



26. MEDZINÁRODNÁ KONFERENCIA  
„SÚČASNÉ PROBLÉMY V KOL'AJOVÝCH  
VOZIDLÁCH - PRORAIL 2023“  
20. – 22. septembra 2023, Žilina, Slovensko

<https://doi.org/10.26552/spkv.Z.2023.1.32>

## MODELOVÁNÍ TŘECÍ VRSTVY V KONTAKTU KOLA A KOLEJNICE ZA PŘÍTOMNOSTI MAZIV

### *THIRD BODY LAYER MODELLING OF WHEEL-RAIL CONTACT IN PRESENCE OF LUBRICANTS*

Daniel KVARDA<sup>\*)</sup>, Milan OMASTA, Radovan GALAS, Martin HARTL

#### 1 ÚVOD

Tribologické procesy v kontaktu kola a kolejnice jsou důležité pro komfortní, spolehlivý a bezpečný provoz kolejových vozidel, jelikož veškeré trakční a brzdící síly jsou přenášeny tímto kontaktem. Již desetiletí je běžnou praxí zvyšování přenosu trakčních a brzdících sil pomocí pískování. Během posledních dekad se rozšířilo cílené řízení tření na temeni kolejnice za účelem snížit tření, opotřebení, hluku a energetických nároků. K tomu jsou využívány modifikátory tření, což jsou látky na bázi oleje, vody nebo ve formě tuhých tyčinek. Pokud uvažujeme hodnotu součinitele tření na suché kolejnici nad 0,6, tak modifikátory tření míří na hodnoty 0,3 – 0,4 [1]. Navíc je potřeba zmínit, že v mnoha publikacích je součinitel tření a součinitel adheze zaměnitelný. Nicméně, součinitel tření primárně definuje poměr třecí a normálové síly za plně skluzového kontaktu. Naopak součinitel adheze, popisuje poměr třecí a normálové síly při valivě-skluzovém kontaktu. Tato definice bude nadále používána pro popis dat získaných v tomto článku.

Testování těchto produktů je prováděno hlavně v laboratoři. Zde nastává problém, že různé testovací zařízení a odlišné parametry experimentu vedou na rozdílné výsledky. Na **obr. 1** jsou vidět výsledky z testování za podmínek suchých, vodou zaplavených, aplikací modifikátoru tření a aplikací maziva pro okolek. Je zde patrné, že i pro suchý kontakt se různá zařízení odlišují v rozmezí součinitele tření 0,4 – 0,8. To je způsobeno nejen odlišnou konfigurací měřících zařízení a parametrů experimentu, ale i samotnými povrchy testovacích těles a jejich stav. Odlišné materiály a jejich povrchové drsnosti vedou na odlišné chování. Za přítomnosti vody jsou měřené hodnoty součinitele tření v rozmezí 0,2 – 0,4 a pro maziva okolku a modifikátory tření 0,03 – 0,25. Redukce součinitele tření na přibližně polovinu hodnoty za sucha je pro modifikátory tření spojeno s výše zmíněnými

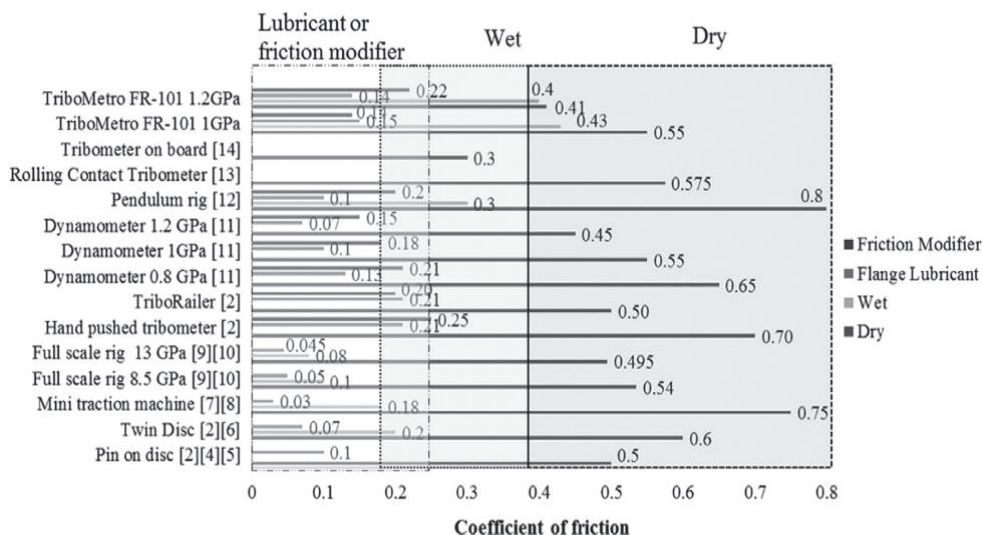
<sup>\*)</sup> **Ing. Daniel KVARDA**, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování, Technická 2896/2, 616 69 Brno. Tel.: +420 541 143 205, e-mail: Daniel.Kvarda@vut.cz.

