



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Brno University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design

VLIV SLOŽENÍ TŘECÍ VRSTVY NA TRIBOLOGII KONTAKTU KOLA A KOLEJNICE

Ing. Daniel Kvarda

Pojednání ke státní doktorské zkoušce
Discourse on the Dissertation Thesis

Brno 2020



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Brno University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design

Vliv složení třecí vrstvy na tribologii kontaktu kola a kolejnice

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

Ing. Daniel Kvarda

Autor práce
Author

prof. Ing. Martin Hartl Ph.D.

Vedoucí práce
Supervisor

Pojednání ke státní doktorské zkoušce
Discourse on the Dissertation Thesis

Brno 2020

OBSAH

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | ÚVOD | 5 |
| 2 | VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE | 7 |
| 3 | SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ | 9 |
| 3.1 | Modely pro predikci součinitele adheze v kontaktu kola a kolejnice | 9 |
| 3.2 | Třecí vrstva v kontaktu kola a kolejnice | 17 |
| 4 | ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE | 31 |
| 4.1 | Zhodnocení poznatků z prací věnovaných predikcím tření v kontaktu kola a kolejnice | 31 |
| 4.2 | Zhodnocení poznatků z prací věnovaných třecím vrstvám | 32 |
| 4.3 | Vyvození závěrů získaných na základě rešerše | 33 |
| 5 | VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ | 35 |
| 5.1 | Zaměření disertační práce | 35 |
| 5.2 | Cíl disertační práce | 35 |
| 5.3 | Způsob řešení a použité metody | 37 |
| 5.3.1 | Matematický model | 37 |
| 5.3.2 | Experimentální studium komplexních třecích vrstev | 38 |
| 5.3.3 | Experimentální ověření modelu | 38 |
| 5.3.4 | Plán publikací | 39 |
| 6 | SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE | 42 |
| 6.1 | Matematický model suchého kontaktu | 42 |
| 6.1.1 | Změna flexibility kontaktu za nízkých skluzů | 43 |
| 6.1.2 | Změna adhezních vlastností za vysokých skluzů | 45 |
| 6.1.3 | Prvotní výsledky modelu | 46 |
| 6.2 | Matematický model kontaktu nerovností | 48 |
| 7 | ZÁVĚR | 56 |

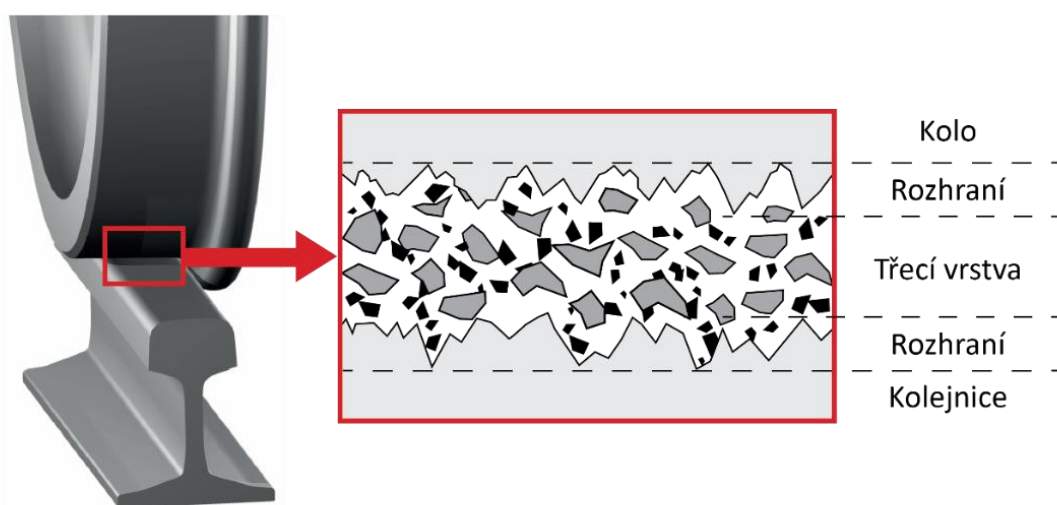
| | | |
|----------|-------------------------------|-----------|
| 8 | LITERATURA | 57 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ | 62 |
| | SEZNAM TABULEK | 64 |
| | SEZNAM PUBLIKACÍ | 65 |

1 ÚVOD

Kolejová doprava je v současnosti jedním z nejefektivnějších 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 cm². Procesy probíhající v této malé kontaktní 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 výrazně zvýšil.

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 opotřebením. 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.

Z předchozího odstavce lze usoudit, že v kontaktu kola a kolejnice vzniká heterogenní vrstva látek různého původu, viz Obr. 1-1. Tato *třecí vrstva* (často také označována jako „*třetí těleso*“) má významný vliv na schopnost kontaktu přenášet síly. Díky velkému množství



obr. 1-1 Ilustrace kontaktu s třecí vrstvou

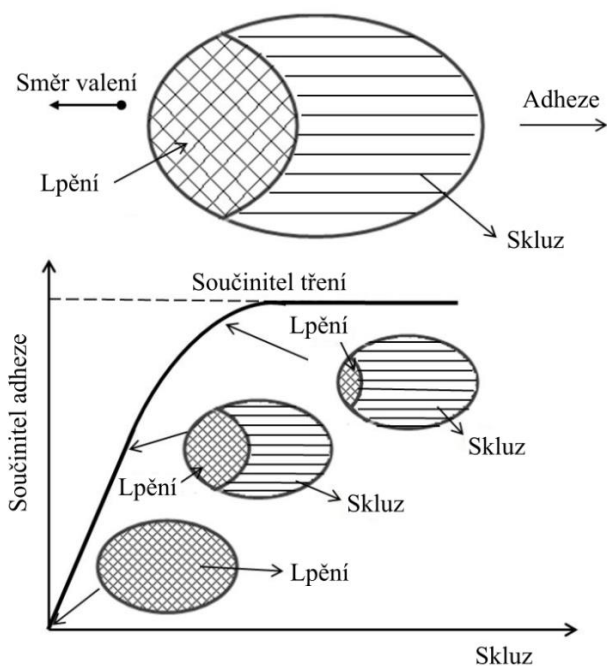
okolních vlivů je však složité napodobit reálné podmínky v laboratoři a in situ pozorování je omezeno na malé množství sledovatelných jevů. Matematické modely pro řízení mazacích nebo pískovacích systému jsou z toho důvodu postaveny na zjednodušených předpokladech a koeficientech založených na experimentech 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, 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.

Předložené pojednání se zabývá chováním třecí vrstvy a modely, které jsou schopny predikovat tření kontaktu kola a kolejnice. Práce je zaměřena na třecí vrstvu v kontaktu kola a kolejnice. Část práce také popisuje možné metody pro predikci třecích vlastností kontaktu.

2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Problematika kontaktu kola a kolejnice je na rozdíl od jiných strojních součástí velmi specifická. Nejen náročné provozní podmínky, ale také ovlivnění z okolního prostředí. V případě ložisek nebo ozubených kol mluvíme o uzavřeném systému, který pracuje za předem definovaných podmínek mazání. Kolo a kolejnice jsou naopak vystaveny podmínkám okolního prostředí. Kvantifikovat síly přenesené kontaktem proto není nijak jednoduché.

Přenos sil mezi tělesem tvaru válce a podložkou je realizován v kontaktní oblasti. Těleso působí na podložku normálovou silou a při působení momentu na válec dojde k změně jeho obvodové rychlosti. Díky tomu, že obvodová rychlost válce a rychlost jeho pohybu může nabývat rozdílných hodnot, vzniká mezi tělesy *skluz*. Ten je definován jako relativní rychlost povrchů vztažená k rychlosti pohybu kola. Působením skluzu vzniká mezi povrchy smykové napětí, které způsobuje přenos sil mezi kolem a podložkou. Pokud smykové napětí v daném bodě kontaktu nedosáhne maximální přenositelné hodnoty (součinitele tření) nazýváme jej bod v oblasti *lpění* (viz Obr. 2-1). V případě, že v bodě nastane maximální smykové napětí, jedná se o bod v oblasti *skluzu*. S rostoucím skluzem roste i smykové namáhání kontaktu, a tedy součinitel adheze. Při určité hodnotě skluzu dojde k dosažení maximální hodnoty součinitele adheze. Tato limitní hodnota je ekvivalentem k součiniteli tření. Tento popis odpovídá ideálnímu kontaktu válce s podložkou.



obr. 2-1 Trakční křivka [1]

Z předchozího odstavce lze usoudit, že rostoucí skluz vede k vyššímu smykovému namáhání a progresivnímu růstu oblasti skluzu na úkor oblasti lpění. Tento jev byl poprvé matematicky popsán Carterem [2] a později potvrzen experimentální metodou fotoelasticimetrie v kombinaci se zmrazením napětí autory Hainesem a Ollertonem [3]. Obě tyto práce mají významný dopad, jelikož jako první popisují a potvrzují chování valivého kontaktu s prokluzem.

O další rozvoj v této oblasti se zasloužil Kenneth Johnson, který jako první vyřešil problém trojrozměrného valivého kontaktu [4]. Jedním z největších přínosů má ovšem Joost Kalker, jehož práce byla zaměřená na rozvoj numerických metod pro řešení kontaktních problémů. Jeho algoritmus CONTACT umožňuje numerické řešení exaktní teorie a algoritmus FASTSIM řešení zjednodušené teorie [5, 6]. Ještě rychlejšího výpočtu dosahuje Polachův model [7], kde rychlý výpočet kontaktního problému umožňuje využití v multibody dynamických simulacích. Výhodou těchto rychlých modelů založených na zjednodušeních je také možnost řešit transientní děje za nízkých výpočetních časů [8].

Výše zmíněné práce řeší suchý kontakt bez kontaminace. Za reálných podmínek ovšem kontaktní tělesa nejsou ideální a je potřeba v modelu zohlednit vliv materiálu a jeho plasticitu [9–11], reálnou drsnost [12–14] a kontaminaci cizími látkami [13–16]. Zároveň za vyšších skluzů dochází k ovlivnění kontaktu zvýšením teploty v důsledku tření [12, 13, 17]. Tato problematika je řešena z různých pohledů (analyticky/numericky, exaktně/zjednodušeně). Žádná z prací ovšem nezohledňuje všechny aspekty kontaktu a mnohdy využívá korekční parametry.

Samotná kontaminace kontaktu z hlediska experimentálních přístupů zahrnuje velké množství prací. Mezi hlavní řešenou problematiku patří kontaminace vodou [18–22], kde malé množství vody dokáže v kombinaci s pevnými kontaminanty vytvořit vysoce viskózní pastu a způsobit nízký součinitel adheze. Kontaminace listím je v mnoha místech závažný problém zejména v kombinaci s vodou [23, 24], jelikož způsobuje nízké hodnoty součinitele adheze. Aktivně se tento problém řeší pískováním [25–27], případně aplikací modifikátoru tření [28, 29]. Samotný modifikátor tření lze použít pro optimalizaci součinitele adheze v kontaktu a snížení opotřebení, laterálních sil a hluku. Tato problematika je velice rozsáhlá a dobře popsána v přehledových článcích [30, 31].

Z předchozích odstavců lze vyvodit závěr, že problematika modelování kontaktu kola a kolejnice je složitá a používá mnoho přístupů pro různé druhy řešených problémů. Reálný kontakt by navíc měl být uvažován jako otevřený systému podléhající mnoha typům změn, ať už z hlediska základního tělesa tak i přítomnosti cizích těles. Předběžným cílem disertační práce je za pomoci numerických a experimentálních metod vyvinout postup pro predikci součinitele adheze v reálném kontaktu kola a kolejnice a experimentálně popsat chování komplexních třecích vrstev.

3 SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

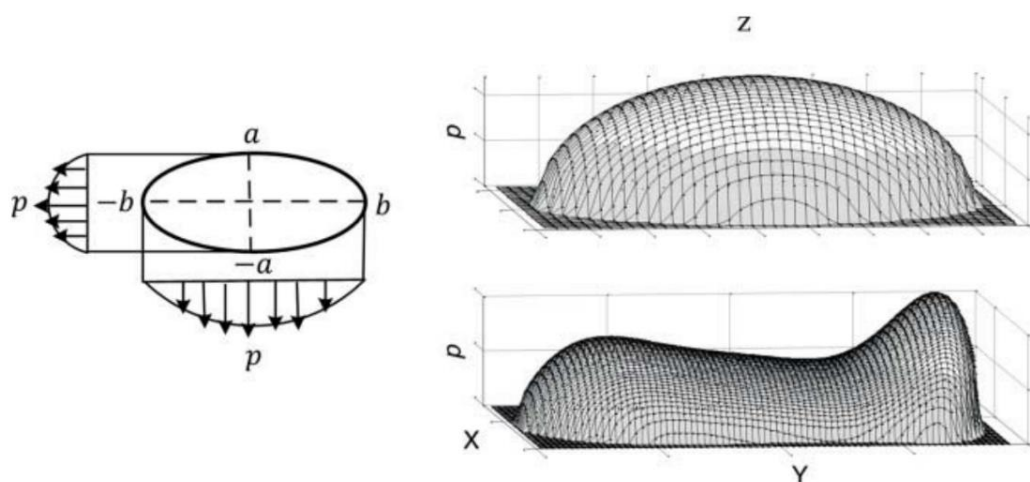
3.1 Modely pro predikci součinitele adheze v kontaktu kola a kolejnice

[32] MEYMAND, S. Z., A. KEYLIN a M. AHMADIAN. A survey of wheel-rail contact models for rail vehicles.

Přehledový článek shrnující dosavadní vývoj a používané teorie při řešení kontaktu kola a kolejnice. Úvodní část se zabývá kinematickým popisem kontaktu, který je důležitý jakožto výchozí předpoklad pro řešení kontaktního problému. Samotné řešení kontaktu je rozděleno na dvě hlavní části: normálový kontakt a tangenciální kontakt. V poslední části jsou zmíněny další pokroky v této oblasti jako experimentální ověření modelů, vliv skluzu a efekt kontaminace. Pro pochopení problematiky tohoto pojednání udává tento článek ucelený pohled kontaktních modelů.

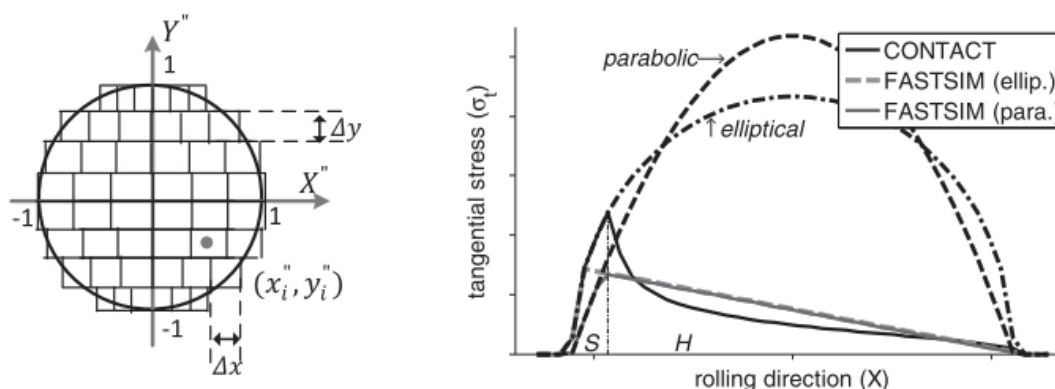
Výsledky

Řešením normálového kontaktu je deformace (velikost kontaktní oblasti) a rozložení kontaktního tlaku mezi dvěma tělesy zatíženými proti sobě. Obecně existují dva způsoby řešení a to Hertzian (Hertzův) model a non-Hertzian model (obr. 3-1). Hertzův model zavádí zjednodušení jako elastické chování materiálu, konstantní poloměr křivosti v kontaktu nebo výrazně větší křivosti těles, než je rozměr kontaktní oblasti. Díky tomu je rychlé a jednoduché získat řešení, a proto je tento zjednodušený způsob často používán pro kontakt kola a kolejnice. Non-Hertzian model nemá výše zmíněné restriktce, a proto je možné numericky řešit kontakt jakékoliv geometrie, i takové která vytváří vícebodový kontakt.



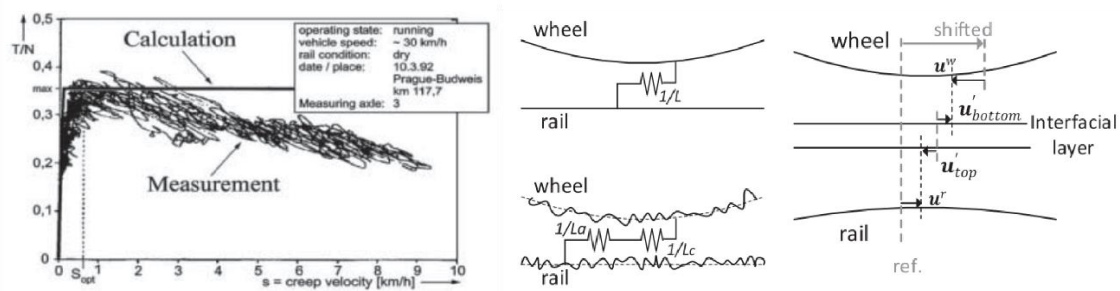
obr. 3-1 Kontaktní oblast (vlevo), Hertzův model (nahore) a ne-Hertzův model (dole) [32]

Tangenciální kontakt vychází z kinematiky pohybu kola po kolejnici. Na základě různých zjednodušení lze poté odvodit různé přístupy k řešení. Jednou z těchto teorií je Kalkerova lineární teorie, která zanedbává smyková napětí v oblasti, kde mezi tělesy vzniká prokluz (viz obr. 2-1). Díky tomu lze tento model použít pouze pro malé skluzu, případně velké součinitele tření. Dalšími analytickými modely využívající zjednodušení jsou například model Johnsona a Vermeulena, nebo Polachův model. Jako klíčový se ukázal algoritmus Kalkera používající zjednodušenou teorii s názvem FASTSIM. Tento algoritmus uvažuje zjednodušení závislosti mezi smykovým napětím a deformací pomocí parametru flexibility L . Zavedením tohoto předpokladu do kinematických vztahů a s využitím rozdělení kontaktní plochy na diskrétní síť lze numericky vyřešit rozložení smykového napětí v kontaktu (viz obr. 3-2). Díky tomuto přístupu lze do algoritmu zavést modifikace jako například non-Hertzian kontakt nebo závislost součinitele adheze na rychlosti. Zároveň je při použití parabolického rozložení kontaktního tlaku dosaženo dobré shody s dalším Kalkerovým algoritmem nazvaným CONTACT. Tento algoritmus je založen na exaktní teorii, která je v dnešní době považována za standart při řešení kontaktního problému. Exaktní teorie byla vyvinuta generalizací principu virtuální práce kontaktního problému. Tento problém je řešen pomocí numerických přístupů.



obr. 3-2 Rozdělení kontaktní oblasti [33] a porovnání algoritmu FASTSIM a CONTACT [32]

Důležitý poznatek v této publikaci je o kontaminaci kontaktu a drsnosti povrchu. Predikce matematických modelů naznačují strmý nárůst trakční křivky v oblasti malých skluzů. Tento jev je však v kontradikci s experimentálními studii jak je naznačeno na obr. 3-3 vlevo. Řešením je zahrnutí změn povrchů těles a třecí vrstvy, které nebyly součástí výchozích výše zmíněných modelů. Toho lze dosáhnout například změnou parametru flexibility ve FASTSIMU jak je ilustrováno na obr. 3-3 vpravo.



obr. 3-3 Porovnání měření a predikce [12, 34] – vlevo, model kontaktu - vpravo [35, 36]

Závěr

Přehledový článek udává kompaktní pohled na současný stav metod řešení valivého kontaktu. Jednoduché modely Kalkerovi lineární teorie a Johnsonova a Vermeulena teorie umožňují rychlý, avšak nepřesný výpočet. Naopak Kalkerova exaktní teorie je používána jako nejpřesnější standart, avšak za cenu velkých výpočetních časů. Na pomezí těchto dvou extrémů leží Polachův model a Kalkerova zjednodušená teorie FASTSIM, která je založena na zjednodušení exaktní teorie. Dalšími zjednodušujícími předpoklady algoritmu FASTSIM je dosaženo Polachova modelu. Samotný algoritmus FASTSIM díky své povaze umožňuje upravit proces řešení přidáním modifikací jako je třecí vrstva a drsnost.

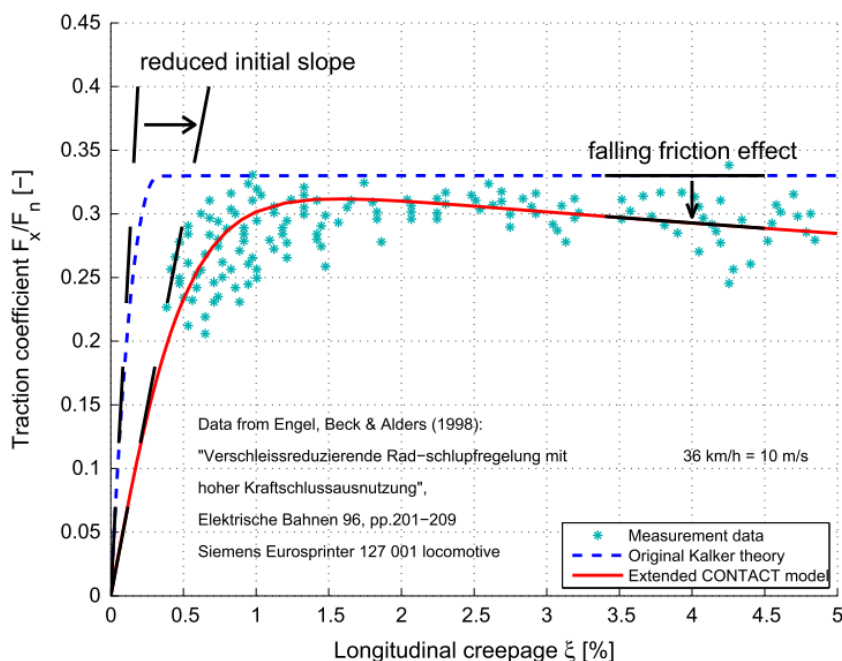
[36] VOLLEBREGT, E. A. H. Numerical modeling of measured railway creep versus creep-force curves with CONTACT.

