17d). Hodnoty pro vykreslení adhezni křivek byly odečteny z časových testů, a to vždy po 80 cyklech od spuštění testu. Po tomto intervalu by již měla být zformována kompaktní vrstva modifikátoru tření a zároveň by vrstva neměla být ještě porušena vlivem vysoké skluzové vzdálenosti. Z průběhu časových testů bylo zjištěno, že pouze při 0,5% a 1% skluzu vykazují testované modifikátory střední hodnoty tření. Při vyšších skluzech dochází k rychlejšímu odstranění modifikátorů z kontaktu, což vede až na hodnoty suchého tření. Z průběhu trakčních křivek vyplývá, že oba testované modifikátory vykazují pozitivní tření, což potlačuje vznik roll-slipu resp. vlnkovité opotřebení a zvýšenou hlukovou emisi. Stejně jako v předešlé publikaci [33] vede aplikace FMA modifikátoru na nižší hodnoty adheze.

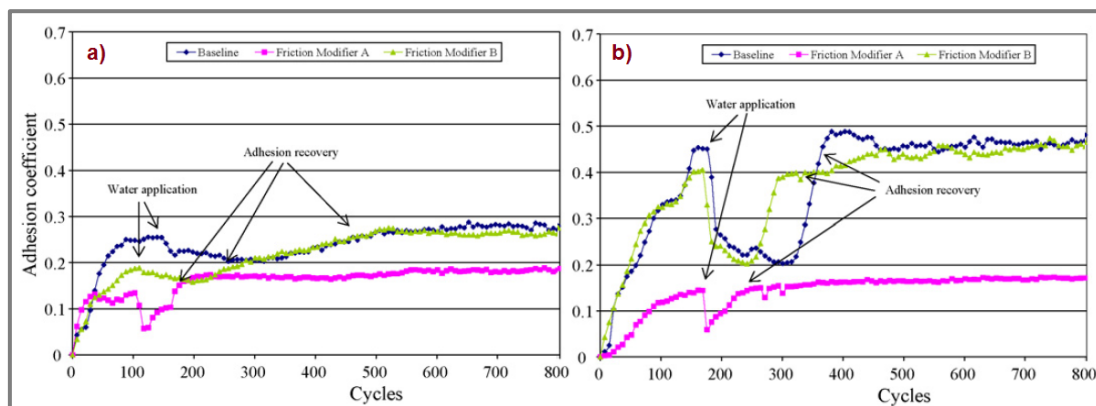
Tab. 3.3 Porovnání hmotnostních úbytků

	Suchý kontakt		FMA		FMB	
	kolo	kolejnice	kolo	kolejnice	kola	kolejnice
m_{loss} (mg)	114,9	90,1	30,3	28,4	109,6	70,5

Další část práce se zabývala degradací povrchu disků, a to jak při suchých podmínkách, tak při aplikaci obou modifikátorů. Celková délka experimentu byla

² Na obr. 3.14 nejsou vykresleny průběhy při 0,5% skluzu.

12 000 cyklů, přičemž během experimentů byla skokově měněna velikost skluzu v rozmezí 0,5-3 %. Suchý kontakt vykazoval po tomto experimentu známky vlnkovitého opotřebení, a současně byl na povrchu detekován oxid železitý a malé jamky, které souvisí s tzv. *ratchettingem*³. Při aplikaci FMA modifikátoru byly taktéž pozorovány jamky související s *ratchettingem*, nicméně v podstatně menším rozsahu. Tvrdá zrna písku obsažená v modifikátoru FMB vytvořila na povrchu disků důlky a rýhy, což způsobilo až třikrát vyšší hodnotu opotřebení v porovnání s FMA modifikátorem (tab. 3.3).



Obr. 3.18 Časové testy při přítomnosti vody pro tři kontaktní situace 0,5 % (a), 1 % (b)

V další části práce byla kromě modifikátorů aplikována do kontaktu voda. Před zahájením testu byl na disky nanesen modifikátor tření, zatímco voda (0,04 g) byla aplikována až po 20-50 cyklech. Cílem testu bylo zaznamenat dobu od okamžiku aplikace vody po okamžik, kdy adheze dosáhne své původní hodnoty (před aplikací vody). Tento čas je v práci označován jako tzv. „*recovery time*“. Z křivek na obrázku 3.18 je patrné, že FMA modifikátor tření vykazoval nejrychlejší čas obnovy, avšak ihned po aplikaci vody dosahoval adheze v kontaktu kriticky nízkých hodnot z hlediska trakce a brzdění. Dále bylo pozorováno, stejně jako při kontaktu s listím [33], že při navyšování skluzu v kontaktu docházelo k rychlejšímu odstranění vody z kontaktu, což mělo za následek rychlejší nárůst adheze.

Závěr

Obě výše uvedené publikace byly zaměřeny na porovnání dvou komerčně dostupných modifikátorů tření. Vzhledem k tomu, že hodnoty adheze naměřené v laboratorních podmínkách se mohou značně lišit od hodnot na trati, je nezbytné tyto testy brát pouze jako komparační bez ohledu na absolutní hodnoty adheze. V takovém případě lze říct, že z hlediska finančních nákladů souvisejících s opotřebením a s aplikací samotných modifikátorů tření je vhodnější FMA modifikátor. Tento modifikátor v obou výše popsáních případech vedl na střední hodnoty adheze (v závislosti na skluzu), což znamená, že doba, po kterou je modifikátor tření v kontaktu aktivní, je výrazně vyšší než v případě FMB modifikátoru. Toto pozitivní chování je způsobeno pravděpodobně pevnější maticí mezi částicemi, vhodnou velikostí a tvrdostí pevných částic. Navíc FMA modifikátor

³ Ratchetting neboli cyklické tečení materiálu je proces při kterém dochází ke kumulaci plastické deformace, a to až do vyčerpání plastických vlastností materiálu.

obsahuje polymerní částice, které zajišťují lepší přilnavost na povrchu disků, což znamená, že je odolnější vůči účinkům skluzu a vody v kontaktu. Střední úroveň adheze logicky vedly také k nižšímu opotřebení a k méně závažným povrchovým vadám, které by mohly vést až ke kontaktní únavě materiálu.

Druhý testovaný modifikátor vykazoval chování podobné spíše pískování (rychlý nárůst adheze bez snahy saturace na hodnotách střední úrovně adheze a výrazná míra opotřebení). V porovnání s pískováním má však tento modifikátor jednu výraznou přednost, a to pozitivní průběh adhezni křivky (obr. 3.17d), což potlačuje výskyt roll-slipu. Tento modifikátor tření by bylo vhodné aplikovat zejména v místech, kde jsou zvýšené požadavky na hodnoty adheze nebo pro rychlé odstranění třecí vrstvy tvořené listím.

[35] LEWIS, S. R., R. LEWIS, U. OLOFSSON, D. T. EADIE, J. COTTER a X. LU, 2013. Effect of humidity, temperature and railhead contamination on the performance of friction modifiers: Pin-on-disk study.

Cílem článku je popsat chování modifikátoru tření na vodní bázi v závislosti na změně klimatických podmínek (teplota a vlhkost vzduchu) a v závislosti na koncentraci oxidů na trati. Experimenty byly provedeny na zařízení typu pin-on-disk při kontaktním tlaku 900 MPa a skluzové rychlosti 0,01 m/s.

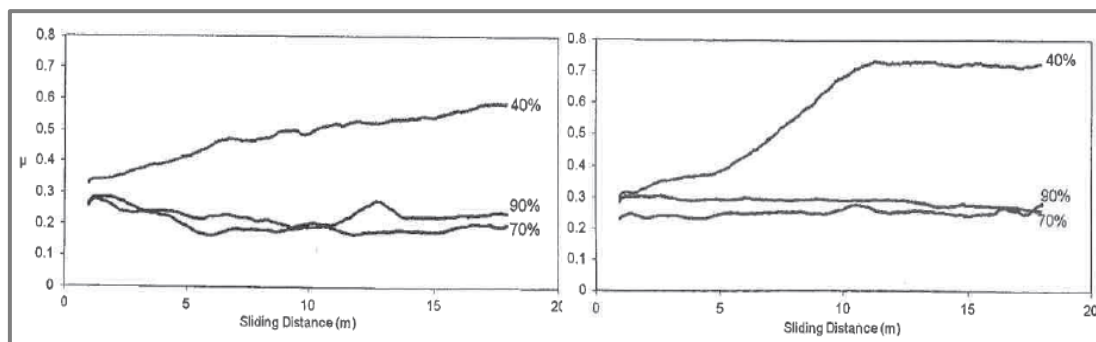
Výsledky

První část experimentů probíhala při konstantní teplotě 10 °C a při 35% koncentraci oxidu železa. Během těchto experimentů byla měněna vzdušná vlhkost 40, 70 a 90 % a typ oxidu, konkrétně oxid železitý a oxid železatoželezitý. Experimenty prokázaly (obr. 3.19), že při zvyšování vzdušné vlhkosti dochází k výraznému poklesu adheze bez ohledu na typ oxidu. V případě 40% vlhkosti nabývala adheze 0,6 a 0,75 v závislosti na typu oxidu v kontaktu, zatímco pro 70 a 90% vlhkosti došlo v obou případech k poklesu adheze na hodnotu přibližně 0,25⁴. Při nadměrné vlhkosti vzduchu dochází k výraznému zpomalení odpařování vody z modifikátoru tření, což vede na stabilní hodnotu adheze. Na základě těchto výsledků byly provedeny další experimenty při 45, 55 a 65% vlhkosti vzduchu, a to za účelem nalezení hranice, při které dochází k výraznému poklesu adheze. Pro všechny případy však adheze nabývala přibližně konstantní hodnoty 0,25, která je mírně vyšší než v případě s modifikátorem tření, avšak bez oxidů. Závěrem tohoto měření je tedy tvrzení, že k výraznému poklesu adheze dochází při vlhkosti mezi 40 a 45 %.

Druhá série experimentů byla provedena při fixní hodnotě vzdušné vlhkosti 40 % a pouze při přítomnosti oxidu železitého a modifikátoru tření. Při experimentech byla v tomto případě měněna koncentrace oxidu a teplota (obr. 3.20). Z průběhu křivek je zřejmé, že při 25% koncentraci oxidu železitého dochází při nárůstu teploty k poklesu adheze v kontaktu, zatímco u 40 % koncentrace je adheze již takřka necitlivá na změnu teploty. Obecně však lze konstatovat, že navyšování koncentrace oxidu železitého ve vrstvě vede na nižší a stabilnější hodnoty adheze, což může být způsobeno schopností oxidů bránit rychlému vypařování vody

⁴ V případě, že byl v kontaktu přítomen pouze modifikátor tření (bez oxidů) dosahovala adheze hodnoty 0,24.

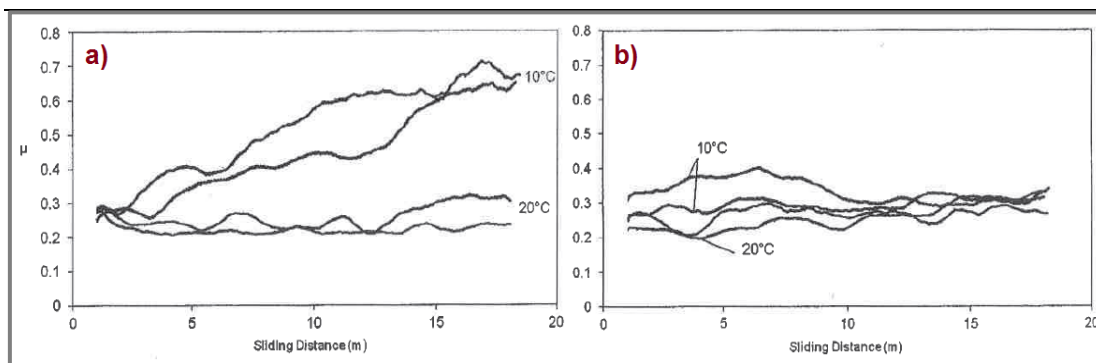
z modifikátoru tření. Během dalších experimentů byla nalezena hraniční hodnota koncentrace oxidů, po které již dochází k prudkému poklesu adheze. V případě teploty 10 °C byla tato koncentrace mezi 37 a 40 % oxidu železitého.



