



Vliv složení třecí vrstvy na tribologii kontaktu kola a kolejnice

Influence of third body layer composition on tribological behaviour of wheel-rail contact

Projekt disertační práce

OBSAH

1 Název v češtině a angličtině	3
2 Klíčová slova česky a anglicky	4
3 Anotace	5
4 Úvod	6
5 Shrnutí současného stavu poznání	8
5.1 Kontakt kola a kolejnice	8
5.1.1 Přenos sil mezi kolem a kolejnicí	8
5.2 Třecí vrstva	11
5.2.1 Přirozená třecí vrstva	13
5.3 Řízení třecích vlastností kontaktu	14
5.3.1 Pevné částice	14
5.3.2 Modifikátory tření	16
5.4 Model tření	17
5.4.1 Implementace třecí vrstvy do kontaktního problému	18
5.4.2 Model komplexní třecí vrstvy	19
6 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků získaných na základě kritické rešerše	21
6.1 Třecí vrstva	21
6.1.1 Materiály tvořící třecí vrstvu	21
6.1.2 Tribologické vlastnosti	22
6.2 Matematický model	22
6.3 Závěry	23
6.4 Shrnutí a zhodnocení získaných poznatků	24
7 Podstata, cíle a přínos disertační práce	25
7.1 Podstata disertační práce	25
7.2 Cíle disertační práce	25
7.3 Přínos disertační práce	25
7.4 Návaznost na současný stav řešení	25
8 Vědecká otázka a pracovní hypotéza	26
9 Způsob řešení a použité vědecké metody zkoumání	27
9.1 Vlastnosti komplexních třecích vrstev	27
9.2 Matematický model kontaktu s třecí vrstvou	28
9.3 Experimentální ověření modelu	30
9.4 Analýza možných rizik	31
10 Časový rozvrh a etapy řešení	32
11 Odůvodnění nutnosti a potřebnosti řešení dané problematiky v daném čase	33
12 Spolupráce s jinými institucemi	34
13 Předpokládané náklady spojené s řešením a jejich zdroje	35
13.1 Předpokládané náklady	35
13.2 Financování výzkumu	35
14 Charakteristika předpokládaného řešení disertační práce	36
15 Bibliografie	37
16 Vědecký životopis	42

1 NÁZEV V ČEŠTINĚ A ANGLIČTINĚ

1

Vliv složení třecí vrstvy na tribologii kontaktu kola a kolejnice

Influence of third body layer composition on tribological behaviour of wheel-rail contact

2 KLÍČOVÁ SLOVA ČESKY A ANGLICKY

Kontakt kola a kolejnice, třecí vrstva, model tření, tribologie

Wheel-rail contact, third body layer, frictional model, tribology

3 ANOTACE

3

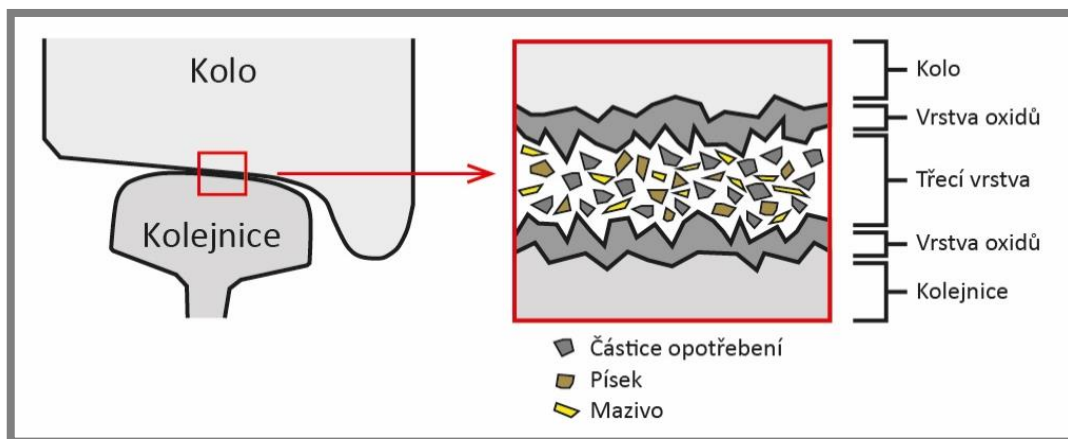
Rostoucí požadavky na bezpečnost, ekonomičnost a komfort provozu kolejových vozidel způsobují častější zaměření na řešení problémů spojených s kontaktem kola a kolejnice. Mezi ty nejvýznamnější patří nízké hodnoty adheze, opotřebení a hluk. Aplikace látek jako je písek nebo modifikátory tření umožňuje potlačit tyto negativní projevy, avšak doposud není dostatečně porozuměno jejich interakcím s přirozenými kontaminanty a vrstvami oxidů na povrchu kontaktních těles. Studium těchto interakcí je prvním krokem v cestě za získáním nových znalostí použitelných nejen při návrhu nových modifikátorů tření, ale také systému jejich aplikace. Tato disertační práce je zaměřena na pochopení procesů v třecích vrstvách složených z přírodních kontaminantů a uměle aplikovaných látek. Cílem je vytvoření nového matematického modelu, který by díky sofistikovanému popisu třecí vrstvy umožňoval přesnější predikci součinitele adheze.

4 ÚVOD

Kolejová doprava je v současnosti jedním z neefektivnějších druhů přepravy osob a materiálu. Nízká energetická náročnost je spojena zejména s efektivním přenosem sil mezi kolem a kolejnici. Samotný kontakt je realizován na velmi malé ploše o rozměrech přibližně 1 cm^2 . Procesy probíhající v této oblasti jsou v posledních desetiletích intenzivně studovány. Tento fakt je spojen s vyššími nároky na kolejovou dopravu jak z hlediska vyšších přepravních rychlostí, tak i nárůstu zatížení náprav, který se od počátku minulého století zvýšil z 10 tun až na 40 tun na jednu nápravu.

Na rozdíl od běžných inženýrských součástí je kontakt kola a kolejnice otevřený systém. Chování kontaktu je značně ovlivněno okolními podmínkami. Přítomnost vody a přírodních kontaminantů z okolního prostředí, jako například listí, může ohrozit přenos sil při rozjezdu a brzdění vozidla. Pro řešení tohoto problému je již dlouho využíváno pískování, které umožňuje zajistit dostatečné trakční schopnosti a také odstranit kontaminovanou vrstvu z povrchu kolejnice. Nevýhodou tohoto přístupu je však značné poškození kontaktních povrchů a s tím spojené náklady na jejich opravu. V opačném případě, kdy na povrchu kolejnice nejsou přítomny kontaminanty, hrají hlavní roli jevy způsobené deformací povrchů a jeho oxidace. Za těchto podmínek jsou síly přenášené povrchy příliš velké z hlediska energetické úspornosti. Aby bylo dosaženo optimální úrovně přenášených sil pro jízdu vozidla a energetickou spotřebu se v posledních letech začali používat modifikátory tření. Tyto komplexní látky jsou navrženy tak, aby při aplikaci na kolej zajistili cílenou hodnotu součinitele tření.

V kontaktu kola a kolejnice vzniká heterogenní vrstva látek různého původu, viz Obr. 4-1. Tato *třecí vrstva* (často také označována jako „*třetí těleso*“) má významný vliv na schopnost kontaktu přenášet síly. Díky velkému množství okolních vlivů je však složité napodobit reálné podmínky v laboratoři a in situ měření je omezeno na malé množství pozorovatelných jevů. Matematické modely pro řízení mazacích nebo pískovacích systému jsou z toho důvodu postaveny na zjednodušených předpokladech a koeficientech založených na experimentech v laboratoři nebo na trati. Tento přístup je vyhovující pro použití do praxe, ovšem nedává žádné relevantní poznatky o podstatě procesů probíhajících v kontaktu kola a kolejnice. Modely, které řeší kontakt na základě fyzikálního popisu, jsou pro aplikaci v řídicích systémech příliš pomalé. Tyto modely již v dnešní době obsahují moduly pro zahrnutí třecí vrstvy,



Obr. 4-1 Příklad třecí vrstvy v kontaktu kola a kolejnice

avšak popis této vrstvy je velmi zjednodušený. Navíc je velmi málo úsilí věnováno studování a modelování interakce přirozené třecí vrstvy s uměle přidanými látkami jako například modifikátory tření.

Cílem této disertační práce je popsat chování třecí vrstvy a navrhnout model, který bude schopen predikovat třecí vlastnosti kontaktu na základě aktuálního složení vrstvy. Tento model bude uvažovat s více vrstvami v kontaktu a také jejich nehomogenitou. Výsledné predikce budou experimentálně ověřeny na modelovém případě.

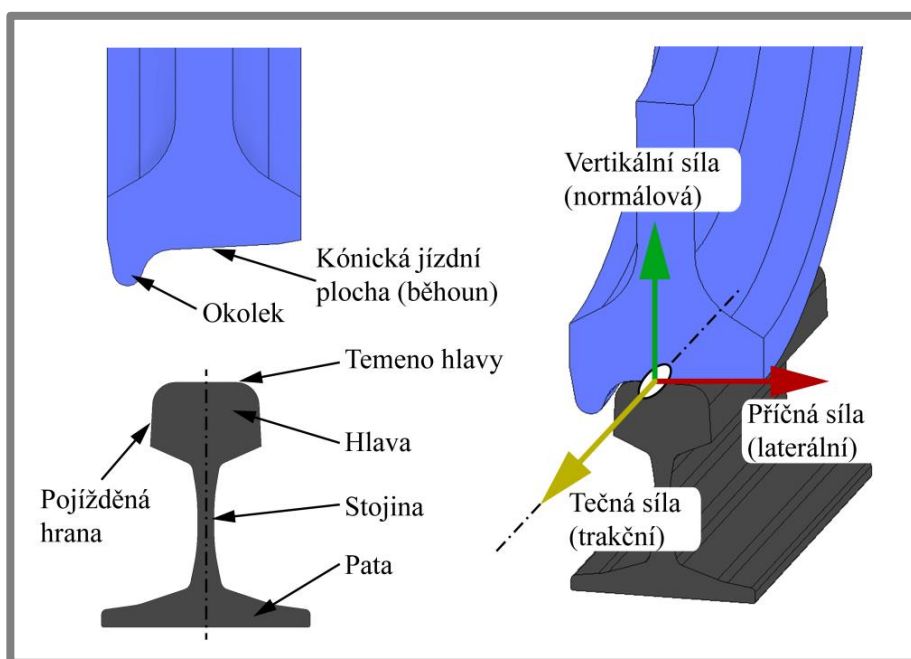
5 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Rešeršní část této práce se dělí na čtyři hlavní podkapitoly:

- **kontakt kola a kolejnice** – shrnutí základních poznatků kontaktu kola a kolejnice
- **třecí vrstva** – současné znalosti z oblasti třecích vrstev
- **řízení třecích vlastností kontaktu** – přehled studií zabývajících se pískováním a modifikací tření
- **model tření kontaktu kola a kolejnice** – metody modelování kontaktu a třecích vrstev

5.1 Kontakt kola a kolejnice

Geometrie kontaktních těles je popsána na Obr. 5-1. Kontakt je realizován ve dvou oblastech. První oblast mezi temenem hlavy kolejnice a kónickou jízdni plochou přenáší trakční a brzdné síly. V případě, že vozidlo projíždí zakřivenou tratí, dojde na jedné straně nápravy ke kontaktu okolku a pojížděné hrany kolejnice. Velikost kontaktní oblasti se tedy může měnit v průběhu jízdy jak změnou jízdni podmínek, tak i změnou geometrie kola a kolejnice díky opotřebení.



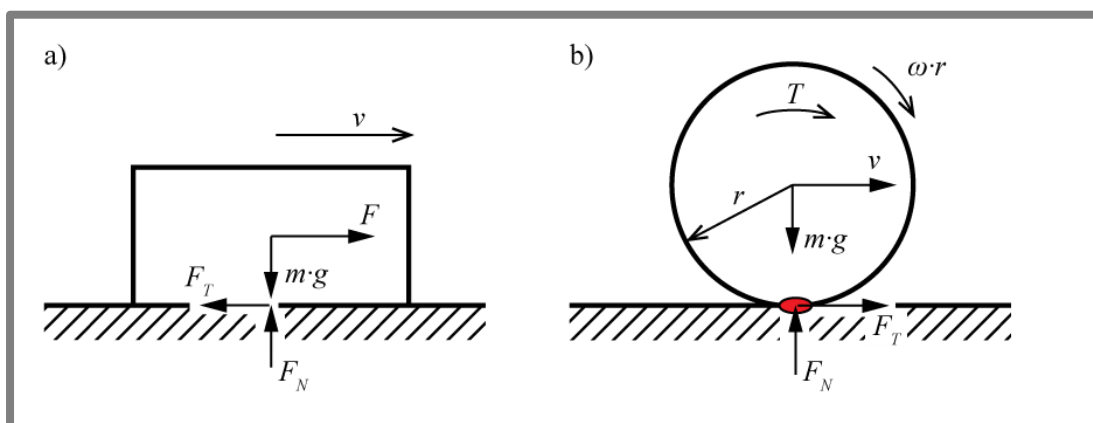
Obr. 5-1 Názvosloví kola (modrá) a kolejnice (šedá)

5.1.1 Přenos sil mezi kolem a kolejnicí

Tečné síly jsou v kontaktu kola a kolejnice přenášeny při rozdílných rychlostech kontaktních povrchů. Tyto tečné síly se v oblasti kolejové dopravy nazývají *adhezní* (nejedná se o tribologii zavedenou adhezi jako sílu potřebnou pro oddělení dvou povrchů), případně *trakční*. Obdobný termín je *třecí síla*, která je definována jako odpor proti pohybu tělesa pohybujícím se po druhém. V případě třecí síly však není

přítomen valivý pohyb tělesa. Přenos sil mezi povrchy může být řízen třemi základními mechanismy: deformace nerovností, adheze (oddělení povrchů), abraze.

Rozdíl mezi výše zmíněnou adhezní silou a třecí silou je ilustrován na Obr. 5-2. V případě třecí síly (Obr. 5-2a) je těleso přitlačováno k podložce silou způsobenou hmotností tělesa m a normálová (reakční) síla od podložky je označena F_N . Do pohybu je těleso uvedeno silou F a vzniklá síla, která brání pohybu tělesa je F_f . Poměr normálové síly a třecí síly je označován jako *součinitel tření*. Pokud se těleso (válec, kolo) po podložce odvaluje (Obr. 5-2b) tak na něj opět působí normálová síla F_N od hmotností m . Síla, která způsobuje pohyb mezi povrchy, vzniká od momentu T a udržuje úhlovou rychlost kola ω . Vzniklá adhezní (trakční) síla je označována jako F_T . Poměr mezi trakční a normálovou silou je označován jako *součinitel adheze*.