Tato práce se zabývá modifikací exaktní teorie tak, aby bylo zohledněno skutečné chování kontaktu. Exaktní Kalkerův model dokáže přesně predikovat součinitel adheze pouze pro ideální podmínky základních těles. Experimentální studie ukazují ovšem odlišná chování kontaktu i při podmínkách kdy povrchy kontaktních těles se zdají být čisté.

Výsledky

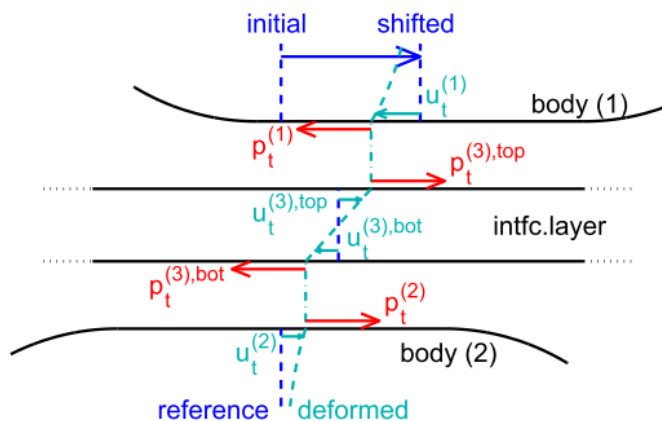
Při použití původního exaktního modelu vznikají dvě nepřesnosti od experimentálních dat. První nepřesností je v počátečním nárůstu součinitele adheze při rostoucím skluzu jak je naznačeno na obr. 3-4. Měření ukazují mnohem menší strmost počátečního nárůstu oproti numerickým predikcím. Tento jev je přisuzován efektu drsnosti a kontaminace kontaktu. Do modelu je tedy zavedena mezivrstva reprezentující drsnost a odlišné materiálové složení, než je základní materiál. Druhou odlišností je pokles adheze při vyšších hodnotách skluzu. Problém nejen exaktního ale i jiných modelů je využití Coulombova přístupu při řešení součinitele tření. Ve skutečnosti dochází při vyšších skluzových rychlostech k poklesu součinitele tření (viz obr 3-4), v důsledku změny kontaktních podmínek nárůstem teploty. Aby bylo možné dosáhnout co nejbližší shody s experimentálními studiemi jsou oba tyto

problémy interpretovány matematicky a zavedeny do současného modelu Kalkerovi exaktní teorie. Výsledek této modifikace porovnán s původním modelem je zobrazen na obr. 3-4.



obr. 3-4 Ukázka nepřesností původního modelu a řešení modifikovaného modelu [36]

Tangenciální problém exaktní teorie je řešen jako závislost mezi deformacemi kontaktních povrchů a vzniklých povrchových napětí. Deformace kontaktních povrchů vychází z teorie lineární elasticity a reálná tělesa jsou aproximována takzvaným nekonečným poloprostorem. Problém nekonečného poloprostoru lze poté řešit analyticky za použití Boussinesq-Cerruti integrálu. Třecí vrstva je přičtena k zmíněným deformacím kontaktních povrchů a je charakterizována tloušťkou a elastickým modulem ve smyku. Část zmíněných deformací kontaktního povrchu je poté přenesena skrze třecí vrstvu jak ukazuje obr. 3-5 a tím snižuje smyková napětí. Díky působení tohoto třetího tělesa a snížením smykových napětí dojde k redukci počátečního sklonu trakční křivky.



obr. 3-5 Deformace v základních tělesech a třecí vrstvě vzniklé působením skluzu [36]

Druhý problém vznikající u vyšších skluzů je často nazýván „falling friction“, tedy padající tření. Tento jev je často přisuzován nárůstu kontaktní teploty. Součinitel tření je v tomto případě omezující, jelikož udává maximální možné smykové napětí v kontaktu. Využitím závislosti mezi součinitelem tření a skluzovou rychlostí lze dosáhnout redukci součinitele adheze za vyšších skluzů. Součinitel tření je tedy implementován jako závislý na lokálním skluzu v diskretních bodech kontaktu. S vyšším lokálním skluzem dochází k nižšímu součiniteli tření a tedy nižší hodnotě maximálního smykového napětí. Závěrečná část práce se věnuje vzniku nestabilit u tranzientních jevů. Tato problematika je ovšem mimo zaměření tohoto pojednání.

Závěr

Tato publikace zpočátku popisuje problematiku třecí vrstvy a matematicky popisuje její vliv na tangenciální kontakt. Implementace této vrstvy je provedena do algoritmu CONTACT za pomoci změny celkové deformace kontaktu při působení smykového napětí. Tento efekt má za následek snížení sklonu trakční křivky za nižších skluzů. Druhou částí práce je implementace poklesu tření při vyšších skluzech, který nastává u experimentů. Tento jev je popsán závislostí součinitele tření na skluzové rychlosti.

[35] ROVIRA, A, A RODA, R LEWIS a M B MARSHALL. Application of Fastsim with variable coefficient of friction using twin disc experimental measurements.

[37] SPIRYAGIN, M., O. POLACH a C. COLE. Creep force modelling for rail traction vehicles based on the Fastsim algorithm.

Následující dvě práce se zabývají implementací výše zmíněného variabilního součinitele tření, pro řešení odlišností mezi experimentálními a numerickými výsledky. V těchto dvou případech se jedná o implementaci do algoritmu FASTSIM. Motivací je opět přesnější predikce součinitele adheze s ohledem na experimentální data.

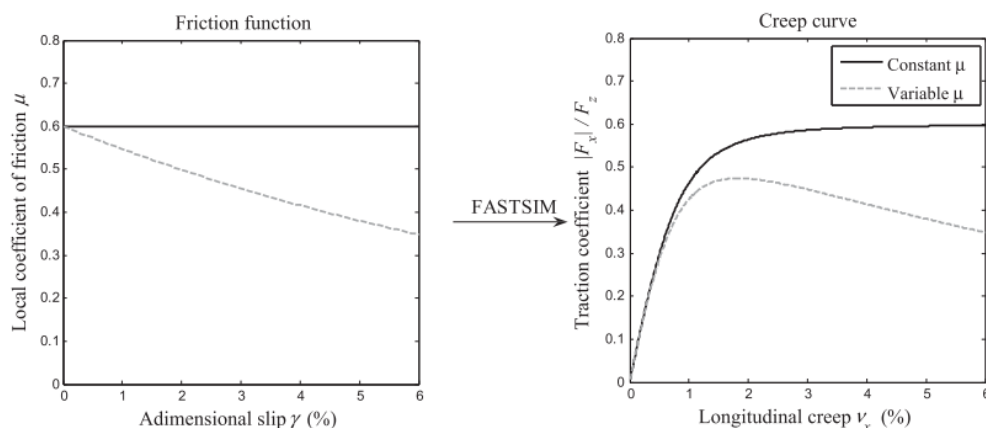
Výsledky

Obě práce využívají jednak změny hodnoty součinitele tření a změnu Kalkerova součinitele flexibility L . Flexibilita ovlivňuje počáteční nárůst součinitele adheze a proměnný součinitel tření má za následek snižování součinitele tření za vyšších skluzů. Oba články pracují s exponenciální funkcí pro redukci součinitele tření:

$$\mu = \mu_0 \cdot [\alpha + (1 - \alpha) \cdot e^{-\beta \cdot s}] \quad (1)$$

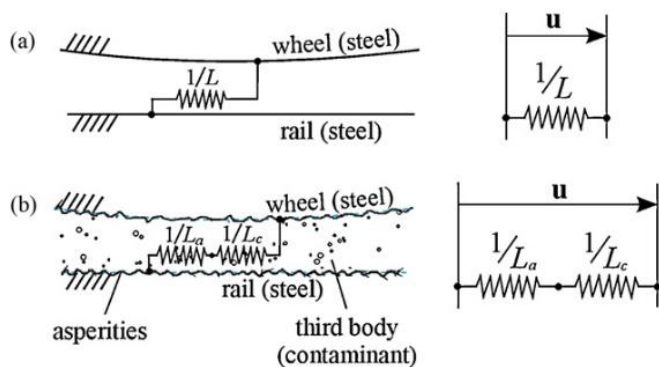
kde μ je výsledný součinitel tření, μ_0 je nejvyšší hodnota součinitele tření, α je poměr mezi nejmenším dosažitelným a nejvyšším součinitelem tření, β je koeficient exponenciálního poklesu a s je skluz.

Zjištění parametrů pro funkci součinitele tření je provedeno na základě porovnání experimentálních a predikovaných hodnot součinitele adheze. Porovnání mezi konstantním a funkcí řízeným součinitelem tření je zobrazeno na obr. 3-6. Konstantní součinitel tření na tomto obrázku reprezentuje Coulombovské tření, zatímco proměnný součinitel tření je řízen výše zmíněnou funkcí s parametry zjištěnými z experimentálních měření. Výsledná změna součinitele adheze za použití upraveného algoritmu FASTSIM je vidět na pravé straně obrázku. Jelikož při nižších skluzech není značný rozdíl mezi Coulombovým a proměnným součinitelem tření, je počáteční nárůst součinitele adheze prakticky neovlivněn. Hlavní změna nastává u vyšších skluzů.



obr. 3-6 Porovnání konstantního a proměnného součinitele tření s efektem na součinitel adheze [35]

Z výše uvedeného obrázku lze vidět, že proměnný součinitel tření neřeší problém se strmostí trakční křivky za nízkých skluzů. Oba autoři proto zavedli redukční součinitel parametru flexibility L . Parametr L popisuje smykovou tuhost kontaktních těles, přičemž bere v potaz ideální hladká tělesa (obr. 3-7a). Uvažování reálného kontaktu je smyková tuhost navíc řízena nerovnostmi a látkami v kontaktu (obr. 3-7b). Skutečná smyková tuhost kontaktu je poté součet tuhostí od nerovností a kontaminace. Zmíněné články využívají zjednodušení a určují výslednou tuhost jako součin parametru flexibility a redukčního součinitele, který zohledňuje výše zmíněné jevy. Identifikace redukčního součinitele opět závisí na porovnání s experimentálními daty.



obr. 3-7 Ilustrace modelu třecí vrstvy [35]

Závěr

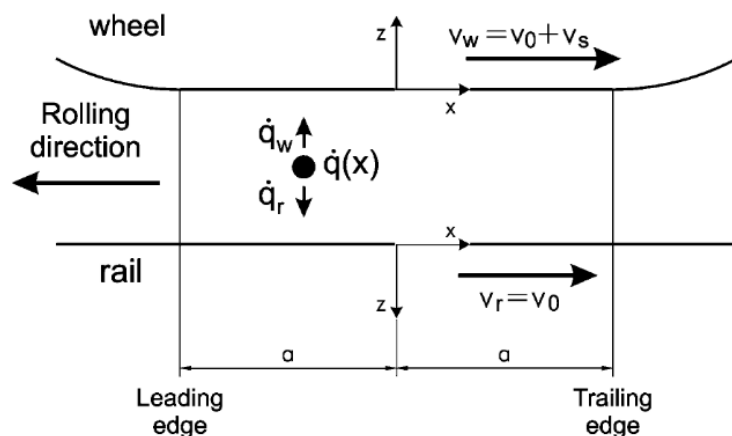
Práce se zabývají řešením nepřesností vzniklými mezi numerickými predikcemi a experimentálními daty. Použitý numerický model byl založen na algoritmu FASTSIM. V obou případech je řešení poklesu součinitele adheze řešeno proměnným součinitelem tření, závislým na skluzové rychlosti. Problém sklonu trakční křivky je vyřešen změnou flexibility kontaktu. Identifikace parametrů pro tyto modifikace je závislá na porovnání predikce s experimentálními daty.

[17] ERTZ, M. a K. KNOTHE. A comparison of analytical and numerical methods for the calculation of temperatures in wheel / rail contact.

Výše zmíněné publikace zabývající se poklesem součinitele adheze za zvýšeného skluzu nezohledňují teplotu v kontaktu. Namísto toho využívají parametrizování maximální součinitele adheze za vyšších skluzů. Změna součinitele adheze je ovšem primárně následkem zvýšené teploty v kontaktu. Tento článek pojednává o metodách výpočtu teploty v kontaktu kola a kolejnice. Článek porovnává různé přístupy k řešení a jejich výhody a nevýhody. Také popisuje numerické metody pro řešení rozložení teploty za různých podmínek.

Výsledky

Kontakt kola a kolejnice lze považovat za pohybující se zdroj tepla. Vysoké teploty lze předpokládat při přenosu trakčních nebo brzdných sil v kontaktu za vysokých rychlostí. Rozdílné rychlosti kontaktních povrchů mají za následek generaci tepla, jak je zobrazeno na obr. 3-10. Toto teplo je poté přenášeno do kola, kolejnice a okolního vzduchu. Jelikož je za běžných podmínek rychlost pohybu povrchů větší než rychlost difuze tepla do materiálu, lze uvažovat šíření tepla pouze v ose z (viz obr. 3-10). Zavedením materiálových charakteristik,



okrajových podmínek a využitím matematických postupů je dosaženo analytického řešení rozložení tepla v kontaktu. Toto řešení lze v principu aplikovat na různé polynomicky určené rozložení.

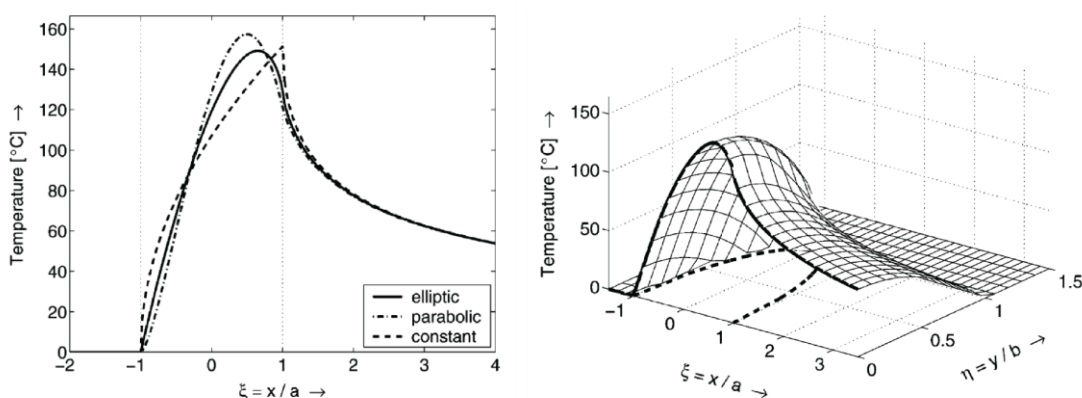
obr. 3-8 Ilustrace vzniku a šíření tepla v kontaktu kola a kolejnice [17]

Rozložení smykového napětí v kontaktu není konstantní a většinou jej nelze popsat polynomickou funkcí. Proto byl představen numerický postup pro řešení libovolného tepelného toku. Rozdělením řezů kontaktní plochy ve směru pohybu na diskrétní body, lze i tepelný tok rozdělit na diskrétní rozložení. Tím lze skokově reprezentovat jakýkoliv tvar tepelného toku.

$$T(x_k) = \frac{2}{\beta_w} \cdot \sqrt{\frac{a}{\pi \cdot v}} \cdot \sum_{i=1}^k \dot{q}_i \cdot (\sqrt{x_k - x_{i-1}} - \sqrt{x_k - x_i}) \quad (2)$$

kde T je teplotní nárůst v $^{\circ}\text{C}$, x je poloha v kontaktní oblasti v m, k je index bodu na ose x , β_w je tepelný penetrační koeficient v $\text{W s}^{0,5} / \text{K m}$, a je šířka kontaktní oblasti v m, v je rychlost pohybu v m/s, \dot{q} je tepelný tok ve W.

Pomocí tohoto řešení byly spočítány povrchové teploty pro různé typy rozložení tepelného toku v modelovém kontaktu kola a kolejnice za úplného skluzu. Spočítané výsledky lze vidět na obr. 3-11 vlevo, kde jsou zobrazeny tři typy tepelného toku v kontaktu. Mezi jednotlivými řešeními lze pozorovat rozdíly zejména v poloze teplotního maxima. Pro konstantní rozložení tepelného toku je u vstupu do kontaktu značnější nárůst teploty, který poté rychleji mění svoji směrnici. Eliptické i parabolické rozložení je velmi podobné, hlavní rozdíl je v hodnotě teplotního maxima. Aplikací tohoto postupu na celý kontakt lze dosáhnout rozložení teplot napříč celou plochou kontaktu, jak je zobrazeno na obr. 3-11 vpravo.



obr. 3-9 Rozložení teploty pro různé tepelné toky - vlevo, rozložení teploty po celém kontaktu - vpravo [17]

Závěr

Tato publikace ukazuje postup řešení rozložení teploty v kontaktu. Jsou analyzovány jak konstantní tepelný tok, tak tepelné toky různých tvarů (eliptický a parabolický). Zmíněný numerický postup řešení kontaktní teploty lze ovšem využít na libovolné počáteční rozložení tepelného toku. Výsledky ukazují maximální teplotu v bodě blízko výstupní části kontaktu. Velikost a poloha tohoto maxima je závislá na rozložení tepelného toku, avšak rozdíly nejsou nijak významné.

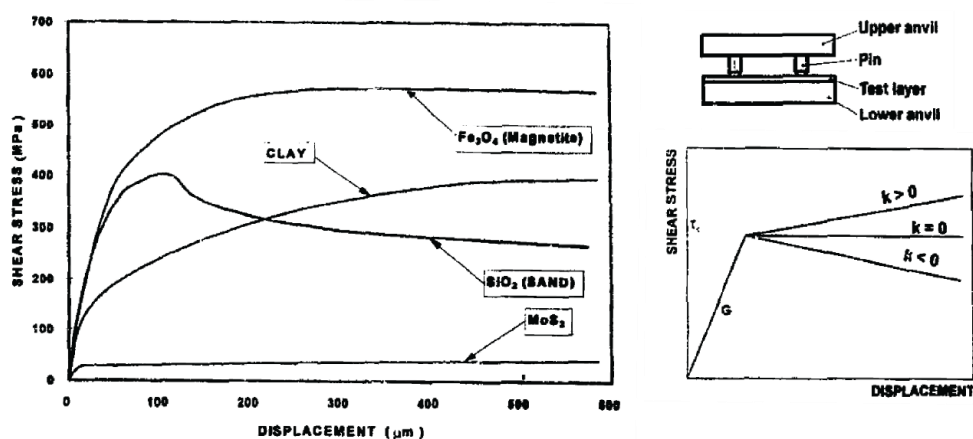
3.2 Třecí vrstva v kontaktu kola a kolejnice

[18] HOU, K., J. KALOUSEK a E. MAGEL. Rheological model of solid layer in rolling contact.

Jedna z prvních prací zabývající se měřením smykového napětí v třecí vrstvě. Za použití reometru pin on disk, kde dva piny jsou tlačeny proti otáčejícímu se plochému vzorku a vytváří kontaktní tlak 985 MPa. Otočení vzorku je provedeno díky aplikaci točivého momentu, který je zaznamenáván. Díky známe zatěžující síle, točivému momentu, ploše pinu a poloze natočení vzorku lze zjistit smykové napětí ve vzniklé vrstvě v závislosti na posunu pinu. Aby bylo dosaženo dobré kompaktnosti vrstvy a zamezeno volného pohybu částic, byly testované materiály rozpuštěny v acetonu do formy pasty, která byla nanášena na povrch. Testovanými částicemi byly magnetit (Fe_3O_4 , $<1 \mu\text{m}$), písek (SiO_2 , $<38 \mu\text{m}$), disulfid molybdenu (MoS_2 , $<1 \mu\text{m}$) a jíla ($<30 \mu\text{m}$).

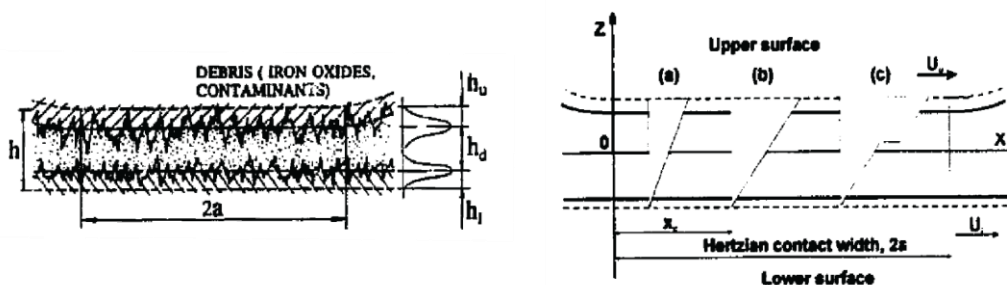
Výsledky

Změřené závislosti mezi smykovým napětím vrstvy a jejím posunutím jsou zobrazeny na obr. 3-12. Jednotlivé druhy částic způsobují odlišná chování jak ve velikosti smykového napětí, tak v trendu průběhu deformace vrstvy. Na základě těchto zjištění byl v matematickém modelu používán bilineární materiálový model zobrazený na obr. 3-12 vpravo dole.



obr. 3-10 Test třecích vrstev - vlevo a zjednodušený bilineární model - vpravo dole [18]

V grafu lze pozorovat úvodní elastickou část, kde nárůst deformace vrstvy vede k lineárnímu nárůstu smykového napětí. Po dosažení určitého bodu vznikne plastická deformace, která mění sklon a tvar křivky. Tato plastická deformace je reprezentována pohybem částic v třecí vrstvě. V třecí vrstvě (obr. 3-13 vlevo) vzniká smykové napětí působením rozdílných rychlostí povrchů. Mezi jednotlivými vrstvami částic roste smykové napětí (obr. 3-13 vpravo, místo (a) a (b)), než dojde k jejich vzájemnému pohybu (obr. 3-13 vpravo, místo (c)). Tento vzájemný pohyb způsobuje relaxaci smykového namáhání, které se projevuje plastickým chováním.



obr. 3-11 Model kontaktu - vlevo, ukázka smýkání třecí vrstvy - vpravo [18]

Změřená data byla proložena bilineárním modelem, kde elastická část je popsána rovnicí (3) a plastická část rovnicí (4). Zakomponování těchto charakteristik do kinematického popisu kontaktu umožnilo na základě vstupních informací o kinematice predikovat součinitel adheze. Jako modelový případ byl použit kontakt kola lokomotivy a kolejnice s vrstvou písku. Výsledný součinitel adheze 0,355 byl porovnán s experimenty reálného kola z jiné publikace, kde hodnota součinitele adheze dosáhla 0,39.