Obr. 3.19 Závislost adheze na vzdušné vlhkosti pro 35% koncentraci oxidu železitého ve vrstvě (a) a pro 35% koncentraci oxidu železnatoželezitého (b)

Závěr

V práci byl objasněn vliv teploty a vzdušné vlhkosti na adhezi v kontaktu při přítomnosti modifikátoru tření a dvou nejběžněji se vyskytujících oxidů železa. Experimenty prokázaly, že vzdušná vlhkost je jedním z klíčových parametrů ovlivňující adhezi, protože nadměrná vlhkost je doprovázena výrazným poklesem adheze. Dále bylo prokázáno, že vyšší koncentrace oxidů ve vrstvě vede na stabilnější a nižší hodnoty adheze. Přítomnost obou testovaných oxidů železa ve vrstvě zvyšuje adhezi v kontaktu (v porovnání s variantou, kdy je v kontaktu pouze modifikátor tření), přičemž vyšší nárůst byl pozorován v případě oxidu železnatoželezitého.

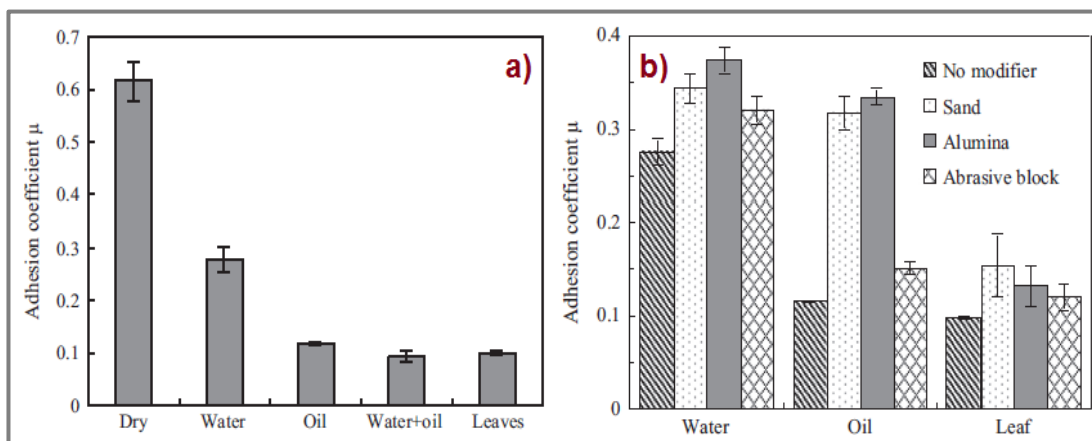


Obr. 3.20 Časový experiment při 40% vzdušné vlhkosti a při 25% (a) a 45% (b) koncentraci oxidu

[36] WANG, W.J., T.F. LIU, H.Y. WANG, Q.Y. LIU, M.H. ZHU a X.S. JIN.
Influence of friction modifiers on improving adhesion and surface damage of wheel/rail under low adhesion conditionstead

Cílem článku je porovnat vliv tří modifikátorů tření na adhezi, opotřebení a poškození povrchu kontaktních těles. Tyto experimenty byly provedeny pro tři

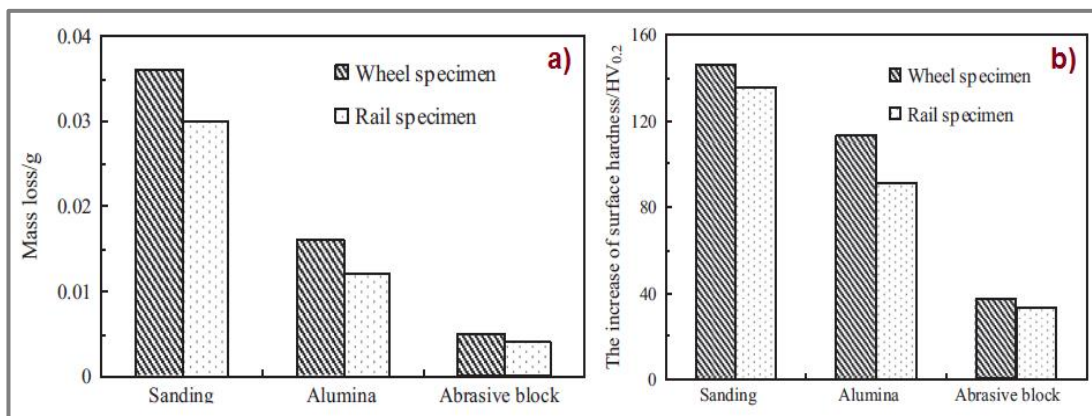
případy kontaminace kontaktu (olej, voda a listí). V práci jsou jako modifikátory tření používány částice oxidu hlinitého⁵ o průměru částic 100 μm , minerální částice, zejména pak částice křemene⁶ o průměru 500 a 1300 μm a abrasivní blok, jehož základem je syntetická pryskyřice. Experimenty byly provedeny na dvoudiskovém zařízení (průměr disků 40 a 36,7 mm) při kontaktním tlaku 1,2 GPa, rychlosti 0,76 m/s a při 1,95% skluzu.



Obr. 3.21 Součinitel adheze pro různé stavy kontaktu (a), porovnání účinnosti modifikátorů tření pro různé stavy kontaktu (b)

Výsledky

Nejdříve byly v práci experimentálně stanoveny vlivy nejběžnějších kontaminantů na adhezi (obr. 3.22a). Výsledky experimentů ukázaly, že nejnížší adheze nastává při kontaminaci kontaktu emulzí tvořené vodou a olejem, což je v souladu s předchozími publikacemi. Následně byly pro stejné podmínky testovány vlivy jednotlivých výše zmíněných modifikátorů tření (obr. 3.22b). Z grafu je patrné, že oxid hlinitý vykazoval nejvyšší nárůst adheze pro případy, kdy byl kontakt kontaminován vodou nebo olejem. Naopak minerální částice vykazovaly nejvyšší adhezi v případě kontaktu s listím. Jako nejméně vhodný modifikátor se jevil abrasivní blok, který byl efektivní pouze v případě, kdy byl kontakt kontaminovaný vodou.



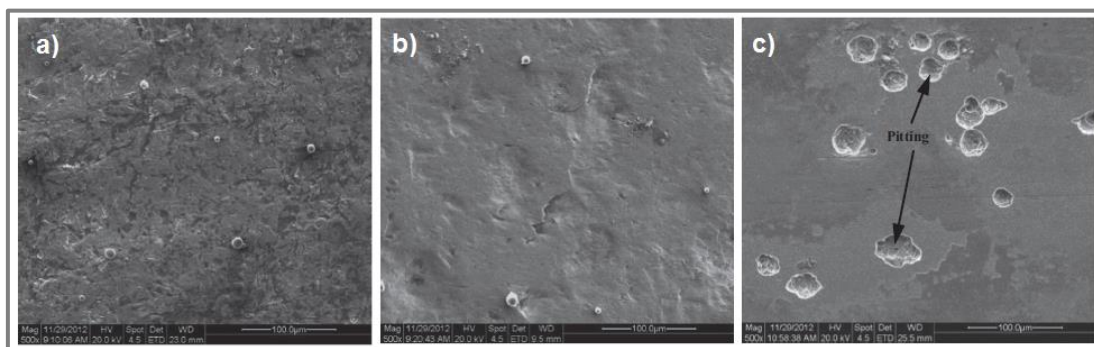
Obr. 3.22 Míra opotřeby (a) a deformační zpevnění (b) v závislosti na použitém modifikátoru tření

⁵ Udávaná tvrdost podle Mohsovy stupnice: 9.

⁶ Udávaná tvrdost podle Mohsovy stupnice: 7.

Další část publikace se zabývala vlivem těchto modifikátorů tření na míru opotřebení a na míru deformačního zpevnění (obr. 3.23)⁷. Nejvyšší míra opotřebení (stejně jako nejvyšší míra deformačního zpevnění) byla pozorována při aplikaci minerálních částic, což je způsobeno vhodnou kombinací velikosti a tvrdosti těchto částic. Nejnižší opotřebení vykazoval abrasivní blok, což je v souladu s nejnižšími hodnotami adheze během experimentu.

Obr. 3.23 znázorňuje míru poškození povrchu po aplikaci testovaných modifikátorů tření. Po aplikaci minerálních částic byl na povrchu disků pozorován především *spalling*. V případě částic oxidu hlinitého se jednalo především o abrasivní opotřebení, nicméně zde byly detekovány také náznaky kontaktní únavy. Naopak po aplikaci abrasivního bloku byl pozorován velmi výrazný *pitting*.



Obr. 3.23 Povrch disků po aplikaci minerálních částic (a), oxidu hlinitého (b) a abrasiv. bloku (c)

Závěr

Článek byl zaměřen na hodnocení tří typů modifikátorů tření. Jako nejméně vhodný modifikátor tření se jevil abrasivní blok (syntetická pryskyřice), který nevedl k požadovanému nárůstu adheze, a to zejména při přítomnosti oleje nebo listí v kontaktu. Navíc aplikace abrasivního bloku vedla k rychlému rozvoji kontaktní únavy – pittingu. Naopak nejpříznivější výsledky vykazovaly částice oxidu hlinitého. V tomto případě bylo dosaženo požadovaného nárůstu adheze, a současně nebyla pozorována vysoká míra opotřebení, a to i přes vyšší tvrdost částic než v případě minerálních částic. Na základě těchto testů bylo prokázáno, že tvrdost částice není jediným faktorem ovlivňující adhezi a opotřebení součástí, ale důležitými faktory jsou také velikost a množství aplikovaných částic.

⁷ Míra opotřebení pro případ disku simulující kolejnici je vždy nižší než v případě druhého disku, což je způsobeno především vyšší tvrdostí.

4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ ŘEŠERŠE

Poznatky získané z výše uvedených publikací lze rozčlenit do dvou oblastí. První oblastí jsou experimentální studie prováděné na reálné trati [26-29], přičemž středem zájmů těchto studií je aplikace modifikátorů tření za účelem redukce vlnkovitého opotřebení a redukce hlukové emise. Tyto experimentální studie prokázaly schopnost modifikátoru tření redukovat popř. úplně předcházet vlnkovitému opotřebení. Současně bylo prokázáno, že při aplikaci modifikátoru tření dochází k výraznému poklesu hlukové emise. Vzhledem k množství publikací a skutečnosti, že tyto výsledky byly získány na základě experimentů na reálné trati lze konstatovat, že se jedná o dobře zmapovanou vědeckou oblast.

Druhou oblastí experimentálního výzkumu jsou studie prováděné v laboratorních podmínkách, přičemž v tomto případě se jedná o rozsáhlejší výzkumnou oblast. První část těchto publikací je zaměřená na popis utváření třecí vrstvy mezi tělesy a na její chemické a reologické vlastnosti [6,19,20-22]. Právě informace v těchto článcích vedly k myšlence cílené modifikace tření, a to nejen z hlediska absolutních hodnot adheze ale také z hlediska změny průběhu trakční křivky [25,26]. Právě v těchto publikacích byl verifikován vliv modifikátoru tření na pozitivní sklon trakční křivky za bodem saturace. Další oblast výzkumu byla směřována na studium kontaktní únavy a opotřebení [30,31]. Pravděpodobně nejrozsáhlejší oblastí, výzkumu jsou publikace zaměřené na hodnocení „výkonnosti“ či efektivity modifikátoru tření v závislosti na změně provozních parametrů a na okolních podmínkách [32-36].