Obr. 5-2 Schéma a) smýkání tělesa po podložce, b) valení válce po podložce

Při porovnání obou výše zmíněných situací je jasné, že pouze v případě valení může být rychlost povrchu $\omega \cdot r$ (obvodová rychlost) odlišná od rychlosti pohybu tělesa v . Pro kvantifikaci těchto rozdílných rychlostí povrchů byl zaveden parametr *skluz*, který je definován následně:

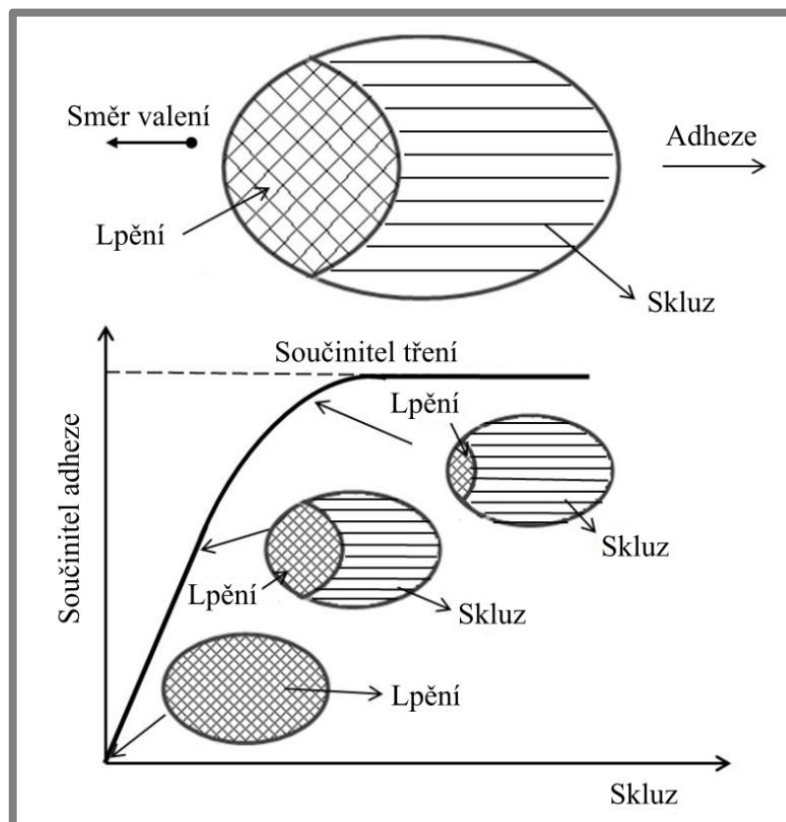
$$\xi = \frac{\omega \cdot r - v}{\frac{1}{2}(\omega \cdot r + v)} \quad (5-1)$$

kde:

ξ	-	je skluz
ω	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	- úhlová rychlost
r	m	- poloměr kola
v	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	- rychlost kola

Pokud je hodnota skluzu rovna nule tak nedochází k relativnímu pohybu povrchů a kontakt nepřenáší žádné tečné síly. Tento stav se nazývá *čisté valení*. Závislost mezi skluzem a tečnou silou (častěji součinitelem adheze) popisuje trakční křivka, která je znázorněna na Obr. 5-3. V počáteční části trakční křivky dochází k nárůstu součinitele adheze se skluzem. Toto chování je způsobeno narůstající oblastí skluzu, kde kontaktní tlak nedokáže udržet přetvoření povrchů a dochází k relativnímu pohybu. Tento fenomén byl poprvé predikován v roce 1926 F. W. Carterem [1]. S rostoucí oblastí skluzu dochází k dosažení limitní hodnoty součinitele adheze, která

nastává při zaniknutí oblasti lpění v kontaktu. Za tímto bodem je součinitel adheze konstantní (*neutrální třecí charakteristika*). Bod kde k tomuto jevu nastane, se nazývá *bod saturace*. V reálných podmínkách není součinitel adheze za bodem saturace konstantní, ale může dojít k jeho růstu (*pozitivní třecí charakteristika*) nebo poklesu (*negativní třecí charakteristika*). O průběhu součinitele adheze za bodem saturace rozhoduje kromě provozních podmínek také třecí vrstva a její složení.



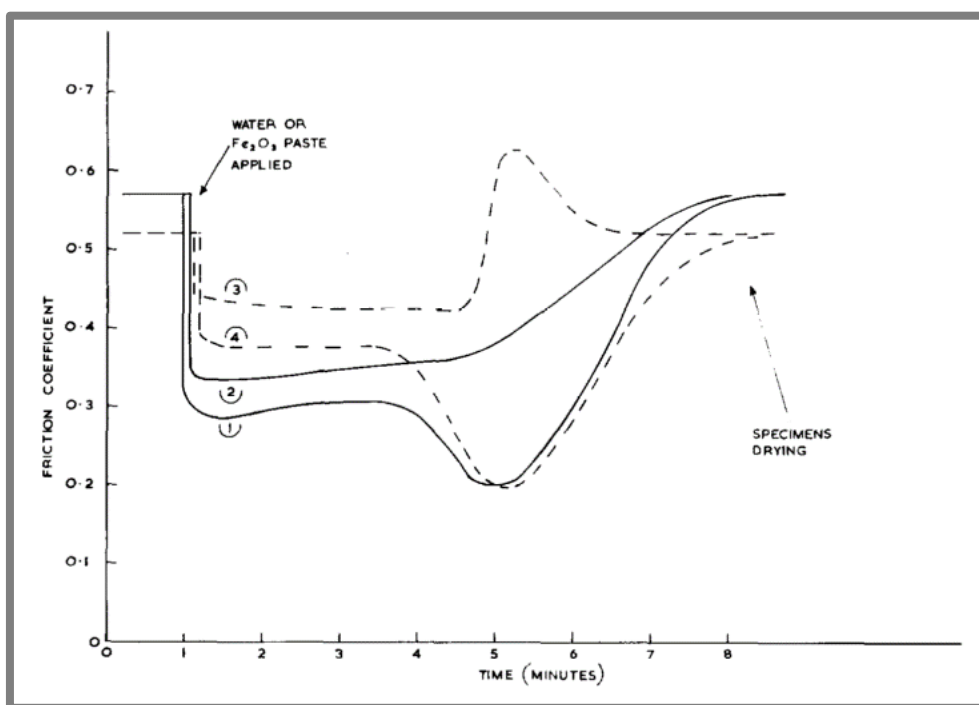
Obr. 5-3 Trakční křivka - upraveno [2]

Z hlediska režimu mazání se kontakt kola s kolejnicí pohybuje v oblasti mezního a smíšeného mazání. Oddělení povrchů mazacím filmem a výrazné snížení součinitele adheze je nevhodné z hlediska přenosu trakčních sil. Naopak příliš vysoký součinitel adheze není vhodný pro životnost kontaktních povrchů a energetickou náročnost. Na základě výzkumu a zkušeností z praxe při provozu kolejových vozidel proto většina publikací rozlišuje tři oblasti součinitele adheze [3]:

- $\mu=0,5 - 0,8 \rightarrow$ Vysoké hodnoty součinitele adheze (suchý kontakt)
- $\mu=0,3 - 0,4 \rightarrow$ Optimální hodnoty součinitele adheze (top of rail modifikátory tření)
- $\mu=0,1 - 0,2 \rightarrow$ Nízké hodnoty součinitele adheze (kontaminace listím a vodou)

5.2 Třecí vrstva

První klíčové publikace z oblasti třecích vrstev v kolejové dopravě a jejich vlivu na součinitel adheze publikoval T. M. Beagley v roce 1975 [4–6]. Výzkum byl zaměřen na vliv oleje, vody a částic opotřebení na součinitel adheze. Výsledky ukazují značný pokles adheze při kontaminaci olejem, zejména při nízké drsnosti povrchu [4]. Množství oleje ovlivňuje pokles mnohem významněji než změna chemického složení oleje. Zmírnění rychlosti poklesu lze dosáhnout použitím tvrdých oxidů Fe_2O_3 , které vyžadují větší množství oleje pro dosažení stejných hodnot součinitele adheze než měkké oxidy Fe_3O_4 [5]. V případě kontaminace vodou namísto oleje [6] je hlavním faktorem změna viskozity vzniklé kompozice. Malé množství vody se dokáže smísit s částicemi opotřebení a vytvořit viskózní pastu, která značně redukuje přenos sil mezi kontaktními povrchy (Obr. 5-4). Tento fenomén byl později pozorován v publikacích zabývajících se přítomností vody s pevnými částicemi v kontaktu [7–9]. Aplikace vody do kontaktu tedy vytvoří nežádoucí podmínky zejména při vysychání, kdy viskozita kompozice roste.



Obr. 5-4 Součinitel adheze: (1) kolejnice kontaminovaná vodou, (2) očištěná kolejnice kontaminovaná vodou, (3) nerezová ocel kontaminovaná vodou, (4) nerezová ocel s pastou Fe_2O_3 /voda – upraveno [6]

Poslední Beagleyho publikace z tohoto období [10] navazuje na předešlé články [4–6] a objasňuje získané výsledky. Pomocí laboratorního reometru bylo potvrzeno, že smyková pevnost i viskozita výrazně roste s vyšším obsahem pevných částic ve vodě. Pomocí predikčního modelu tření se smyková pevnost ukázala jako zavádějící pro kompozice s méně než 90 % oxidů. V těchto případech je již třeba brát v úvahu tokové vlastnosti kapaliny. Smyková pevnost třecí vrstvy tedy nemusí predikovat přesné hodnoty součinitele adheze a je třeba zvážit celkovou reologii látky. Beagleyho experimenty byly navíc zaměřeny na vysoké skluzy a proto nepřináší mnoho poznatků z oblasti trakční křivky před bodem saturace.

Pro možnost predikce součinitele adheze za různých skluzů se Hou a kol. [11] zaměřili na změnu smykové pevnosti třecí vrstvy s její deformací. Studie byla provedena s pevnými kontaminanty v suchém kontaktu. Za účelem změření této závislosti byl použit reometr v konfiguraci pin-on-disk. Jako reprezentativní vzorek kontaminantu byl použit disulfid molybdenu, písek, jíl a magnetit (Fe_3O_4). Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 5-5. Průběh smykového napětí se pro různé materiály výrazně mění s rostoucím přetvořením a to nejen v maximálních hodnotách ale i v trendu křivek. Jsou zde patrné tři základní chování, která jsou naznačena na Obr. 5-5 vpravo. Na základě aproximace skutečných dat lze popsat průběh pouze třemi parametry (rovnice 5-2). Predikční model součinitele tření, který autoři vyvinuli, byl v dobrém souladu s hodnotami zjištěnými z reálné tratě. Studium dalších pevných kontaminantů jako například síra, fosforit nebo cement [12] ukazuje jejich schopnost snížit součinitel tření svou nižší smykovou pevností za suchých podmínek. Zmíněné látky navíc dokázali snížit energetickou náročnost kontaktu. Naopak v přítomnosti oleje nebo listí [13] je vhodné, aby pevné částice písku, hliníku nebo magnetitu obnovily adhezi do optimálních hodnot svou vyšší smykovou pevností.

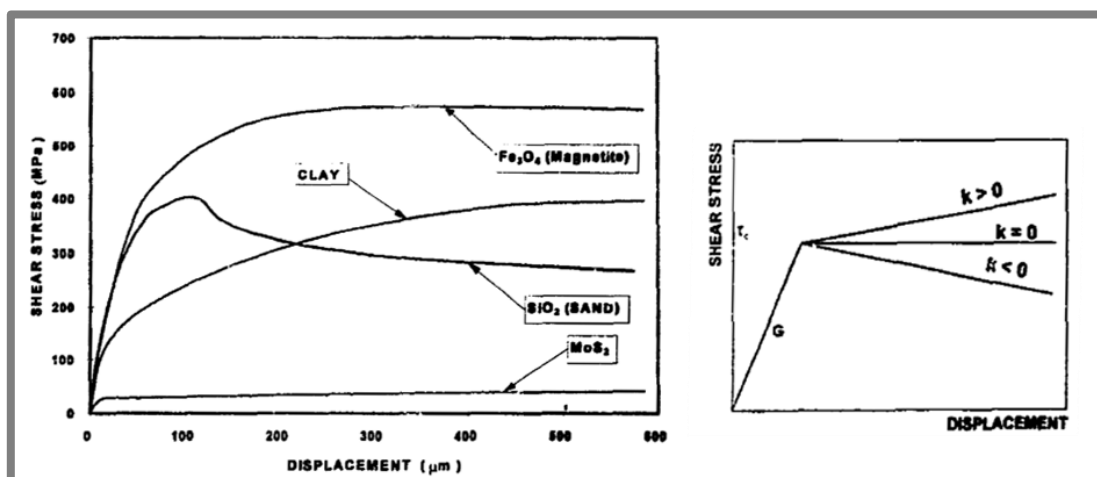
$$\tau = G\gamma$$

(5-2)

$$\tau = \tau_c + k(\gamma - \gamma_c)$$

kde:

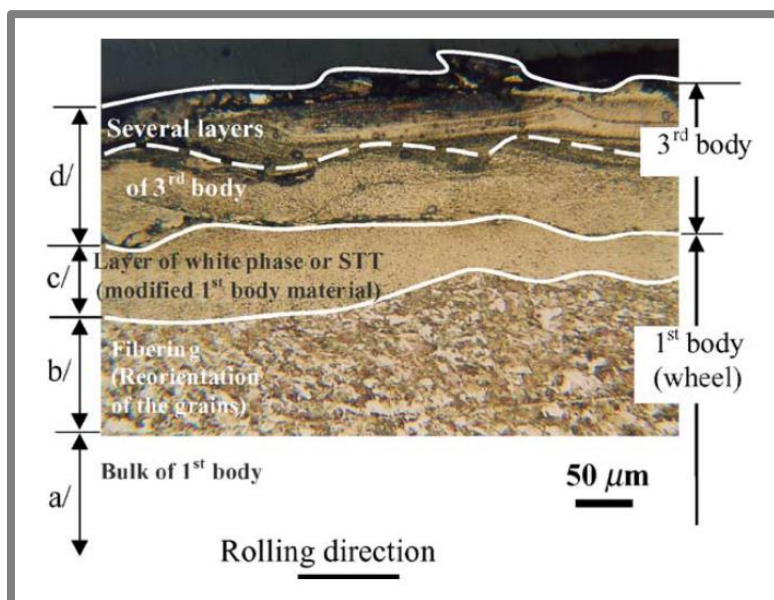
τ	-	je smyková pevnost
γ	-	- přetvoření
G	MPa	- modul pružnosti ve smyku
γ_c	-	- limitní přetvoření
τ_c	MPa	- limitní smykové napětí
k	MPa	- modul plasticity ve smyku