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (3)$$

$$\tau = \tau_c + k \cdot (\gamma - \gamma_c) \quad (4)$$

kde τ je smykové napětí v Pa, τ_c je kritické smykové napětí v Pa, G je elastický modul ve smyku v Pa, γ je přetvoření, γ_c je kritické přetvoření a k je plastický modul ve smyku.

Závěr

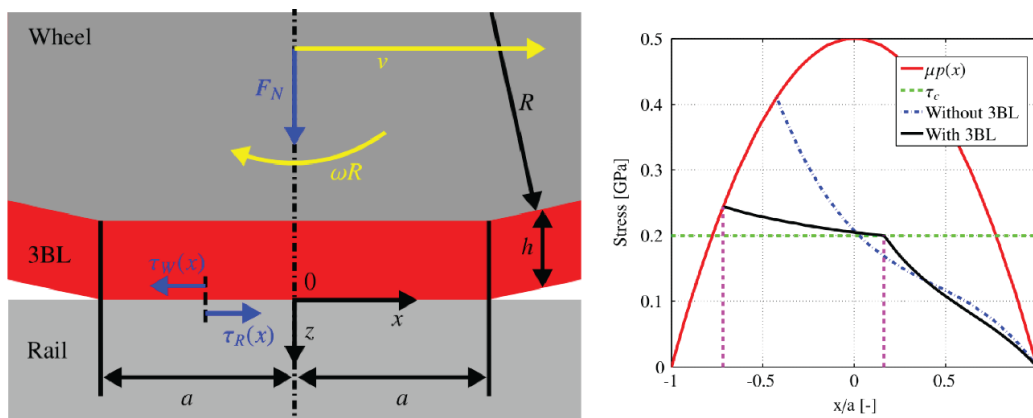
Studie popisuje vliv třecí vrstvy na třecí vlastnosti kontaktu. Potvrzuje přítomnost tří typů třecích vrstev s rostoucím, klesajícím a neměnným smykovým napětím po dosažení plastické části. Toto smykové chování vrstvy přímo ovlivňuje výsledný součinitel adheze v kontaktu, což bylo potvrzeno matematickým modelem kontaktu. Zároveň potvrzuje domněnku, že přítomností třecí vrstvy lze dosáhnout změny dosaženého součinitele adheze.

- [9] 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.

Publikace je zaměřena na řešení tangenciálního problému zahrnujícího třecí vrstvu. Třecí vrstvou je v tomto článku myšlena povrchová vrstva základního materiálu, nikoliv kontaminace vnějšími látkami. Řešení je čistě analytické a neobsahuje řešení poklesu tření za vyšších skluzů. Výsledky z analytického modelu jsou porovnány s měřením na dvoudiskovém zařízení a je dosaženo dobré shody.

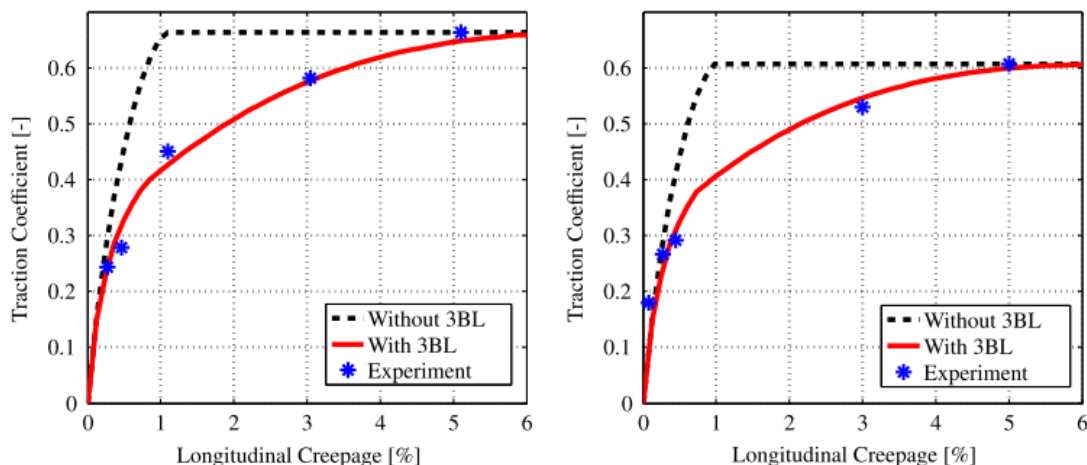
Výsledky

Analytický model kontaktu je založen na řešení kinematických poměrů mezi dvěma základními tělesy a třecí vrstvou jak je zobrazeno na obr. 3-8 vlevo. Třecí vrstva je popsána bilineárním elastoplastickým modelem shodným s dřívější publikace Houa [18]. Vrstva je charakterizována čtyřmi parametry: tloušťka vrstvy, limitní smykové napětí, elastický modul a plastický modul. Po dosažení mezního smykového napětí je tvar plastické části určen plastickým modulem. Tento přechod je ve výsledném rozložení smykových napětí naznačen zelenou čarou na hodnotě 0,2 GPa na obr. 3-8 vpravo. Z rozložení smykového napětí lze vidět, že největší rozdíl ve výsledném součiniteli adheze tvoří plastická část. Čím větší tato oblast je, tím větší je snížení výsledného součinitele adheze.



obr. 3-12 Ilustrace modelu třecí vrstvy – vlevo a výsledky matematického modelu – vpravo [9]

Ověření modelu proběhlo na dvoudiskovém zařízení. Byly simulovány čtyři podmínky o různém kontaktním tlaku a rychlosti. Parametry třecí vrstvy byly zvoleny dle optického pozorování kontaktní oblasti pro zjištění tloušťky (přibližně 20 μm) a dle materiálových parametrů zoxidované vrstvy. Při porovnání s modelem bez třecí vrstvy bylo dosaženo dobré shody zejména proto, že nedochází k rychlému nárůstu součinitele adheze.



obr. 3-13 Porovnání simulace a experimentu (vlevo 0,9 GPa a 0,5 m/s; vpravo 0,9 GPa a 1 m/s) [9]

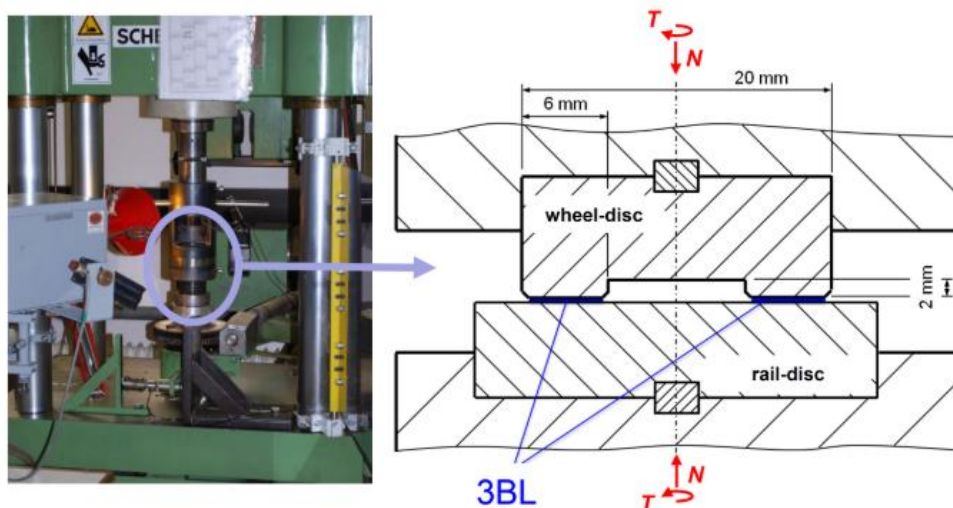
Závěr

Článek přináší analytické řešení třecí vrstvy, která je popsána bilineárním modelem. Výsledná redukce ve strmosti počátku trakční křivky umožňuje přesněji predikovat součinitel adheze reálného kontaktu. Pomocí rozdělení vzorku po experimentu a optickém pozorování bylo možné určit velikost vzniklé oxidické vrstvy. Chemická analýza ukázala složení vrstvy z oxidů železa. Zároveň byla provedena parametrická studie pro zjištění vlivu jednotlivých parametrů třecí vrstvy na tvar trakční křivky.

[10] SIX, K., A. MEIERHOFER, G. TRUMMER, C. MARTE a G. MULLER. Classification and Consideration of Plasticity Phenomena in Wheel-Rail Contact Modelling.

[11] SIX, K., A. MEIERHOFER, G. MUULLER a P. DIETMAIER. Physical processes in wheel-rail contact and its implications on vehicle-track interaction.

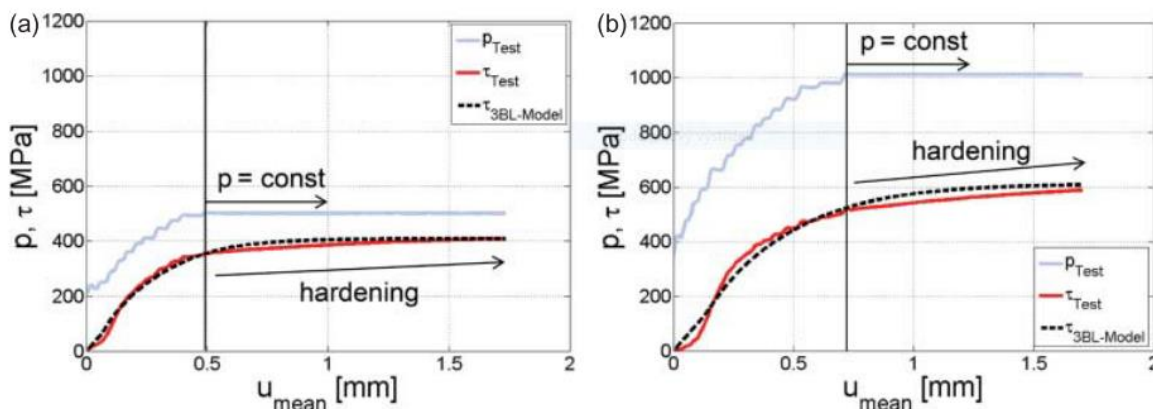
Tyto dva články se zabývají vlastnostmi plastické třecí vrstvy na povrchu základních těles a jejich modelování v kontaktu kola a kolejnice. Poukazují na přirozený vznik této vrstvy a její charakterizaci za pomoci měření smykového napětí za vysokého tlaku pomocí High Pressure Torsion (HPT) testovacího zařízení. Zařízení skládající se z dvou disků, na které působí normálová síla a moment je zobrazeno na obr. 3-14. Toto zařízení je schopné dosáhnout tlaku a rozměru kontaktní oblasti odpovídající kontaktu kola a kolejnice. Pomocí smykového namáhání je poté změřeno smykové napětí a natočení vzorků, což odpovídá deformaci vrstvy.



obr. 3-14 Zařízení HPT - vlevo, ilustrace kontaktu testovacích vzorků - vpravo [11]

Výsledky

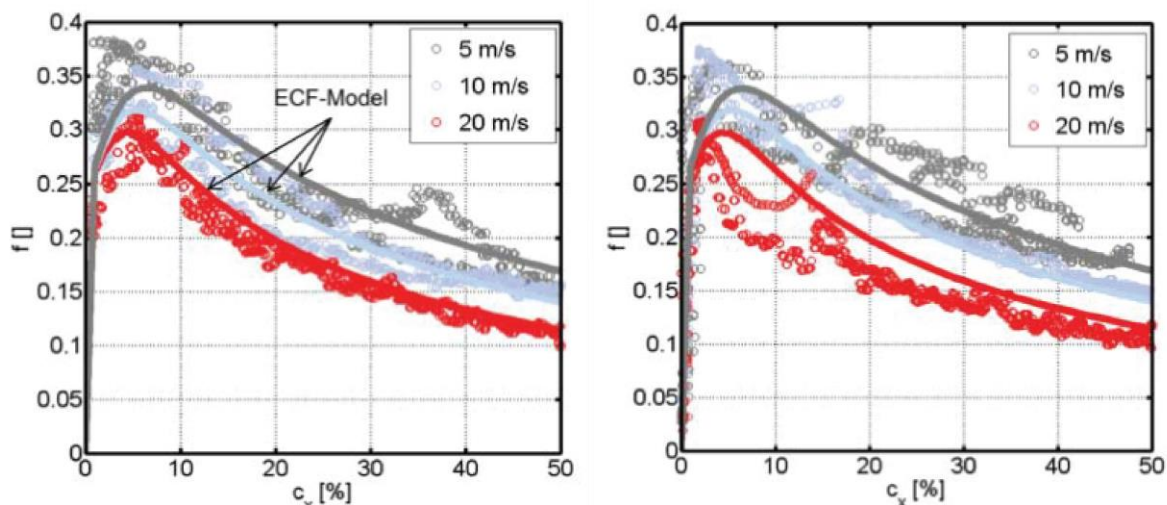
Aby bylo možné matematické modely zpřesnit, bylo sledováno chování vzorků z kola a kolejnice pod smykovým namáháním. První testy zkoumali, zda třecí vrstva skutečně vykazuje elasto-plastické chování. Testy byly provedeny s čistými vzorky za suchých podmínek bez přítomnosti kontaminantů. Výsledky jsou uvedeny na obr. 3-15. Maximální dosažený kontaktní tlak byl 500 MPa (obr. 3-15a) a 1 GPa (obr. 3-15b). Bylo pozorováno, že poměr mezi smykovým napětím a kontaktním tlakem není konstantní. Zároveň po dosažení maximálního kontaktního tlaku dochází k mírnému zvyšování smykového napětí s deformací, což je způsobeno deformačním zpevňováním.



obr. 3-15 Výsledky měření na HPT za různých maximálních kontaktních tlaků [11]

Na základě dosažených výsledků byl vyvinut matematický model třecí vrstvy. Pro popis třecí vrstvy byl použit Voceho plastický model. Do parametrů popisujících materiál dle Voceho byla zavedena závislost na tlaku a teplotě. Na základě HPT testů byli identifikovány parametry pro model, pouze vliv teploty byl změřen nepřímou. Výsledky z predikce a měření

jsou zobrazeny na obr. 3-16. Zvyšováním rychlosti dochází k poklesu součinitele adheze a je dosaženo dobré shody mezi experimenty a predikcí.



obr. 3-16 Porovnání predikce a modelu pro suchý kontakt - vlevo a pískovaný kontakt - vpravo [11]

Závěr

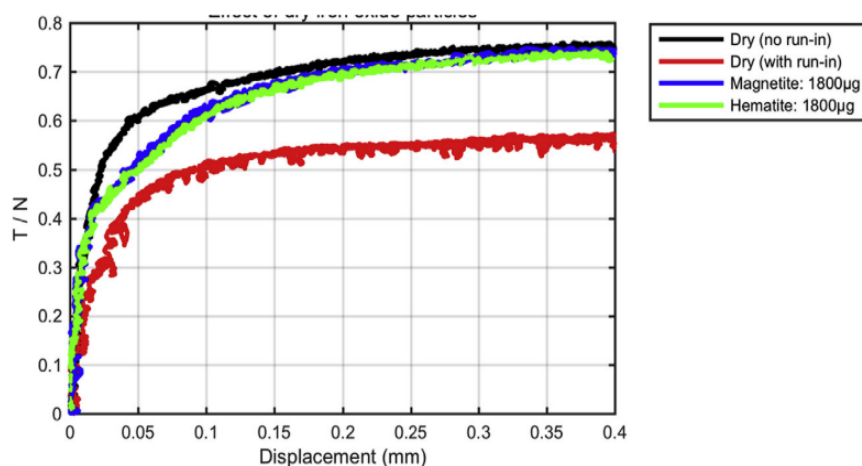
Práce popisují chování třecí vrstvy a její implementaci do modelu kontaktu za pomoci závislosti mezi smykovým napětím a deformací. Měření smykových vrstev probíhá za pomoci vysokotlakého torzního zařízení HPT. Výsledky měření smykových vrstev ukazují, že poměr mezi smykovým napětím a kontaktním tlakem neroste lineárně se zvyšujícím se tlakem. Zároveň dochází k deformačnímu zpevňování vrstvy a tedy postupnému nárůstu smykového napětí za konstantního tlaku. Výsledná implementace do modelu ukazuje dobrou shodu s experimentálním měřením. Navíc je třeba zmínit, že detailní popis modelu třecí vrstvy je uveden v disertační práci autora Meierhofera [38].

-
- [39] BUCKLEY-JOHNSTONE, L. E., G. TRUMMER, P. VOLTR, A. MEIERHOFER, K. SIX, D. I. FLETCHER a R. LEWIS. Assessing the impact of small amounts of water and iron oxides on adhesion in the wheel/rail interface using High Pressure Torsion testing.

Tato studie byla věnována problému nízké adheze při přítomnosti malého množství vody. Na rozdíl od ostatních studií, sledujících pouze součinitel adheze, byla zaměřena na smykové vlastnosti třecí vrstvy složené z malého množství vody a částic opotřebení. K měření smykových vlastností bylo použito vysokotlaké torzní (HPT) zařízení, stejně jako v [10, 11] s materiály vzorku reprezentujícími reálné kolo a kolejnici. Jako částice opotřebení byly použity hematit (Fe_2O_3) a magnetit (Fe_3O_4). Na závěr byl použit jednoduchý model pro predikci součinitele adheze v závislosti na poměru mezi vodou a částicemi opotřebení v třecí vrstvě.

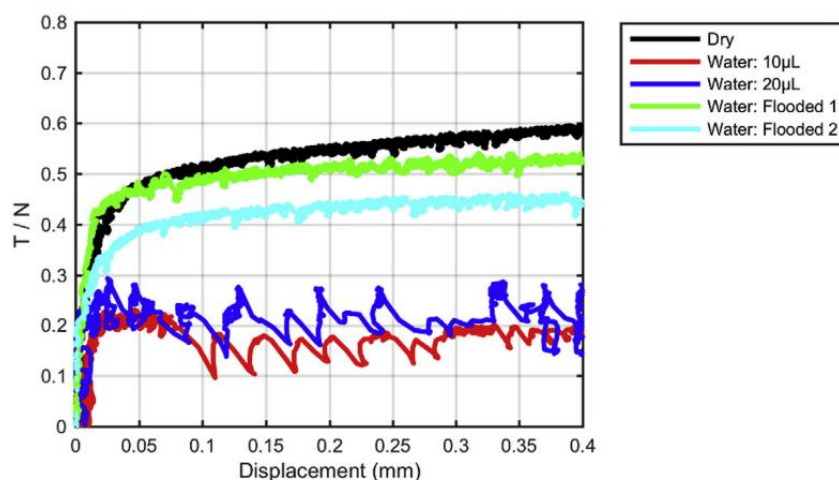
Výsledky

První experimenty byly zaměřeny na smykovou pevnost základních těles a použitých částic. Na obr. 3-17 jsou vidět výsledky z těchto testů. Oba dva druhy částic společně s vzorky bez záběhu dosahovali podobných hodnot smykových napětí. Největší rozdíl byl pozorován v přechodu z elastické na plastickou část, kde částice vykazovali plynulejší přechod. Vzorky po záběhu zajišťovali nižší hodnoty smykového napětí. To je dáno značnými změnami v povrchově třecí vrstvě způsobené záběhem a tedy změně smykového chování této vrstvy.



obr. 3-17 HPT test se suchými vzorky a částicemi opotřebením [39]

Experimenty s vodou byly rozděleny na malá množství a plně zaplavený kontakt (obr. 3-18). Plně zaplavený kontakt snížil hodnotu smykového napětí oproti suchým podmínkám pouze o přibližně 10 – 20 %. Naopak 10 – 20 µl vody vedlo na výrazné snížení smykového napětí. Zároveň došlo k oscilacím měřených hodnot způsobených stick-slip efektem. Nebylo ovšem analyzováno zda je tento jev způsobený dynamickými projevy zařízení nebo projevy na rozhraní těles. Testování kompozice s malým množstvím vody v částicích magnetitu vedl na podobný trend poklesu součinitele adheze.



obr. 3-18 HPT test s různým množstvím vody v kontaktu [39]

Vyvinutý model byl založen na smykových vlastnostech třecí vrstvy a její vliv na součinitel adheze. Také byla brána v potaz drsnost povrchu. Výsledky ukazují velmi úzké okno mezi poměrem pevných částic a vodou, které dokáže způsobit nízké hodnoty součinitele adheze. Množství pevných částic, mezi kterým dochází k poklesu součinitele adheze, je v rozmezí 95 – 99 %, přičemž při 100 % pevných částic dochází k prudkému nárůstu. Tento nárůst je způsoben řízením smykové pevnosti suchými pevnými částicemi. Zároveň nízké hodnoty drsnosti mají za následek výraznější pokles v součiniteli adheze. Také větší tloušťka vrstvy vody a oxidů způsobovala snížení hodnoty součinitele adheze.