Na základě provedené rešerše v oblasti modifikace tření kontaktu kola a kolejnice byly zformulovány následující důležité závěry:

- Primární funkce modifikátoru tření v kontaktu kola a kolejnice spočívá v dosažení střední úrovně adheze a pozitivního trendu trakční křivky za bodem saturace [27,29].
- Pozitivní trend trakční křivky za bodem saturace potlačuje vznik stick-slipu, který je iniciátorem vlnkovitého opotřebení [27-29].
- Kritický faktor z hlediska funkce modifikátoru tření představuje třecí vrstva, především pak reologické a mechanické vlastnosti této vrstvy [6,19,20-22,32], která je tvořena oxidy, vodou, mazivem, listím apod.
- Modifikátor tření je tvořen základní bází (voda nebo olej), pojivem a pevnými částicemi pro modifikaci tření. Zpravidla je do této kompozice přidáváno také pevné mazivo a další přísady (smáčedlo, konzervanty, nerezové částice aj.) [23,24].
- Z hlediska rychlosti nárůstu adheze v kontaminovaném kontaktu jsou klíčovými parametry modifikátoru tření především velikost, tvrdost a otěruvzdornost částic pro modifikaci tření [33-35].
- Modifikátory tření na vodní bázi nepodporují růst trhlin a redukují opotřebení a sklon ke kontaktní únavě [30,31,36].
- Z hlediska okolních podmínek má na funkci modifikátoru tření významný vliv především vzdušná vlhkost, míra oxidace povrchu a typ oxidů [35].

I přes neoddiskutovatelný přínos výše popsaných publikací je však nutné zmínit, že v případě převážné části těchto publikací se jedná o aplikovaný výzkum a často tak tyto publikace neposkytují vysvětlení některých základních jevů. Důkazem tohoto je i skutečnost, že modifikátory tření využívané v těchto publikacích jsou zpravidla již komerčně používané produkty, takže v publikacích není studováno složení a vliv jednotlivých složek modifikátoru tření na adhezi či opotřebení. Navíc vzhledem k dominantnímu postavení společnosti LB Foster je v těchto publikacích používán takřka výhradně pouze jeden modifikátor tření⁸, což je dáno také kooperací této společnosti s předními světovými univerzitami a výzkumnými institucemi.

V současné době nejsou tedy publikovány články, jejichž předmětem by bylo objasnění vlivu složení modifikátoru tření z hlediska trakce, opotřebení či z hlediska schopnosti utváření třecí vrstvy v kontaktu. Současně jsou také až na pár výjimek v publikacích opomíjeny modifikátory tření na olejové bázi, které již také mají nezanedbatelné zastoupení na trhu. V porovnání s modifikátory tření na vodní bázi obsahují tyto modifikátory tření místo minerálních částic zpravidla částice kovové, což v kombinaci s olejovou bází vede na zcela odlišné chování těchto modifikátorů tření v kontaktu.

⁸ Jedná se o modifikátor tření na bázi vody, který je prodáván pod obchodním názvem Keltrack.

5 VYMEZENÍ CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

5.1 Vymezení cíle práce

Podstatou dizertační práce je experimentální studium modifikátorů tření ve valivě-skluzovém kontaktu. Cílem dizertační práce je experimentálně objasnit závislost složení modifikátorů tření na trakční vlastnosti třecí vrstvy, a to na rozhraní mezného a smíšeného režimu mazání na Stribeckově křivce.

Realizace cíle dizertační práce je podmíněna následujícími dílčími cíli:

- modifikace stávající experimentální aparatury,
- provedení ověřovacích experimentů pro různé stavy kontaminace kontaktu (voda, mazivo aj.) a jejich porovnání s již publikovanými výsledky za účelem verifikace experimentální metody,
- provedení série experimentů s komerčně dostupnými modifikátory tření za účelem stanovení vhodné metodologie experimentu,
- návrh a příprava vlastních kompozic modifikátorů tření,
- posouzení vlivu jednotlivých složek modifikátorů tření na trakci a opotřebení na hranici mezného a smíšeného režimu mazání,
- vyhodnocení výsledků, jejich porovnání s dosud publikovanými výsledky a jejich zobecnění aplikovatelné na reálnou trať.

Jak bude zmíněno dále v textu, dizertační práce je součástí výzkumného projektu, což znamená, že výše popsané dílčí cíle budou v průběhu práce doplňovány s ohledem na očekávané výstupy tohoto projektu. Předchozí tvrzení reflektuje také plán publikací v podkapitole 5.4.

5.2 Vědecká otázka a pracovní hypotéza

Vědecká otázka a pracovní hypotézy vycházejí z analýzy poznatků, které byly získány na základě kritické rešerše.

Vědecká otázka je dána následovně:

„Jaká je závislost mezi složením modifikátoru tření a trakčními vlastnostmi třecí vrstvy na hranici mezného a smíšeného mazání Stribeckovy křivky?“

Pracovní hypotézy:

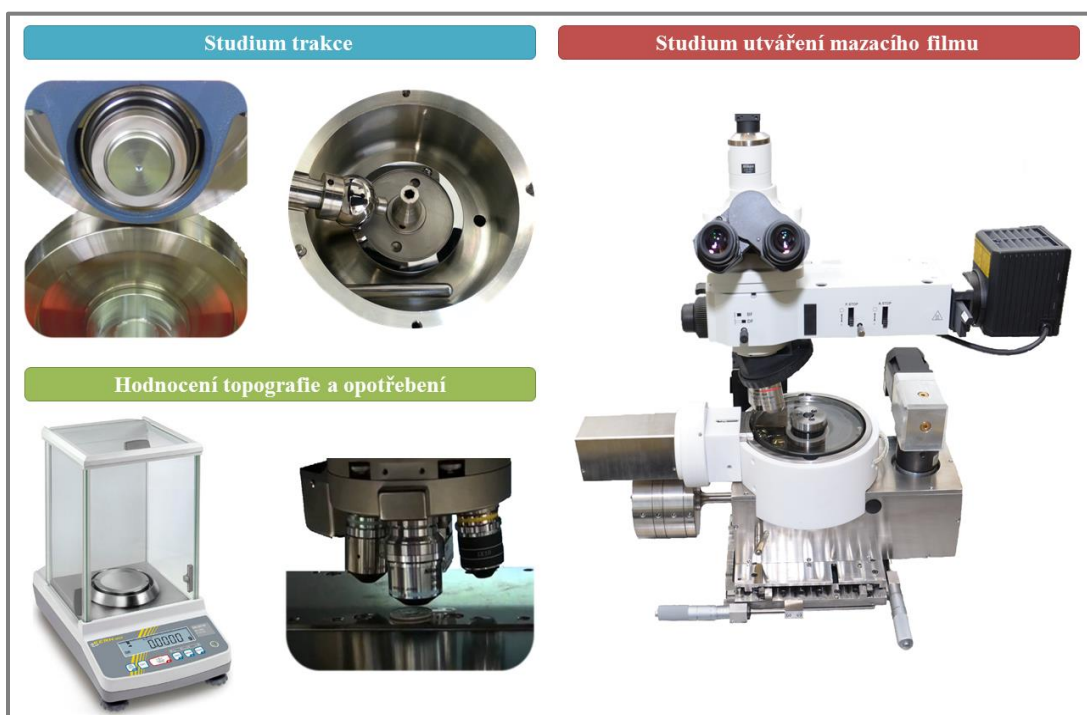
- *„V případě modifikátorů tření na olejové bázi je chování kontaktu na pomezí mezného a smíšeného režimu mazání ovlivňováno zejména viskózním chováním kapaliny, zatímco u modifikátorů tření na vodní bázi se chování kontaktu odvíjí od vlastností tuhých těles modifikátoru tření.“*

- „Hodnota trakce a míra opotřebení je podmíněna zejména velikostí, tvrdostí a smykovou pevností pevných částic vstupujících do kontaktu.“
- „Nárůst trakce v kontaktu je doprovázen lineárním nárůstem smykového napětí v třecí vrstvě.“
- „V poměru k velikosti kontaktní oblasti existuje mezní hodnota velikosti částic, při které již částice nevstupují do kontaktu.“

5.3 Způsob řešení a použité metody

5.3

Cílem práce je najít odpověď na vědeckou otázku, přičemž pro nalezení odpovědi je nezbytné provést sérii experimentů. Při experimentech bude docházet k pozorování modelové situace a budou zde aplikovány empirické metody. Na základě experimentů proběhne analýza získaných dat a následná interpretace výsledků. Při tomto procesu bude využíván tzv. *Kolbův cyklus*, pro který je charakteristické, že při vyhodnocování získaných dat a formulaci pracovního postupu dochází ke střídání metody indukce a dedukce.



Obr. 5.1 Experimentální aparatura

V první fázi experimentálního výzkumu budou studovány trakční vlastnosti komerčně dostupných modifikátorů tření. Za tímto účelem bude využíváno dvoudiskové zařízení (detailně popsáno v kap. 6) a komerční tribometr Mini-traction-machine (dále MTM), který je zobrazen na obr. 5.1. V případě dvoudiskového zařízení je možné simulovat kontaktní tlak až 1 GPa a současně obvodovou rychlost až 6 m/s. Předností tohoto zařízení je zejména stabilita kontaktní oblasti, která je docílena liniovým kontaktem (viz kapitola 6.1). Současně konstrukce umožňuje

měnit úhel náběhu, a to v rozmezí $\pm 6^\circ$, čímž lze simulovat průjezd soupravy traťovým obloukem. V případě MTM v konfiguraci ball-on-disk je možné simulovat maximální Hertzův tlak až 1,7 GPa. Nemalou předností tohoto zařízení je také možnost provádět experimenty v rozsahu teplot od -20 do 150°C .

Během druhé etapy řešení dizertační práce bude studována závislost složení modifikátoru tření na trakční chování třecí vrstvy. Pro realizaci těchto experimentů bude opět využíváno dvoudiskové zařízení a tribometr MTM. Nedílnou součástí práce bude také hodnocení topografie povrchu, míry opotřebení kontaktních těles a klasifikace mechanismů opotřebení. Za tímto účelem bude využíván optický profilometr Contour GT-X a analytická váha KERN ABS-N_ABJ-NM (obr. 5.1). Pro objasnění chování pevných částic modifikátoru tření uvnitř kontaktu budou tyto experimenty doplněny o testy na optickém tribometru (obr. 5.1), který využívá metodu kolorimetrické interferometrie [37].

Poslední etapa dizertační práce bude zaměřena na experimenty prováděné na reálné trati při aplikaci modifikátoru tření. Během těchto experimentů budou zaznamenávány informace o hlukové emisi, vlnkovitosti a opotřebení kolejnic.

Dizertační práce autora je navázána na projekt Technologické agentury České republiky (dále TAČR) programu alfa „*Výzkum a vývoj systému pro aktivní řízení adheze v kolejové dopravě*“⁹. Předmětem tohoto projektu je vývoj a implementace prototypů off-board a on-board systémů pro aplikaci modifikátoru tření. Množství aplikovaného modifikátoru tření bude řízeno v závislosti na provozních parametrech (např.: rychlost a hmotnost soupravy, poloměr traťového oblouku aj.) a současně v závislosti na okolních podmínkách (teplota a vlhkost vzduchu). Při řešení tohoto projektu bude Ústav konstruování spolupracovat s českou společností Tribotec, která je tradičním výrobcem mazacích systémů a hydrauliky. Spolupráce s touto společností navazuje na dva úspěšné projekty řešené v minulosti, které byly zaměřeny na optimalizaci mazání okolků (projekt Ministerstva průmyslu a obchodu) a optimalizaci pískovacího procesu v kolejové dopravě (TAČR). Vzhledem k povaze projektu byl tento řešitelský tým navíc rozšířen o spolupráci s Vysokou školou chemicko-technologickou v Praze (dále VŠCHT), která zajišťuje přípravu kompozic modifikátorů tření. S ohledem na cíl dizertační práce a na výstupy tohoto projektu byl sestaven níže uvedený plán publikací.