Obr. 5-5 Smyková pevnost kontaminantů (vlevo), reologický model třecí vrstvy (vpravo) [11]

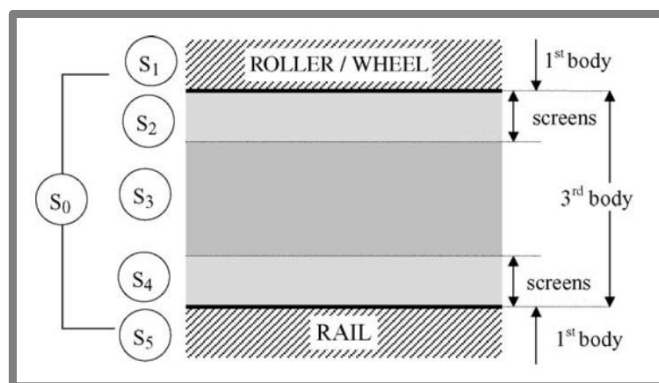
5.2.1 Přirozená třecí vrstva

Třecí chování kontaktu není ovlivněno jen kontaminanty v kontaktu, jak zjistili Beagley a Hou [4–6, 10, 11], ale také samotným materiálem na povrchu základních těles. Proto autoři Berthier, Descartes a kol. [14, 15] poukazují na přítomnost této přirozené třecí vrstvy na vzorcích kolejnice a železničního kola. Tato vrstva má tloušťku od několika desítek až do stovek mikrometrů a vzniká z částic pocházejících původem z kola a kolejnice. Vrstva není atomárně vázaná na základní těleso a existuje tedy rozhraní mezi základním tělesem a třecí vrstvou. Na řezech vzorků bylo pozorováno několik na sobě ležících vrstev, které dohromady tvoří komplexní třecí vrstvu (Obr. 5-6). Pomocí metalografických analýz bylo zjištěno, že dochází k „tečení“ a plastické deformaci materiálu na povrchu. Třecí vrstvy na obou kontaktních površích tedy podléhají silnému skluzovému namáhání. Chování kontaktu je proto silně ovlivněno mechanickými vlastnostmi nejen základního materiálu, ale hlavně přirozené třecí vrstvy na povrchu.



Obr. 5-6 Řez železničního kola s třecí vrstvou [15]

Autoři Niccolini a Berthier [16] experimentálně testovali zmíněný vliv mechanických vlastností třecí vrstvy na adhezi. Odlišení základního tělesa od třecí vrstvy (Obr. 5-7) je zde zpřesněno na třetí těleso složené z částic oddělených od kontaktních povrchů (S_3), tenké vrstvy přilnuté na povrchu základních těles vzniklé například oxidačním účinkem (S_2, S_4) a základní tělesa (S_1, S_5). Zvyšováním skluzu a současným sledováním kontaktních povrchů bylo zjištěno, že za nízkých skluzů vzniká nejprve přilnutá vrstva na povrchu (S_2, S_4). Se zvyšujícím skluzem se uvolňují částice z povrchu a vzniká tuhý film (S_3), který se projevuje jako tmavé proužky na povrchu. Vyšší hodnoty prokluzu vedou na rychlejší formování tuhého filmu. Vyšší smyková pevnost vzniklé vrstvy vede na vyšší hodnoty součinitele adheze a posouvá bod saturace k nižším hodnotám skluzu. Přirozeně vznikající třecí vrstva má vliv nejen na ochranu základního tělesa před poškozením [14, 15], ale také zvyšuje hodnoty součinitele adheze.



Obr. 5-7 Rozdělení třecí vrstvy [16]

Analýzu vzniku oxidů železa na povrchu kontaktních těles provedli Nakahara a kol. [17]. Průběh součinitele adheze pro suché a vodou kontaminované podmínky odpovídá výskytu měkkých (magnetit, Fe_3O_4) a tvrdých (hematit, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) částic oxidů železa. Nárůst součinitele adheze je spojen s rostoucím výskytem tvrdých oxidů $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Naopak ustálení, případně pokles, je způsoben měkkými oxidy Fe_3O_4 . Prudkého nárůstu tloušťky zoxidované vrstvy je dosaženo po ustálení součinitele adheze, kdy dochází k nejintenzivnějšímu pohybu částic v třecí vrstvě a základním materiálu. Za přítomnosti vody v kontaktu bylo nárůstu tloušťky oxidované vrstvy (pohybu částic) zabráněno tribochemickými reakcemi kontaktního povrchu s atomy křemíku, vápníku a sodíku obsaženými ve vodě. Tento jev byl zároveň pozorován autory Zhu a kol. [7], kteří při kontaminaci vodou a glykolu pozorovali vyšší obsah zinku a sodíku. Třecí vrstvu tedy neovlivňují jen samostatné látky vstupující do kontaktu, ale také jejich vzájemné chemické a tribologické působení.

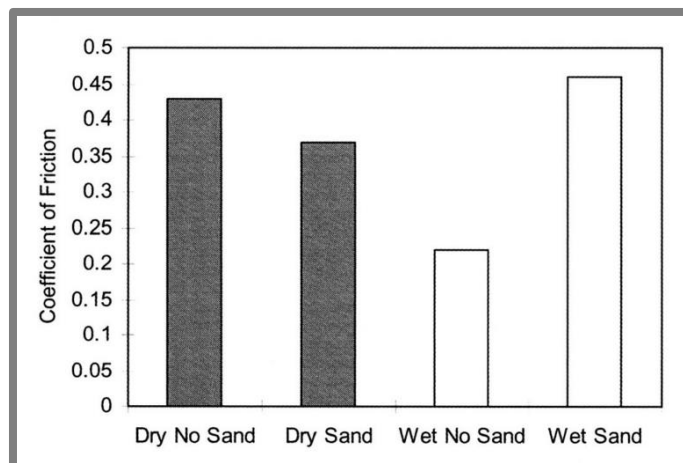
5.3 Řízení třecích vlastností kontaktu

Z předchozích podkapitol je patrné, že kontakt kola a kolejnice nikdy není provozován za ideálně čistých podmínek bez přítomnosti třetího tělesa. Aby byly neutralizovány negativní vlivy nízkých a vysokých hodnot součinitele adheze, je běžné do kontaktu cíleně přidávat cizí (umělé) látky.

5.3.1 Pevné částice

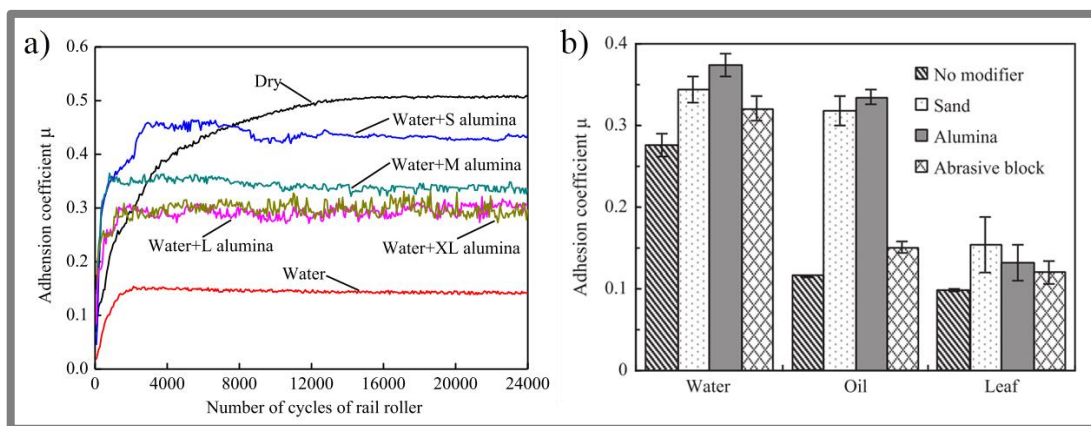
Dnes již běžně používané pískování je efektivní způsob rychlého navýšení součinitele adheze. Za podmínek kdy je kontakt kontaminován například listím působí částice písku nejen zvýšením adheze, ale také odstraněním vrstvy listí z kontaktních povrchů. Nevýhodou je rychlejší a větší poškození povrchu.

Lewis a Dwyer-Joyce studovali vliv pískování na tření a opotřebení za suchých a vodou kontaminovaných podmínek na dvoudiskovém zařízení [18]. Použití písku za suchých podmínek nemělo významný vliv na součinitel adheze (Obr. 5-8). Opotřebení kontaktních povrchů však vzrostlo několikanásobně oproti suchému kontaktu bez pískování. Použití písku s vodou vedlo na další nárůst opotřebení a také zvýšení součinitele adheze. Opačného trendu při měření součinitele adheze bylo dosaženo v práci Wang a kol. [19]. Kombinace písku s vodou vedla na nižší hodnoty součinitele adheze, než v případě suchého kontaktu. Tento rozdíl lze přisoudit použitím různých zrnitostí písku a odlišným způsobem dopravy písku a vody do kontaktu.



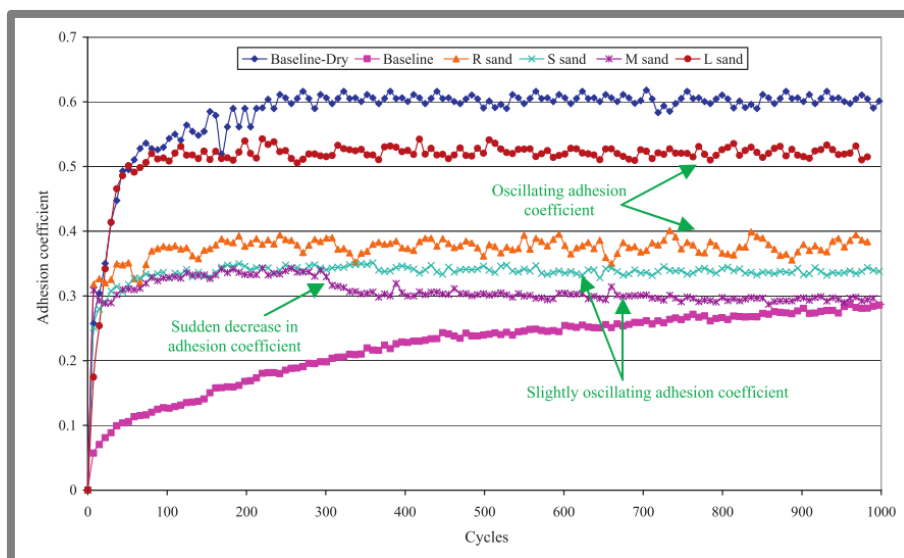
Obr. 5-8 Naměřené hodnoty součinitele tření [18]

Použití částic oxidu hliníku (Al_2O_3) [20] za mokrých podmínek také vede na vyšší hodnoty součinitele adheze oproti vodou kontaminovaným podmínkám. Nárůst ovšem nepřekročí hodnoty suchého kontaktu (Obr. 5-9a), jak bylo dříve pozorováno s částicemi písku [18]. Velikost součinitele adheze je navíc závislá na velikosti použitých částic. Menší částice označené jako S ($75\ \mu\text{m}$) zajistili hodnoty blízké suchému kontaktu. Zatímco větší částice L ($250\ \mu\text{m}$) a XL ($550\ \mu\text{m}$) snížili součinitel adheze skoro na polovinu. Porovnání částic písku s oxidy hliníku provedli Wang a kol. [13]. Částice byly srovnávány při kontaminaci vodou, olejem a listím (Obr. 5-9b). Částice písku zajistili vyšší hodnoty adheze než částice hliníku jen při testech s listím. Částice oxidu hliníku navíc ve všech testech způsobují menší opotřebení kontaktních povrchů.



Obr. 5-9 a) vliv velikosti částic na vodou kontaminovaný kontakt [20], b) srovnání částic písku a oxidu hliníku [13]

Hlavní část doposud vydaných publikací z oblasti pískování je zaměřena na podmínky kontaminace listím, kdy odstranění vrstvy listí hraje důležitou roli. Vliv velikosti částic písku na součinitel adheze při kontaminaci listím studoval Arias-Cuevas za použitím dvoudiskového zařízení [21]. Použité částice písku byly označeny jako S ($180\ \mu\text{m}$), M ($400\ \mu\text{m}$), R ($800\ \mu\text{m}$) a L ($1,2\ \text{mm}$). Větší částice zajistili vyšší hodnoty součinitele adheze, jak je zobrazeno na Obr. 5-9. Rozhodujícím faktorem byla také velikost skluzu. Zvětšování hodnot skluzu zvýšilo efektivitu částic písku.



Obr. 5-9 Výsledky testů s různými velikostmi písku [21]

Kontaktní povrchy však podléhaly značnějšímu opotřebení a plastickým deformacím. Výsledky byly ověřeny na reálné trati [22] kde se ukázalo, že použití větších částic (1,4 mm a 900 μm) způsobuje macro-slip (prokluz) kol. Tento jev byl potlačen použitím menších částic písku (400 μm).

Efektivnější působení písku za vyšších skluzů bylo potvrzeno Gallardo-Hernandezem [23], taktéž s použitím dvoudiskového zařízení. Zvýšením skluzu z 1 % na 3 % byl počet cyklů pro odstranění vrstvy listí snížen na třetinu. Výraznější poškození povrchu nastalo u měkčího materiálu disku. Dalším důležitým parametrem je množství písku dopravovaného do kontaktu, který studovali Omasta a kol. [24]. Pomocí dvoudiskového zařízení s průměry disku 320 mm byl studován vliv množství aplikovaného písku na obnovu adheze v listí kontaminovaném kontaktu. Zvýšení aplikovaného množství mělo hlavní dopad pouze v oblasti nízkých rychlostí a skluzů. Také bylo zjištěno, že nižších hodnot součinitele adheze dosahuje listí v kombinaci s vodou.