Závěr

Výsledky ukazují výrazný pokles smykového napětí při aplikaci malého množství vody oproti plně zaplavenému kontaktu. Stejného výsledku bylo dosaženo při měření směsi s malým množstvím vody v částicích magnetitu. Tento jev je způsoben změnou vodní kompozice na pastu obsahující převážně malé pevné částice rozmístěné ve vodním médiu. Na základě těchto poznatků byl použit jednoduchý model pro predikci součinitele adheze. Ve velmi malém rozsahu množství vody v kompozici docházelo k výraznému snížení součinitele adheze. Malá množství vody jsou tedy pro kontakt kritičtější než plné zaplavení kontaktu.

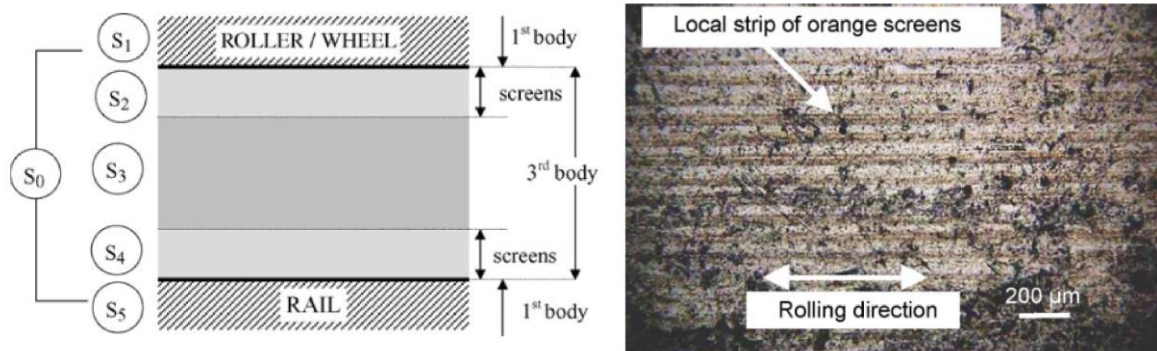
[40] NICCOLINI, E. a Y. BERTHIER. Wheel-rail adhesion: Laboratory study of „natural“ third body role on locomotives wheels and rails.

[41] DESCARTES, S., C. DESRAYAUD, E. NICCOLINI a Y. BERTHIER. Presence and role of the third body in a wheel – rail contact.

Následující dvě publikace se zaměřují na takzvané třetí těleso, tedy třecí vrstvu. Byl sledován vznik a změny v třecí vrstvě za působení kontaktního tlaku a prokluzu. Třecí vrstvy jsou rozděleny na přirozené a umělé [41]. Přirozená vrstva vzniká interakcemi mezi kontaktními tělesy, zatímco umělá třecí vrstva je vytvořena interakcemi cizích těles v kontaktu. Článek [41] kombinuje jak vzorky z reálně tratě, tak i z experimentálních měření v laboratoři. Druhá publikace [40] sleduje pouze vzorky z experimentálních měření v laboratoři. Experimentální zařízení v obou případech využívá vzorek kolejnice, po kterém se pohybuje disk s určitým skluzem. Výsledky jsou hodnoceny dle součinitele tření a vzniku třecí vrstvy.

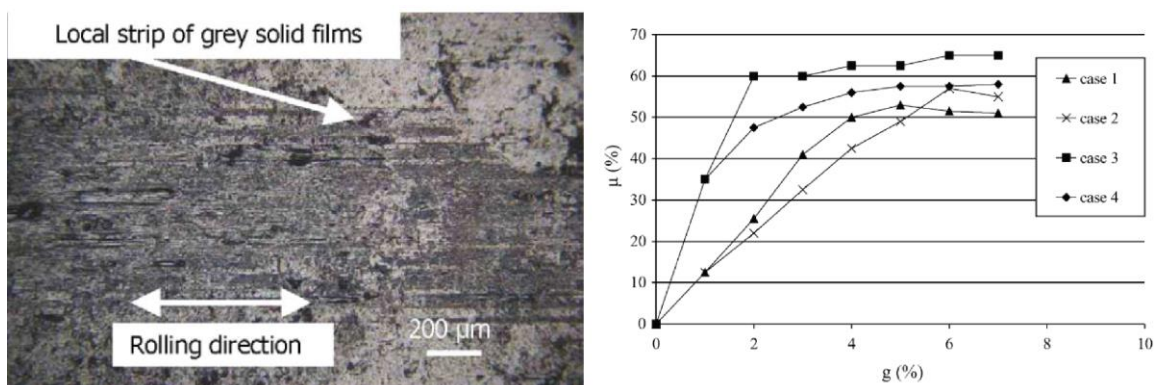
Výsledky

V první práci [40] byla sledována aktivace vrstvy a vliv provozních parametrů na třecí vrstvu. Již při 1% skluzu dochází k vzniku povrchové vrstvy, která má žlutou barvu vzniklou kontaktem s nerovnostmi protějšího vzorku. Tato vrstva je na obr. 3-19 označena jako „screen“. Aktivace této vrstvy roste se zvyšujícím se skluzem.



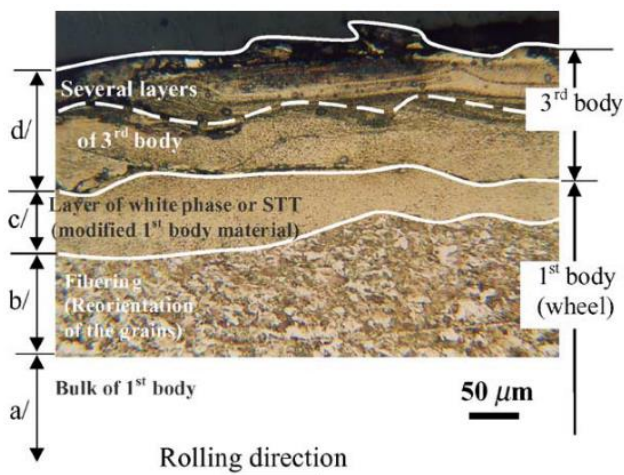
obr. 3-19 Popis třecí vrstvy - vlevo a vznik žlutých drah za nízkých skluzů - vpravo [40]

Při dosažení vyšších skluzů dochází k druhému jevu. Malé částice opotřebení jsou uvolněny z povrchu a smíchány s již existující vrstvou. Vrstva je složena z dlouhých šedých pruhů na povrchu vzorku (obr. 3-20 vlevo). Poslední fáze je vznik třecí vrstvy na povrchu kolejničky, který je způsoben zvětšením počtu částic opotřebení a následnému poškození povrchu. Tento jev je závislý na provozních podmínkách. Jednotlivé typy vrstev byly dále samostatně vytvořeny a změřeny jejich trakční křivky (obr. 3-20 vpravo). Vzorek bez třecí vrstvy dosažený broušením povrchu je označen jako „case 1“. „Case 2“ je vzorek s třecí vrstvou s nízkou smykovou pevností, zatímco „case 3“ a „case 4“ jsou třecí vrstvy s vysokou smykovou pevností.



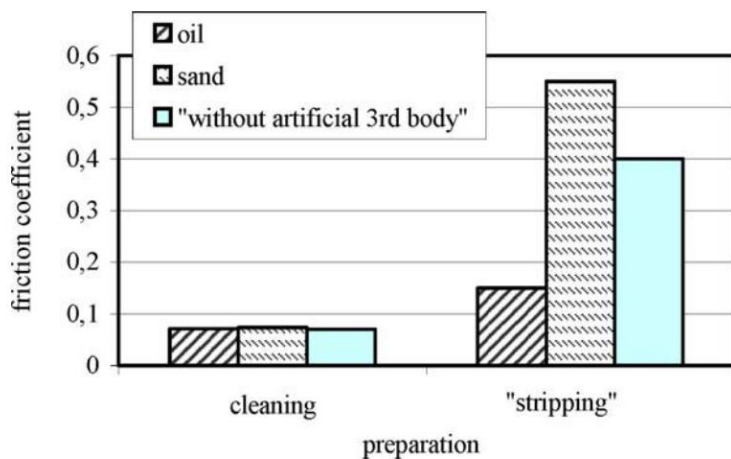
obr. 3-20 Šedé pruhy z částic opotřebení - vlevo, trakční křivky jednotlivých vrstev - vpravo [40]

Ve studii [41] byly sledovány vzorky z reálné tratě, které ukazují přítomnost několika vrstev. Na obr. 3-21 lze pozorovat základní těleso označené jako a) bílou barvou. Dále jsou přeorientovaná zrna b) a vrstva bílé fáze c). Vrstva c) pochází ze základního tělesa a má velikost okolo 50 μm. Vrstva označená jako d) je označená jako třetí těleso, tedy třecí vrstva s rozměrem mezi 150 – 200 μm. Tyto vrstvy byly dále analyzovány pomocí elektronové mikroskopie a EDX analýzy. Vzorek s tímto složením povrchových vrstev byl dále použit pro experimentální měření uměle vzniklých třecích vrstev.



obr. 3-21 Třecí vrstva na povrchu kolejí [40]

Vzorek koleje s třecí vrstvou byl použit s vzorkem disku bez třecí vrstvy. Dvě metody úpravy třecí vrstvy byly použity: čištění použitím bavlněného hadru napuštěného acetonem („cleaning“) nebo ultrazvukem s trichlorethylenem („stripping“). Pro umělou třecí vrstvu bylo využito dvou látek. Jako první látka byl použit olej EP 460 a dále písek z pískovacího kolejového zařízení. Olej byl ponechán na povrchu 24 hodin a následně byl přebytek oleje ořen z povrchu. Výsledky lze vidět na obr. 3-22, kde metoda pouhého povrchového očištění acetonem zanechala v pórech třecí vrstvy zbytky kontaminantu a došlo tedy ke snížení součinitele adheze. Naopak „stripping“ povrchu odstranilo zbytky umělé třecí vrstvy a hodnoty součinitele adheze se pohybovali v hodnotách očekávaných pro tento kontaminant.



obr. 3-22 Výsledky měření s třecími vrstvami [40]

Závěr

Obě zmíněné publikace ukazují vznik a vliv třecí vrstvy na součinitel adheze. Práce Niccoliniho [40] ukazuje postupný vznik třecí vrstvy a jednotlivé fáze při rostoucím působení skluzu. Zcela čistý povrch a vzniklé třecí vrstvy ukazují odlišnou smykovou

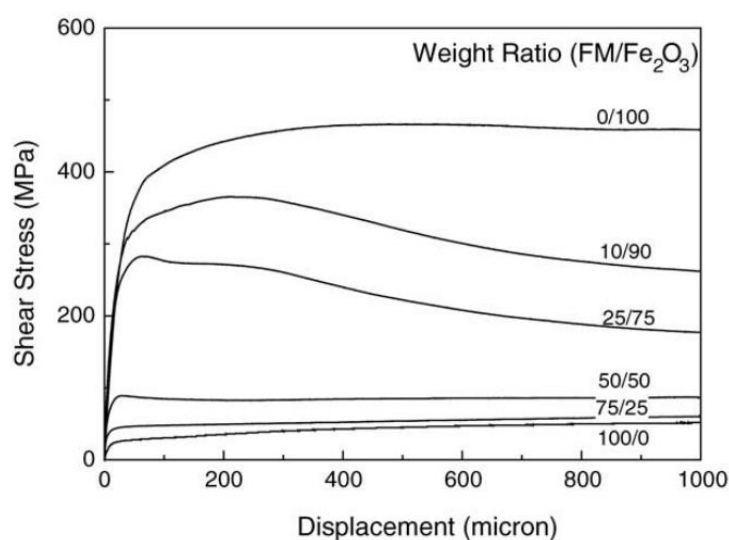
pevnost a tedy i vliv na součinitel adheze. V práci Descartese [41] jsou popsány jednotlivé fáze povrchu vzorku kolejnice. Povrch základního tělesa podléhá změnám jak v orientaci zrn tak i jejich modifikaci. Třecí vrstva třetího tělesa je poté podrobena testům s olejem a částicemi písku. Jednoduché očištění povrchu pomocí acetonu a otření látkou nedokáže odstranit veškeré kontaminanty. Zbytek oleje a kontaminantů zůstává v povrchové třecí vrstvě umístěn mezi póry a následně ovlivňuje součinitel adheze při testu. Tyto zmíněné práce ukazují přítomnost třecí vrstvy a její vliv na adhezní chování.

[42] 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.

Pro úpravu vlastností třecí vrstvy se používají modifikátory tření. V této studii byla sledována umělá třecí vrstva složená z modifikátoru tření, částic opotřebení a plastického maziva. Pomocí pin-on-disk reometru bylo měřeno smykové napětí v třecí vrstvě a použitím disk-on-disk zařízení poté součinitel tření. Jako modifikátor tření byl použit komerční produkt od firmy KELTRACK. Tuhé mazivo bylo Shell Cardura W a částice opotřebení hematit (Fe_2O_3) o průměrné velikosti 5 μm .

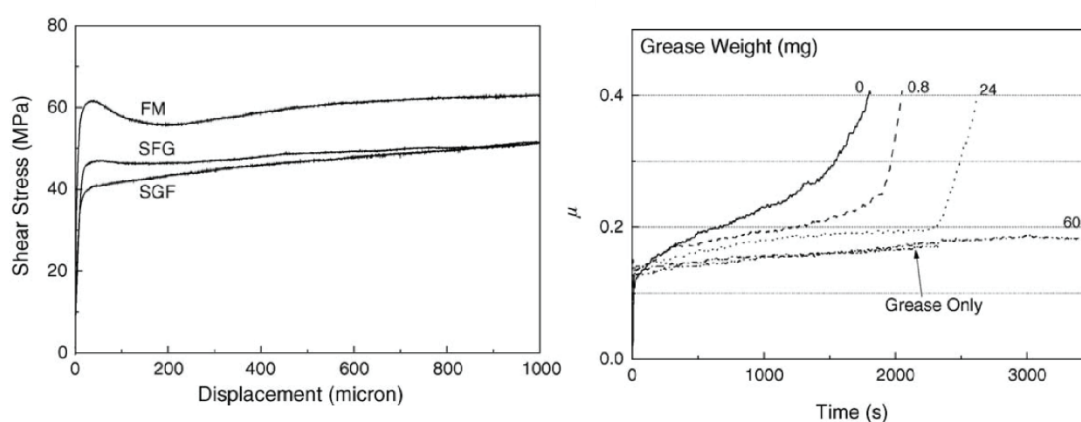
Výsledky

V první části studie bylo změřeno smykové chování modifikátoru tření s částicemi opotřebení a plastickým mazivem. Zvyšováním množství částic opotřebení se zvyšovalo i přenesené smykové napětí (obr. 3-23). Pro kompozice kde bylo přidáno malé množství modifikátoru tření (10/90 a 25/75) byl pozorován pokles smykového napětí po dosažení maxima v okolí 50 – 100 μm deformace vrstvy. Ve všech ostatních případech byla po dosažení maxima udržena stabilní hodnota smykového napětí.



obr. 3-23 Smykové napětí třecí vrstvě z modifikátoru tření a hematitu [42]

Kontaminace plastickým mazivem byla reprezentována dvěma případy. První případ kdy na povrch vzorku byl nanesen modifikátor tření a na něj plastické mazivo (SFG). V druhém případě bylo nejprve nanesen plastické mazivo a na něj modifikátor tření (SGF). Na obr. 3-24 vlevo jsou zobrazeny oba případy a čistý modifikátor tření. Oba případy kontaminace plastickým mazivem dosahují nižších hodnot než samotný modifikátor tření. Varianta SFG má vyšší kritickou hodnotu smykového napětí, avšak zvyšováním deformace až na 1000 μm je dosaženo stejných hodnot. Závislost mezi množstvím aplikovaného plastického maziva a součinitelem tření je na obr. 3-24 vpravo. V tomto testu bylo použito 2 – 3 mg modifikátoru tření. Zvyšováním množství aplikovaného maziva dochází k prodloužení doby pod hranicí součinitele tření 0,4. Při hmotnosti 60 mg maziva již nebyl pozorován rozdíl mezi samotným mazivem a mazivem s modifikátorem tření.



obr. 3-24 Smykové napětí třecí vrstvy s plastickým mazivem - vlevo a součinitel adheze - vpravo [42]

Závěr

Smykové chování modifikátoru tření je ovlivněno množstvím kontaminace částicemi hematitu. Vysoká koncentrace hematitu vede k výraznému maximu za nízkých deformací. Malá množství modifikátoru tření vedou na negativní sklon závislosti smykového napětí na deformaci. Plastické mazivo v kombinaci s modifikátorem tření vede na snížení smykového napětí přenášeného třecí vrstvou. Pokud bylo mazivo aplikováno na povrch pod modifikátor tření, byla hodnota smykového napětí za malých deformací nižší. Nízké množství maziva navíc zásadně neovlivňuje funkčnost modifikátoru tření.

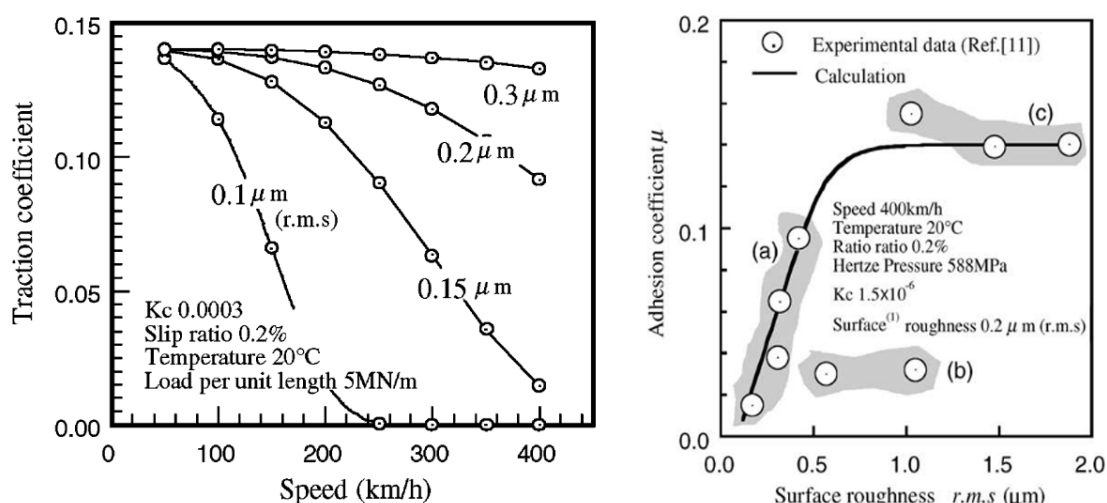
[43] CHEN, H., T. BAN, M. ISHIDA a T. NAKAHARA. Adhesion between rail/wheel under water lubricated contact.

Doposud zmíněné práce se z hlediska režimu mazání zabývali pouze oblastí mezního mazání. Jelikož je kontakt kola a kolejnice běžně vystaven přítomností vody a také látkami jako mazivo okolku nebo modifikátor tření je třeba brát v potaz také částečný elasto-hydrodynamický efekt. Tento jev v návaznosti na kontaminaci vodou studovala Chen na

zjednodušeném modelu kontaktu nerovností. Pomocí predikce tloušťky filmu v isoviskózním režimu a jednoduchého modelu kontaktu nerovností byla provedena parametrická studie a porovnání s daty získanými ze zařízení umožňující vysoké rychlosti.

Výsledky

Podstata použité metody spočívá ve výpočtu zatížení neseného kapalinovým filmem a kontaktem nerovností. Zatížení nesené filmem je spočítáno pomocí Herrebrughovy formule pro elastický isoviskózní režim. Zatížení nesené nerovnostmi je determinováno pomocí přístupu Greenwooda a Trippa [44]. Na základě parametrů topografie a materiálových vlastností je predikován průměrný tlak nesený nerovnostmi vztažený k celkové ploše kontaktu. Díky tomu je získáno zatížení nesené nerovnostmi. V případě že je součet zatížení nesené filmem a nerovnostmi dostatečně blízko celkovému zatížení je výpočet ukončen. Pokud ne tak je upravena tloušťka oddělující povrchy a znovu přepočítány nesené zatížení, dokud není dosaženo konvergence. Výsledný součinitel tření je získán z váhového součtu součinitelů tření za suchých podmínek a za podmínek kontaminace vodou. Váhové hodnoty jsou v tomto případě poměry mezi zatížením neseným kapalinovým filmem a nerovnostmi. Výsledný součinitel tření je tedy kombinací tření za sucha a tření při úplném oddělení povrchů.



obr. 3-25 Porovnání různých vstupních drsností do modelu (vlevo), srovnání s experimentálními daty z vysokorychlostního dvoudiskového zařízení (vpravo) [43]

Výsledky simulací ukazují značný efekt změny drsnosti povrchů viz obr. 3-25 vlevo. Voda jako mazivo dosahuje díky nízké viskozitě malé tloušťky filmu a tak je kontakt velmi citlivý na změnu nerovností. Změna nerovností v rámci desítek nanometrů může odpovídat stejné velikosti změny tloušťky filmu s rozdílem desítek km/h. Z publikace Greenwooda a Trippa jsou navíc zavedeny dva další parametry pro definici povrchu, které jsou v práci Chenové zanedbány. Správně zvolené parametry však dokáží vhodně popsat experimentální výsledky jak je naznačeno na obr. 3-25 vpravo. V publikaci jsou navíc zahrnuty výsledky s odlišnou

teplotou vody, která má vliv na tloušťku filmu a tedy i rychlost přechodu k smíšenému mazání.

Závěr

Publikace ukazuje možný přístup k řešení přechodu mezi režimem plného kontaktu nerovností, případně pevného maziva, do režimu kdy kontakt ovlivňují reologické vlastnosti kapalin přítomných v kontaktu. Pro vyřešení kontaktu nerovností je použit elastický model Greenwooda a Trippa. Výsledky ukazují značnou závislost na již malé změně v drsnosti povrchu. Při dostatečně malé drsnosti a dostatečné rychlosti tedy může dojít k částečnému oddělení nerovností a tím k propadu součinitele adheze do velmi nízkých hodnot daných nízkou viskozitou vody. Tento jev může být dále zhoršen v případě kontaminace olejem nebo plastickým mazivem používaným pro okolky. Tato publikace se váže na podobnou problematiku od stejných autorů z dřívější publikace [45] a také z nedávných let [46].