5.4 Plán publikací

První publikace bude zaměřená na posouzení „výkonnosti“ několika komerčních modifikátorů tření na olejové bázi. Jak bylo zmíněno výše, publikace související s touto problematikou využívá takřka výhradně vodní modifikátor tření Keltrack, jehož chování a mechanismy nastávající v kontaktu mohou být vzhledem k vodní bázi zcela jiné než v případě modifikátorů na bázi oleje. Další motivací této publikace je také výše zmíněný projekt TAČR. Konfrontace těchto modifikátorů tření povede k selekci nejvhodnějšího modifikátoru tření, který bude využíván v dalších etapách projektu.

⁹ Doba řešení projektu 07/2014 – 06/2017.

Tab. 5.1 Plán publikací – publikace 1

Číslo publikace 1 – předpokládaný termín odeslání 10/2015	
Cíl publikace	Popis chování modifikátorů tření na olejové bázi v kontaktu kola a kolejnice
Aparatura	Ball-on-disk tribometr, optický profilometr
Časopis	Wear
Impact faktor	1,862

Druhou publikaci lze vzhledem k cíli disertační práce označit za nejpodstatnější. Cílem článku bude popsat vliv jednotlivých složek modifikátorů tření na trakci a opotřebení v kontaktu, a to na hranici mezného a smíšeného režimu mazání. Příprava nezbytných kompozic modifikátorů tření bude konzultována a prováděna ve spolupráci s VŠCHT.

Tab. 5.2 Plán publikací – publikace 2

Číslo publikace 2 – předpokládaný termín odeslání 4/2016	
Cíl publikace	Posouzení vlivu jednotlivých složek modifikátorů tření na trakci a opotřebení na hranici mezného a smíšeného režimu mazání
Aparatura	Dvoudiskové zařízení, ball-on-disk tribometr, optický tribometr, optický profilometr, analytická váha
Časopis	Tribology International
Impact faktor	2,124

Na základě výsledků a poznatků získaných z předešlých dvou publikací bude vybrán nejvhodnější modifikátor tření, který bude sloužit jako pracovní médium off-board a on-board systémů, které jsou jedním ze základních výstupů projektu TAČR. Tyto experimenty budou realizovány na reálných tramvajových tratích, přičemž na jedné trati bude po dobu několika měsíců aplikován modifikátor tření, zatímco druhá trať bude komparačního charakteru. V průběhu experimentů budou v pravidelných intervalech zaznamenávány informace o opotřebení (změna profilu kolejnice), vlnovitosti (délka a amplituda vln), efektivita třecí vrstvy¹⁰ a také informace o hlukové emisi. Délka experimentu navíc umožní posouzení vlivu modifikátoru tření na tyto parametry během různých ročních období.

Tab. 5.3 Plán publikací – publikace 3

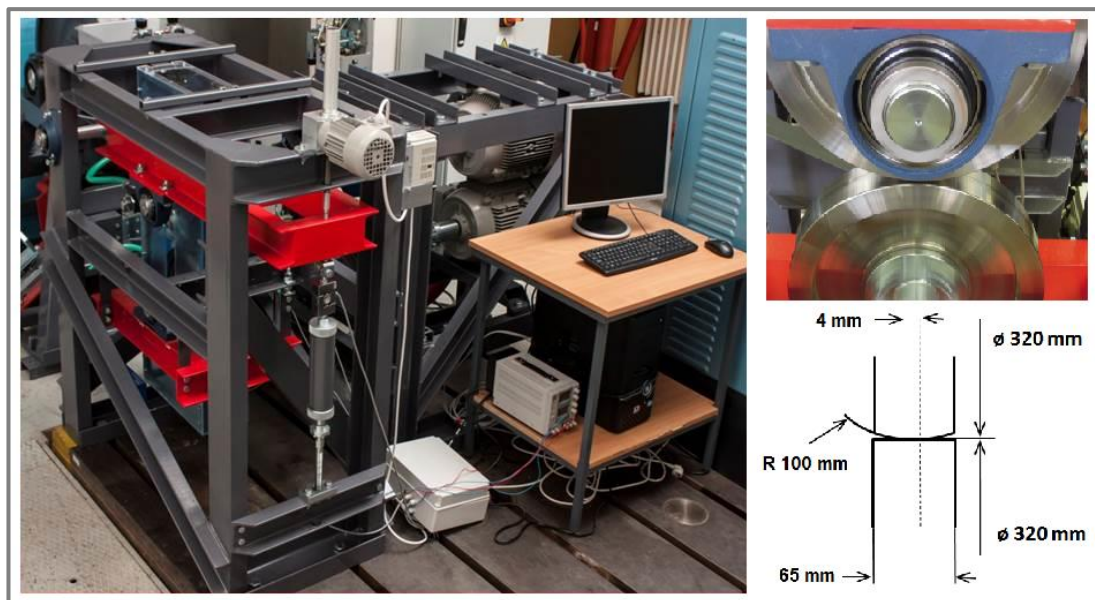
Číslo publikace 3 – předpokládaný termín odeslání 3/2017	
Cíl publikace	Posouzení vlivu modifikátoru tření na opotřebení, vlnovitost a hlukovou emisi
Aparatura	Reálná tramvajová trať v Brně
Časopis	Wear
Impact faktor	1,862

¹⁰ Efektivitou třecí vrstvy se rozumí vzdálenost, na které modifikátor tření plní požadovanou funkci.

6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE

6.1 Modifikace experimentální aparatury

Původní dvoudiskové zařízení (obr. 6.1) bylo navrženo v rámci projektu TAČR „Výzkum a vývoj progresivního pískovacího systému kolejových vozidel“ [38]. Předností této konfigurace byla především poměrně velká kontaktní oblast (vzhledem k průměrné zrnitosti minerálních částic) a reálná konformita disků v jedné z rovin (obr. 6.1). Nicméně nevýhodou této konfigurace je zejména nestabilita kontaktní oblasti, kdy vlivem opotřebení dochází k postupnému přechodu na liniový kontakt, což vede nejen ke změně geometrie kontaktní oblasti, ale také k poklesu kontaktního tlaku během experimentu. Další nevýhodou současné konfigurace představuje uložení disků, které neumožňuje rychlou výměnu kontaktních těles. Současně průměr disků (320 mm) znemožňuje analýzu topografie povrchu na optickém profilometru a nezanedbatelnou nevýhodou je také samotná cena těchto vzorků.

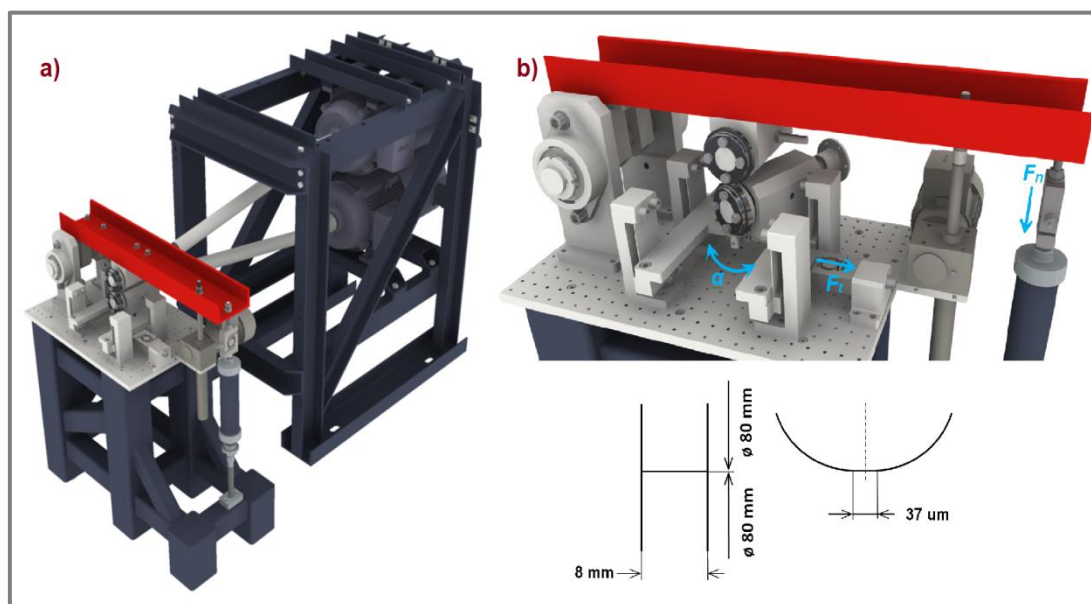


Obr. 6.1 Původní konfigurace dvoudiskového zařízení

Vzhledem k výše zmíněným nevýhodám původní konfigurace, byla provedena modifikace dvoudiskového zařízení (obr. 6.2), přičemž při modifikaci byl brán zřetel především na parametry stávajících pohonů. Hlavním cílem této modifikace bylo nahradit stávající disky za disky menšího průměru s liniovým kontaktem, které by současně umožňovaly simulovat průjezd traťovým obloukem. Vzhledem k těmto požadavkům byla navržena zcela nová testovací část zařízení a zachována zůstala pouze pohonná část (došlo pouze k odstranění převodovky). Předností nové konfigurace je také letmé uložení disků, které umožňuje snazší a rychlejší výměnu vzorků než v případě původní varianty.

Nová koncepce dvoudiskového zařízení využívá dvou ocelových disků o průměru 80 mm (obr. 6.2), což odpovídá přibližně měřítku zmenšení 1:12. Disky jsou vyrobeny z materiálu ekvivalentních ke kolejnicové oceli R260 a k oceli běžně používané pro výrobu železničních kol 12 050. Oba disky byly po výrobě tepelně

zpracovány za účelem dosažení reálné tvrdosti kontaktních dvojic. Pro zajištění dostatečné variability kontaktního tlaku byly při návrhu zařízení uvažovány tři varianty tloušťky disků (tab. 6.1). Každý z disků je nezávisle poháněn asynchronním elektromotorem, což umožňuje řídit velikost skluzu v kontaktu. Samotný kontakt je zatěžován pomocí páky a předepjaté nástrojové pružiny, což umožňuje dosažení maximálního Hertzova tlaku až 1 GPa. Vzhledem k vlastním frekvencím zařízení a k parametrům pohonu lze zařízení provozovat při obvodové rychlosti disků do 6 m/s. Uložení spodního ložiskového tělesa umožňuje natáčení disku až o 6° (obr 6.2), čehož se využívá při simulaci průjezdu vozidla traťovým obloukem. Zařízení obsahuje dva tenzometrické snímače síly, přičemž první z nich zaznamenává normálovou sílu, zatímco druhý snímač zaznamenává sílu třecí. Na základě těchto dat je následně dopočítán součinitel adheze.



Obr. 6.2 Nová konfigurace dvoudiskového zařízení (a), detail na testovací část zařízení (b)

Jak bylo zmíněno výše, původní konfigurace dvoudiskového zařízení byla navržena v rámci projektu TAČR. Vzhledem k termínu ukončení tohoto projektu (30. 6. 2015) bylo nezbytné zachovat stávající podobu experimentální aparatury kvůli závěrečnému oponentskému řízení. Další překážkou byla také probíhající rekonstrukce laboratorní Ústavu konstruování, kde se předpokládá montáž a zprovoznění nové konfigurace dvoudiskového zařízení, a to během července tohoto roku.