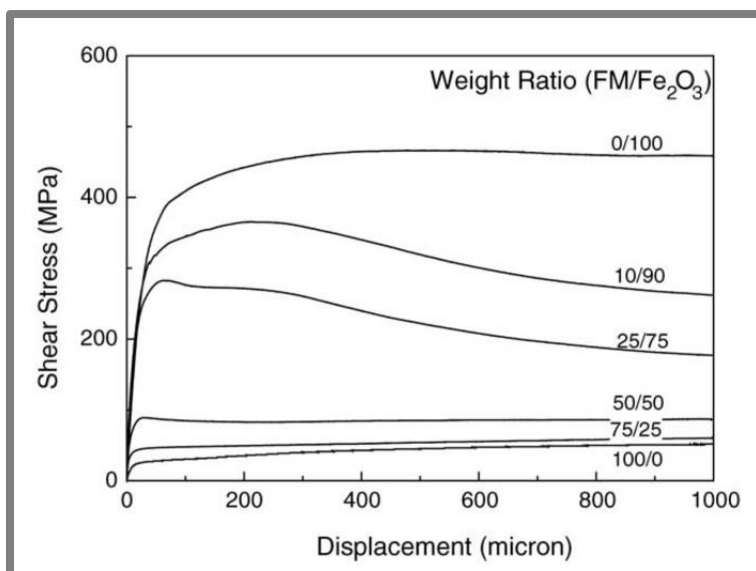
5.3.2 Modifikátory tření

Se zvyšující se popularitou modifikátorů tření a vyššími nároky na energetickou úsporu v kolejové dopravě je kladen tlak na bližší poznání interakce látek přítomných na kontaktním povrchu. Velká rozmanitost látek aplikovaných do kontaktu kola a kolejnice z hlediska materiálů a principu jejich funkce [3] komplikuje studium jak samotných modifikátorů, tak i interakce s třecí vrstvou. Z hlediska použití modifikátorů tření bylo publikováno mnoho studií za laboratorních i reálných podmínek potvrzujících jejich pozitivní dopad na opotřebení [25, 26], hluk [27, 28] a redukci laterálních sil [29]. Pouze menší množství je zaměřeno na vlastnosti modifikátorů tření za podmínek kontaminace [30].

Publikace autorů Li a kol. [31] se zabývají vlivem modifikátorů tření na listím kontaminovaný kontakt. Použitím dvoudiskového zařízení s průměry disků 47 mm a dvou odlišných modifikátorů tření byla testována rychlost obnovy adheze. V tomto ohledu byl lepší modifikátor tření s většími a tvrdšími částicemi (FMB). Nevýhodou

použití tohoto produktu je ovšem značnější opotřebení povrchu. Menší a měkčí částice druhého testovaného modifikátoru tření (FMA) nedokázali dostatečně rychle odstranit vrstvu listů a obnovit adhezi do optimálních hodnot. Dosažené výsledky se z hlediska použitých částic shodují s experimenty publikovanými v dřívější práci Ariase-Cuevase a kol. [21]. Za pomoci stejného zařízení a použitých modifikátorů tření byl testován i vliv aplikace vody na efektivitu modifikátoru tření. Lepších vlastností opět dosáhl produkt FMB s většími a tvrdšími částicemi. Výsledky obou zmíněných článků jsou dále shrnuty do jedné publikace [32].

Studie zabývající se vlivem částic oxidu železa na vlastnosti modifikátoru tření [33, 34] ukázaly, že použitý modifikátor tření dokáže do vysokého obsahu Fe_2O_3 zajistit vhodnou smykovou pevnost pro řízení adheze (Obr. 5-8). Ovšem okolní podmínky (teplota, vlhkost) významně ovlivnily dobu efektivní funkce modifikátoru tření. Odlišné výsledky od předchozích publikací [5, 17] byly zjištěny při porovnání tvrdých (Fe_2O_3) a měkkých (Fe_3O_4) částic. Měkčí částice oxidu železa zajistili vyšší hodnoty součinitele adheze v kombinaci s modifikátorem tření [33]. Tento jev autoři vysvětlují větší velikostí měkkých částic Fe_3O_4 . Navíc byla potvrzena teorie, že změna smykového napětí třecí vrstvy závisí nejen na poměru obsažených látek, ale také na jejich odolnosti vůči opotřebení (otěruvzdornosti) [34].



Obr. 5-8 Smyková pevnost modifikátoru tření/ Fe_2O_3 [34]

5.4 Model tření

Matematické modely popisující přenos sil mezi kolem a kolejnicí jsou důležité nejen pro studii dynamického chování vozidla, ale také návrh systémů pro řízení brzdícího procesu, pískování, predikci opotřebení a jiné důležité parametry provozu kolejového vozidla.

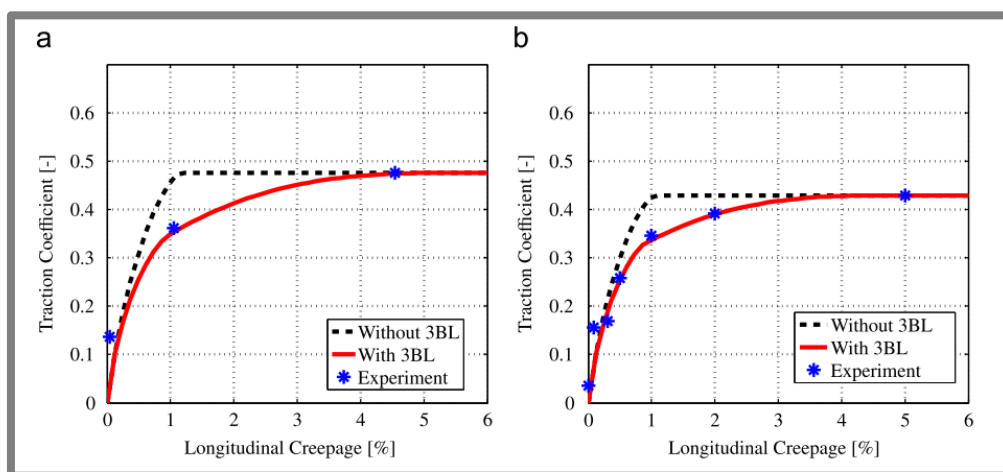
Matematický popis kontaktu je založen na dvou problémech: přenos normálových a tečných sil. Shrnutí současných teorií je popsáno Meymandem a kol. [35]. Normálový problém lze řešit pomocí Hertzovi teorie, teorií odvozených z Hertzových předpokladů nebo na základě jiných principů. Zavedením valivého

kontaktů s tečnými silami dojde k již zmiňovanému skluzu mezi kontaktními povrchy (kapitola 5.1.1). Modely popisující kontakt vystavený skluzu se rozdělují na zjednodušené, exaktní a MKP (metoda konečných prvků) [35]. Zjednodušené modely jsou vhodné pro rychlou predikci součinitele adheze za pomoci minima vstupních parametrů, proto jsou v oblasti kolejové dopravy hojně používány. Dobré přesnosti těchto modelů je ovšem dosaženo jen u eliptických kontaktních oblastí. Exaktní teorie vychází ze základních fyzikálních principů a jejich výpočet je časově velmi náročný. Výhodou je možnost dosažení vysoké přesnosti a přesného určení oblasti skluzu. Modely založené na MKP lze použít pro obecnější problémy, avšak vedou na dlouhé výpočetní časy.

Carter [1] na počátku 20. století předložil analytické řešení valivého kontaktu založené na rozdělení kontaktní oblasti na oblast lpění a oblast skluzu (viz Obr. 5-3). Jeho řešení bylo provedeno pro kontakt válce a roviny. Samotné řešení mělo lineární průběh v nízkých hodnotách skluzu a ve vyšších skluzech bylo limitováno hodnotou součinitele tření. V druhé polovině 20. století se o další rozvoj kontaktní mechaniky valivého kontaktu zasadili Johnson a Kalker. Johnson jako první vyřešil valivý kontakt v trojrozměrném prostoru zahrnující nejen sklu ale i spin [36]. Kalker přispěl k rozvoji numerických metod pro řešení valivého kontaktu. Své poznatky numerického řešení spolu s kontaktními teoriemi publikoval ve své knize [37]. Kalkerův software CONTACT je navíc jedním z nejkompaktnějších používaných modelů.

5.4.1 Implementace třecí vrstvy do kontaktního problému

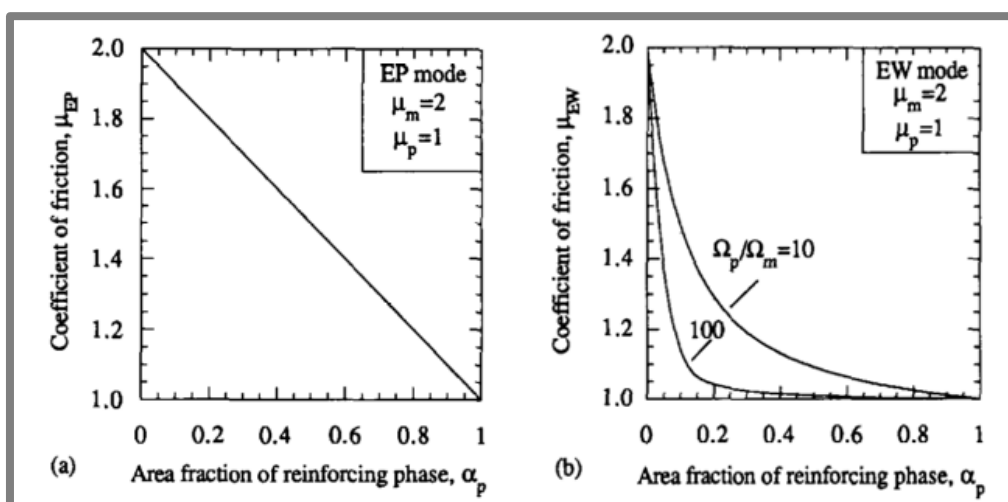
Zavedení třecí vrstvy do softwaru CONTACT je popsáno v publikaci Vollebregta [38]. Popis vrstvy vychází z elasto-plastického modelu, který na základě experimentálních dat publikoval Hou a kol. [11]. Při výpočtu deformací kontaktních povrchů je část těchto deformací přenášena třecí vrstvou. Zvyšováním tloušťky a snižováním smykové pevnosti vrstvy je dosaženo redukce přenesených tečných sil. Stejněho elasto-plastického modelu využili také autoři Meierhofer a kol. [39]. Ve své publikaci prezentují odvození analytického řešení kontaktního problému se zavedením třecí vrstvy na povrchu kola. Stejně jako v případě softwaru CONTACT vychází Meierhofer z deformací povrchů a třecí vrstvy. Vyvinutý model je navíc konfrontován s experimentálními daty. Na Obr. 5-9 lze vidět, že prezentovaný model dobře reprezentuje reálná měření.



Obr. 5-9 Porovnání experimentů s modelem třecí vrstvy, a) 0,5m/s, b) 1 m/s [39]

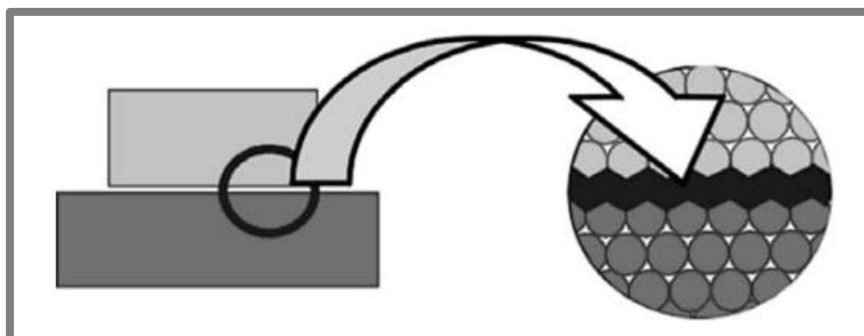
5.4.2 Model komplexní třecí vrstvy

Matematický popis složené třecí vrstvy byl zmíněn v předchozí kapitole 5.3.2. Použitím objemového poměru dvou složek a jejich součinitele tření v třecí vrstvě vedlo k nepřesným predikcím [34]. Zavedení otěruvzdornosti jako dalšího parametru přesněji popsal chování složené třecí vrstvy. Model, který uvažuje pouze objemové poměry, se nazývá *equal pressure* (EP). Zahrnutí otěruvzdornosti do modelu je nazváno *equal wear* (EW). Pokud se látka chová na pomezí je popsána *intermediate* (I) modelem. Axén byl jedním z autorů, který výrazně přispěl k tomuto analytickému popisu látek. Jeho publikace [40, 41] popisují matematický základ zmíněných modelů. Všechny tři modely jsou porovnány s experimentálními daty. Zvyšováním parametrů ovlivňujících poškození povrchů, jako například zatížení a velikost částic, přibližovalo výsledky k EP modelu.



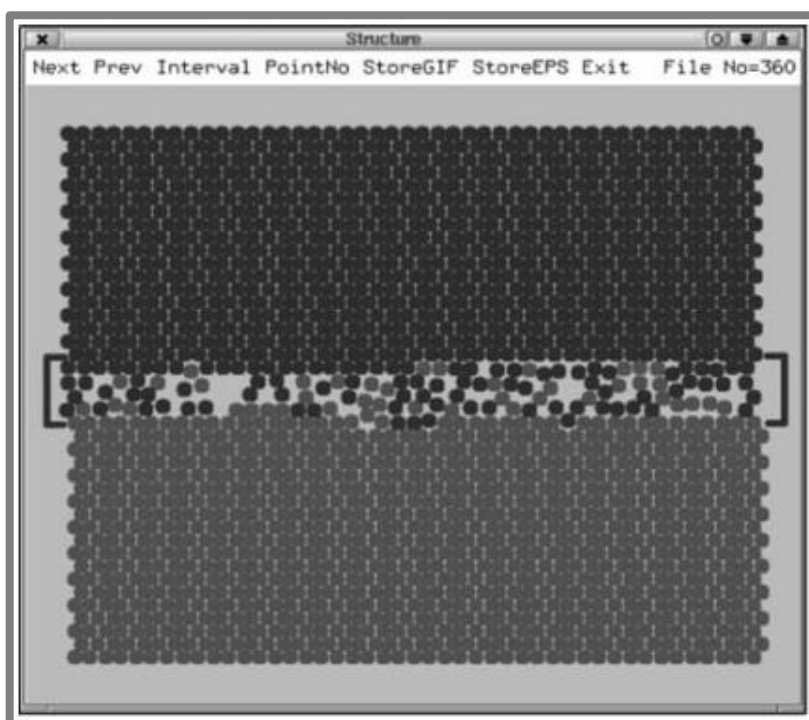
Obr. 5-10 Porovnání součinitele tření dvousložkové látky pomocí a) EP, b) EW modelu [40]

S rychlým rozvojem výpočetních metod se jako jeden ze způsobů řešení komplexních kompozitních látek v kontaktu jeví metoda *movable cellular automata* (MCA). Na rozvoji této metody a její zavedení do oblasti tribologie se výrazně podíleli Popov a Psakhie [42–44]. Jedná se o simulační model, který rozdělí reálná spojitá tělesa na množinu diskrétních elementárních částic (Obr. 5-11). Sousední částice mezi sebou mají vazbu, která popisuje mechanické vlastnosti simulovaného materiálu. V případě že dojde k překročení únosnosti tak je vazba mezi částicemi přerušena. Tento přístup je vhodný pro studii procesů na nano-úrovni.