**Ing. Milan OMASTA, Ph.D.**, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování, Technická 2896/2, 616 69 Brno. Tel.: +420 541 143 323, e-mail: omasta@fme.vutbr.cz.

**Ing. Radovan GALAS, Ph.D.**, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování, Technická 2896/2, 616 69 Brno. Tel.: +420 541 143 239, e-mail: Radovan.Galas@vut.cz.

**prof. Ing. Martin HARTL, Ph.D.**, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování, Technická 2896/2, 616 69 Brno. Tel.: +420 541 142 769, e-mail: Martin.Hartl@vut.cz.

benefity [1]. Druhotný efekt modifikátoru tření je potlačení negativní třecí charakteristiky, která se projevuje zvyšováním součinitele adheze při rostoucím skluzu.



**Obr. 1** Běžné hodnoty součinitele tření na různých zařízeních v publikované literatuře [2].

**Fig. 1** Typical values of coefficient of friction on different experimental devices published in literature [2].

Cílem této práce je popsat třecí chování modifikátorů tření pomocí jednoduchého experimentálního přístupu a aplikace výsledků do modelu kontaktu kola a kolejnice. Jednoduchým experimentálním přístupem je myšleno potlačit nežádoucí vlivy konstrukce experimentálního zařízení, velikosti kontaktní oblasti a tranzientních jevů na měření. Zejména pokud je cílem studovat vliv množství maziva v kontaktu, tak valivě skluzový kontakt se projevuje tranzientními jevy a postupným odstraňováním maziva a změnou vlastností třecí vrstvy. Motivace využití experimentálních dat do modelu kontaktu kola a kolejnice míří na studium různých kontaktních podmínek bez tranzientních jevů při experimentech s valivě skluzovým kontaktem. Využití matematického modelu navíc umožňuje pochopit chování modifikátorů tření v kontaktu na fundamentální úrovni kde experimentální přístup má své limity.

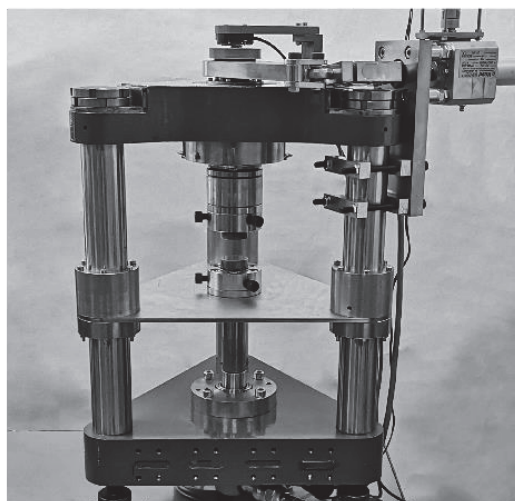
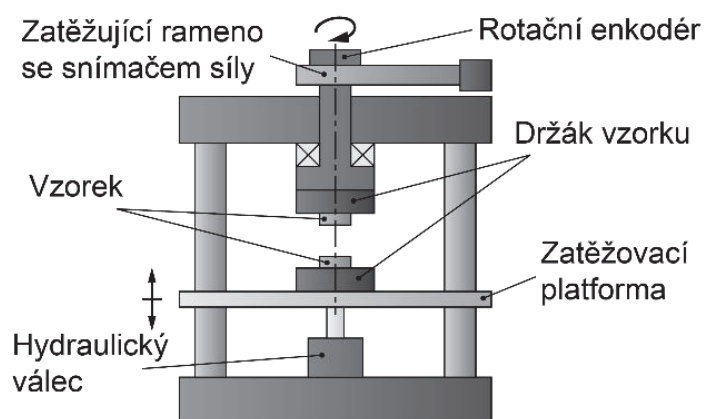
## 2 MATERIÁL A METODY