4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE

Poznatky z výše uvedených publikací lze rozdělit na dvě hlavní oblasti. První oblastí je problematika modelování kontaktu a přenosu sil. Druhá oblast je studium třecích vrstev a jejich vliv na součinitel adheze. Studie zabývající se modelováním kontaktu a kontaktní mechanika jako taková se začala rozvíjet s řešením normálového problému [47] a tečného problému [2]. V současné době jsou studie fundamentálních jevů na ústupu a velké úsilí je soustředěno do vývoje numerických nástrojů. Zejména implementace kontaktní mechaniky do dynamických modelů vytváří motivaci pro vývoj rychlého a přesného modelu zahrnujícího všechny současné poznatky o přenosu trakčních sil. Experimentální studie kontaktu kola a kolejnice jsou v posledních desetiletích zaměřeny na celou řadu kontaktních podmínek. Od počátku výzkumu v této oblasti bylo studováno velké množství kontaminantů a látek [48–50]. V posledních letech je velká část studií zaměřena na modifikaci tření v kontaktu a výsledný efekt těchto kontaminantů. Avšak aplikace těchto komplexních látek výrazně komplikuje predikci jejich chování na základě matematických modelů.

4.1 Zhodnocení poznatků z prací věnovaných predikováním tření v kontaktu kola a kolejnice

Prvotní modely kontaktu kola a kolejnice [4–6] (exaktní a zjednodušené) umožnili predikovat rozložení smykového napětí v kontaktu a tedy součinitel tření. Při konfrontaci s experimentálními studii ovšem narazili na dva hlavní problémy. První problém je příliš strmý nárůst součinitele adheze za nízkých skluzů. Druhým problémem je naopak pokles součinitele adheze za vysokých skluzů (oba tyto jevy jsou ilustrovány na obr. 3-4, str. 13).

Původní algoritmy tedy byly upraveny tak aby umožnili řešit tento problém [35–37]. Bylo identifikováno, že vznik tohoto jevu je spojen se změnami v rozhraní kontaktních povrchů, které neuvažují původní teorie. Jde o reálnou drsnost, změny ve vrchních vrstvách základního materiálu a přítomnost cizích látek v kontaktu. Tyto prvky byly ovšem v publikaci [36] implementovány pouze jako přítomnost další elastické vrstvy na povrchu s určitou tloušťkou. Výsledkem byla redukce počátečního nárůstu součinitele adheze, avšak ze skutečné třecí vrstvy je použita pouze její elastická část. V případě publikací [35, 37] jde o změnu tuhosti na základě korekčního koeficientu, který byl zjištěn nepřímo na základě již známých experimentálních dat. V obou případech je řešen problém počátečního sklonu trakční křivky, ovšem nejde o skutečnou reprezentaci třecí vrstvy v kontaktu, protože

dřívější práce ukázala její elasto-plastické chování [18]. Až publikace [9–11] využívají ve své implementaci skutečné smykové chování, ať už popsané elasto-plasticky [9], nebo Voceho modelem na základě experimentálního měření smykového napětí v třecí vrstvě [10, 11]. Výsledky těchto zmíněných prací ukazují lepší shodu s experimentálními daty z laboratoře a reálné tratě. Je pouze otázka, zda využít model s korekčním koeficientem zpětně zjištěným z měření trakční křivky nebo na základě měření smykových vlastností třecí vrstvy.

Druhý problém s poklesem adheze za vyšších skluzů byl v prvotních studiích řešen parametrizací součinitele tření [35–37], který určuje maximální dosažitelný součinitel adheze. Tento přístup je volen i přesto, že je v diskusích tento jev přisuzován zvýšením teploty v kontaktu. Jsou tedy implementovány funkce popisující exponenciální pokles součinitele tření za vyšších skluzových rychlostí, které ve výsledku vedou na pokles součinitele adheze. Popis metod pro numerické řešení teploty v kontaktu je shrnuto v článku [17]. Využití takového přístupu pro kalkulaci teploty a následné využití při řešení adhezních vlastností je naznačeno v článku [13]. Využití teplotního rozložení je dále využito v člancích [10, 11]. Detailnější popis tohoto přístupu je zmíněn v disertační práci [38]. Experimentální získání dat pro popis závislosti teploty a smykového napětí je ovšem limitováno možnostmi současných zařízení. Proto jsou tyto parametry opět určeny nepřímo na trakčních křivkách. Doposud jsou tyto řešení aplikovány na jednodušší typy třecích vrstev.

Z hlediska modelů kontaktu je také nedílnou součástí vliv elasto-hydrodynamického (EHD) jevu. Experimentální práce se vlivem vody na součinitel adheze často zabývají [19–22, 39] avšak matematické modely jsou často limitovány na studie samostatného vlivu vody se součinitelem tření za sucha definovaným jako konstantou [43, 45]. Jako bílé místo se zde jeví kombinace modelu suchých třecích vrstev [9–11, 35] a modelu EHD mazání [45, 46], který je propojen kontaktem nerovností [44]. Společně má tento přístup potenciál popsat komplexní chování látek s kapalnou základní bází i bez nosné kapaliny.

4.2 Zhodnocení poznatků z prací věnovaných třecím vrstvám

Jak již bylo zmíněno, třecí vrstvy lze rozdělit na přirozené a umělé [51]. Přirozená třecí vrstva vzniká změnami na povrchu základního tělesa za pomoci působícího prokluzu mezi povrchy. Vývoj této vrstvy byl popsán v publikacích [40, 41], kde byla také provedena analýza rozložení jednotlivých vrstev pod povrchem. Je evidentní, že lze třecí vrstvu charakterizovat změnami v základním tělese a třetím tělesem složeným z částic ze základního tělesa a okolních látek. Bylo prokázáno, že povrchová část má schopnost pojmout kontaminanty přítomné na povrchu a tím měnit své vlastnosti. Je tedy svým složením z hlediska reologie špatně popsitelná. Je však zřejmé, že schopnost kontaktu

přenést trakční síly je závislá na smykových vlastnostech této vrstvy. Podrobnější studie smykového chování byla v návaznosti na matematický model provedena v studiích [9–11, 39]. Studie [10, 11] ukazují možnou metodiku pro měření smykových napětí v závislosti na deformaci pomocí vysokotlakého torzního zařízení (HPT – high pressure torsion). Ukazují také nelineární závislost poměru tečného a normálového napětí při zvyšujícím se kontaktním tlaku. Zabývají se ovšem pouze čistými povrchy bez umělé třecí vrstvy.

Studium smykových vlastností umělé třecí vrstvy byla provedena v článku [39], kde hlavní zaměření bylo na vliv malého množství vody s částicemi na smykové chování. Jednoznačně byl prokázán pokles smykového napětí při malém množství vody s částicemi a tedy efekt nazývaný „low adhesion problem“. Vzniklé oscilace při deformování vrstvy způsobené stick-slipem ovšem nejsou blíže popsány a nelze je tedy přisoudit samotné vrstvě nebo dynamice zařízení. Podobný HPT test byl použit pro třecí vrstvu složenou z komerčního modifikátoru tření a částic opotřebení [42]. Byl ukázán vliv částic opotřebení na smykové vlastnosti vrstvy a změnu v trendu při různých složeních. Také byl studován vliv kontaminace modifikátoru tření plastickým mazivem. Jelikož byl použit komerční modifikátor tření nelze hodnotit vliv složení modifikátoru na výsledky. Výše zmíněné publikace ukazují metodiku hodnocení třecích vrstev, avšak jejich implementace a ověření je doposud značnou mezerou.

Přestože byl problém s poklesem adheze při kontaminaci vodou pozorován a částečně i modelován [15, 39], nebylo doposud publikováno velké množství prací v této oblasti, což svědčí o možnosti rozšířit znalosti a přispět k poznání a odstranění tohoto problému. Jednou z možností je parametrický přístup založený na vstupech z předchozích experimentů [15]. Druhou možností je využít EHD modelu doplněného modelem kontaktu nerovností, který zaručí přechod z nekapalinového režimu do režimu smíšeného, případně EHD.

4.3 Vyvození závěrů získaných na základě rešerše

Na základě publikací zmíněných v tomto pojednání lze vyvodit následující závěry:

- Matematické modely kontaktu lze rozdělit do tří hlavních částí: exaktní teorie [4, 5], zjednodušené teorie (vycházení z exaktní) [5, 6] a ostatní [9, 18].
- Za nízkých skluzů predikují původní matematické modely strmější nárůst součinitele adheze, než ukazují experimenty [32]. Tyto odlišnosti jsou způsobeny zejména drsností a třecí vrstvou. Ve většině prací je řešením korekční součinitel upravující tuhost rozhraní [35, 37], tento přístup je založen na nepřímém určení potřebných parametrů. Druhým způsobem je využití elastické vrstvy [9, 36], pro kterou je třeba znát modul elasticity materiálu. Pouze malé množství prací ovšem využilo změřené elastické chování třecí vrstvy pro predikci součinitele adheze [10, 11, 39].

- Za vysokých skluzů dochází k postupnému poklesu součinitele adheze. Tento jev je přisuzován tepelným změnám v kontaktu. Avšak převážná část prací implementuje řešení využívající parametrizaci součinitele tření [35–37]. Všechny tyto práce využívají takřka stejný exponenciální pokles součinitele tření, Tedy samotná teplota v kontaktu není brána v potaz. Pouze malé množství studií se zabývá výpočtem rozložení teploty [17] a implementace teplotních závislostí [10, 11] do třecí vrstvy.
- Studie přirozených třecích vrstev jsou zaměřeny zejména na jejich vznik a materiálové složení [40, 41]. Pro využití v modelu je ovšem důležité jejich smykové chování. To bylo experimentálně zjištěno za pomoci vysokotlakého torzního zařízení na přirozené třecí vrstvě [10, 11] a umělé třecí vrstvě [39, 42]. Tyto studie ovšem nejsou zaměřeny na vliv složení třecí vrstvy na smykové chování.
- Použití modifikátoru tření pro řešení problému spojených s kontaktem kola a kolejnice je aktuálním tématem. Využití matematických modelů pro predikci a popisu chování modifikátorů tření ovšem v současnosti není oblastí, na kterou by se studie zaměřovali.
- Aplikace modifikátoru tření, maziva okolku a kontaminace vodou mají společný charakter v tom, že nosná kapalina může způsobit při určitých rychlostech částečné oddělení povrchu, a tedy EHD efekt. Doposud publikované práce se tímto problémem zajímají jen v návaznosti na kontaminaci vodou [39, 45] nikoliv při kontaminaci modifikátorem tření na bázi oleje nebo vody. V některých případech jsou aplikovány parametrické modely [15], avšak komplexnější popis založený na procesech probíhajících v kontaktu je doposud neúplně prozkoumanou oblastí.

5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

Podstatou disertační práce je experimentální a numerické studium třecích vrstev v kontaktu kola a kolejnice. Díky rostoucí popularitě modifikátorů tření a pokročilých metod pro změnu adheze v kontaktu se samotný kontakt stává stále více komplexnější svým složením a chováním.

5.1 Zaměření disertační práce

Současné numerické studie umožňují díky konceptu třecí vrstvy vyřešit nepřesnosti mezi původními teoriemi a experimentálními studiemi. Pouze malá část prací se však zabývá experimentálními studiemi reologického chování třecích vrstev tak, aby bylo možné je využít v numerických simulacích. Tyto studie jsou výhradně zaměřeny na přirozenou třecí vrstvu nebo vrstvu s jednoduchým složením, ať už se jedná o „suchou“ kontaminaci nebo kontaminaci „mokrou“. Doposud tedy nebyla provedena studie zaměřená na studium třecích vrstev z pohledu komplexního složení a jejich využití pro predikování součinitele adheze.

5.2 Cíl disertační práce

Cílem disertační práce objasnění chování komplexních třecích vrstev v kontaktu kola a kolejnice pomocí numerických a experimentálních metod. Jedním cílem je vytvoření numerického modelu zahrnujícího třecí vrstvu s vlivem teploty na základě doposud publikovaných studií. Tato vrstva by měla být schopna popsat jednak chování suché kontaminace díky její odezvě na deformaci, tak i chování kapalinové kontaminace pomocí viskozitní odezvy na rychlost deformace. Propojení těchto dvou typů chování je založeno na rozložení zatížení do kapaliny a pevné látky pomocí modelu kontaktu nerovností. Dalším cílem je zjištění vlivu složení komplexních třecích vrstev na smykové chování. Následně ověření výsledků modelu na modelových experimentech.

Mezi dílčí cíle vedoucí ke splnění hlavního cíle disertační práce patří:

- Vytvoření matematického modelu popisujícího kontakt kola a kolejnice
- Implementace třecí vrstvy do modelu
- Implementace vlivu teploty na třecí vrstvu
- Návrh metodiky experimentů pro měření smykových vlastností komplexních třecích vrstev

- Experimentální studium vlivu složení třecí vrstvy na smykové vlastnosti
- Využití získaných experimentálních dat v numerickém modelu a získání predikcí součinitele adheze
- Modelové experimenty pro získání ověřovacích dat k matematickému modelu

V návaznosti na závěry z kritické rešerše a cíle disertační práce jsou formulovány následující vědecké otázky a pracovní hypotézy:

Vědecká otázka č. 1

„Jaký vliv mají částice přítomné v kontaktu vliv na výsledné smykové vlastnosti kontaktu?“

Pracovní hypotéza č. 1

„Třecí vlastnosti kontaktu by měli být výhradně řízeny smykovou pevností třecí vrstvy na rozhraní povrchů. Částice oddělující povrchy by měli mít dominantní vliv na chování kontaktu. V případě že je přítomen částečný kontakt povrchů záleží na poměrem mezi zatížením neseným třecí vrstvou a nerovnostmi.“

Změna chování kontaktu oproti suchým podmínkám by se měla odvíjet od vzniklé třecí vrstvy. Tato třecí vrstva může být přirozená nebo umělá. U přirozených třecích vrstev dochází ke změnám na povrchu těles a částice vzniklé v kontaktu by měly napomáhat ke změně smykové pevnosti na rozhraní těles, jak ukazuje publikace [39–41]. Umělé třecí vrstvy vytvořené v kontaktu by stejným způsobem měli ovlivnit třecí vlastnosti dle smykové pevnosti těchto vrstev [42]. Je tedy důležité, z jakých částic se skládá třecí vrstva a jaké vlastnosti mají základní materiály. V případě třecích vrstev, které umožňují částečný kontakt nerovností je důležité kolik zatížení nesou nerovnosti a třecí vrstva [43].

Vědecká otázka č. 2

„Lze aplikovat algoritmy pro predikci součinitele adheze v kontaktu kola a kolejnice na případ kontaktu kontaminovaného komplexním složením cizích částic?“

Pracovní hypotéza č. 2

„Přenos sil v kontaktu mezi dvěma tělesy je výhradně řízen smykovými vlastnostmi rozhraní. Tyto smykové vlastnosti jsou řízeny jak pevnou, tak i kapalnou částí látek v kontaktu. Při znalosti smykových vlastností lze implementovat do algoritmů prvky, které povedou na přesnou predikci součinitele adheze.“

Predikce trakční křivky reálného kontaktu je spojena s mnoha jevy, které byly zmíněny v předchozích částech této práce. Dominantním prvkem je smykové chování kontaktu. Znalost smykového chování jakékoliv třecí vrstvy umožňuje predikci součinitele adheze. Je ovšem potřeba zohlednit složení třecí vrstvy a termální jevy. V případě úplného kontaktu nerovností je dominantní smykové chování pevných složek, v případě oddělení povrchů

dominuje součinitel adheze kapalinový režim mazání [46]. Rozhraní těchto dvou jevů a jejich vzájemný přechod je definován částečným kontaktem nerovností [44].

5.3 Způsob řešení a použité metody

Způsob řešení je rozdělen na tři dílčí části. První částí je vyvinutí matematického modelu pro predikci součinitele adheze v kontaminovaném kontaktu kola a kolejnice. Druhou částí je studium komplexních třecích vrstev. Třetí částí je ověření výsledků matematického modelu.

5.3.1 Matematický model

Získání predikce pomocí matematického modelu je nezbytné pro dosažení cílů disertační práce. Pro vytvoření matematického modelu lze využít několik přístupů. Jedním z nich je využít některý z programovacích jazyků jako je například C++. Další možností je využít komerční software, který je zaměřen na řešení matematických problémů jako je MathWorks MATLAB. MATLAB má širokou škálu knihoven umožňujících práci s různými typy matematických problémů. Také díky uživatelsky přívětivějšímu prostředí a lepší práci s maticemi a grafy se MATLAB jeví jako lepší řešení.

Z rešerše plyne, že lze využít matematické modely založené na odlišných teoriích. Exaktní teorie je tou nejkomplicovanější a výpočtově nejnáročnější. Její modifikace a implementace složitějších algoritmů pro řešení třecí vrstvy nebo teploty lze považovat za příliš složité a výpočetně náročné. Větší část publikací [35, 37] pracuje se zjednodušeným modelem založeným na algoritmu FASTSIM. Tento algoritmus poskytuje řešení mnohem rychleji a díky postupu řešení umožňuje jednoduchou modifikaci. Pro účely této disertační práce byl proto vybrán jako nejvhodnější. Samotný algoritmus je popsán v několika publikacích, přičemž nejzásadnější je kniha od J. Kalkera [5].

Pro řešení vlivu kapalných látek bude použit model částečného kontaktu nerovností dle Greenwooda a Trippa [44]. Tento model je popsán pro různé druhy nerovností a jejich rozložení, bude proto vhodné najít takový popis, který nejvíce vyhovuje implementaci do modelu. Pro predikci tření v elasto-hydrodynamickém režimu bude použita základní teorie smýkání viskózních látek mezi dvěma povrchy jak je popsáno v pracích [43, 52].

Jak již bylo zmíněno, dva hlavní problémy s predikcemi trakční křivky jsou sklon počátečního nárůstu za nízkých skluzů a změna součinitele adheze za vysokých skluzů vlivem teplotních vlivů. Řešení problému s příliš strmým počátečním nárůstem trakční křivky bude řešeno pomocí změny tuhosti kontaktu v elastické oblasti smykových vlastností kontaktu, jak bylo zmíněno v publikacích [35, 37, 53]. Proměnný součinitel adheze za

vyšších skluzů bude řešen zavedením teplotních vlivů na chování kontaktu dle [17]. Jde tedy o změnu chování v plastické oblasti smykových vlastností.

5.3.2 Experimentální studium komplexních třecích vrstev

Pro matematické modely je nutné získat relevantní vstupy, které budou charakterizovat třecí vrstvu. Tyto vstupy budou získány pomocí experimentálního přístupu. Při provádění experimentů budou sledovány modelové situace a budou využity empirické metody. Získanými daty budou pro suchý kontakt závislosti mezi deformací modelové třecí vrstvy a smykovým napětím. Pro kontakt kontaminovaný kapalinou je to závislost mezi rychlostí deformace a smykovým napětím, tedy viskozitou.

Jako modelová třecí vrstva bude využit kontakt kontaminovaný vodou, na kterém se odladí matematický model. Dále bude využit nekontaminovaný kontakt a pevné látky: hematit, magnetit, disulfid molybdenu. Poté bude následovat měření komplexních třecích vrstev. Složení těchto třecích vrstev bude určeno na základě předchozí diplomové práce autora [54] a dostupných patentů pro modifikátory tření [55–57].

Data pro pevné třecí vrstvy budou změřena na vysokotlakém torzním zařízení. Toto zařízení je v současné době ve fázi úprav v laboratořích Ústavu konstruování. Aby byla získána data pro suchou třecí vrstvu relevantní, bude muset třecí vrstva podléhat skutečným podmínkám v kontaktu. Bude využit kontaktní tlak 750 MPa a kontaktní oblast okolo 1 cm². Aby bylo možné získaná data využít v modelu, bude potřeba je proložit Voceho elasto-plastickým modelem (případně Swiftovým modelem dle chování konkrétní třecí vrstvy). Toho bude dosaženo v programu MATLAB a výsledné parametry materiálového modelu budou fungovat jako vstupy do numerického algoritmu.

Vlastnosti kapalné části komplexních vrstev budou měřeny na rotačním reometru dostupným na Ústavu konstruování. Závislost viskozity kapaliny na tlaku je již také možné změřit pomocí vysokotlakého viskozimetru, případně metodou proložení dat měření tloušťky filmu.

5.3.3 Experimentální ověření modelu

Predikované výsledky získané z modelu a změřených smykových vlastností budou ověřeny na dvoudiskovém zařízení. Pro ověření budou nastaveny modelové podmínky 750 MPa, rozsah rychlostí 0,5 – 3 m/s a skluz v rozsahu 0 – 5 %. Takovýto rozsah rychlostí a skluzů pokryje jak počáteční část elastického chování trakční křivky, tak i změnu trendu trakční křivky za vysokých skluzů. Zmíněná rychlost by měla být dostatečná pro získání hodnot ze částečně smíšeného režimu mazání modifikátorem tření na olejové bázi. Měření třecích vrstev bude třikrát zopakováno, aby byla zajištěna opakovatelnost a stabilita vytvořené vrstvy. Výsledkem bude kvalitativní i kvantitativní porovnání mezi predikovanou a

změřenou trakční křivkou. Tyto výsledky ukážou použitelnost modelu v reálných aplikacích a případné nedostatky nebo nepřesnosti u některých typů vrstev.

5.3.4 Plán publikací

Publikace budou rozděleny dle tří hlavních oblastí této disertační práce. První částí je popis a ověření modelu uvažujícím komplexní třecí vrstvy s parametrickou studií modelu. Druhá publikace se bude zabývat měřením smykových vlastností třecích vrstev na vysokotlakém torzním zařízení. Třetí publikací bude zavedení experimentálního ověření na modelovém případě komplexních modifikátorů tření.