Tab. 6.1 Parametry modifikované experimentální aparatury

Předpokládaný součinitel tření $f = 0,6$						
Měřítko	Průměr disků (mm)	Tloušťka (mm)	Velikost oblasti (mm)	Tlak (GPa)	Síla (kN)	Max. rychlost (m/s)
Stávající (1:3)	320	50	2,3 x 2,7	1	3,2	5,5
1:12	80	10	0,28	0,8	3,5	6
1:12	80	8	0,31	0,9	3,5	6
1:12	80	6	0,36	1	3,5	6

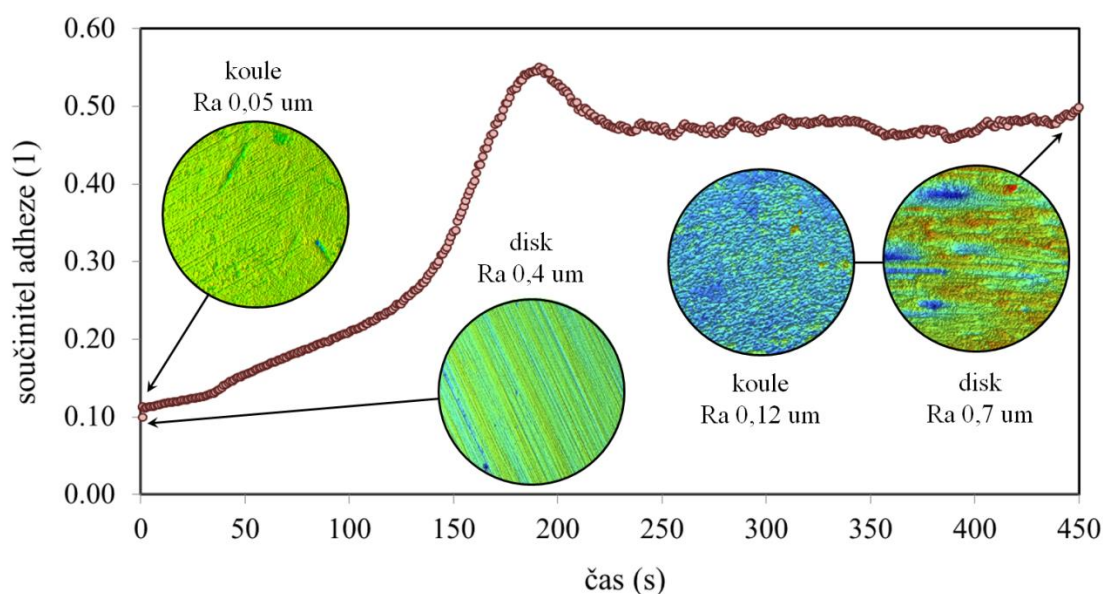
Během následujícího období se předpokládá konstrukce klimatické komory, která umožní simulaci různých environmentálních podmínek (teplota a vlhkost vzduchu). Dále bude experimentální aparatura doplněna o kameru a osvětlovací zdroj pro zaznamenávání vývoje kontaktní dráhy disku během experimentu.

6.2 Verifikace experimentálního přístupu

Vzhledem ke skutečnosti, že v době psaní tohoto pojednání nebyla z výše uvedených důvodů provedena montáž a verifikace modifikovaného dvoudiskového zařízení, bude v této podkapitole provedena pouze verifikace výsledků z tribometru MTM v konfiguraci ball-on-disk. Jako materiál disku byla vybrána ocel 12 050, která je ekvivalentem ke kolejnicové oceli UIC 900A. Vzhledem k nedostupnosti koule, která by svými chemickými a materiálovými vlastnostmi odpovídala materiálu železničních kol R7T, byla jako nejvhodnější vybrána koule z ložiskové oceli AISI 1010 s tvrdostí 650 HB. Kompletní specifikace kontaktní dvojice je uvedena v tab. 6.2.

Tab. 6.2 Specifikace kotaktních těles na MTM

Materiál		Rozměry		Drsnost ¹¹		Tvrdost	
disk	koule	disk	koule	disk	koule	disk	koule
12 050	AISI 1010	∅ 46 mm	∅ 19,05 mm	Ra 0,4	Ra 0,05	245 HB	650 HB



Obr. 6.3 Záběhový test

Pro dosažení realistických výsledků musí být před samotným experimentem proveden záběhový test¹² (nejen v případě nových vzorků), jehož cílem je odstranit vrstvy na povrchu těles, které vznikají např. v důsledku oxidace povrchu. Kritériem

¹¹ Jedná se o drsnost vyhodnocovanou před záběhovým testem.

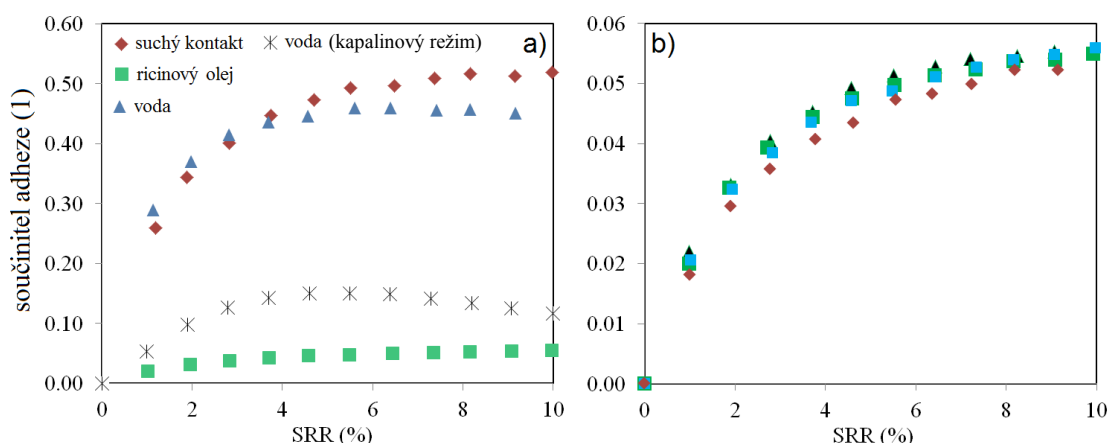
¹² Záběhový test byl proveden při Hertzově tlaku 0,75 GPa, rychlosti 0,3 m/s a při 10% skluzu.

pro zastavení testu je ustálení hodnoty adheze v kontaktu na hodnotě odpovídající suchému tření (obr. 6.3). Z grafu je patrné, že hodnoty suchého tření bylo dosaženo přibližně po 220 vteřinách, přičemž následně zůstala tato hodnota neměnná až do zastavení experimentu. Z obr. 6.3 je dále patrné, že experiment vedl k navýšení drsnosti obou těles, přičemž v případě disku vykazoval povrch již zřetelné známky adhezivního opotřebení, což je charakteristické pro kontakt dvou těles s rozdílnou tvrdostí.

Tab. 6.3 Parametry trakčního a Stribeckova experimentu

Typ experimentu	Kontaktní tlak	SRR ¹³	Rychlost
Časové křivky	0,75 GPa	10 %	300 mm/s
Stribeckova křivka	0,75 GPa	10 %	0-2500 mm/s
Trakční křivka	0,75 GPa	0-10 %	300 mm/s

Pro verifikaci experimentálního přístupu byly změřeny trakční a Stribeckovy křivky (obr. 6.3 a 6.4), přičemž vstupní parametry těchto experimentů jsou uvedeny v tab. 6.3. V případě trakčních křivek se jednalo o tři případy, a to o suchý kontakt, kontakt kontaminovaný mazivem a kontakt při přítomnosti vody, přičemž v obou posledně zmíněných případech se jednalo o plně zaplavený kontakt. Výsledné křivky v případě suchého kontaktu a kontaktu zaplaveného ricinovým olejem jsou v souladu s předchozími publikacemi [13,21]. Při zaplavení kontaktu vodou dosahovala adheze v kontaktu takřka hodnot suchého tření, což vzhledem k poměrně nízké rychlosti a vyšší hodnotě redukované drsnosti vedlo na mezný režim mazání. Z tohoto důvodu byly tyto experimenty doplněny o experiment při rychlosti 2 m/s (na obr. 6.4a křivka voda (jiné podmínky)). Současně byl pro tento test změněn také materiál obou kontaktních těles, a to na ložiskovou ocel AISI 52 100. V případě disku byla v tomto případě drsnost R_a 0,01 μm a tvrdost 650 HB, zatímco v případě koule byla drsnost R_a 0,02 μm a tvrdost 650 HB. Tyto hodnoty v kombinaci s vyšší rychlostí vedly na kapalinový režim mazání, což je v souladu s predikcí podle piezo-viskózního režimu.

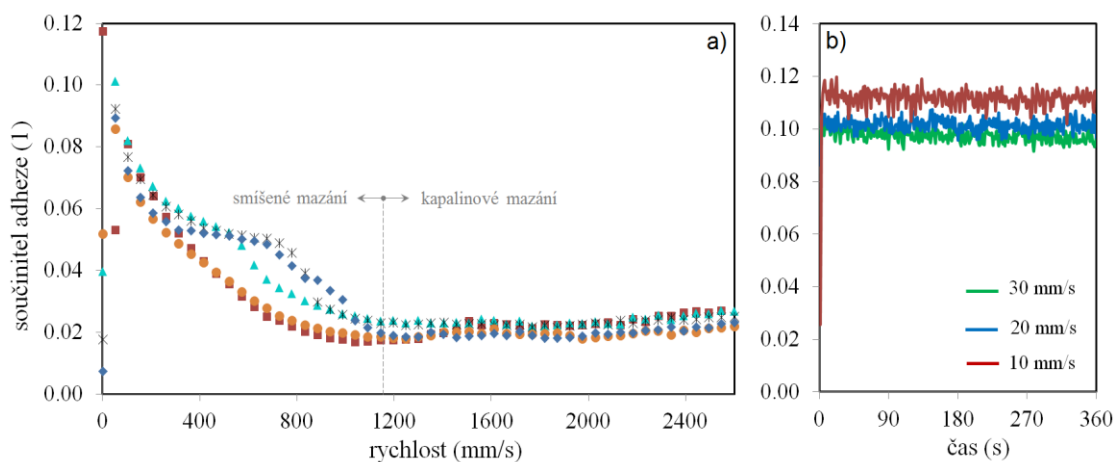


Obr. 6.4 Trakční křivky pro tři stavy kontaktu (a), opakovatelnost experimentu při přítomnosti maziva v kontaktu

¹³ SRR (Slide/Roll Ratios) je poměr skluzu a valení, který se používá pro vyjádření míry skluzu ve valivě-skluzovém kontaktu.

Sekundárním cílem těchto experimentů bylo ověření opakovatelnosti experimentálně získaných dat. Na obr. 6.4b jsou vykresleny trakční křivky pro kontakt zaplavený ricinovým olejem. Z průběhu křivek je zřejmé, že experimenty vykazují dobrou opakovatelnost¹⁴, a to i v případě, že nebylo dosaženo kapalinového mazání¹⁵.