Obr. 5-11 Rozdělení kontaktních těles na soustavy částic [44]

Použití MCA na suchý kontakt kola a kolejnice publikovali Bucher a kol. [45]. Zavedením vyšší drsnosti do simulace byl sledován pomalejší nárůst součinitele tření s rostoucím skluzem. Mezi kontaktními povrchy byla sledována vrstva z odtržených částic (Obr. 5-12). Autoři potvrzují, že součinitel tření je výrazně ovlivněn dynamickými procesy v této vzniklé vrstvě. Studii tenkého filmu z částic oxidů a pevného maziva provedli Österle a kol. [46]. Práce byla zaměřená na procesy v automobilových brzdách. Pomocí metody MCA bylo zjištěno, že přidáním 13 % grafitu do zoxidovaného filmu byl výrazně snížen součinitel tření. Navíc byl pozorován znatelně menší rozptyl hodnot součinitele tření v průběhu simulace. Výsledky byly experimentálně ověřeny na tribometru konfigurace pin-on-disc. Dobrá shoda experimentu s modelem byla dosažena simulací za vysokého kontaktního tlaku. Použitím metody MCA s jednoduchými nanostrukturami na smýkajících se površích bylo dosaženo obdobných výsledků jako při laboratorních experimentech.



Obr. 5-12 Výsledek simulace kontaktu dvou povrchů [45]

6 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ KRITICKÉ REŠERŠE

6

Ze současného stavu poznání lze usoudit, že problematika kontaminace kontaktu a řízení adheze je dlouhodobě studována. Zejména využití modifikátorů tření a jejich pozitivní dopad je motivován aplikovaným výzkumem. Méně zkoumanou oblastí je interakce kontaminantů s uměle aplikovanými látkami, kterou se doposud zabývalo malé množství článků [33, 34]. Také predikční modely zahrnující třecí vrstvu nejsou nijak rozšířené a většinou využívají zjednodušený popis vrstvy. Jednou z hlavních mezer je ovšem experimentální ověření těchto modelů, kde relevantních publikací (např. [39]) není dostatek.

6.1 Třecí vrstva

6.1

Přenos sil mezi železničním kolem a kolejnicí je významně ovlivněn provozními (zatížení, rychlost, skluz) a okolními (kontaminace, vlhkost, teplota) podmínkami. Z toho důvodu se součinitel adheze může pohybovat v širokém rozmezí od 0,1 až po 0,8. Klíčovou roli v tomto ohledu hrají látky na rozhraní mezi kolem a kolejnicí. Tato třecí vrstva může vznikat přirozeně z okolních kontaminantů nebo uměle cílenou aplikací látek do kontaktu.

6.1.1 Materiály tvořící třecí vrstvu

6.1.1

V kontaktu kola a kolejnice se díky otevřenosti systému mohou vyskytnout různé materiály. Ze zmíněných článků a podstaty interakce kola a kolejnice je jasné, že hlavní složkou přirozené třecí vrstvy jsou oxidy železa. Běžně se v kontaktu můžou vyskytovat měkké částice Fe_3O_4 a tvrdé částice Fe_2O_3 [17]. Zároveň byla pozorována nepřítomnost třetího oxidu FeO díky nepříznivým podmínkám v kontaktu, zejména nízké teplotě a přítomnosti elementárního kyslíku [7]. Pozorování oxidačních vrstev bylo ve většině publikací provedeno optickou mikroskopií nebo elektronovou mikroskopií v kombinaci s metalografickými řezy [14–16]. Pro posouzení chemického složení povrchu byly využívány metody Augerovy elektronové spektroskopie, Ramanovy spektroskopie a optické emisní spektroskopie (GD-OES) [7, 17].

V posledních letech je hojně studovaným kontaminantem listí, což značí publikace [21, 23, 24, 31]. Lze tedy usoudit, že problematika nízkých hodnot součinitele adheze za přítomnosti listí je aktuálním tématem. Pro obnovu adheze za kontaminace listím byly testovány různé materiály, ovšem písek se ukázal jako nejúčinnější [13]. Proto jsou uvedené publikace prakticky vždy spojeny s procesem pískování. Samotný písek má ovšem destruktivní následky na povrchy kontaktních těles. V případě kdy je s pískem přítomna voda je poškození povrchu ještě značnější [18].

Dalšími látkami testovanými v publikacích jsou jíla [9, 11], disulfid molybdenu (MoS_2) [9, 11, 34], grafit [9, 24, 34] nebo také síra a fosfor [12]. Často jsou tyto látky přítomny v okolí kolejnice nebo jsou součástí modifikátorů tření. MoS_2 a grafit jsou navíc používány v mazivech pro mazání okolku [34]. Situace s pevnými kontaminanty může být nadále zkomplikována přítomností vody a oleje, jelikož začnou hrát důležitou roli tokové vlastnosti [4, 6].

6.1.2 Tribologické vlastnosti

V kontaktu kola a kolejnice se mohou vyskytovat jak pevné látky, tak i kapaliny. Důležité zjištění je, že s různým poměrem kapaliny a pevné látky se mění mechanismus tření [10]. Publikace zabývající se pevnými látkami za suchých podmínek využívají smykovou pevnost (případně závislost smykového napětí na deformaci vrstvy) jako směrodatnou vlastnost pro třecí chování [11, 16, 34, 39]. V případě, že je s pevnou látkou přítomna i kapalina je potřeba od určitého množství brát ohled na tokové vlastnosti [10].

Za podmínek nízkých hodnot součinitele adheze se publikace shodují, že přítomnost tvrdých částic vede na obnovu adheze [18, 21]. Pro částice písku lze říci, že s rostoucí velikostí a částic roste rychlost obnovy adheze [13, 20]. Opačného trendu ovšem bylo dosaženo s částicemi hliníku [20], což může být způsobeno vyšší tvrdostí použitých částic a tedy jejich horším rozdrčením. Problematika pevných částic je prostudována zejména pro částice písku [18, 19, 21, 24], oxidy železa [8, 17] a také částice hliníku [13, 20]. Zmíněné látky jsou však výhradně studovány samostatně za suchých, mokrých nebo listím kontaminovaných podmínek. S ohledem na otevřenost systému kola a kolejnice by bylo vhodné zaměřit budoucí studie na interakci těchto a jiných částic s ostatními látkami v kontaktu (např. modifikátory tření, maziva okolku).

Z oblasti cílené úpravy třecích vlastností kontaktu bylo mnoho publikací zaměřeno na pískování (za podmínek kontaminace vodou a listím) a modifikaci tření. Pozitivní dopad modifikátorů tření byl potvrzen mnoha publikacemi, avšak jejich interakce s ostatními látkami byla zřídka studována a většinou zaměřena pouze na kontaminaci listím [31] a oxidy železa [33, 34]. Tento malý počet článků z oblasti interakce modifikátoru tření a třecí vrstvy potvrzuje přehledový článek Hamrona a Lewise [30]. Tato oblast výzkumu má v současnosti prostor pro další rozvoj a přínos nových znalostí. Jednou z očividných překážek je spojení tribologických vlastností se složením komerčních modifikátorů tření, které od výrobců není běžně dostupné. Tento problém lze řešit chemickou analýzou nebo vlastní přípravou modifikátoru tření na základě dostupných patentů.

Publikace z rešeršní části ukazují, že pro popis třecích vlastností jsou používány dvě veličiny: součinitel tření/adheze a smyková pevnost/napětí. Měření součinitele tření/adheze je většinou realizováno na dvoudiskových zařízeních [17, 23, 31]. Nejčastěji se jedná o nekomerční zařízení s různými geometriemi disků. Méně často je využíváno zařízení konfigurace ball-on-disc [9] a pin-on-disc [12]. Konfigurace pin-on-disc je navíc využívána pro měření smykových vlastností třecích vrstev [11, 34]. Pro věrohodnější reprezentaci materiálu kola a kolejnice v laboratoři využívají některé studie [21, 31] výrobu testovacích geometrií z vzorku reálného kola a kolejnice. Tento přístup je finančně náročnější, avšak podmínky experimentů se blíží skutečnému provozu.

6.2 Matematický model

Matematické modely popisující kontakt kola a kolejnice se rozdělují na zjednodušené, exaktní a MKP. Zjednodušené modely jsou v praxi používány zejména proto, že umožňují rychlou a dostatečně přesnou predikci součinitele adheze. Exaktní modely vychází z fyzikální podstaty kontaktu a jsou tedy přesnější na úkor výpočetní náročnosti. Metoda konečných prvků umožňuje práci s obecnými geometriemi, avšak

potřebuje dlouhý výpočetní čas. Pro účely základního výzkumu a studie třecích vrstev jsou exaktní modely vhodnější, protože umožňují pracovat s jednoduchým modelovým případem a zároveň vycházet z fyzikálních principů. Chování třecích vrstev lze v exaktním modelu zahrnout pomocí materiálových vlastností.

V publikacích využívajících třecí vrstvy [38, 39] je ve výpočtu využíván model třecí vrstvy od autorů Hou a kol. [11]. Jedná se o bilineární model popsáný třemi parametry. Na základě experimentů se tento model ukázal jako vhodný pro popis jak elastické, tak i plastické části smykového napětí testovaných materiálů. Přesnější implementace smykových vlastností třecí vrstvy může být dosažena využitím obecnější funkce nebo po částech spojitého polynomu. Tímto přístupem lze zvýšit přesnost modelu, avšak opět výměnou za vyšší výpočetní čas. Lze však očekávat, že v rámci ostatních nejistot vnesených do modelu nemá toto zpřesnění relevantní opodstatnění.

Samotné modelování třecí vrstvy v kontaktu kola a kolejnice bylo doposud výhradně zaměřené na případy jedné vrstvy (jednoho kontaminantu) popsané závislostí smykového napětí na deformaci [38, 39]. Jak již ovšem některé studie zmínily [16], tak na kole i kolejnici vzniká přilnutá vrstva oxidů, mezi kterými se pohybují volné částice opotřebení, kontaminanty a další látky. Pro popis takto komplexních třecích vrstev je možné vycházet z modelu publikovaného Axénem [40, 41], který je zaměřen na predikci součinitele tření mezi dvěma pevnými kompozitními tělesy. Aby však bylo možné tento model využít pro kontakt kola a kolejnice je potřeba zohlednit fakt, že třecí vrstva není jedno pevné těleso, ale skládá se z částic o různých velikostech, tvarech, tvrdostech, atd. Alternativním způsobem je využití metody movable cellular automata [42], která byla použita například při simulacích suchého kontaktu kola a kolejnice [45] nebo predikci tření v automobilových brzdách [46].

Na základě zmíněných publikací lze konstatovat, že současné matematické modely buďto neuvažují s komplexními třecími vrstvami, nebo nejsou přímo aplikovatelné na kontakt kola a kolejnice. **Neexistují tedy studie zaměřené na vývoj modelů komplexních třecích vrstev v kontaktu kola a kolejnice.**

6.3 Závěry

6.3

Z předložených studií lze vyvodit některé důležité závěry týkající se tribologických vlastností třecích vrstev a matematického modelování kontaktu:

- Kontakt kola a kolejnice se zřídka kdy nachází v ideálně čistém stavu. Za nejpříznivějších podmínek, kdy kontakt na pohled nejeví známky kontaminace, je na povrchu kontaktních těles vždy přítomna vrstva, jejíž chemické složení neodpovídá základnímu tělesu.
- Přítomnost jakýchkoliv jiných látek než je základní materiál ovlivňuje chování kontaktu. V případě vzniku povrchových oxidů dochází ke změně trakční křivky k pozitivnějšímu. Naopak přítomnost látek s nízkou smykovou pevností mezi kontaktními tělesy může způsobit příliš nízké hodnoty součinitele adheze pro bezpečný provoz kolejového vozidla.
- Na základě dostupných publikací lze identifikovat nejčastěji se vyskytující materiály v kontaktu: oxidy železa, písek, listí a jíl. Další látky pochází z modifikátorů tření a maziv okolku (MoS_2 , grafit).

- Součástí pevných látek v kontaktu může být i voda nebo olej. Přítomnost těchto látek ovšem značně komplikuje popis třecích vrstev, jelikož tokové vlastnosti začnou hrát důležitou roli.
- Změnou vlastností třecí vrstvy lze dosáhnout mnoha pozitivních dopadů (optimální úroveň součinitele adheze, snížení hluku, nižší energetická náročnost, ...). Dosavadní studie jsou většinou zaměřeny na aplikovaný výzkum pískování a využití modifikátorů tření. Tyto studie ovšem nepřinášejí vysvětlení některých procesů.
- Studium charakteristik ovlivňujících závislost smykové pevnosti na deformaci vrstvy (například velikost, tvar a tvrdost částic) je doposud opomíjeno. S rozvojem modelů třecích vrstev jsou však tyto informace velmi cenné pro pochopení procesů v třecích vrstvách.
- Nedostatečný výzkum lze identifikovat v oblasti interakce různých složek třecí vrstvy. Většina publikací se vymezuje na samostatné složky třecí vrstvy, což ovšem nereflktuje skutečné podmínky kola a kolejnice.
- Modelování kontaktu s třecí vrstvou je v současnosti velmi perspektivní oblast, která umožňuje přinést nové znalosti. Hlavní mezery lze identifikovat v popisu kompozitní třecí vrstvy a experimentálním ověřením modelu. Model kompozitních látek od Axéna [40, 41] se díky své jednoduchosti jeví jako nejvhodnější řešení.

6.4 Shrnutí a zhodnocení získaných poznatků

Z výše zmíněné analýzy lze vyvodit, že studium komplexních třecích vrstev a jejich modelování je doposud opomíjenou oblastí tribologie kontaktu kola a kolejnice. Studie nejvíce se dotýkající popisu třecích vrstev jsou publikace od Beagleyho [10] a Houa [11], které ovšem nepracují s komplexními třecími vrstvami. Stejně jsou na tom i modely kontaktu, které uvažují pouze jednoduché třecí vrstvy [38, 39]. Doposud tedy není publikována rozsáhlá a ucelená studie zabývající se komplexními třecími vrstvami v kontaktu kola a kolejnice. Popis fyzikálních procesů v těchto vrstvách a jejich modelování je tedy oblastí umožňující přínos nových znalostí.