Publikace 1

Cílem druhé publikace je popis a využití numerického modelu pro predikci tření v kontaktu kola a kolejnice. Bude popsána funkce modelu, implementace třecí vrstvy a částečného kontaktu nerovností. Tato studie bude provedena na optickém tribometru s možností měření tloušťky filmu a součinitele adheze. Díky tomu bude docíleno ověření predikce tloušťky a její chování, což v současnosti není pokryto publikacemi. Jako vstupní data pro model budou použity změřené vlastnosti vody, topografie naskenovaná na optickém profilometru a data pro mezní režim budou extrapolována z měření za suchých podmínek. Cílovým časopisem je Tribology International (IF = 3.517). Předpokládaný termín odeslání je druhé čtvrtletí 2020.

tab. 5-1 Návrh experimentů pro první článek

| Test | Podmínky testů | Sledované veličiny | Poznámka |
|------|---|---|---|
| 1 | Zatížení: 90 N (0,75 GPa) Rychlost: 100 – 2000 mm/s SRR: 0 % Mazivo: voda | Tloušťka filmu v závislosti na rychlosti | Test s leštěnou kuličkou. Ověření predikce a experimentu. Odladění kalibrace a aplikace vody z hlediska kontaminace okolním olejem. |
| 2 | Zatížení: 90 N (0,75 GPa) Rychlost: 100 – 2000 mm/s SRR: -10 – 10 % Mazivo: žádné | Skluž a krouticí moment pro vyhodnocení součinitele adheze na trakční křivce. | Data pro trakční křivku suchého kontaktu, která je použita pro určení parametrů modelu suchého kontaktu. |
| 3 | Zatížení: 90 N (0,75 GPa) Rychlost: (250; 500; 1000; 1500; 2000) mm/s SRR: -10 – 10 % Mazivo: voda | Skluž a krouticí moment pro vyhodnocení součinitele adheze na trakční křivce. | Test se zaběhlou kuličkou s vyšší drsností. Výsledkem budou trakční křivky, které budou porovnány s matematickým modelem. |
| 4 | Zatížení: 90 N (0,75 GPa) Rychlost: 100 - 2000 mm/s SRR: 5 % Mazivo: voda | Skluž a krouticí moment pro vyhodnocení součinitele adheze na trakční křivce. | Testy stribeckových křivek pro porovnání s modelem pro dva typy drsnost. |

Publikace 2

Cílem je experimentální studium třecích vrstev a vlivu složení na smykové vlastnosti. Pro získání dat bude použito vysokotlaké torzní zařízení a výsledky budou porovnány se současně malým množstvím publikací zabývajících se touto problematikou. Testy budou provedeny s torzními vzorky z ložiskové oceli, aby bylo zabráněno vlivu materiálu vzorku. Vzorky z reálného materiálu by se mohli výrazně rychleji opotřebit a vzniklé drsnosti by ovlivnili chování měřených látek. Na základě mála dostupných publikací [39], bude zvolena velikost deformace vrstvy 0,4 mm s minimální možnou rychlostí pro zamezení vlivu ohřátí. Kontaktní tlak bude zvolen tak, aby odpovídal reálnému kontaktu kola a kolejnice a zároveň byl možný použit v budoucích testech na dostupných zařízeních v laboratoři. Navíc bude testován vliv teploty ohřátím vzorků pomocí topných patron. Testované materiály budou zvoleny reprezentativně dle možných kontaminantů a materiálů používaných v modifikátorech tření. Dále bude otestován vliv vody na schopnost změnit smykové vlastnosti vrstev. Cílovým časopisem je Tribology International (IF = 3.517). Předpokládaný termín odeslání je poslední čtvrtletí 2020.

tab. 5-2 Návrh experimentů pro druhý článek

| Test | Podmínky testů | Sledované veličiny | Poznámka |
|------|--|---|--|
| 1 | Zatížení: 0,75 GPa Velikost deformace: 0,4 mm Mazivo: žádné | Poloha natočení vzorku, krouticí moment a normálové zatížení. | Test suchého kontaktu pro referenční měření a zjištění vlastností základních těles. |
| 2 | Zatížení: 0,75 GPa Velikost deformace: 0,4 mm Mazivo: MoS ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , ZnO. Vše v kombinaci s H ₂ O s hmotnostním podílem (0, 25, 50, 75, 100) % | Poloha natočení vzorku, krouticí moment a normálové zatížení. | Test zvolených materiálů z a vliv vody na jejich smykové chování, Publikace ukazují značnou redukci smykového napětí při přítomnosti vody. |
| 3 | Zatížení: 0,75 GPa Velikost deformace: 0,4 mm Teplota: (24 – 120) °C Mazivo: MoS ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ | Poloha natočení vzorku, krouticí moment, normálové zatížení a teplota. | Testování vlivu teploty na vybrané materiály. |

Publikace 3

Cílem poslední publikace bude sjednocovat všechny dosažené výsledky a konfrontovat je s ověřujícími experimenty na komplexních látkách. Bude představen experimentální postup pro ověření modelu a zhodnocena jeho přesnost a využitelnost. Pro vstupy do modelu budou použity měření smykových pevností na vysokotlakém torzním zařízení a reologických vlastností na rotačním viskozimetru. Budou zvoleny reprezentativní materiály na základě dostupných modifikátorů tření a případně předchozí diplomové práce autora zabývající se vlastními kompozicemi vodních modifikátorů tření. V případě nutnosti jejich reologických vlastností budou změřeny na rotačním viskozimetru (pokud nebude možno z důvodu obsažených částic, budou použity základové oleje). Jako kontaktní tělesa budou použity

disky z ložiskové oceli, aby bylo možné využít výsledky z experimentů na vysokotlakém torzním zařízení. Testy součinitele adheze budou provedeny na dvoudiskovém laboratorním zařízení. Cílovým časopisem je Tribology International (IF = 3.517). Předpokládaný termín odeslání je první čtvrtletí 2021.

tab. 5-3 Návrh experimentů pro třetí článek

| Test | Podmínky testů | Sledované veličiny | Poznámka |
|------|---|----------------------------|---|
| 1 | Zatížení: 0,75 GPa Rychlost: 1 m/s SRR: 2 % Mazivo: MoS ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , ZnO. Vše v kombinaci s H ₂ O s hmotnostním podílem (0, 25, 50, 75, 100) % | Součinitel adheze | Test k porovnání modelu s předchozím měřením třecích vrstev na jednoduchých časových testech. |
| 2 | Zatížení: 0,75 GPa Rychlost: 1 m/s SRR: 0 – 5 % Mazivo: MoS ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , Lubcon Sintono Terra, Igralub Headlub | Součinitel adheze a skluz. | Data pro trakční křivku kontaminovaného kontaktu částicemi i modifikátory tření. Data budou srovnány s predikcemi modelu. |

6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce je ve fázi ukončení matematického modelu a začátku úprav experimentálního zařízení. V následující kapitole bude popsán algoritmus FASTSIM a implementace změny flexibility kontaktu a teplotního ovlivnění třecí vrstvy. Zároveň bude představen kontaktní model nerovností sjednocující FASTSIM a teorii elastohydrodynamického mazání. Na závěr budou představeny prvotní experimenty ověřující funkčnost modelu.

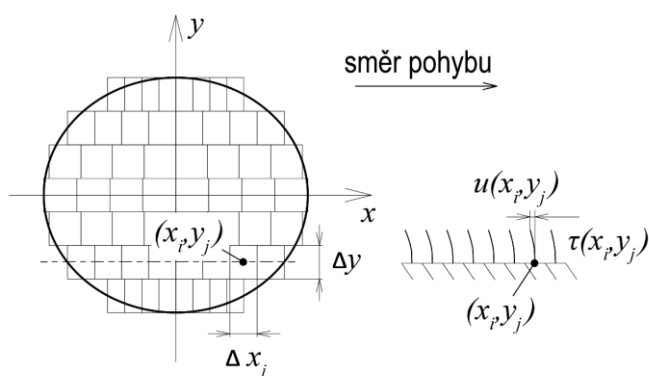
6.1 Matematický model suchého kontaktu

Jak již bylo zmíněno matematický model suchého kontaktu je postaven na algoritmu FASTSIM. Tento algoritmus je založen na lineární závislosti mezi napětím a deformací. Tato závislost je popsána rovnicí (4). Zde vyskytující se parametr flexibility existuje pro směr podélný, příčný a rotační. Parametry flexibility závisí na materiálu a rozměrech kontaktu. Původně byl odvozen Kalkerem na základě zjednodušujících předpokladů. Druhým krokem pro řešení této rovnice je zjištění deformace. Jelikož se jedná o numerický model, dochází k diskretizaci kontaktní oblasti, kde deformace v každém bodě nabývá jiných hodnot.

$$\tau(u) = \frac{u}{L} \quad (4)$$

kde τ je smykové napětí v Pa, L je parametr flexibility v m Pa⁻¹ a u je deformace v m.

Diskretizace kontaktu je vidět na obr. 6-1. Jelikož obecným tvarem kontaktu vycházejícím z Hertzovy teorie je elipsa, diskretizace probíhá jak v příčném, tak podélném směru. Aby bylo dosaženo dobrého rozlišení, je počet elementů ve směru pohybu vždy stejný. Dochází tedy ke zmenšování velikostí elementu u bočních hran kontaktu. Řešení algoritmu probíhá v jednotlivých řezech ve směru pohybu. Uvažovaný bod prochází kontaktem a s postupným posouváním k výstupní oblasti dochází k jeho větší deformaci. Jelikož je deformace každého bodu závislá pouze na jeho vlastní deformaci a není ovlivněn okolními body, nazývá se tento model kartáčový („brushed model“).



obr. 6-1 Diskretizace kontaktní oblasti

Výpočet posunutí (deformace) každého bodu vychází z kinematických závislostí v kontaktu. Jsou zanedbány transientní jevy a je uvažován ustálený stav s konstantními kinematickými hodnotami. Pokud zanedbáme vliv laterálního a otočného prokluzu vychází z kinematických závislostí rovnice (5).

$$u(x) = u(x - 1) + \Delta x \cdot s_x \quad (5)$$

kde u je deformace v mm, Δx je vzdálenost mezi diskretními body v mm a s_x je skluz.

Aplikací rovnice (5) a (4) na diskretizovanou síť s uvažováním nulové deformace na vstupní hraně kontaktu $u(x = 0) = 0$ a znalosti parametru flexibility dojdeme k řešení smykového napětí ve všech řezech kontaktu. Takto lze zjednodušeně popsat algoritmus FASTSIM.

6.1.1 Změna flexibility kontaktu za nízkých skluzů

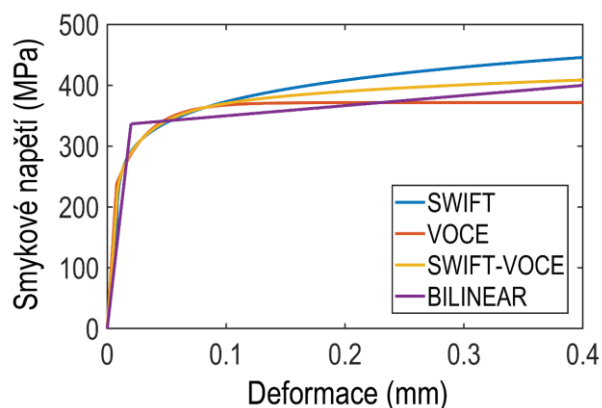
Jak již bylo zmíněno v současném stavu poznání, změnu parametru flexibility lze dosáhnout součtem parametru flexibility vycházejícího z Kalkerova řešení pro suchý kontakt a parametrem charakterizujícím třecí vrstvu (viz rovnice (6)). Tímto je dosaženo snížení tuhosti kontaktu a menšímu nárůstu součinitele adheze s rostoucím skluzem.

$$L = L_K + L_{3BL} \quad (6)$$

kde L je celkový parametr flexibility v m Pa^{-1} , L_K je Kalkerův parametr flexibility v m Pa^{-1} a L_{3BL} je parametr flexibility třecí vrstvy v m Pa^{-1} .

Získání parametru flexibility pro třecí vrstvu je závislé na měření smykového napětí. Získaná data je potřeba proložit vhodným modelem. V práci Houa [18] byl použit jednoduchý

bilineární model, ovšem pro popis materiálů s plastickým chováním existují přesnější modely jako například Swiftův nebo Voceho model (viz obr. 6-2).



obr. 6-2 Diskretizace kontaktní oblasti

Měření třecích vrstev doprovází při malých deformacích vždy elastické chování. Proto je počáteční elastické chování popsané rovnicí (4) zachováno. Avšak jakmile je dosažena hranice napětí, při kterém dojde k vzájemnému posuvu v třecí vrstvě, vznikají plastické deformace. Tyto plastické deformace lze popsat dle Swifta (rovnice (7)) a Voceho (rovnice (8)) a využít v navrženém algoritmu. Při řešení napětí v diskrétních bodech je prováděna kontrola překročení elastické části. Jakmile je tato hranice překonána algoritmus přechází na výpočet napětí dle Swifta nebo Voceho, dle vhodnější shody s experimentálními daty.

$$\tau(u_p) = A \cdot (u_0 + u_p)^n \quad (7)$$

$$\tau(u_p) = \tau_0 + (\tau_{lim} - \tau_0) \cdot (1 - \exp(-\beta \cdot u_p)) \quad (8)$$

kde $\tau(u_p)$ smykové napětí v plastické oblasti v Pa, A a n jsou koeficienty pro napětí dle Swifta, u_0 je parametr počátku plastické deformace v m, u_p je plastická deformace v m, τ_0 je smykové napětí v místě počátku plastické deformace v Pa, τ_{lim} je maximální smykové napětí v Pa, β je koeficient pro napětí dle Voceho.

V původním algoritmu je maximální dosažitelná hodnota smykového napětí limitována součinitelem tření. Tento přístup si lze představit jako bilineární model, ve kterém modul plasticity nabývá nulové hodnoty (po dosažení plasticity je smykové napětí rovno součinu normálového napětí a součinitele tření).

Jelikož rozložení normálového napětí není v kontaktní oblasti konstantní, je využita lineární závislost mezi kontaktním tlakem a smykovým napětím. Díky tomu je možné využít pouze jedno měření smykového napětí, avšak model se tímto dopouští nepřesností. V budoucnu bude model upraven pro přesnější závislost mezi normálovým napětím a smykovým

napětím. Pro přesnější popis budou použity výsledky z měření smykového napětí v třecí vrstvě.

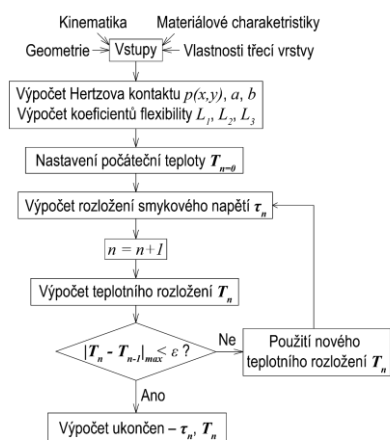
6.1.2 Změna adhezních vlastností za vysokých skluzů

Druhou hlavní modifikací modelu je implementace teplotních vlivů. V předchozí kapitole byl popsán model popisující elasto-plastické smykové vlastnosti. V reálném kontaktu dochází vlivem skluzu ke generaci tepla. Toto teplo způsobuje poddajnější chování kontaktu, a tedy nižší vzniklá smyková napětí. Výpočet teplotního rozložení vychází z publikace [17].

$$T(x_i) = \frac{2}{\sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}} \cdot \sqrt{\frac{a}{\pi \cdot v}} \cdot \sum_{k=1}^i \dot{q}_k \cdot (\sqrt{x_i - x_{k-1}} - \sqrt{x_i - x_k}) \quad (9)$$

kde $T(x_i)$ je teplota v °C, λ je tepelná vodivost v W/K m, ρ je hustota v kg/m³, c je tepelná kapacita v J kg/K, a je délka kontaktu v m, v je rychlost pohybu v m/s, \dot{q}_k je teplo v J, x je souřadnice bodu v m.

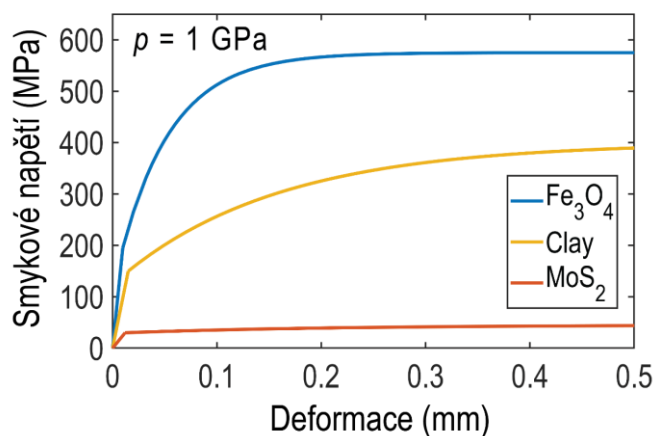
Výpočet teploty probíhá stejně jako výpočet smykového napětí. Každým řezem ve směru pohybu je proveden výpočet. V bodě na počátečním kraji kontaktu je uvažován nulový nárůst teploty, a tudíž je brána ambientní teplota okolí. Parametry pro elasto-plastický model (parametry v rovnicích (7) a (8)) poté mohou být parametrizovány na základě vlivu teploty. Jelikož je teplotní rozložení \dot{q}_k vypočítáno jako součin smykového napětí a skluzové rychlosti je potřeba tento problém vyřešit iteračně. Po prvním vyřešení teplotního rozložení se na základě teploty aktualizují parametry elasto-plastického modelu a znovu proběhne výpočet smykového napětí. Díky novému rozložení smykového napětí je poté opět vypočítáno nové teplotní rozložení. Tento proces probíhá do té doby, než je dosaženo konvergence k hodnotě s dostatečnou přesností (postačuje přesnost 1 °C). Celý proces řešení je poté naznačen na obr. 6-3.



obr. 6-3 Diskretizace kontaktní oblasti

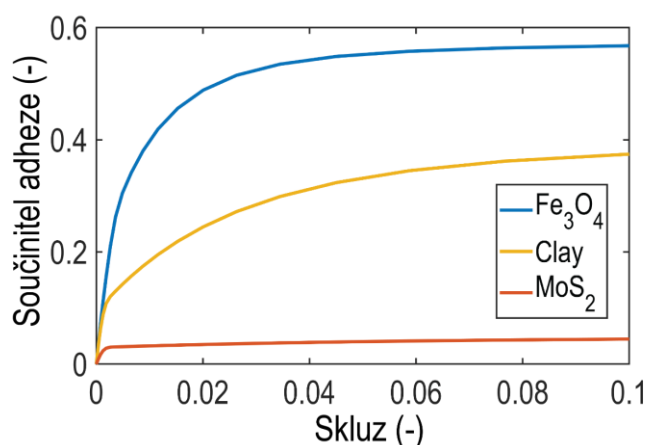
6.1.3 Prvotní výsledky modelu

Prvotní výsledky modelu sloužily k ověření funkčnosti a odladění. Jelikož doposud nebyly měřeny smykové závislosti materiálu třecí vrstvy, byly převzaty hodnoty z publikace [18]. Data byla proložena Voceho modelem a jsou zobrazeny na obr. 6-3. Jedná se o materiály oxidu železa, jílu a disulfidu molybdenu. Parametry modelu byly $a = 10$ mm, $b = 9,81$ mm, rychlost $v = 20$ m/s a maximální kontaktní tlak $p_{\max} = 1$ GPa.



obr. 6-4 Proložená data z publikace [18]

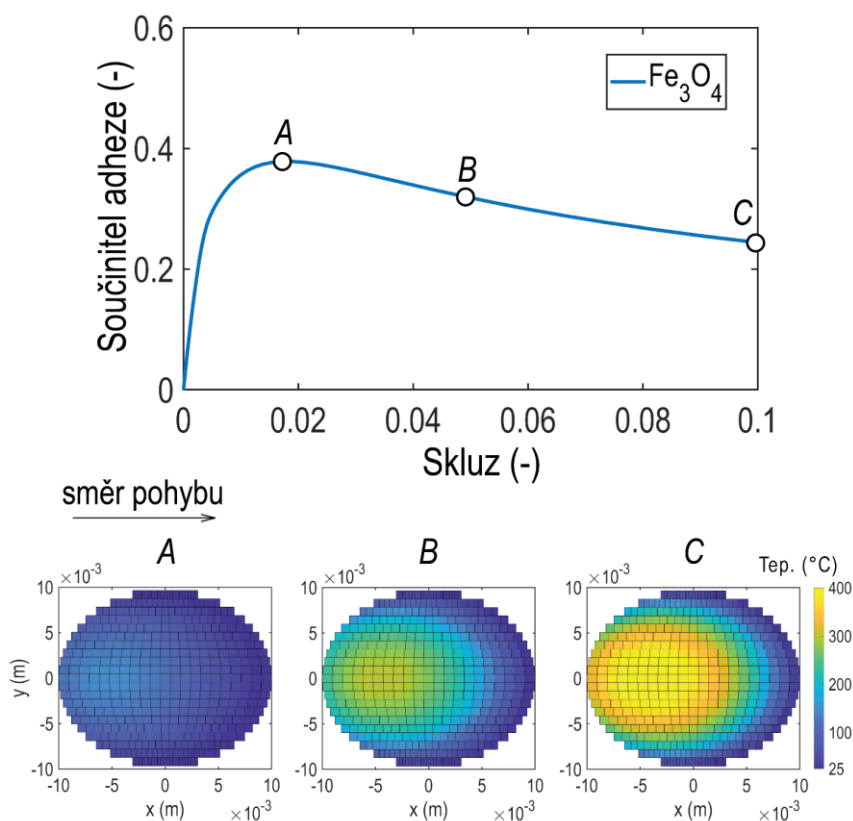
Výsledné trakční křivky lze vidět na obr. 6-5. V tomto případě nebyl uvažován nárůst teploty, a proto výsledky reprezentují zejména změnu počátečního nárůstu součinitele adheze. Lze vidět podobnost mezi proloženými smykovými vlastnostmi a trakční křivkou. To je dáno tím, že zvyšující se skluz odpovídá nárůstu deformací v kontaktu i přesto že deformace jsou v každém bodě jiné. Jelikož materiálový model vykazuje saturaci napětí v plastické oblasti tak i trakční křivky dosahují limitní hodnoty odpovídající saturaci smykového napětí v kontaktu.



obr. 6-5 Trakční křivka pro materiály bez teplotní závislosti

Zavedení teplotních koeficientů na základě disertační práce [38] umožnilo změnu vývoje součinitele adheze za vyšších skluzů. Výsledná trakční křivka pro oxid železa je zobrazena

na obr. 6-6. Počáteční nárůst trakční křivky není zásadně ovlivněn teplotním efektem, díky tomu že nárůst teploty není dostatečný pro změnu vlastností třecí vrstvy. Při porovnání teploty v bodech A, B a C lze vidět jasný vliv zvýšené teploty na součinitel adheze. Největší změny teplotního rozložení nastávají blíže k výstupnímu kraji kontaktní oblasti. U výstupního kraje dochází k největším deformacím a tedy i smykovému napětí, které je zdrojem tepla. Pro skluz 0,1 je dosaženo maximální teploty okolo 400 °C.