Trakční vlastnosti ricinového oleje byly následně studovány pomocí Stribeckovy křivky, přičemž se stejně jako v předešlém případě jednalo o plně zaplavený kontakt (obr. 6.5a a tab. 6.3). Nejlepší shodu vykazují Stribeckovy křivky v kapalinovém režimu mazání, přičemž součinitel adheze v tomto režimu dosahoval hodnoty 0,02. Dobré shody bylo dosaženo také v první části smíšeného režimu mazání, kdy data vykazují také dobrou shodu s trakčními křivkami na obr. 6.4b, kde pro 10% SRR a pro rychlost 300 mm/s nabýval součinitel adheze přibližně hodnoty 0,56. Ve smíšeném režimu mazání v intervalu rychlostí 300-1100 mm/s dochází k jistému rozptylu naměřených dat, což může souviset se změnou drsnosti těles. Vzhledem ke značnému rozptylu adheze při rychlostech nižších než 50 mm/s, byla adheze v tomto intervalu rychlostí popsána pomocí časových testů (obr. 6.5b). Na základě těchto časových průběhů lze konstatovat, že hodnoty adheze jsou při takto nízkých rychlostech stabilní, a současně je možné pozorovat trend klesající adheze s narůstající rychlostí, což je charakteristické pro smíšené mazání. Na druhou stranu však lze předpokládat, že při rychlosti 10 mm/s se vzhledem k velikosti dosažené adheze jednalo již o mezní režim mazání, nebo o přechod mezi mezním a smíšeným režimem mazání. Níže zobrazené Stribeckovy křivky budou využity v další podkapitole pro komparaci s modifikátory tření.



Obr. 6.5 Stribeckovy křivky ricinového oleje (opakovatelnost) (a), časové křivky pro nízké obvodové rychlosti (b)

6.3 Modifikátory tření na olejové bázi

V této podkapitole budou využívány dva komerční modifikátory tření na olejové bázi od předních světových výrobců maziv. V případě prvního modifikátoru tření (dále označován jako FMA) se jedná o modifikátor tření s pevnými částicemi mědi a zinku. Druhý modifikátor tření (dále označován jako FMB) obsahuje částice

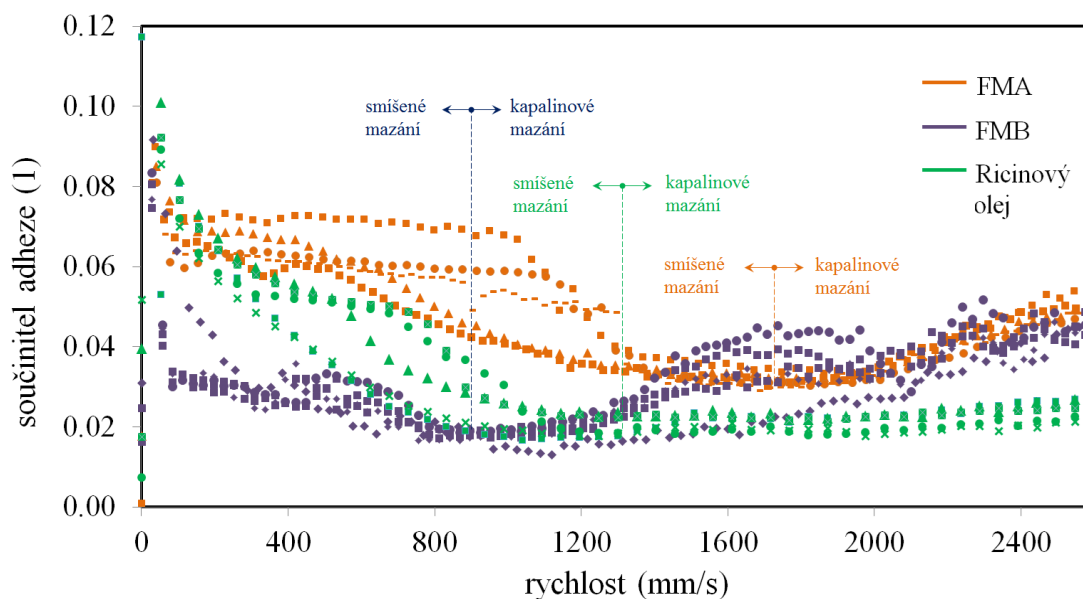
¹⁴ Průměrná směrodatná odchylka byla 0,0014.

¹⁵ Predikce režimu mazání byla provedena dle vztahů Hamrocka a Dowsona.

hliníku a mědi s velikostí částic do 25 μm , přičemž základní bází je v tomto případě rostlinný olej.

Na obr. 6.6 jsou vykresleny Stribeckovy křivky pro FMA a FMB modifikátor tření pro plně zaplavený kontakt (podmínky experimentu viz tab. 6.3). Pro porovnání jsou součástí grafu také Stribeckovy křivky ricinového oleje. Pro verifikaci těchto výsledků byly Stribeckovy křivky konfrontovány s trakčními křivkami pro různé rychlosti resp. pro různé režimy mazání, přičemž výsledky prokazovaly dobrou shodu. Z průběhu Stribeckových křivek na obr. 6.5 byly formulovány následující závěry a hypotézy:

- V plně zaplaveném kontaktu nevykazují modifikátory tření požadovanou střední míru adheze v žádném režimu mazání, což může být zapříčiněno absencí pevných částic v kontaktu.
- FMA modifikátor tření vykazuje vyšší míru adheze ve smíšeném režimu mazání než FMB modifikátor a ricinový olej, což může být způsobeno vlastností základní báze modifikátoru tření.
- Po přechodu do kapalinového režimu mazání vykazuje FMA modifikátor tření a ricinový olej stabilní hodnoty tření (z hlediska opakovatelnosti), zatímco v případě FMB modifikátoru tření dochází po překročení rychlosti 1400 mm/s k jistému rozptylu experimentálních dat, který může souviset se změnou drsnosti povrchu kontaktních těles.

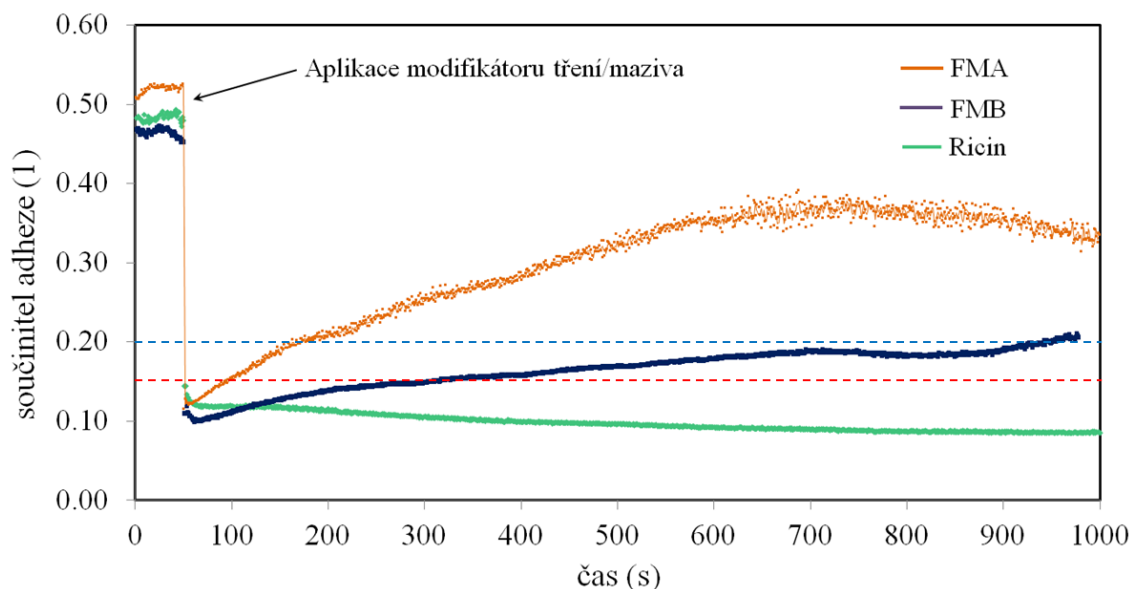


Obr. 6.6 Stribeckovy křivky pro FMA, FMB modifikátor tření a pro ricinový olej

Vzhledem k nízkým hodnotám součinitele adheze při plně zaplaveném kontaktu byly provedeny experimenty s přesně definovaným množstvím modifikátoru tření. Na obr. 6.7 jsou vykresleny časové křivky pro ricinový olej a pro dva výše zmíněné modifikátory tření. Na počátku každého experimentu byl proveden záběh, a po dosažení a ustálení adheze na hodnotě odpovídající suchému tření byl experiment zastaven. Po zastavení bylo na povrchu disku aplikováno pomocí mikropipety přesně definované množství modifikátoru tření (2 μl), které bylo následně rozetřeno po celém obvodu disku. Po nanesení tenké vrstvy modifikátoru tření po celém obvodu

kontaktní dráhy disku byl experiment znovu spuštěn. Během experimentu byly sledovány především tři parametry, a to konkrétně:

- Rychlost dosažení střední hodnoty adheze, přičemž vzhledem k hodnotám suchého tření při záběhu byla za střední hodnotu adheze považována hodnota 0,2, která je dostatečná z hlediska trakce a brzdění (na obr. 6.7 je tato míra adheze vyznačena modrou čárkovanou čarou).
- Doba efektivního působení modifikátoru tření v kontaktu, která je brána jako časový interval od okamžiku aplikace modifikátoru tření až po dobu, kdy dosáhne adheze hodnoty suchého tření.
- Doba, po kterou součinitel adheze nabývá kriticky nízkých hodnot vzhledem k trakci a brzdění. Jako minimální hodnota adheze pro trakci a brzdění bude uvažována hodnota 0,15¹⁶ (na obr. 6.7 je tato míra adheze vyznačena červenou čárkovanou čarou).



Obr. 6.7 Časové křivky pro FMA, FMB modifikátor tření a pro ricinový olej při rychlosti 0,3 m/s

Na základ výše definovaných parametrů monitorovaných během experimentu a časových křivek na obr. 6.7 byly definovány následující závěry.

- U všech testovaných látek docházelo bezprostředně po aplikaci k poklesu adheze pod kritickou hodnotu 0,15, což by mohlo vést k problémům s trakcí a brzděním soupravy.
- FMA modifikátor tření vedl k nejrychlejšímu nárůstu adheze potřebné pro trakci a brzdění (43 vteřin) a současně vykazoval nejrychlejší dosažení střední hodnoty adheze (111 vteřin). V případě FMB modifikátoru tření byly tyto časy 247 a 884 sekund.
- Při přítomnosti FMA modifikátoru tření v kontaktu bylo dosaženo ustálení adheze na hodnotě 0,36.

¹⁶ Minimální hodnota adheze pro trakci a brzdění nejsou shodné a závisí na celé řadě faktorů (hmotnost soupravy, počtu hnaných náprav apod.).

- U žádné z testovaných látek nebylo dosaženo obnovy adheze na hodnotu suchého tření.
- Přítomnost ricinového oleje v kontaktu vedla na extrémně nízké hodnoty adheze během experimentu, které by znemožnily dostatečnou trakci a brzdění.

Na základě těchto do jisté míry „úvodních experimentů“ s modifikátory tření se nabízí celá řada otázek k řešení, jako jsou např.:

- „Vstupují pevné částice do kontaktu, nebo je nárůst adheze v čase způsoben pouze interakcí mezi nerovnostmi základních těles?“
- „Pokud ano, kolik procent pevných částic skutečně vstoupí do kontaktní oblasti, a jaká je jejich mezní velikost?“
- „Jak by se změnil trend časových křivek např. při zdvojnásobení rychlosti, drsnosti či aplikovaného množství modifikátoru tření?“
- „Jak by vypadal průběh adheze v čase v případě, že by byly na disk nanесeny pouze pevné částice modifikátoru tření bez základní báze?“
- „Jak by vypadal průběh adheze v čase v případě, že by v kontaktu nebyl přítomen pouze modifikátor tření ale také kontaminanty jako jsou voda, oxidy, listí a jiné běžné kontaminanty?“

Další experimenty budou plánovány s ohledem na odpovědi na tyto otázky. Postupně nalézání dílčích odpovědí povede až k nalezení odpovědi na samotnou vědeckou otázku dizertační práce.