7 PODSTATA, CÍLE A PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE

7

7.1 Podstata disertační práce

7.1

Podstatou disertační práce je pochopení interakcí pevných látek různého původu v kontaktu kola a kolejnice. Důležitým dílčím cílem je rozvoj nového matematického modelu, který by reálněji predikoval součinitel adheze. Méně prozkoumanými oblastmi, pro které by tato disertační práce měla mít hlavní přínos, je popis chování třecích vrstev z pevných látek a experimentální ověření matematického modelu obsahujícího třecí vrstvy.

7.2 Cíle disertační práce

7.2

Cílem disertační práce je na základě studia třecích vrstev vyvinout model pro predikci součinitele adheze v kontaktu kola a kolejnice. Dílčí cíle jsou:

- Popsání vlivu složení třecí vrstvy na závislost smykového napětí/deformace.
- Vytvoření matematického modelu zohledňujícího třecí vrstvy mezi kontaktními povrchy.
- Implementace modelu složené třecí vrstvy, který na základě experimentů obecně popíše její smykové chování.
- Ověření vzniklého modelu s laboratorními experimenty.

7.3 Přínos disertační práce

7.3

Přínos disertační práce je zejména v získání poznatků z doposud málo studované oblasti chování komplexních třecích vrstev, které hrají klíčovou roli při přenosu sil mezi kolem a kolejnicí. V této oblasti budou získané vědomosti aplikovatelné při návrhu modifikátorů tření nebo vývoji systémů pro řízení trakce. Vytvořený matematický model přinese nový přesnější způsob predikce součinitele adheze. Model bude také možné použít pro přesnější určení vstupních parametrů do dynamických simulací, které patří mezi jednu z nejdůležitějších analýz chování kolejového vozidla.

7.4 Návaznost na současný stav řešení

7.4

Cíl disertační práce navazuje zejména na publikaci Meierhofer [39]. Současně s publikací od Vollebregta [38] se jedná dvě o nejdůležitější práce, na které by měl zamýšlený matematický model navázat a rozšířit je o popis komplexních třecích vrstev. Samotné studium těchto vrstev bude doplněno o poznatky z komplexních složení a vlivu jednotlivých složek a jejich parametrů na smykovou pevnost. Tím budou pochopeny a vysvětleny klíčové znalosti ze studia pevných kontaminantů od Houa [11], které ukazují odlišné chování třecích vrstev z různých materiálů.

8 VĚDECKÁ OTÁZKA A PRACOVNÍ HYPOTÉZA

Vědecká otázka 1

„Jaké charakteristiky třecích vrstev nejvýznamněji ovlivňují závislost mezi smykovým napětím a deformací vrstvy?“

Pracovní hypotéza 1

„Závislost mezi smykovým napětím a deformací třecí vrstvy je nejvíce ovlivněna materiálovými vlastnostmi, dále velikostí a tvarem částic. Mezi nejdůležitější materiálové vlastnosti patří tvrdost, otěruvzdornost a smyková pevnost.“

Vědecká otázka vychází z publikace Houa a kol. [11], kde testované třecí vrstvy z rozdílných materiálů a velikostí částic způsobily jiné průběhy závislosti smykového napětí na deformaci. Přesnější vysvětlení zjištěných rozdílů ovšem autor nediskutuje. Na základě studií [9, 12, 13] lze ovšem konstatovat, že odlišné materiálové vlastnosti mají nejvýznamnější dopad na velikost součinitele adheze a tedy smykového napětí ve vrstvě. Zejména tvrdost a smyková pevnost se ukazují jako zásadní parametry. Studie kompozitních materiálů [40, 41] navíc ukazují důležitou roli otěruvzdornosti. Velikost a tvar částic do jisté míry nehrají tak důležitou roli ve smykovém napětí. Větší částice ovšem vytváří objemnější volná místa v mezerách mezi částicemi [11], tím zvyšují nestabilitu třecí vrstvy. Tento fenomén se může projevit zejména na počátečním nárůstu smykového napětí, kde dochází k nejvýznamnějšímu přeuspořádání částic. Větší částice jsou také náchylnější na fragmentaci [13] a mohou tak způsobit rozptyl měřených hodnot. Z hlediska složených vrstev a kontaminantů je velikost částic velmi důležitá, jelikož určuje míru obnovy adheze [20, 21].

Vědecká otázka 2

„Jakými způsoby lze modifikovat třecí vrstvu, aby bylo dosaženo požadovaných třecích vlastností?“

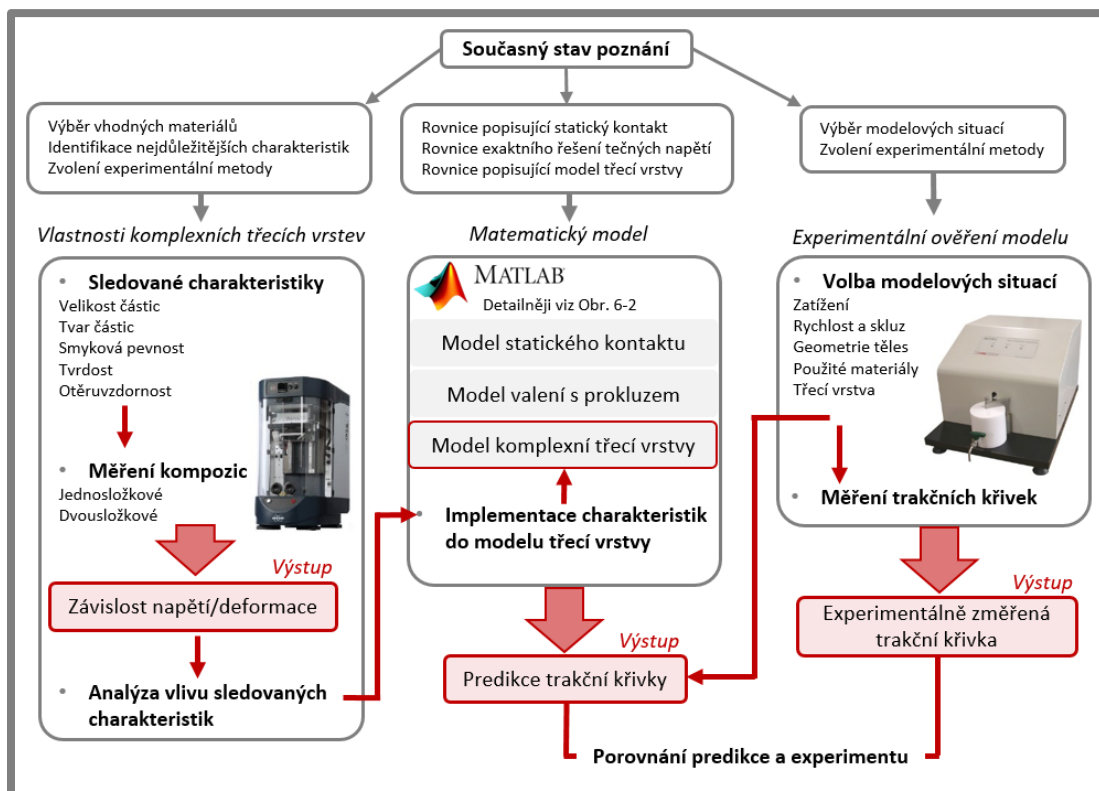
Pracovní hypotéza 2

„Dosažení požadovaných třecích vlastností lze docílit přidáním materiálu s vhodnou smykovou pevností, tvrdostí a velikostí částic do kontaktu. Množství přidaného materiálu ovlivní velikost poklesu nebo nárůstu smykové pevnosti a tedy součinitele adheze.“

Publikace [34] ukazuje, že přidáním látky o nízké smykové pevnosti do částic oxidů dojde k celkovému poklesu smykového napětí. Velikost poklesu je závislá na množství přidané látky a proto je důležité správně navrhnout velikost aplikovaného množství. S ohledem na třecí vrstvu je také důležité zvolit vhodnou tvrdost a velikost použitých částic. Tento fakt podporuje studie s částicemi písku [21], které s rostoucí velikostí částic dosahují vyšších hodnot adheze v listí kontaminovaném kontaktu. Naopak částice hliníku [20] s rostoucí velikostí částic vedou na nižší hodnoty součinitele adheze ve vodou kontaminovaném kontaktu. Optimální hodnoty součinitele adheze je tedy dosaženo kombinací správně zvoleného materiálu, velikosti obsažených částic a aplikované množství. Na tuto problematiku doposud nejsou publikovány důkladnější studie.

9 ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ VĚDECKÉ METODY ZKOUMÁNÍ

Řešení disertační práce lze rozdělit na tři etapy: (1) popis vlastností komplexních třecích vrstev, (2) vytvoření matematického modelu kontaktu s třecí vrstvou a (3) experimentální ověření matematického modelu. Schématický postup řešení je znázorněn na Obr. 6-1.



Obr. 6-1 Schéma postupu řešení

9.1 Vlastnosti komplexních třecích vrstev

První část disertační práce bude zaměřena na popis komplexních třecích vrstev. Na základě rešeršní části budou zajištěny následující látky: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , písek, listí, jíla a MoS_2 . Pro Fe_2O_3 , Fe_3O_4 a písek bude snaha zajistit více velikostí částic pro posouzení jejich vlivu. Následně bude probíhat měření smykových vlastností samostatných složek a jejich kombinace v objemových procentuálních poměrech 25 %/75 %, 50 %/50 % a 75 %/25 %. Přičemž budou testovány tyto dvousložkové kombinace:

- Fe_2O_3 a Fe_3O_4 – přirozeně vznikající zoxidovaná vrstva
- Písek a listí – z hlediska aplikovaného výzkumu běžně studovaná kombinace
- Fe_2O_3 a MoS_2 – kombinace reprezentující částice opotřebení a hlavní složku z modifikátorů tření a maziva okolku
- Jíla a MoS_2 – jílovitá zahušťovadla a MoS_2 patří mezi běžné složky modifikátorů tření

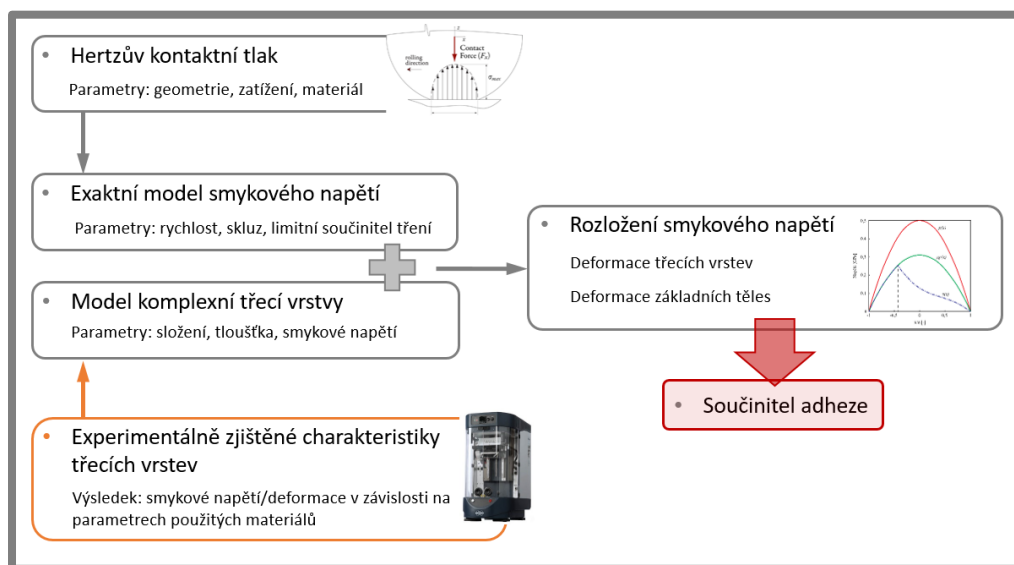
Testované komplexní látky budou zváženy na laboratorní váze KERN ABJ 320-4NM a rozmíchány v acetonu tak aby byly částice homogenně rozmístěny. Látka bude dále aplikována na testovaný povrch a po vyschnutí acetonu bude spuštěn test. Použitím acetonu se zamezí vzniku nekompaktní vrstvy s velkými mezerami mezi částicemi.

Měření bude realizováno na zařízení Bruker UMT Tribolab, které je součástí laboratoří ÚK. Zvolena bude konfigurace testovacích těles pin-on-plate vyrobených z ložiskové oceli. Deformace vrstvy bude vyvozována a měřena pomocí posuvné platformy s testovacím vzorkem pinu. Rychlost posuvu bude zvolena v rozmezí nejmenších možných hodnot 0,002 – 0,1 mm/s a testovací dráha 1 mm. Kontaktní tlak bude s ohledem na skutečné podmínky zvolen 750 MPa.

Pomocí naměřených zatěžovacích sil, třecích sil a průměru použitého plochého pinu bude přepočítáno smykové napětí testované vrstvy. Smykové napětí bude vždy přiřazeno odpovídajícímu posuvu (deformaci) vrstvy. Tyto data budou pro všechny testované vrstvy srovnány a bude porovnán vliv obsahu jednotlivých složek, velikosti částic, tvrdosti částic, ošetrivostnosti a smykové pevnosti. Zároveň budou výsledná data vstupovat do matematického modelu. Cílem této první části je popsat vliv jednotlivých materiálů na průběh smykového napětí třecí vrstvy a zároveň získat vstupní data do matematického modelu.

9.2 Matematický model kontaktu s třecí vrstvou

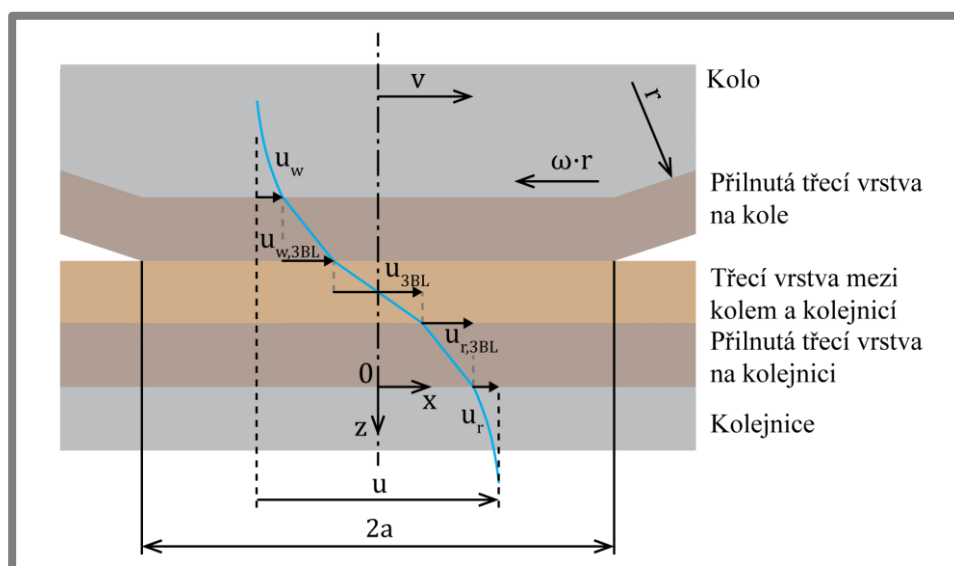
Druhá hlavní část disertační práce bude věnována vytvoření matematického modelu, popisujícího kontakt kola a kolejnice (schéma na Obr. 6-2). Programování bude provedeno v softwaru Matlab 2016a. Model bude zahrnovat chování komplexní třecí vrstvy a bude postaven na Hertzově teorii a exaktním řešení tangenciálních sil. Jelikož mnoho publikací využívá převedení skutečného tvaru kontaktní oblasti do modelového (např. eliptický → liniový), bude pro zjednodušení kontaktní problém řešen v rovině (liniově). Z důvodu variability modelu budou kontaktní tělesa definována pomocí poloměrů a šířky těles, lze tedy simulovat kontakt typu válec-válec a válec-rovina. Pro ověřovací experimenty poté bude skutečná kontaktní oblast převedena na odpovídající dvourozměrný případ v matematickém modelu.