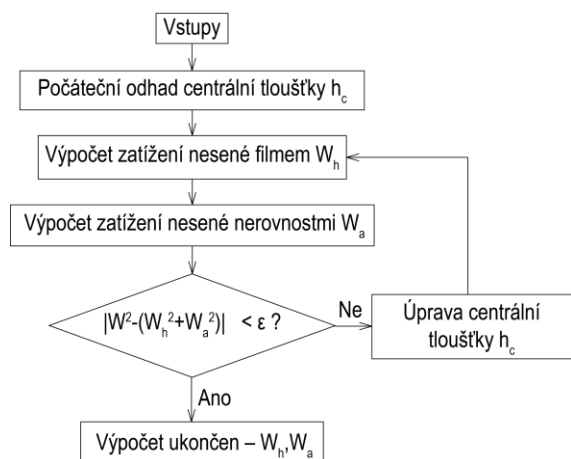
obr. 6-6 Trakční křivka oxidu železa s teplotním efektem

Tyto výsledky ukazují možnosti vzniklého modelu a jeho aplikace. V rámci testování modelu byly zjištěny nedostatky konvergence smykového napětí a teploty. Byl proto upraven algoritmus, který kontroluje konvergenci. Místo lineárního průběhu konvergence bylo dosaženo exponenciálního průběhu. Zejména pro vysoké skluzy, kde je dosaženo vyšších teplot, byl výpočet značně zrychlen.

Představené výsledky byly prezentovány na konferenci Wear of Materials 2019 ve formě posteru.

6.2 Matematický model kontaktu nerovností

Model kontaktu nerovností je založen na teorii Greenwooda a Trippa [44] která definuje velikost zatížená nesenou nerovnostmi. Při známém součiniteli tření pro kontakt nerovností (model suchého kontaktu) a pro film vyplňující nerovnosti (EHD model, viz níže) lze predikovat výsledný součinitel tření pomocí váhových hodnot, které značí rozložení zatížení v kontaktu. Algoritmus výpočtu poměru zatížení nesené nerovnostmi a filmem je znázorněno na obr. 6-7.



obr. 6-7 Algoritmus výpočtu zatížení nesené filmem a nerovnostmi

K odhadu výpočtu centrální tloušťky lze využít rovnici dle Nijenbanninga [58], avšak pro prvotní ověřující experimenty byla použita rovnice isoviskózního režimu dle [59].

$$U = \frac{\eta \cdot v}{E \cdot r} \quad (11)$$

$$W = \frac{F}{E \cdot r^2} \quad (12)$$

$$h_c = 5,08 \cdot U^{0,66} \cdot W_h^{-0,21} \cdot r^2 \quad (13)$$

kde U je bezrozměrná rychlost, η je viskozita v Pa s, v je rychlost pohybu v m/s, E je redukovaný modul pružnosti v Pa, r je poloměr křivosti ve směru toku maziva v m, W bezrozměrné zatížení, W_h je bezrozměrné zatížení nesené filmem, F je zátěžná síla v N, h_c je tloušťka filmu v m.

Výpočet kontaktního tlaku nerovností je založen na parametrech topografie a využití specifického rozložení nerovností. Na základě protnutí geometrií vrcholů nerovností je potom odvozena rovnice pro průměrný tlak kontaktu nerovností po ploše kontaktu dvou těles. Důležitým parametrem je vzdálenost střednic obou povrchů, často vztažena vůči průměrná kvadratické úchylce profilu R_q . Parametry popisující profil povrchu je již zmíněné

R_q , počet výstupků n_a v $1/m^2$ a poloměr zakřivení vrcholku nerovnosti β v m. Výpočet průměrného tlaku v nerovnostech s uvažováním elastického chování a Gaussovým rozložením je dle rovnice (14). Ta je odvozena pro reálný povrch proti ideální rovině.

$$P = \frac{4}{3} (\beta \cdot n_a \cdot R_q) \cdot E \cdot \sqrt{\frac{R_q}{\beta}} \cdot F_{\frac{3}{2}} \left(\frac{h_c}{R_q} \right) \quad (14)$$

Pro porovnání je také využita rovnice zahrnující plastické deformace povrchů s Gaussovým rozložením (rovnice (15)).

$$P = \frac{2}{3} \pi^2 \cdot S \cdot H \cdot (\beta \cdot n_a \cdot R_q)^2 \cdot F_4 \left(\frac{h_c}{R_q} \right) \quad (15)$$

kde P průměrný tlak způsobený nerovnostmi vztažený k celkové ploše kontaktu v Pa, β je poloměr zakřivení vrcholku nerovností v m, n_a je počet výstupků vztažený k ploše v $1/m^2$, R_q je průměrná kvadratická úchylka profilu v m, E je redukovaný modul pružnosti v Pa, h_c je centrální tloušťka filmu oddělující povrchy v m, S je plocha kontaktu dvou těles v m^2 , H je průměrný tlak vztažený k tvrdosti materiálu v Pa.

Ze známého tlaku a kontaktní plochy se určí síla nesená nerovnostmi, která se převede na bezrozměrnou veličinu W_a dle rovnice (12). Funkce $F_{\frac{3}{2}}$ a F_4 jsou vztaženy k statistickému rozložení nerovností a interferencí mezi dvěma kontaktními rovinami. Tyto funkce lze vypočítat následovně:

$$F_n(u) = \int_u^\infty (s-u)^n \phi^*(s) \cdot ds \quad (16)$$

Konvergence řešení probíhá Newton-Raphsonovou metodou. Výpočet je ukončen po dosažení chyby maximálně 1 %. Po dokončení konvergence je známo bezrozměrné zatížení nesené filmem W_h a kontaktem nerovností W_a . Toho je využito při výpočtu výsledného součinitele tření. Pro suchý kontakt je brán součinitel tření z algoritmu popsaného v kapitole 6.1. Pro součinitel tření vzniklý filmem kapaliny v kontaktu je využita teorie EHD mazání.

Při výpočtu součinitele tření EHD režimu je využito stejné diskretizace jako v případě kapitoly 6.1 a v diskrétních bodech se řeší změna viskozity s tlakem dle Barrusova vztahu (neplatí v případě isoviskózního režimu) a smykové namáhání kapaliny dle rovnice (17). Relativní rychlost povrchů je dána celkovou rychlostí a skluzem. Podíl mezi sumou smykových napětí a sumou diskrétního tlakového pole dává součinitel tření pro kapalinové mazání.

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dx} \quad (17)$$

kde τ je smykové napětí v Pa, η je viskozita kapaliny v Pa s, dv je rozdíl rychlostí dvou povrchů v m/s a dx je vzdálenost střednic povrchů.

$$\mu_h = \frac{\text{sum}(\tau)}{\text{sum}(p)} \quad (18)$$

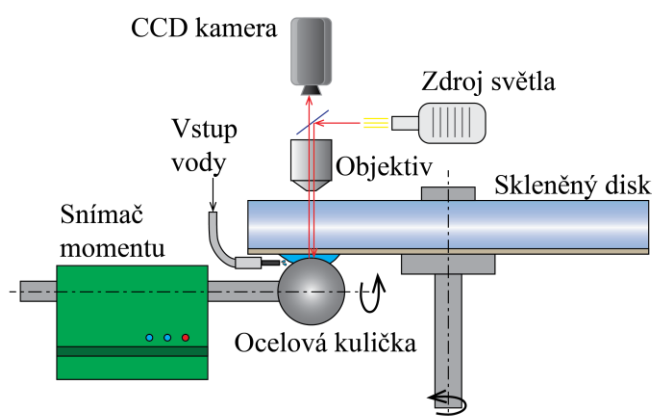
kde μ_h je součinitel tření od kapalinového filmu, τ je smykové napětí v kapalině v Pa s, p je kontaktní tlak v Pa.

Výsledný součinitel tření je potom definován:

$$\mu = \frac{\mu_a \cdot W_a + \mu_h \cdot W_h}{W_a + W_h} \quad (19)$$

kde μ je celkový součinitel tření, μ_a je součinitel tření od kontaktu nerovností, W_a je bezrozměrné zatížení nesené nerovnostmi, μ_h je součinitel tření od EHD režimu, W_h je bezrozměrné zatížení nesené EHD filmem.

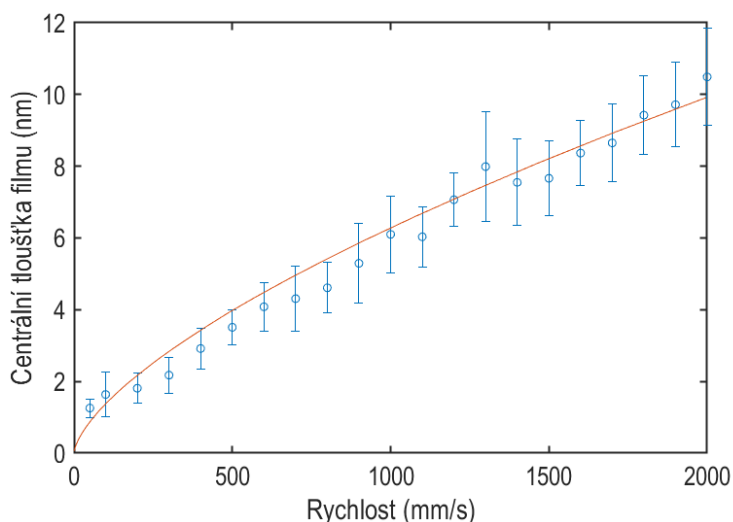
Pro verifikaci tohoto modelu bylo navrženo měření na optickém tribometru umožňujícím měření tloušťky filmu pomocí kolorimetrické interferometrie a zároveň měření krouticího momentu. Bližší popis metody je uveden v publikaci [60]. Schéma zařízení je zobrazeno na Obr. 6-7. Byly použity vzorky z ložiskové oceli s nízkou drsností povrchu, což umožnilo v rámci měřených rychlostí 0 – 2 m/s projít smíšeným a EHD režimem. Zároveň ložiskový materiál zajišťoval dobrou stabilitu drsnosti v průběhu testu. První testy byly navrženy pro ověření predikované tloušťky filmu. Tímto je ověřen použitý isoviskózní model a zároveň je zajištěno, že nedojde ke kontaminaci olejem, který je v tomto zařízení běžně testován. Kontaminace olejem by mohla výrazně ovlivnit tloušťku filmu a také hodnoty tření.



obr. 6-7 Schéma experimentálního zařízení

Výsledky z měření tloušťky filmu jsou zobrazeny na obr. 6-8. Ocelová kulička byla zatěžována proti skleněnému disku s vrstvou chromu silou 90 N, která způsobuje maximální

kontaktní tlak 0,75 GPa. Voda byla dopravována přímo do kontaktu pomocí injekční stříkačky s jehlou aby bylo zamezeno možné kontaminace z vany pod kuličkou. Test byl proveden v rozsahu rychlostí 50 – 2000 mm/s. V okolí rychlosti 1200 m/s je frekvence otáčení blízko vlastní frekvenci zařízení, což se projevuje kmitáním kontaktu a na obr. 6-8 to lze pozorovat na větší hodnotě směrodatné odchylky. Test byl proveden při 0 % SRR (hodnota SRR je rovna dvojnásobku skluzu, vychází to z odlišného výpočtu) a opakován 7krát. Po každém změření zmíněného rozsahu rychlostí byla kulička s diskem očištěna a zároveň byl vyčištěn reservoár pod kuličkou. V průběhu testů bylo zjištěno, že když se hladina odtékající vody do vany pod kuličkou zvedne a dotkne se spodní části kuličky, dojde ke kontaminaci olejem s předchozích měření. Tento jev je patrný na snímaných interferenčních obrázcích lokálním nárůstem tloušťky filmu až o třínásobek predikované hodnoty. Na tento kontrolu tohoto jevu byl kladen důraz při průběhu navazujících měření. Pokud byla zpozorována kontaminace vody byl test přerušen a vyřazen z vyhodnocení. Kontaktní dvojce společně se všemi vnitřními plochami reservoáru a vany byly důkladně vyčištěny.



obr. 6-8 Porovnání experimentu s predikcí tloušťky filmu vody

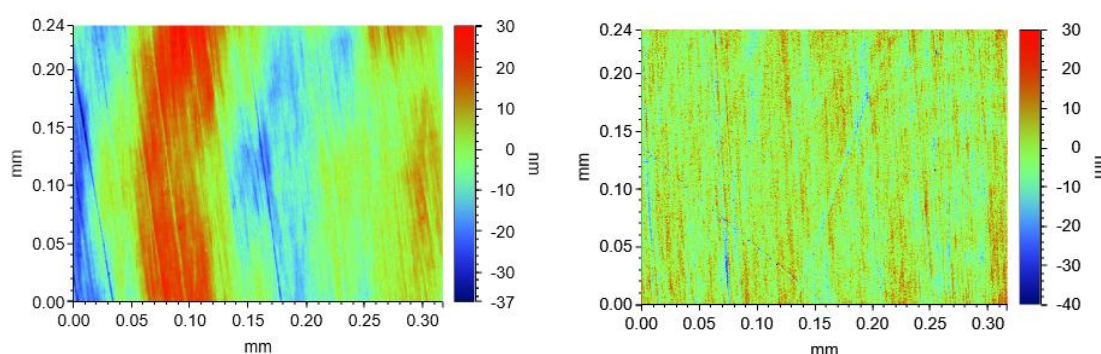
Výsledky ukazují dobrou shodu s predikcí isoviskózního režimu (rovnice (13)) jak zobrazuje plná oranžová čára na obr. 6-8. Při nižších rychlostech měření naráží na limity metody měření tloušťky filmu. Díky tomu, že měřené tloušťky filmu byly v barevném spektru šedé, byl kladen důraz na kalibraci, a proto byly provedeny kalibrační snímky před i po měření a byl kontrolován případný posun v kalibraci. V navazujících experimentech již nebyla vyhodnocována tloušťka filmu, avšak bylo sledováno správné spektrum šedé zaručující správné hodnoty tloušťky filmu

Hlavním experimentem pro porovnání predikčního modelu byly stríbeckovy a trakční křivky. Testy byly rozděleny na měření s hladkým povrchem a s zdrsňeným povrchem. Trakční křivky byly změřeny za mírně zvýšené drsnosti, jelikož nebylo možné v rámci měřených skluzů zamezit částečnému zdrsňení povrchů. Po záběhu s 10% skluzem po dobu

půl minuty bylo dosaženo drsnosti, která se ustálila a nebyla sledována změna před a po měření trakční křivky, které trvalo zhruba 1 minutu. Profil vzniklé drážky byl změřen na pěti náhodných místech (jedno z nich je zobrazeno na obr. 6-9) a hodnoty pro model byly brány jako průměr z těchto měření. Výsledné parametry povrchu pro model jsou v tab. 6-1. Vybrané profily jsou poté zobrazeny na obr. 6-9.

tab. 6-1 Parametry profilu pro dva stavy drsností. V závorkách jsou uvedeny směrodatné odchylky

| Typ Povrchu | R_q (nm) | n_a (1/m ²) | β (mm) |
|-------------|------------|---------------------------|---------------|
| Hladký | 8,3 (1,45) | 24200 (2900) | 0,301 (0,005) |
| Zdrsněný | 9,56 (4,7) | 21500 (5000) | 0,373 (0,026) |



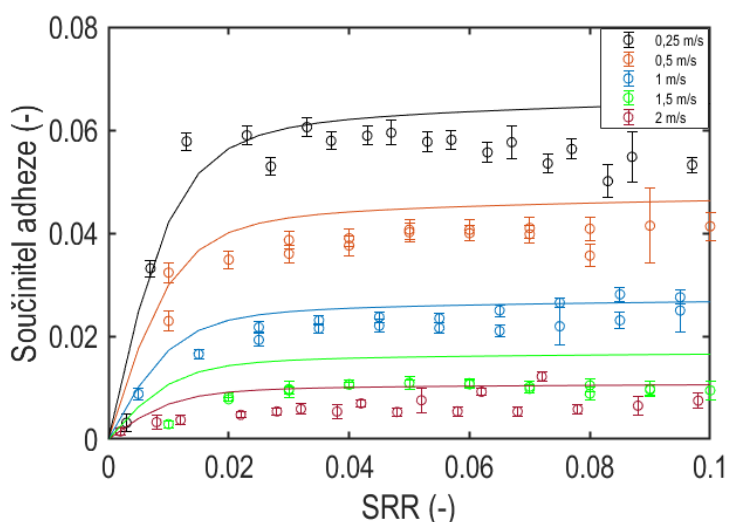
obr. 6-9 Profily povrchu kuličky pro případ hladké (vlevo) a zdrsněné (vpravo)

První typ testu s měřením tření byl trakční test. Jelikož velká část měření se pohybovala ve vyšších hodnotách součinitele adheze, nebylo možné zajistit pro toto měření data s hladkou kuličkou. Proto bylo měření provedeno pouze pro zdrsněný povrch, který je po záběhu stabilní po celou dobu testu. Aby byla pokryta co největší část trakční křivky bylo měření provedeno v rozsahu SRR 0 – 0,1. Hodnoty SRR byly nastaveny od -10 % do 10% a poté průměrovány, navíc byly zpřesněny na základě skutečných otáček kuličky a disku. Rychlosti byly zvoleny z celého možného rozsahu měření od 0 – 2 m/s.

Pro model byla zvolena viskozita vody 0,7 mPas, která byla změřena na rotačním viskozimetru HAAKE RotoVisco 1. Parametry suché třecí vrstvy byly zjištěny na základě proložení dat z trakčního testu za sucha (-10 – 10 % SRR), který proběhl se stejným zatížením a při rychlosti 500 mm/s. Pro zjednodušení byl smykový model třecí vrstvy upraven tak, aby byla závislost na tlaku lineární a tudíž postačovalo zadat kritické hodnoty součinitele adheze (skutečné smykové napětí v daném bode je dáno jakou součin normálového tlaku a součinitele adheze). Hodnota součinitele adheze kde končí elastická část je 0,16, maximální hodnota součinitele adheze činila 0,18, hodnota elastické flexibility (viz rovnice (6)) byla 6 a plastické 0,01. Hodnoty jsou bezrozměrné jelikož vyjadřují vztah k součiniteli adheze. Vliv teploty byl zanedbán a průměrný tlak vztažený k tvrdosti materiálu

pro výpočet zatížení neseného nerovnostmi byl zvolen 6 GPa (hodnota zvolená na základě tvrdosti koule a dle publikací taktéž odpovídá přibližně trojnásobku meze pevnosti).

Výsledky jsou zobrazeny na obr. 6-10. Počáteční nárůst součinitele adheze probíhá v rozsahu 0–2 % SRR. Tento nárůst je dobře reflektován modelem, a tudíž hodnota elastické flexibility za sucha odpovídá i při kontaminaci vodou. Dosažené maximální hodnoty součinitele adheze pro měřené rychlosti jsou nižší než predikované hodnoty modelem. Největší rozdíl je pozorován u nejvyšších rychlostí, kdy je kontakt už z velké části řízen EHD režimem. Experimentálně zjištěné hodnoty se téměř překrývají, a tudíž naráží na hranici součinitele adheze možnou zajistit EHD režimem. Model predikuje pro 2 m/s a 1,5 m/s větší rozdíl a lze tedy předpokládat, že se pohybuje na spodní hranici smíšeného mazání. Obecně jsou změřené hodnoty nižší než hodnoty predikované modelem. To může být způsobené citlivostí na parametry povrchu, které mají statisticky větší hodnotu směrodatné odchylky, jelikož drsnější povrch vykazuje v jistých místech značné lokální poškození

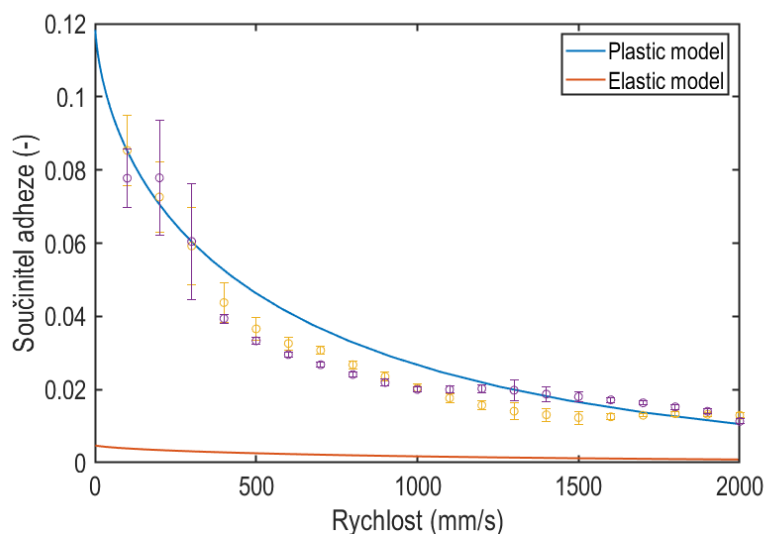


obr. 6-10 Trakční křivka experimentu s vodou pro různé rychlosti, plné čáry zobrazují predikci dle modelu.