6.4 Modifikátory tření na vodní bázi

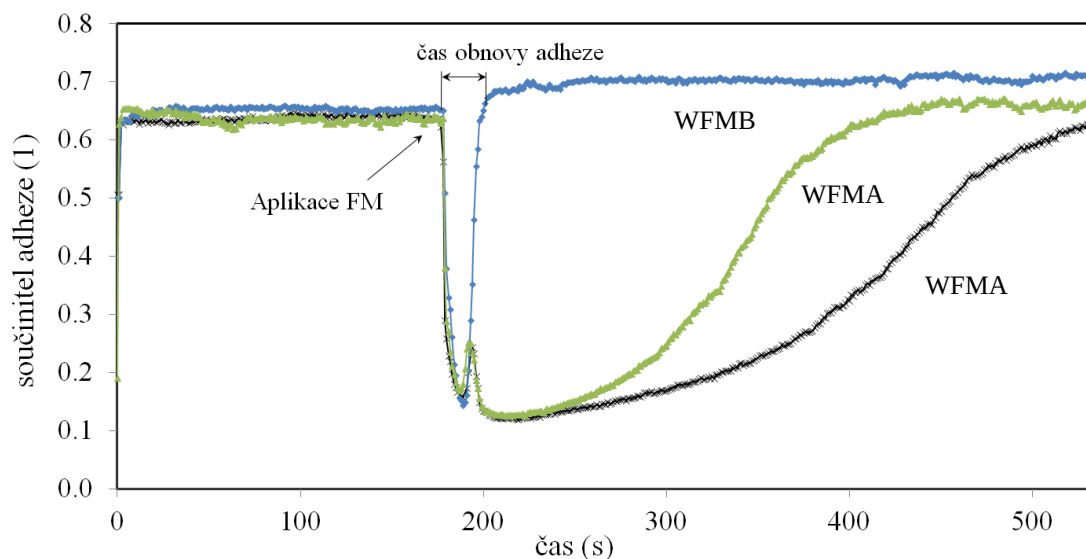
6.4

Součástí dizertační práce bude také popis chování modifikátorů tření na vodní bázi. Vzhledem k výše zmíněnému projektu TAČR (podkapitola 5.3) a spolupráci s VŠCHT byly v první fázi řešení projektu navrženy tři modifikátory tření (tab. 6.4), jejichž účelem bylo ověřit funkci modifikátorů tření na vodní bázi. Složení modifikátorů tření vycházelo z patentů výrobců [23,24].

Tab. 6.4 Složení modifikátorů tření na vodní bázi ¹⁷

Základní suroviny	Funkce suroviny	WFMA	WFMB	WFMC
Voda	základní báze	81,01	85,3	81,01
Bentonit sodný	zahušťovadlo	9,03	9,5	9,03
IGEPAL CO 630	smáčedlo	0,002	0,002	0,002
Molyka	pevné mazivo	4,98	-	4,98
Mastek HTTP 1	částice pro modifikaci tření	4,98	5,2	-
Mastek KT05M	částice pro modifikaci tření	-	-	4,98

¹⁷ Čísla v tabulce vyjadřují hmotnostní procenta.



Obr. 6.8 Časové křivky pro tři modifikátory tření na vodní bázi

Experimenty probíhaly při stejných podmínkách jako v případě modifikátoru na olejové bázi (tab. 6.3). Po provedení záběhové části experimentu bylo ve všech případech aplikováno do kontaktu stejné množství modifikátoru tření (2 μ l). Z výsledků časových křivek na obr. 6.8 byly zformulovány následující závěry:

- Po aplikaci všech tří modifikátorů tření došlo k výraznému poklesu součinitele adheze, a to vždy na stejnou hodnotu, což znamená, že tato redukce pravděpodobně souvisí s vlastnostmi základní báze – vody.
- Modifikátor tření bez tuhých částic maziva (WFMB) vede prakticky k okamžitému nárůstu adheze na hodnotu odpovídající suchému tření.
- S rostoucí velikostí pevných částic obsažených v modifikátoru tření se zkracuje čas obnovy adheze.
- Během experimentů nedošlo v žádném z testovaných případů k saturaci součinitele adheze na hodnotě odpovídající střednímu tření.

Kromě výše zmíněných výsledků bylo také ověřeno tvrzení uváděné v literatuře, že přítomnost oxidů na povrchu součástí výrazně ovlivňuje funkci (výkonnost) modifikátoru tření. Stejně jako v případě modifikátorů tření na olejové bázi se nabízí celá řada otázek k řešení, které budou tvořit dílčí kroky k zodpovězení vědecké otázky dizertační práce.

Výsledky z této a předešlé podkapitoly byly využity pro napsání konferenčního příspěvku na ITC (International Tribology Conference) 2015, která se bude konat v září tohoto roku v Tokiu. Výsledky studenta budou prezentovány v podobě posteru.

7 ZÁVĚR

7

V tomto pojednání ke státní doktorské zkoušce byly detailně rozebrány nejvýznamnější experimentální a teoretické studie související s modifikátory tření, které se využívají v kolejové dopravě za účelem optimalizace trakce a redukce opotřebení, hlukové emise a jiných nežádoucích vlivů. Na základě analýzy poznatků získaných z této části práce byla zformulovaná vědecká otázka a pracovní hypotézy dizertační práce. Na základě vědecké otázky dizertační práce a souvisejícího výzkumného projektu byl v práci navržen vhodný metodický postup řešení, a současně byl prezentován plán publikací pro nadcházející období. V poslední části tohoto pojednání je představen současný stav řešení dizertační práce, kde byla popsána modifikace experimentální aparatury, a taktéž zde byly uvedeny první výsledky a závěry experimentálního výzkumu. Při řešení práce byly již částečně splněny dílčí cíle práce, které tvoří předpoklad pro úspěšné splnění primárního cíle dizertační práce.

LITERATURA

1. CARTER, F. W., I.J. MCEWEN a C. PRITCHARD, 1926. On the Action of a Locomotive Driving Wheel. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 03.08., roč. 112, s. 151-157. DOI:10.1098/rspa.1926.0100.
2. HAINES, D. J., et al. Contact stress distributions on elliptical contact surfaces subjected to radial and tangential forces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1963, 177.1: 95-114.
3. BEAGLEY, T.M., I.J. MCEWEN a C. PRITCHARD, 1975. Wheel/rail adhesion—Boundary lubrication by oily fluids. *Wear*. roč. 31, s. 77-88. DOI: 10.1016/0043-1648(75)90123-4.
4. BEAGLEY, T.M. a C. PRITCHARD, 1975. Wheel/rail adhesion — the overriding influence of water. *Wear*. roč. 35, s. 299-313. ISSN 00431648. DOI:10.1016/0043-1648(75)90078-2.
5. BEAGLEY, T.M., I.J. MCEWEN, C. PRITCHARD a Xuesong JIN, 1975. Wheel/rail adhesion — the influence of railhead debris. *Wear*. roč. 33, s. 141-152. DOI: 10.1016/0043-1648(75)90230-6.
6. BEAGLEY, T M, I.J. MCEWEN a C. PRITCHARD, 1976-6-1. The rheological properties of solid rail contaminants and their effect on wheel/rail adhesion. *ARCHIVE: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 1847-1982*. roč. 190, s. 419-428. DOI:10.1243/PIME_PROC_1976_190_044_02
7. ZHANG, Weihua, Jianzheng CHEN, Xuejie WU a Xuesong JIN, 2002. Wheel/rail adhesion and analysis by using full scale roller rig. *Wear*. roč. 253, s. 82-88. ISSN 00431648. DOI:10.1016/S0043-1648(02)00086-8.
8. BAEK, Koan-Sok, Keiji KYOGOKU a Tsunamitsu NAKAHARA, 2007. An experimental investigation of transient traction characteristics in rolling–sliding wheel/rail contacts under dry–wet conditions. *Wear*. roč. 263, s. 169-179. DOI:10.1016/j.wear.2007.01.067.
9. BAEK, Koan-Sok, Keiji KYOGOKU a Tsunamitsu NAKAHARA, 2008. An experimental study of transient traction characteristics between rail and wheel under low slip and low speed conditions. *Wear*. roč. 265, s. 1417-1424. DOI:10.1016/j.wear.2008.02.044.
10. CHEN, H., T. BAN, M. ISHIDA a T. NAKAHARA, 2008. Experimental investigation of influential factors on adhesion between wheel and rail under wet conditions. *Wear*. roč. 265, s. 1504-1511. DOI:10.1016/j.wear.2008.02.034.
11. WANG, W.J., P. SHEN, J.H. SONG, J. GUO, Q.Y. LIU a X.S. JIN, 2011. Experimental study on adhesion behavior of wheel/rail under dry and water conditions. *Wear*. roč. 271, s. 2699-2705. DOI:10.1016/j.wear.2011.01.070.
12. OLOFSSON, U, K SUNDVALL, J.H. SONG, J. GUO, Q.Y. LIU a X.S. JIN, 2004-1-1. Influence of leaf, humidity and applied lubrication on friction in the wheel-rail contact: pin-on-disc experiments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. roč. 218, s. 235-242. DOI:10.1243/0954409042389364.
13. CANN, P.M., K SUNDVALL, J.H. SONG, J. GUO, Q.Y. LIU a X.S. JIN, 2006. The “leaves on the line” problem—a study of leaf residue film formation and

- lubricity under laboratory test conditions: pin-on-disc experiments. *Tribology Letters*. 13.11., roč. 24, s. 151-158. DOI:10.1007/s11249-006-9152-2.
14. GALLARDO-HERNANDEZ, E.A., R. LEWIS, J.H. SONG, J. GUO, Q.Y. LIU a X.S. JIN, 2008. Twin disc assessment of wheel/rail adhesion: pin-on-disc experiments. *Wear*. roč. 265, s. 1309-1316. DOI:10.1016/j.wear.2008.03.020.
 15. OMASTA, Milan, Martin MACHATKA, David SMEJKAL, Martin HARTL a Ivan KRUPKA. 2015. Influence of sanding parameters on adhesion recovery in contaminated wheel–rail contact. *Wear*. 322-323(1-2): 218-225. DOI: 10.1016/j.wear.2014.11.017.
 16. WANG, W.J., H.F. ZHANG, H.Y. WANG, Q.Y. LIU, M.H. ZHU a X.S. JIN, 2011. Study on the adhesion behavior of wheel/rail under oil, water and sanding conditions: pin-on-disc experiments. *Wear*. roč. 271, s. 2693-2698. DOI:10.1016/j.wear.2010.12.019.
 17. ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI, R. LEWIS, Q.Y. LIU, M.H. ZHU a X.S. JIN, 2010. Investigating the Lubricity and Electrical Insulation Caused by Sanding in Dry Wheel–Rail Contacts: pin-on-disc experiments. *Tribology Letters*. roč. 37, s. 623-635. DOI:10.1007/s11249-009-9560-1.
 18. ARIAS-CUEVAS, Oscar, Zili LI a Roger LEWIS, 2011. A laboratory investigation on the influence of the particle size and slip during sanding on the adhesion and wear in the wheel–rail contact. *Wear*. roč. 271, s. 14-24. DOI:10.1016/j.wear.2010.10.050.
 19. HOU, Keping, J. KALOUSEK a E. MAGEL, 1997. Rheological model of solid layer in rolling contact. *Wear*. roč. 211, s. 134-140. DOI:10.1016/S0043-1648(97)00097-5.
 20. NAKAHARA, Tsunamitsu, Koan-Sok BAEK, Hua CHEN a Makoto ISHIDA, 2011. Relationship between surface oxide layer and transient traction characteristics for two steel rollers under unlubricated and water lubricated conditions. *Wear*. roč. 271, s. 25-31. DOI:10.1016/j.wear.2010.10.030.
 21. BAEK, Koan-Sok, Keiji KYOGOKU, Tsunamitsu NAKAHARA a Makoto ISHIDA, 2008. An experimental study of transient traction characteristics between rail and wheel under low slip and low speed conditions. *Wear*. roč. 265, s. 1417-1424. DOI:10.1016/j.wear.2008.02.044.
 22. BAEK, Koan-Sok, Keiji KYOGOKU, Tsunamitsu NAKAHARA a Makoto ISHIDA, 2007. An experimental investigation of transient traction characteristics in rolling–sliding wheel/rail contacts under dry–wet conditions. *Wear*. roč. 263, s. 169-179. DOI:10.1016/j.wear.2007.01.067.
 23. CHIDDICK, Kelvin. Solid Lubricants & Friction Modifiers for heavy Loads and Rail Applications, EP Patent No. EP 0 946 693 B1.
 24. CHIDDICK, Kelvin. Solid Lubricants & Friction Modifiers for heavy Loads and Rail Applications, US Patent No. 6,136,757, 2000.
 25. MATSUMOTO, Akira, Yasuhiro SATO, Hiroyuki ONO, Yonjin WANG, Masayuki YAMAMOTO, Masuhisa TANIMOTO a Yasushi OKA, 2002. Creep force characteristics between rail and wheel on scaled model. *Wear*. roč. 253, s. 199-203. DOI:10.1016/S0043-1648(02)00100-X.
 26. TOMEOKA, Masao, Naoji KABE, Masuhisa TANIMOTO, Eiji MIYAUCHI, Machi NAKATA, Masuhisa TANIMOTO a Yasushi OKA, 2002. Friction control between wheel and rail by means of on-board lubrication. *Wear*. roč. 253, s. 124-129. DOI:10.1016/S0043-1648(02)00091-1.