Obr. 6-2 Schéma jednotlivých částí matematického modelu

V první fázi výpočtu bude z geometrie, zatížení a materiálových vlastností vypočítán kontaktní tlak dle Hertzovy teorie. Použity budou odvozené rovnice pro případ kontaktu dvou těles s poloměry v jedné ose a tloušťkou v ose druhé. Vypočítaný maximální tlak bude vstupovat do rovnice rozložení tlaku, které Hertzova teorie uvažuje jako semi-eliptické. Rozložení tlaku bude klíčovým parametrem pro druhou fázi výpočtu, kterou bude výpočet smykového napětí v kontaktní oblasti.

Hlavní část exaktního modelu řeší smykové napětí v oblasti lpění, kde celková deformace je dána součtem jednotlivých deformací všech těles v kontaktu, což je zobrazeno na Obr. 6-3. Aby bylo možné použít vstupní parametry (rychlost a skluz) je součet deformací povrchů pomocí derivace převeden na diferenciální rovnici prvního řádu. Tato rovnice bude řešena numericky za pomoci funkcí obsažených v softwaru Matlab. Důležitou vstupní okrajovou podmínkou pro tuto část výpočtu je limitní součinitel tření, jehož hodnota bude určena na základě provedených experimentů. Výsledkem této části výpočtu bude poloha přechodu mezi oblastí lpění a oblastí skluzu. V oblasti skluzu bude hodnota smykového napětí rovna součinu součinitele tření a kontaktního tlaku. Dále bude zjištěn průběh smykového napětí v oblasti lpění.



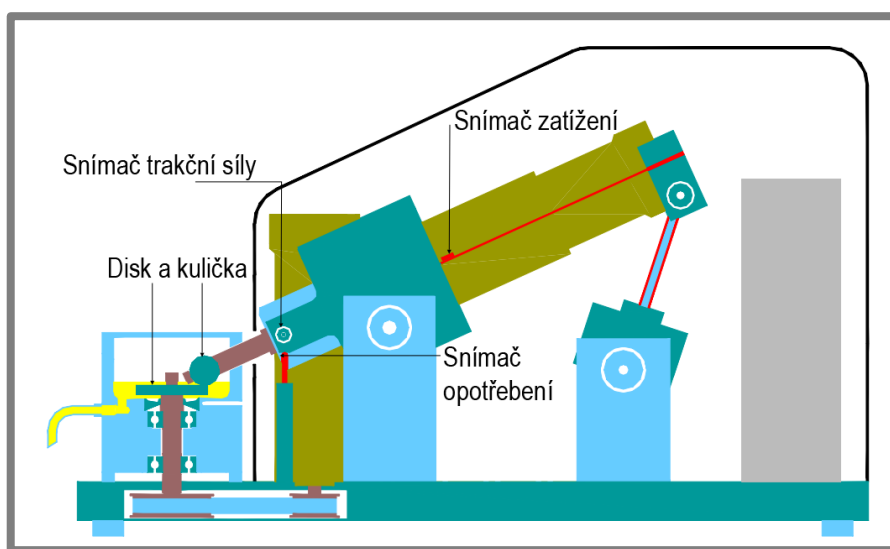
Obr. 6-3 Deformace základních těles a třecích vrstev v oblasti lpění

Komplexní třecí vrstva v exaktním řešení bude popsána modelem dle dostupných publikací [40, 41]. Tento model bude rozšířen o poznatky ze studie parametrů třecích vrstev zjištěné v první fázi řešení. Vstupními parametry budou data z měření a požadované přesné složení třecí vrstvy. Výpočtem poté bude určen konkrétní typ chování a závislost smykového napětí na deformaci, které bude popsáno elasticko-plastickým modelem dle Houa [11]. Celý tento proces bude implementován jako samostatná součást exaktního modelu.

Pro zjištění přesnosti modelu bude provedena citlivostní analýza. Za dané geometrie, zatížení, skluzu, rychlosti, materiálu a limitního součinitele tření budou měněny tyto parametry: tloušťka třecí vrstvy a složení třecí vrstvy (tedy závislost smykového napětí na deformaci). V případě, že bude některý z těchto parametrů třecí vrstvy výrazně ovlivňovat výsledky, bude potřeba zohlednit míru nejistoty při porovnávání matematického modelu s experimentálními výsledky.

9.3 Experimentální ověření modelu

Pro posouzení správnosti modelu budou provedeny experimenty za modelových podmínek. Ověřovací testy budou probíhat na laboratorním zařízení Mini Traction Machine (PCS Instruments) s konfigurací ball-on-disc (Obr. 6-4). Testy budou probíhat za podmínek malých rychlostí (200 – 400 mm/s) a kontaktního tlaku 750 MPa. Pro posouzení shody predikce s experimenty bude naměřena trakční křivka v rozmezí skluzů 1 – 5 % (odstupňováno po 1 %). Délka testu bude 1 minuta po počátečním nárůstu a ustálení hodnot součinitele adheze. Průměrná hodnota z této jedné minuty bude brána jako výsledná pro daný skluz. Vzorky disku budou vyrobeny z oceli C45, která je svými vlastnostmi blízko materiálu kolejnice. Kulička bude z materiálu C10. Díky odolnějšímu povrchu kuličky bude vznik oxidované vrstvy pozorován pouze na disku.



Obr. 6-4 Mini Traction Machine (PCS Instruments)

Testy budou provedeny pro vybrané kompozice z první části měření smykových pevností. Jako nejvhodnější se jeví kompozice $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ a $\text{Jíl}/\text{MoS}_2$. Aby bylo dosaženo obdobných podmínek, bude kompozice opět rozpuštěna v acetonu a nanášena na povrch disku před spuštěním testu. Po doměření všech skluzů s vybranou kompozicí bude potřeba analyzovat tloušťku vrstev oxidů a nanášené kompozice. Za tímto účelem bude vzorek disku ihned po testu zalit epoxidovou pryskyřicí. Následně dojde k metalografickému výbrusu napříč vzniklou dráhou a bude analyzována vzniklá vrstva za cílem zjištění tloušťek jednotlivých vrstev. Tyto hodnoty tloušťek budou vstupovat do matematického modelu třecí vrstvy.

Závěrem budou výsledky z predikčního matematického modelu srovnány s naměřenými hodnotami. Při porovnání bude zohledněna citlivost matematického modelu na vlastnosti třecí vrstvy, rozptyl hodnot z experimentů a přesnost určení tloušťek třecích vrstev.

9.4 Analýza možných rizik

9.4

Nenalezení dodavatele zvolených materiálů o různých velikostech částic.

Řešení: Přesetí částic na různé zrnitosti externí firmou.

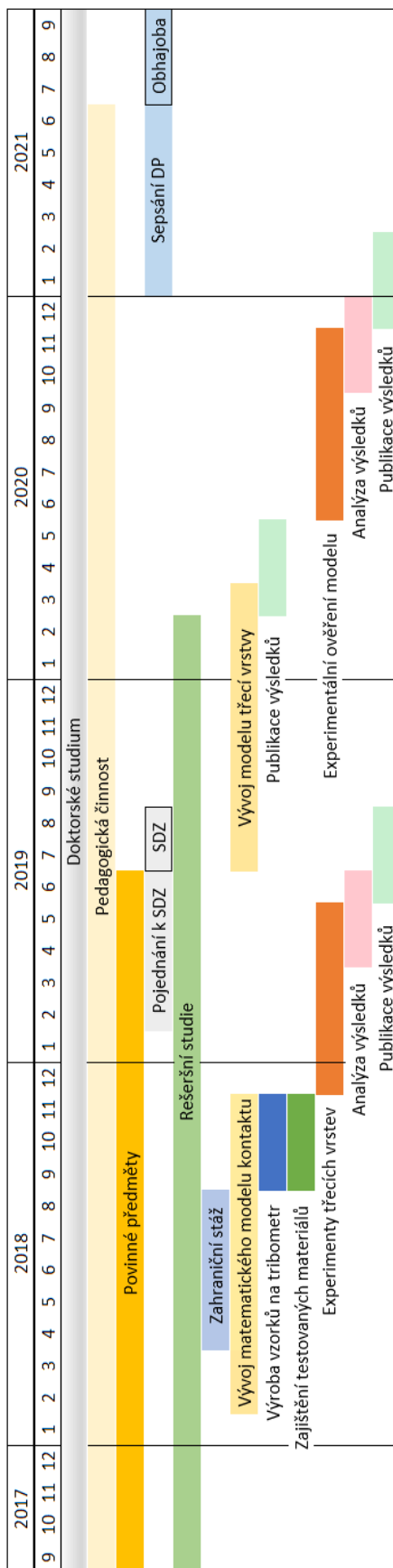
Nevyhovující řešení modelu komplexních třecích vrstev.

Řešení: Naprogramování a zavedení modelu MCA do exaktního řešení. Předcházet bude ověření vhodnosti porovnáním s experimentálně naměřenými daty smykového napětí komplexních třecích vrstev.

Špatná rozlišitelnost tloušťek třecích vrstev.

Řešení: Analýza vzorků pomocí Augerovy elektronové spektroskopie. Případně ponechání metalografických výbrusů a analýzy externí firmě.

10 ČASOVÝ ROZVRH A ETAPY ŘEŠENÍ



11 ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI A POTŘEBNOSTI ŘEŠENÍ DANÉ PROBLEMATIKY V DANÉM ČASE

Optimalizace přenosu sil mezi kolem a kolejnicí je jedním z nejdůležitějších aspektů pro komfortní a ekonomický provoz kolejových vozidel. V současnosti jsou kladeny vysoké nároky na snížení hluku a opotřebení kontaktních povrchů, což je reflektováno v počtu publikací na tuto tematiku za posledních deset let. Vyšší míra hluku má nejvýznamnější dopad v hustě zalidněných oblastech, kde provoz kolejových vozidel znepříjemňuje život obyvatelům v okolí. Naopak výraznější opotřebení nutí provozovatele k častějšímu přebušování nebo výměně poškozených kol a kolejnic. Řešením těchto problémů je tzv. *friction management*, neboli systémy pro řízení tření v kontaktu kola a kolejnice. Tyto systémy mohou být založeny na procesu pískování nebo aplikace modifikátoru tření do kontaktu. Většina publikovaných studií je ovšem zaměřena na aplikovaný výzkum a zabývá se zejména způsoby aplikace a aplikovaným množstvím.

Publikace zaměřené na tribologické chování kontaktu kola a kolejnice lze s ohledem na tuto disertační práci rozdělit na tři hlavní oblasti: zkoumání oxidických povrchových vrstev, pískování a modifikátory tření. Přestože je kontakt kola a kolejnice otevřený tribologický systém ovlivňovaný okolními podmínkami jsou tyto oblasti studovány odděleně. Interakce jednotlivých složek a vznik komplexní třecí vrstvy ovšem významně ovlivňuje chování kontaktu. Studium těchto složených vrstev je často opomíjeno a není tedy brán v úvahu skutečný stav kontaktu. Tento problém se promítá také do matematických modelů kontaktu, kde se až v posledních letech začali zavádět zjednodušené modely třecích vrstev. Přestože je přesná predikce součinitele adheze jedním z klíčových kroků pro řídicí systémy vozidel a dynamické simulace, není zde věnováno dostatečné úsilí ze strany výzkumných institucí.

12 SPOLUPRÁCE S JINÝMI INSTITUCEMI

V souladu s vytyčenými cíli bude autor spolupracovat s následujícími institucemi:

- Ústav materiálového inženýrství, VUT v Brně
- Ústav fyzikálního inženýrství, VUT v Brně
- Southwest Jiao Tong University, Čína

13 PŘEDPOKLÁDANÉ NÁKLADY SPOJENĚ S ŘEŠENÍM A JEJICH ZDROJE

13

13.1 Předpokládané náklady

13.1

• Konstrukce vzorků do univerzálního tribometru UMT Bruker Tribolab	15 000 Kč
• Vzorky disků do zařízení Mini Traction Machine	15 000 Kč
• Nákup testovaných materiálů	10 000 Kč
• Spotřební materiál	5 000 Kč
• Náklady spojené s účastí na konferencích	100 000 Kč
• Mzda řešitele	975 000 Kč
Celkem:	1 120 000 Kč

13.2 Financování výzkumu

13.2

Řešení disertační práce bude financováno z projektů školitele.