Druhým typem testu byla závislost na rychlosti, a tedy i změnu režimu. V tomto případě bylo možné využít jak drsnější, tak i hladký povrch koule, protože čas ve kterém byly dosaženy vyšší hodnoty součinitele adheze byl řádově nižší než při měření trakční křivky. Hodnota SRR byla zvolena 5 %, díky tomu se měření vyhnulo elastické oblasti nárůstu součinitele adheze a pohybovalo se ve stabilní oblasti limitního součinitele adheze. Rychlosti byly provedeny od nejnižší 100 mm/s po nejvyšší 2000 mm/s a zpět na 100 mm/s.

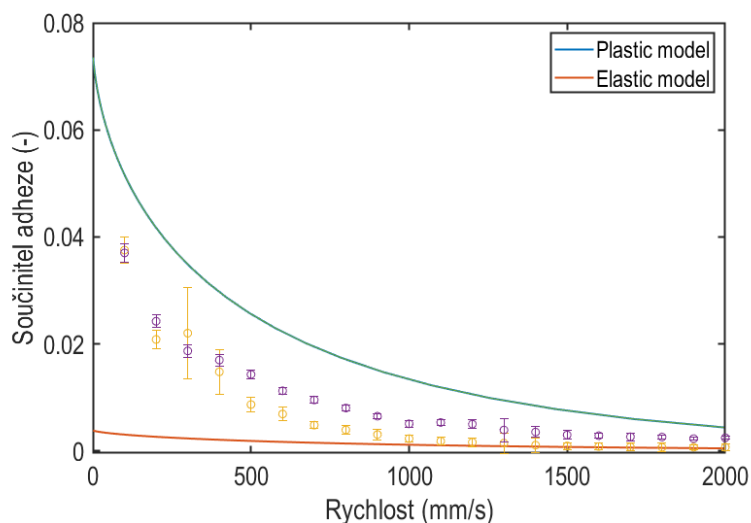
Výsledky pro drsnější povrch jsou na obr. 6-11. Výsledky z experimentů ukazují, že rozsah rychlostí pokrývá režimy smíšený a EHD. Minimální rychlost měření dosáhla hodnot součinitele adheze 0,08 a je tedy daleko od hodnot suchého kontaktu, který dosáhl 0,18. Postupný pokles při zvýšení rychlosti se ustaluje okolo rychlosti 1 m/s. Minimální hodnota součinitele adheze dosáhla 0,01. Predikce plastického modelu je v dobré shodě

s experimenty. Ovšem predikce s elastickým modelem nenese prakticky žádnou shodu s experimentem. Lze očekávat, že zvolené zatížení vytváří významné plastické deformace.



obr. 6-11 Stribeckova křivka pro drsnější povrch koule, predikce zobrazena plnou čarou.

Poslední experiment probíhal s leštěnou kličkou a je zobrazen na obr. 6-12. Výsledky opět ukazují strmý pokles součinitele adheze a jeho ustálení na nejnižších hodnotách okolo 1 m/s. V porovnání s predikcí modelem je zde větší rozdíl. Avšak stejně jako v případě s drsnější kuličkou predikuje elastický model extrémně nízké hodnoty součinitele adheze.



obr. 6-12 Stribeckova křivka pro hladký povrch koule, predikce zobrazena plnou čarou.

V případě porovnání obou stribeckových křivek byl pozorován významný nesouhlas experimentu s elastickým modelem nerovností. Hodnoty predikovaném elastickým modelem jsou významně nižší, než hodnoty experimentálně změřené. Predikce se v rozsahu rychlostí takřka výhradně pohybuje v EHD režimu a nelze pozorovat přechod do smíšené oblasti. Z hlediska vstupních parametrů by to znamenalo, že aby fungoval elastický model, musela by drsnost povrchů být mnohem vyšší. Z hlediska tloušťky filmu by to ovšem nebylo

srovnatelné. Naměřené drsnosti jsou ekvivalentní hodnotě tloušťky filmu při rychlosti okolo 1500 mm/s.

Porovnání experimentu s modelem ukázalo výrazný vliv typu deformace nerovností. Při uvážení, že změřená data profilů nerovností jsou řádově správná, nelze očekávat pro zvolené podmínky experimentů vhodnost elastického modelu deformací. Predikce je v případě zvolených podmínek citlivá na vstupy profilu, jelikož tloušťky filmu jsou v rozsahu rychlostí velmi malé. Bylo by vhodné tuto premisu ověřit a provést stejný typ experimentů pro olejové mazivo. Jako vhodný kandidát se jeví ricinový olej, jelikož rostlinné oleje jsou často využívány pro aplikace s důrazem na biologickou odbouratelnost.

Poslední zmíněné výsledky modelu kontaktu nerovností jsou předmětem první publikace.

7 ZÁVĚR

V tomto pojednání ke státní doktorské zkoušce byly analyzovány nejpodstatnější publikace z hlediska modelování a experimentální studie třecích vrstev. Na základě zhodnocení poznatků z rešerše byl formulován cíl práce a vědecké otázky. Postup řešení a metody vychází z aktuálních studií o dané problematice. Byly představeny tři publikace zaměřené na jednotlivé fáze řešení disertační práce. V současném stavu řešení byl popsán aktuální stav modelu pro predikci součinitele adheze v kontaktu. Byly popsány dvě modifikace pro vliv třecí vrstvy a teploty v kontaktu a obecný algoritmus řešení. Prvotní výsledky ukazují možnosti využití modelu a jsou předpokladem pro jeho další využití navázané na experimentální studium třecích vrstev.

8 LITERATURA

- [1] 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
- [2] 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
- [3] HAINES, D. J. a E. OLLERTON. Contact Stress Distributions on Elliptical Contact Surfaces Subjected to Radial and Tangential Forces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* [online]. 1963, roč. 177, č. 1, s. 95–114. ISSN 00224898. Dostupné z: doi:10.1243/PIME_PROC_1963_177_014_02
- [4] JOHNSON, K. L. The Effect of Spin Upon Rolling Motion of an Elastic Sphere on a Plane. *Journal of Applied Mechanics*. 1958, roč. 80, s. 332–338.
- [5] KALKER, J. J. a K. L. JOHNSON. *Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact* [online]. B.m.: Eisenbahntechnische Rundschau, 1993. ISBN 0792307127. Dostupné z: doi:10.1115/1.2900773
- [6] KALKER, J. J. Simplified Theory of Rolling Contact. *Delft Progress Report, Ser. C., Mech. and Aero Engng. Shipbdg.* 1973, roč. 1, č. 1 (DECEMBER, 1973), s. 1–10.
- [7] POLACH, O. A Fast Wheel-Rail Forces Calculation Computer Code. *Vehicle System Dynamics* [online]. 1999, roč. 33, č. Supplement 33, s. 728–739. ISSN 00423114. Dostupné z: http://www.polach.ch/data/object_4/IAVSD_1999_Pretoria_Paper.pdf
- [8] VOLTR, Petr. Calculation of locomotive traction force in transient rolling contact. *Applied and Computational Mechanics* [online]. 2017, roč. 11, č. 1, s. 1–12. ISSN 1802680X. Dostupné z: doi:10.24132/acm.2017.335
- [9] 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
- [10] SIX, K., A. MEIERHOFER, G. TRUMMER, C. MARTE a G. MULLER. Classification and Consideration of Plasticity Phenomena in Wheel-Rail Contact Modelling. *International Journal of Railway Technology* [online]. 2017, roč. 5, č. 3, s. 55–77. Dostupné z: doi:10.4203/ijrt.x.x.yyy
- [11] SIX, K., A. MEIERHOFER, G. MUULLER a P. DIETMAIER. Physical processes in wheel-rail contact and its implications on vehicle-track interaction. *Vehicle System Dynamics* [online]. 2015, roč. 53, č. 5, s. 635–650. ISSN 17445159. Dostupné z: doi:10.1080/00423114.2014.983675
- [12] ERTZ, M a F BUCHER. Improved creep force model for wheel/rail contact considering roughness and temperature. *Veh Syst Dyn.* [online]. 2002, roč. 37, č. Suppl, s. 314–325. ISSN 00423114. Dostupné z: doi:10.1080/00423114.2002.11666242
- [13] TOMBERGER, C., P. DIETMAIER, W. SEXTRO a K. SIX. Friction in wheel-rail

- contact: A model comprising interfacial fluids, surface roughness and temperature. *Wear* [online]. 2011, roč. 271, č. 1–2, s. 2–12. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2010.10.025
- [14] WU, B., Z. WEN, H. WANG a X. JIN. Numerical analysis on wheel/rail adhesion under mixed contamination of oil and water with surface roughness. *Wear* [online]. 2014, roč. 314, č. 1–2, s. 140–147. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2013.11.041
- [15] TRUMMER, G., L. E. BUCKLEY-JOHNSTONE, P. VOLTR, A. MEIERHOFER, R. LEWIS a K. SIX. Wheel-rail creep force model for predicting water induced low adhesion phenomena. *Tribology International* [online]. 2017, roč. 109, č. December 2016, s. 409–415. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2016.12.056
- [16] GORYACHEVA, I. a F. SADEGHI. Contact characteristics of a rolling/sliding cylinder and a viscoelastic layer bonded to an elastic substrate. *Wear* [online]. 1995, roč. 184, č. 2, s. 125–132. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/0043-1648(94)06561-6
- [17] ERTZ, Martin a Klaus KNOTHE. A comparison of analytical and numerical methods for the calculation of temperatures in wheel/rail contact. *Wear* [online]. 2002, roč. 253, č. 3–4, s. 498–508. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1648(02)00120-5
- [18] 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
- [19] BAEK, K. S., K. KYOGOKU a T. NAKAHARA. An experimental investigation of transient traction characteristics in rolling-sliding wheel/rail contacts under dry-wet conditions. *Wear* [online]. 2007, roč. 263, č. 1-6 SPEC. ISS., s. 169–179. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2007.01.067
- [20] 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
- [21] 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
- [22] 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
- [23] ISHIZAKA, K., S. R. LEWIS a R. LEWIS. The low adhesion problem due to leaf contamination in the wheel/rail contact: Bonding and low adhesion mechanisms. *Wear* [online]. 2017, roč. 378–379, s. 183–197. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2017.02.044
- [24] CANN, P. M. The „leaves on the line“ problem - A study of leaf residue film formation and lubricity under laboratory test conditions. *Tribology Letters* [online]. 2006, roč. 24, č. 2, s. 151–158. ISSN 10238883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-006-9152-2

- [25] 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
- [26] 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
- [27] 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
- [28] ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI, R. LEWIS a E. A. GALLARDO-HERNANDEZ. Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel-rail contacts. *Wear* [online]. 2010, roč. 268, č. 2–3, s. 543–551. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2009.09.015
- [29] 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.
- [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] STOCK, R., L. STANLAKE, C. HARDWICK, D. T. 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
- [32] 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
- [33] IWNICKI, S. *A Handbook of Railway Vehicle Dynamics* [online]. 2006. ISBN ISBN 978-0-8493-3321-7. Dostupné z: doi:10.1201/9781420004892.ch1
- [34] LANG, W a G ROTH. *Optimale Kraftschlussausnutzung bei Hochleistungs-Schienenfahrzeugen*. 1993.
- [35] ROVIRA, A., A. RODA, R. LEWIS a M. B. MARSHALL. Application of Fastsim with variable coefficient of friction using twin disc experimental measurements. *Wear* [online]. 2012, roč. 274–275, s. 109–126. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2011.08.019
- [36] 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
- [37] SPIRYAGIN, M., O. POLACH a C. COLE. Creep force modelling for rail traction vehicles based on the Fastsim algorithm. *Vehicle System Dynamics* [online]. 2013, roč. 51, č. 11, s. 1765–1783. ISSN 00423114. Dostupné

z: doi:10.1080/00423114.2013.826370

- [38] MEIERHOFER, A. A new Wheel-Rail Creep Force Model based on Elasto-Plastic Third Body Layers. *Disertační práce*. 2015.
- [39] BUCKLEY-JOHNSTONE, L. E., G. TRUMMER, P. VOLTR, A. MEIERHOFER, K. SIX, D. I. FLETCHER a R. LEWIS. Assessing the impact of small amounts of water and iron oxides on adhesion in the wheel/rail interface using High Pressure Torsion testing. *Tribology International* [online]. 2019, roč. 135, č. February, s. 55–64. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2019.02.024
- [40] 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
- [41] 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
- [42] 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
- [43] CHEN, H., T. BAN, M. ISHIDA a T. NAKAHARA. Adhesion between rail/wheel under water lubricated contact. *Wear* [online]. 2002, roč. 253, č. 1–2, s. 75–81. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1648(02)00085-6
- [44] GREENWOOD, J. A. a J. H. TRIPP. The Contact of Two Nominally Flat Rough Surfaces. *Proceedings Inst Mech Engrs* [online]. 1970, roč. 185, č. 48/71, s. 625–633. Dostupné z: doi:10.1243/PIME
- [45] CHEN, H., A. YOSHIMURA a T. OHYAMA. Numerical analysis for the influence of water film on adhesion between rail and wheel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* [online]. 1998, roč. 212, č. 5, s. 359–368. ISSN 13506501. Dostupné z: doi:10.1243/1350650981542173
- [46] CHEN, H., T. BAN, M. ISHIDA a S. NAKAHARA. Influential factors on adhesion between wheel and rail under wet conditions. *Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute)* [online]. 2012, roč. 53, č. 4, s. 223–230. ISSN 00339008. Dostupné z: doi:10.2219/rtriqr.53.223
- [47] HERTZ, H. Über die Berührung fester elastischer Körper. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*. 1881, roč. 171, č. 92, s. 156–171.
- [48] 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
- [49] 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.
- [50] 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
- [51] 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
- [52] CHEN, H., M. ISHIDA, A. NAMURA, K. S. BAEK, T. NAKAHARA, B. LEBAN a M. PAU. Estimation of wheel/rail adhesion coefficient under wet condition with measured boundary friction coefficient and real contact area. *Wear* [online]. 2011, roč. 271, č. 1–2, s. 32–39. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2010.10.022
- [53] ZAAZAA, Khaled E a A L SCHWAB. Review of Joost Kalker’s Wheel-Rail Contact Theories and their Implementation in Multibody Codes. *Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2009* [online]. 2009, s. 1–12. Dostupné z: doi:10.1115/DETC2009-87655
- [54] KVARDA, D. *Vliv složení modifikátorů tření na trakci v kontaktu kola a kolejnice*. B.m.: Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Radovan Galas., nedatováno.
- [55] COTTER, J. *COTTER, J. Friction control compositions with enhanced retentivity*. US. United States Patent US 6,759,372 B2. 2004. 2004
- [56] CHIDDICK, K. *CHIDDICK, K. Solid lubricants and friction modifiers for heavy loads and rail application*. US. United States Patent 6,136,757. 2000. 2000
- [57] EADIE, D. T., X. LU a J. COTTER. *EADIE, D. T., X. Lu a J. Cotter. Modified friction control compositions*. US. United States Patent US 7,939,476 B2. 2011. 2011
- [58] NIJENBANNING, G, C H VENNER a H MOES. Film thickness in elasto-hydrodynamically contacts. *Wear* [online]. 1994, roč. 176, č. 2, s. 217–229. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043164894901503>
- [59] ESFAHANIAN, M. a B. J. HAMROCK. Fluid-film lubrication regimes revisited. *Tribology Transactions* [online]. 1991, roč. 34, č. 4, s. 628–632. ISSN 1547397X. Dostupné z: doi:10.1080/10402009108982081
- [60] HARTL, M., I. KŘUPKA, R. POLIŠČUK a M. LIŠKA. An automatic system for real-time evaluation of EHD film thickness and shape based on the colorimetric interferometry©. *Tribology Transactions* [online]. 1999, roč. 42, č. 2, s. 303–309. ISSN 10402004. Dostupné z: doi:10.1080/10402009908982221

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

| | | |
|------------------|---|----|
| obr. 1-1 | Ilustrace kontaktu s třecí vrstvou | 5 |
| obr. 2-1 | Trakční křivka [1]..... | 7 |
| obr. 3-1 | Kontaktní oblast (vlevo), Hertzův model (nahore) a ne-Hertzův model (dole) [32] | 9 |
| obr. 3-2 | Rozdělení kontaktní oblasti [33] a porovnání algoritmu FASTSIM a CONTACT [32]..... | 10 |
| obr. 3-3 | Porovnání měření a predikce [12, 34] – vlevo, model kontaktu - vpravo [35, 36] | 11 |
| obr. 3-4 | Ukázka nepřesností původního modelu a řešení modifikovaného modelu [36] | 12 |
| obr. 3-5 | Deformace v základních tělesech a třecí vrstvě vzniklé působením skluzu [36] | 12 |
| obr. 3-6 | Porovnání konstantního a proměnného součinitele tření s efektem na součinitel adheze [35] | 14 |
| obr. 3-7 | Ilustrace modelu třecí vrstvy [35] | 14 |
| obr. 3-8 | Ilustrace vzniku a šíření tepla v kontaktu kola a kolejnice [17]..... | 16 |
| obr. 3-9 | Rozložení teploty pro různé tepelné toky - vlevo, rozložení teploty po celém kontaktu - vpravo [17] | 16 |
| obr. 3-10 | Test třecích vrstev - vlevo a zjednodušený bilineární model - vpravo dole [18] | 17 |
| obr. 3-11 | Model kontaktu - vlevo, ukázka smýkání třecí vrstvy - vpravo [18] | 18 |
| obr. 3-12 | Ilustrace modelu třecí vrstvy – vlevo a výsledky matematického modelu – vpravo [9] | 19 |
| obr. 3-13 | Porovnání simulace a experimentu (vlevo 0,9 GPa a 0,5 m/s; vpravo 0,9 GPa a 1 m/s) [9] | 20 |
| obr. 3-14 | Zařízení HPT - vlevo, ilustrace kontaktu testovacích vzorků - vpravo [11]. | 21 |
| obr. 3-15 | Výsledky měření na HPT za různých maximálních kontaktních tlaků [11]. | 21 |
| obr. 3-16 | Porovnání predikce a modelu pro suchý kontakt - vlevo a pískovaný kontakt - vpravo [11] | 22 |
| obr. 3-17 | HPT test se suchými vzorky a částicemi opotřebení [39]..... | 23 |
| obr. 3-18 | HPT test s různým množstvím vody v kontaktu [39] | 23 |

| | | |
|------------------|---|----|
| obr. 3-19 | Popis třecí vrstvy - vlevo a vznik žlutých drah za nízkých skluzů - vpravo [40] | 25 |
| obr. 3-20 | Šedé pruhy z částic opotřebení - vlevo, trakční křivky jednotlivých vrstev - vpravo [40] | 25 |
| obr. 3-21 | Třecí vrstva na povrchu kolejí [40]..... | 26 |
| obr. 3-22 | Výsledky měření s třecími vrstvami [40]..... | 26 |
| obr. 3-23 | Smykové napětí třecí vrstvě z modifikátoru tření a hematitu [42] | 27 |
| obr. 3-24 | Smykové napětí třecí vrstvy s plastický mazivem - vlevo a součinitel adheze - vpravo [42] | 28 |
| obr. 3-25 | Porovnání různých vstupních drsností do modelu (vlevo), srovnání s experimentálními daty z vysokorychlostního dvoudiskového zařízení (vpravo) [43] | 29 |
| obr. 6-1 | Diskretizace kontaktní oblasti | 43 |
| obr. 6-2 | Diskretizace kontaktní oblasti | 44 |
| obr. 6-3 | Diskretizace kontaktní oblasti | 45 |
| obr. 6-4 | Proložená data z publikace [18]..... | 46 |
| obr. 6-5 | Trakční křivka pro materiály bez teplotní závislosti..... | 46 |
| obr. 6-6 | Trakční křivka oxidu železa s teplotním efektem..... | 47 |

SEZNAM TABULEK

| | | |
|-----------------|--|----|
| tab. 5-1 | Návrh experimentů pro první článek | 39 |
| tab. 5-2 | Návrh experimentů pro druhý článek | 40 |
| tab. 5-3 | Návrh experimentů pro třetí článek..... | 41 |
| tab. 6-1 | Parametry profilu pro dva stavy drsností. V závorkách jsou uvedeny směrodatné odchylky | 52 |

SEZNAM PUBLIKACÍ

SHI, L.B., C. WANG, H.H. DING, D. KVARDA, R. GALAS, M. OMASTA, W.J. WANG, Q.Y. LIU a M. HARTL. Laboratory investigation on the particle-size effects in railway sanding: Comparisons between standard sand and its micro fragments. *Tribology International* [online]. 2020, **146** [cit. 2020-09-02]. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106259. ISSN 0301679X.

REMEŠOVÁ, M., S. TKACHENKO, D. KVARDA, I. ROČŇÁKOVÁ, B. GOLLAS, M. MENELAOU, L. ČELKO a J. KAISER. Effects of anodizing conditions and the addition of Al₂O₃/PTFE particles on the microstructure and the mechanical properties of porous anodic coatings on the AA1050 aluminium alloy. *Applied Surface Science* [online]. 2020, **513** [cit. 2020-09-02]. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.145780. ISSN 01694332.

SHI, L.B., Q. LI, D. KVARDA, R. GALAS, M. OMASTA, W.J. WANG, J. GUO a Q.Y. LIU. Study on the wheel/rail adhesion restoration and damage evolution in the single application of alumina particles. *Wear* [online]. 2019, **426-427**, 1807-1819 [cit. 2020-09-02]. DOI: 10.1016/j.wear.2019.01.021. ISSN 00431648.

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, **117**, 87-97 [cit. 2020-09-02]. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.08.019. ISSN 0301679X.

KVARDA, D., R. GALAS, M. OMASTA a M. HARTL. An Investigation on Adhesion Behavior of Solid Particles in Water Contaminated Wheel-Rail Contact. In 2018 International Symposium on Rail Infrastructure Systems Engineering (i-RISE 2018). Proceedings. MDPI, 2018. p. 1145-1148. ISSN: 2504-3900.