27. EADIE, Donald T., Joe KALOUSEK a Kelvin C. CHIDDICK, 2002. The role of high positive friction (HPF) modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena. *Wear*. roč. 253, s. 185-192. DOI:10.1016/S0043-1648(02)00098-4.
28. EADIE, D.T. a M. SANTORO, 2006. Top-of-rail friction control for curve noise mitigation and corrugation rate reduction. *Journal of Sound and Vibration*. roč. 293, s. 747-757. DOI:10.1016/j.jsv.2005.12.007.
29. EGANA, J.I., J. VINOLAS a N. GIL-NEGRETE, 2005. Effect of liquid high positive friction (HPF) modifier on wheel-rail contact and rail corrugation. *Tribology International*. roč. 38, s. 769-774. DOI:10.1016/j.triboint.2004.11.006.
30. EADIE, Donald T., Dave ELVIDGE, Kevin OLDKNOW, Richard STOCK, Peter POINTNER, Joe KALOUSEK a Peter KLAUSER, 2008. 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*. roč. 265, s. 1222-1230. DOI:10.1016/j.wear.2008.02.029.
31. STOCK, Richard, Donald T. EADIE, Dave ELVIDGE a Kevin OLDKNOW, 2011. Influencing rolling contact fatigue through top of rail friction modifier application – A full scale wheel-rail test rig study. *Wear*. roč. 271, s. 134-142. DOI:10.1016/j.wear.2010.10.006.
32. LU, X., J. COTTER a D.T. EADIE, 2005. Laboratory study of the tribological properties of friction modifier thin films for friction control at the wheel/rail interface. roč. 259, s. 1262-1269. DOI:10.1016/j.wear.2005.01.018.
33. LI, Z., O. ARIAS-CUEVAS, R. LEWIS a E. A. GALLARDO-HERNÁNDEZ, 2009. Rolling-Sliding Laboratory Tests of Friction Modifiers in Leaf Contaminated Wheel-Rail Contacts. *Tribology Letters*. roč. 33, s. 97-109. DOI:10.1007/s11249-008-9393-3.
34. ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI, R. LEWIS a E.A. GALLARDO-HERNÁNDEZ, 2010. Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel-rail contacts. *Wear*. roč. 268, s. 543-551. DOI:10.1016/j.wear.2009.09.015.
35. LEWIS, S. R., R. LEWIS, U. OLOFSSON, D. T. EADIE, J. COTTER a X. 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*. 2013, 227(2): 115-127. DOI: 10.1177/0954409712452239.
36. WANG, W.J., T.F. LIU, H.Y. WANG, Q.Y. LIU, M.H. ZHU a X.S. JIN. Influence of friction modifiers on improving adhesion and surface damage of wheel/rail under low adhesion conditions. *Tribology International*. 2014, 75:16-23. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.03.008.
37. HARTL, M., et al. Thin film lubrication study by colorimetric interferometry. *Tribology Series*. 2000, vol. 38, s. 695-704. DOI: 10.1016/S01678922(00)80172-8.
38. GALAS, R. *Konstrukce experimentálního zařízení pro studium pískování kolejových vozidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 102 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Šperka, Ph.D.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1	Trakční křivka a tři situace kontaktní oblasti	7
Obr. 3.1	Závislost smykového napětí (a) a viskozity (b) na složení směsi.....	9
Obr. 3.2	Křivka popisující reologické vlastnosti třecí vrstvy	11
Obr. 3.3	Průběh adheze, teploty, vibrací, tvrdosti a drsnosti v čase a výsledky AES analýzy pro suchý kontakt.....	12
Obr. 3.4	Průběh adheze, teploty, vibrací, tvrdosti a drsnosti v čase a výsledky AES analýzy pro vodou kontaminovaný kontakt	13
Obr. 3.5	Trakční křivky v podélném směru pro suchý kontakt (a) a pro kontakt s modif. tření (b)	15
Obr. 3.6	Trakční křivky v příčném směru pro suchý kontakt (a) a pro kontakt s modif. tření (b)	16
Obr. 3.7	Závislost počtu průchodů modifikátoru tření kontaktem pro dva způsoby aplikace.....	17
Obr. 3.8	Trakční křivka (a), lesklé plošky na kolejnici (b) a tmavé plošky na obvodu kola (c)	18
Obr. 3.9	Vývoj amplitudy vlnkovitého opotř. v čase (a), vlnkovité opotř. (b).....	20
Obr. 3.10	Porovnání opotřebení kolejnice pro kontakt s a bez modifikátoru tření u kolejnice R260 (a), změna profilu kolejnice při aplikaci modifikátoru tření (b)	21
Obr. 3.11	Vliv modifikátoru na míru opotřebení a iniciaci trhlin (a), porovnání povrchu kolejnic (b)	21
Obr. 3.12	Porovnání opotřebení pro kontakt s a bez modifikátoru tření u kolejnice R350HT (a), vliv modifikátoru tření a materiálu kolejnice na plastické tečení (b)	23
Obr. 3.13	Smykové napětí ve vrstvě v závislosti na skluzové vzdálenosti pro různé složení třecí vrstvy (a), součinitel adheze pro různé koncentrace oxidů (b), závislost součinitele adheze na kontaktním tlaku pro různé složení třecí vrstvy (c)	23
Obr. 3.14	Smykové napětí ve vrstvě v závislosti na skluzové vzdálenosti (a), závislost součinitele adheze na skluzové rychlosti (b), časový test pro různé koncentrace modifikátoru tření a plastického maziva ve vrstvě (c)	24
Obr. 3.15	Kompletní průběh testu: záběh, formování třecí vrstvy z listí a odezva vrstvy (a), časové testy pro čtyři kontaktní situace a tři hodnoty skluzu: 0,5 % (b), 1 % (c), 2 % (d)	26
Obr. 3.16	Analýza velikosti částice FMA a FMB modifikátoru (a), denty na povrchu disků způsobené částicemi FMB modifikátoru (b)	27
Obr. 3.17	Časové testy pro tři kontaktní situace a tři hodnoty skluzu 1 % (a), 2 % (b), 3 % (c), trakční křivky pro tři kontaktní situace	28
Obr. 3.18	Časové testy při přítomnosti vody pro tři kontaktní situace 0,5 % (a), 1 % (b)	29
Obr. 3.19	Závislost adheze na vzdušné vlhkosti pro 35% koncentraci oxidu železitého ve vrstvě (a) a pro 35% koncentraci oxidu železnatoželezitého (b)	31
Obr. 3.20	Časový experiment při 40% vzdušné vlhkosti a při 25% (a) a 45% (b) koncentraci oxidu.....	31

Obr. 3.21	Součinitel adheze pro různé stavy kontaktu (a), porovnání účinnosti modifikátorů tření pro různé stavy kontaktu (b)	32
Obr. 3.22	Míra opotřebení (a) a deformační zpevnění (b) v závislosti na použitém modifikátoru tření.	32
Obr. 3.23	Povrch disků po aplikaci minerálních částic (a), oxidu hlinitého (b) a abrasiv. bloku (c)	33
Obr. 5.1	Experimentální aparatura.....	37
Obr. 6.1	Původní konfigurace dvoudiskového zařízení.....	40
Obr. 6.2	Nová konfigurace dvoudiskového zařízení (a), detail na testovací část zařízení (b).....	41
Obr. 6.3	Záběhový test.....	42
Obr. 6.4	Trakční křivky pro tři stavy kontaktu (a), opakovatelnost experimentu při přítomnosti maziva v kontaktu.....	43
Obr. 6.5	Stribeckovy křivky ricinového oleje (opakovatelnost) (a), časové křivky pro nízké obvodové rychlosti (b)	44
Obr. 6.6	Stribeckovy křivky pro FMA, FMB modifikátor tření a pro ricinový olej.....	45
Obr. 6.7	Časové křivky pro FMA, FMB modifikátor tření a pro ricinový olej při rychlosti 0,3 m/s	46
Obr. 6.8	Časové křivky pro tři modifikátor tření na vodní bázi	48

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1	Smyková pevnost a součinitel tření v závislosti na složení třecí vrstvy.....	10
Tab. 3.2	Testované trati a jejich charakteristiky	19
Tab. 3.3	Porovnání hmotnostních úbytků	28
Tab. 5.1	Plán publikací – publikace 1	39
Tab. 5.2	Plán publikací – publikace 2	39
Tab. 5.3	Plán publikací – publikace 3	39
Tab. 6.1	Parametry modifikované experimentální aparatury	41
Tab. 6.2	Specifikace kontaktních těles na MTM	42
Tab. 6.3	Parametry trakčního a Stribeckova experimentu	43
Tab. 6.4	Složení modifikátorů tření na vodní bázi	47

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka Význam

AES	Augerova elektronová spektroskopie
EP	model pro predikci adheze u vícefázové třecí vrstvy (<i>Equal Pressure</i>)
EW	model pro predikci adheze u vícefázové třecí vrstvy (<i>Equal Wear</i>)
FMA	modifikátor tření (<i>Friction Modifier</i>)
FTIR	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (<i>Fourier transform infrared spectroscopy</i>)
HPF	modifikátory tření, které způsobují pozitivní trend trakční křivky a střední úroveň adheze v kontaktu (<i>High Friction Modifiers</i>)
ITC	International Tribology Conference
LCF	modifikátory tření, které způsobují redukci adheze v kontaktu pod hodnotu 0,1 (<i>Low coefficient of Friction</i>)
RS	laserová Ramanova spektroskopie (<i>Raman spectroscopy</i>)
SRR	Poměr skluzu a valení (<i>Slide/Roll Ratios</i>)
TAČŘ	Technologická agentura České republiky
WFMA	modifikátor tření na bázi vody (<i>Water-Based Friction Modifier</i>)

Symbol Jednotka Popis

f	1	součinitel tření
G	Pa	modul pružnosti třecí vrstvy
h	m	tloušťka třecí vrstvy
k	Pa	modul plasticity ve smyku třecí vrstvy
s	%	skluz
U_i	m/s	rychlosti povrchu těles
μ	1	součinitel adheze
σ	Pa	smykové napětí v třecí vrstvě
σ_y	Pa	mez pevnosti tuhých částic
τ_c	Pa	limitní smykové napětí v třecí vrstvě