14 CHARAKTERISTIKA PŘEDPOKLÁDANÉHO ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Požadavkem Ústavu konstruování na splnění doktorského studia je odevzdání přílohové disertační práce složené z publikací v odborných časopisech. Z tohoto důvodu bude publikační činnost autora rozdělena na tři články v impaktovaných časopisech (J_{imp} v souladu s Metodikou hodnocení výzkumu a vývoje) korespondující s třemi hlavními částmi tohoto projektu:

- Vliv parametrů třecí vrstvy na smykovou pevnost
- Matematický model komplexní třecí vrstvy
- Experimentální ověření modelu složené třecí vrstvy

Seznam předpokládaných periodik pro publikaci výsledků:

Wear (IF = 2,531)

Tribology International (IF = 2,903)

Tribology Letters (IF = 1,891)

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit (IF = 1,537)

15 BIBLIOGRAFIE

- [1] CARTER, F., I. J. MCEWEN a C. PRITCHARD. On the Action of a Locomotive Driving Wheel. In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 1926, s. 151–157. ISSN 1364-5021. Dostupné z: doi:10.1098/rspa.1983.0054
- [2] ZHU, Y. *Adhesion in the wheel-rail contact. Stockholm, 2013. Disertační práce. Royal Institute of Technology. Department of Machine Design. Vedoucí práce Prof. Ulf Olofsson.* 2013. ISBN 978-91-7501-896-6
- [3] STOCK, R., L. STANLAKE, C. HARDWICK, D. EADIE a R. LEWIS. Material concepts for top of rail friction management – classification, characterization and application. *Proceedings of 10th international conference on contact mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems* [online]. 2015, s. 1–8. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2016.05.028
- [4] BEAGLEY, T. M., I. J. MCEWEN a C. PRITCHARD. Wheel rail adhesion - boundary lubrication by oily fluids. *Wear*. 1975, roč. 31, č. 1, s. 77–88.
- [5] BEAGLEY, T. M., I. J. MCEWEN a C. PRITCHARD. Wheel/rail adhesion - the influence of railhead debris. *Wear* [online]. 1975, roč. 33, č. 1, s. 141–152. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/0043-1648(75)90230-6
- [6] BEAGLEY, T. M. a C. PRITCHARD. Wheel/rail adhesion - the overriding influence of water. *Wear* [online]. 1975, roč. 35, č. 2, s. 299–313. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/0043-1648(75)90078-2
- [7] ZHU, Y., Y. LYU a U. OLOFSSON. Mapping the friction between railway wheels and rails focusing on environmental conditions. *Wear* [online]. 2015, roč. 324–325, s. 122–128. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2014.12.028
- [8] ZHU, Y., X. CHEN, W. WANG a H. YANG. A study on iron oxides and surface roughness in dry and wet wheel-rail contacts. *Wear* [online]. 2015, roč. 328–329, s. 241–248. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2015.02.025
- [9] GALAS, R., D. KVARDA, M. OMASTA, I. KRUPKA a M. HARTL. The role of constituents contained in water-based friction modifiers for top-of-rail application. *Tribology International* [online]. 2018, roč. 117, č. April 2017, s. 87–97. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2017.08.019
- [10] BEAGLEY, T. M. The rheological properties of solid rail contaminants and their effect on wheel/rail adhesion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* [online]. 1976, roč. 190, č. 1, s. 419–428. ISSN 0954-4119. Dostupné z: doi:10.1243/PIME
- [11] HOU, K., J. KALOUSEK a E. MAGEL. Rheological model of solid layer in rolling contact. *Wear* [online]. 1997, roč. 211, č. 1, s. 134–140. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1648(97)00097-5
- [12] KHALLADI, A. a K. ELLEUCH. Tribological Behavior of Wheel–Rail Contact Under Different Contaminants Using Pin-On-Disk Methodology. *Journal of Tribology* [online]. 2016, roč. 139, č. 1, s. 11102. ISSN 0742-4787. Dostupné z: doi:10.1115/1.4033051
- [13] 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* [online]. 2014, roč. 75, s. 16–23. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2014.03.008
- [14] BERTHIER, Y., S. DESCARTES, M. BUSQUET, E. NICCOLINI, C. DESRAYAUD a L. BAILLET. The role and effects of the third body in the wheel – rail interaction. *Materials and Structures* [online]. 2004, roč. 27, s. 423–436. ISSN 8756-758X. Dostupné z: doi:10.1111/j.1460-2695.2004.00764.x
- [15] DESCARTES, S., C. DESRAYAUD, E. NICCOLINI a Y. BERTHIER. Presence and role of the third body in a wheel – rail contact. *Wear* [online]. 2005, roč. 258, č. 7–8, s. 1081–1090. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2004.03.068
- [16] NICCOLINI, E. a Y. BERTHIER. Wheel-rail adhesion: Laboratory study of „natural“ third body role on locomotives wheels and rails. *Wear* [online]. 2005, roč. 258, č. 7–8, s. 1172–1178. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2004.03.028
- [17] NAKAHARA, T., K. S. BAEK, H. CHEN a M. ISHIDA. Relationship between surface oxide layer and transient traction characteristics for two steel rollers under unlubricated and water lubricated conditions. *Wear* [online]. 2011, roč. 271, č. 1–2, s. 25–31. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2010.10.030
- [18] LEWIS, R. a R. S. DWYER-JOYCE. Wear at the wheel/rail interface when sanding is used to increase adhesion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F-Journal of Rail and Rapid Transit* [online]. 2006, roč. 220, č. 1, s. 29–41. ISSN 0954-4097. Dostupné z: doi:Doi 10.1243/095440905x33260
- [19] WANG, W. J., H. F. ZHANG, H. Y. WANG, Q. Y. LIU a M. H. ZHU. Study on the adhesion behavior of wheel/rail under oil, water and sanding conditions. *Wear* [online]. 2011, roč. 271, č. 9–10, s. 2693–2698. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2010.12.019
- [20] CAO, X., W. L. HUANG, C. G. HE, J. F. PENG, J. GUO, W. J. WANG, Q. Y. LIU a M. H. ZHU. The effect of alumina particle on improving adhesion and wear damage of wheel/rail under wet conditions. *Wear* [online]. 2016, roč. 348–349, s. 98–115. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2015.12.004
- [21] ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI a R. LEWIS. 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* [online]. 2011, roč. 271, č. 1–2, s. 14–24. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2010.10.050
- [22] ARIAS-CUEVAS, O. a Z. LI. Field investigations into the adhesion recovery in leaf-contaminated wheel-rail contacts with locomotive sanders. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* [online]. 2011, roč. 225, č. 5, s. 443–456. ISSN 0954-4097. Dostupné z: doi:10.1177/2041301710394921
- [23] GALLARDO-HERNANDEZ, E. A. a R. LEWIS. Twin disc assessment of wheel/rail adhesion. *Wear* [online]. 2008, roč. 265, č. 9–10, s. 1309–1316. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2008.03.020

- [24] OMASTA, M., M. MACHATKA, D. SMEJKAL, M. HARTL a I. KŘUPKA. Influence of sanding parameters on adhesion recovery in contaminated wheel-rail contact. *Wear* [online]. 2015, roč. 322–323, s. 218–225. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2014.11.017
- [25] EADIE, D. T., D. ELVIDGE, K. D. OLDKNOW, R. STOCK, P. POINTNER, J. KALOUSEK a P. KLAUSER. The effects of top of rail friction modifier on wear and rolling contact fatigue: Full-scale rail-wheel test rig evaluation, analysis and modelling. *Wear* [online]. 2008, roč. 265, č. 9–10, s. 1222–1230. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2008.02.029
- [26] SEO, J.-W., H.-K. JUN, S.-J. KWON a D.-H. LEE. Effect of Friction Modifier on Rolling Contact Fatigue and Wear of Wheel and Rail Materials. *Tribology Transactions* [online]. 2016, roč. 0, č. 0, s. 1–12. ISSN 1040-2004. Dostupné z: doi:10.1080/10402004.2016.1271487
- [27] EADIE, D. T., M. SANTORO a W. POWELL. Local control of noise and vibration with KELTRACK friction modifier and Protector trackside application: An integrated solution. *Journal of Sound and Vibration* [online]. 2003, roč. 267, č. 3, s. 761–772. ISSN 0022460X. Dostupné z: doi:10.1016/S0022-460X(03)00739-9
- [28] LIU, X. a P. A. MEEHAN. Investigation of squeal noise under positive friction characteristics condition provided by friction modifiers. *Journal of Sound and Vibration* [online]. 2016, roč. 371, s. 393–405. ISSN 0022460X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2016.02.028
- [29] SUDA, Y., T. IWASA, H. KOMINE, M. TOMEOKA, H. NAKAZAWA, K. MATSUMOTO, T. NAKAI, M. TANIMOTO a Y. KISHIMOTO. Development of onboard friction control. *Wear* [online]. 2005, roč. 258, č. 7–8, s. 1109–1114. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2004.03.059
- [30] HARMON, M. a R. LEWIS. Review of top of rail friction modifier tribology. *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces* [online]. 2016, roč. 5831, č. October, s. 1–13. ISSN 1751-5831. Dostupné z: doi:10.1080/17515831.2016.1216265
- [31] LI, Z., O. ARIAS-CUEVAS, R. LEWIS a E. A. GALLARDO-HERNANDEZ. Rolling–Sliding Laboratory Tests of Friction Modifiers in Leaf Contaminated Wheel–Rail Contacts. *Tribology Letters* [online]. 2009, roč. 33, č. 2, s. 97–109. ISSN 1023-8883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-008-9393-3
- [32] LI, Z. a O. ARIAS-CUEVAS. An investigation on the desired properties of friction modifiers for slippery rails. In: *International Symposium on Speed-up, Safety and Service Technology for Railway and Maglev Systems*. 2009, s. 16–19.
- [33] 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* [online]. 2013, roč. 227, č. 2, s. 115–127. ISSN 09544097. Dostupné z: doi:10.1177/0954409712452239
- [34] LU, X., J. COTTER a D. T. EADIE. Laboratory study of the tribological properties of friction modifier thin films for friction control at the wheel/rail

- interface. *Wear* [online]. 2005, roč. 259, č. 7–12, s. 1262–1269. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2005.01.018
- [35] MEYMAND, S. Z., A. KEYLIN a M. AHMADIAN. A survey of wheel-rail contact models for rail vehicles. *Vehicle System Dynamics* [online]. 2016, roč. 54, č. 3, s. 386–428. ISSN 17445159. Dostupné z: doi:10.1080/00423114.2015.1137956
- [36] JOHNSON, K. L. *The Effect of Spin Upon Rolling Motion of an Elastic Sphere on a Plane* [online]. 1958. Dostupné z: doi:http://www.grc.nasa.gov/WWW/StructuresMaterials/TribMech/highlights/documents/reference/4-Johnson%20K.%20L.%20(1958b)%20J.%20Appl.%20Mech.,%20Trans%20ASME,%20Vol.%2080,%20pp%20339-346.pdf
- [37] KALKER, J. J. a K. L. JOHNSON. *Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact* [online]. 1993. ISBN 0792307127. Dostupné z: doi:10.1115/1.2900773
- [38] VOLLEBREGT, E. A.H. Numerical modeling of measured railway creep versus creep-force curves with CONTACT. *Wear* [online]. 2014, roč. 314, č. 1–2, s. 87–95. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2013.11.030
- [39] MEIERHOFER, A., C. HARDWICK, R. LEWIS, K. SIX a P. DIETMAIER. Third body layer-experimental results and a model describing its influence on the traction coefficient. *Wear* [online]. 2013, roč. 314, s. 148–154. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2013.11.040
- [40] AXÉN, N., I. M. HUTCHINGS a S. JACOBSON. A model for the friction of multiphase materials in abrasion. *Tribology International* [online]. 1996, roč. 29, č. 6, s. 467–475. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/0301-679X(95)00104-C
- [41] AXÉN, N. a S. JACOBSON. A model for the abrasive wear resistance of multiphase materials. *Wear* [online]. 1994, roč. 174, č. 1–2, s. 187–199. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/0043-1648(94)90101-5
- [42] POPOV, V. L. a S. G. PSAKHIE. Theoretical principles of modeling elastoplastic media by movable cellular automata method. I. Homogeneous media. *Physical Mesomechanics* [online]. 2001, roč. 4, č. 1, s. 12–25. Dostupné z: mechanik.tu-berlin.de/popov/publications/MCA-Popov-Psakhie1.pdf
- [43] POPOV, V. L. a S. G. PSAKHIE. Numerical simulation methods in tribology. *Tribology International* [online]. 2007, roč. 40, č. 6, s. 916–923. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2006.02.020
- [44] PSAKHIE, S. G., Y. HORIE, G. P. OSTERMEYER, S. Yu KOROSTELEV, A. Yu SMOLIN, E. V. SHILKO, A. I. DMITRIEV, S. BLATNIK, M. ŠPEGEL a S. ZAVŠEK. Movable cellular automata method for simulating materials with mesostructure. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* [online]. 2001, roč. 37, č. 1–3, s. 311–334. ISSN 01678442. Dostupné z: doi:10.1016/S0167-8442(01)00079-9
- [45] BUCHER, F., A. I. DMITRIEV, M. ERTZ, K. KNOTHE, V. L. POPOV, S. G. PSAKHIE a E. V. SHILKO. Multiscale simulation of dry friction in wheel/rail contact. *Wear* [online]. 2006, roč. 261, č. 7–8, s. 874–884. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2006.01.046

- [46] ÖSTERLE, W., A. I. DMITRIEV, G. ORTS-GIL, T. SCHNEIDER, H. REN a X. SUN. Verification of nanometre-scale modelling of tribofilm sliding behaviour. *Tribology International* [online]. 2013, roč. 62, s. 155–162. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2013.02.018

16 VĚDECKÝ ŽIVOTOPIS

Ing. Daniel Kvarda

- PhD student
- Vědecký pracovník skupiny kolejové dopravy, odbor tribologie, Ústav konstruování, VUT v Brně

Vzdělání

- 2015 – 2017 Ing. – Konstrukční inženýrství – Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně
- 2012 – 2015 Bc. – Základy strojního inženýrství – Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně

Praktické zkušenosti, stáže, vědecké projekty

- 2017 RISEN Research and ECR Training Workshop, Polytechnic University of Valencia, Valencia, Spain – Workshop zaměřený na soft skills a spolupráci Ph.D. studentů
- 2017 Diplomová práce – Vliv složení modifikátoru tření na trakci v kontaktu kola a kolejnice

Výsledky vědeckých aktivit a akademická ocenění

- 2017 Ocenění za nejlepší prezentaci na International Symposium on Rail Infrastructure Systems Engineering (i-RISE 2017) – The role of constituents contained in water-based friction modifier
- 2017 Cena průmyslového podniku – Uděleno společností Honeywell za vynikající diplomovou práci
- 2017 Spoluautor článku publikovaného v *Tribology International*: The role of constituents contained in water-based friction modifiers for top-of-rail application
- 2017 Magisterský studijní obor – prospěl s vyznamenáním

Publikační činnost

GALAS, R.; KVARDA, D.; OMASTA, M.; KŘUPKA, I.; HARTL, M. The role of constituents contained in water-based friction modifiers for top-of-rail application. *Tribology International*, 2017, roč. 117, č. 1, s. 87-97. ISSN: 0301-679X.

Další relevantní informace

Výzkumné dovednosti:

- Měření a vyhodnocení topografie povrchu pomocí 3D optického profilometru
- Měření třecích vlastností (PCS Mini traction machine, Bruker UMT Tribolab) a reologických vlastností (HAAKE RotoVisco 1)
- Měření tenkých mazacích filmů pomocí kolorimetrické interferometrie

Research ID – <http://www.researcherid.com/rid/U-2251-2017>

ORCID – <https://orcid.org/0000-0002-5386-2486>