Dané cíle jsou dosaženy kombinací experimentálního a simulačního přístupu. Experimentální metoda využívá vysokotlaký torzní reometr. Tento přístroj umožňuje studovat odezvu kontaktní oblasti na postupný nárůst deformace mezi kontaktními povrchy. Tato deformace je přibližně rovnoměrná napříč celou kontaktní oblastí. Stejný procesy se vyskytují ve valivě-skluzovém kontaktu kola a kolejnice, kde ovšem deformace mezi kontaktními povrchy není rovnoměrná napříč kontaktní oblastí [3], jak popisují kontaktní teorie. Výsledkem měření na vysokotlakém torzním reometru je závislost mezi deformací a součinitelem tření.

Matematický model využívá algoritmu FASTSIM [3] s implementovaným modelem třecí vrstvy [4]. Pro účely této práce jsou vlivy kapalinového mazání a oddělení povrchů hydrodynamickým efektem zanedbány. Vstupem do modelu třecí vrstvy je odezva smykového napětí na deformaci mezi povrchy s mazivem v kontaktu. Tuto závislost lze přirovnat k tahové zkoušce, avšak pro rozhraní dvou povrchů.

## 2.1 Vysokotlaký torzní reometr

Vysokotlaký torzní reometr je vyfocen a schematicky zobrazen na **obr. 2**. Spodní vzorek má rovinný povrch a je uchycen v držáku k zatěžovací platformě, ktorá umožňuje horizontální pohyb a zachycuje kroutiac ı moment vyvozený na spodní vzorek. Zat e ov n ı je provedeno působením hydraulického válce na spodní držák se vzorkem. Maximální zatěžení je 100 kN. Horní vzorek má tvar mezikru ı s vnitrn m průměrem 6 mm a vn j m průměrem 12 mm což vede na kontaktní plochu 85 mm<sup>2</sup>. Vzorek je taktéž uchycen v držáku a pevne spojen s h ıdel ı, jejž vertikální pohyb je zachycen v axiálním ložisku. H ıdel je natáčena pomocí zat e uj c ıho ramena, jež je spojen s  nekov m zvedákem poh n en m elektromotorem. Natočení h ıdele je m eeno rotačním enkodérem, ktorý umožňuje m eet deformaci na efektivním pr m ere s p esnosn ı na 20 nm. Mezi zvedákem a ramenem je umístěn snímač sily, ktorý na dan e páce umožňuje m eet maximální moment 400 Nm s chybou opakovanostn ı 0,08 Nm.



**Obr. 2** Schéma a fotka vysokotlakého torzního reometru.

**Fig. 2** Illustration and picture of a high pressure torsion rheometer.

Sou inatel tření je vypo ıt m pomocí známe zat e uj c ı sily a m een m momentu. Tento moment působí v kontaktní ploše na efektivním polom ere 9,33 mm. Konkrétní rovnice

použité k výpočtu lze najít v publikaci [5]. Výsledná chyba součinitele tření, dána přesností měření krouticího momentu, je 0,0002.

## 2.2 Matematický model

Matematický model je detailně popsán v článku [4]. Zde bude popsán ve zjednodušené formě. Samotný výpočet vychází z algoritmu FASTSIM [3]. Tento algoritmus počítá smykové napětí na diskretizované kontaktní oblasti. Diskretizace kontaktu je provedena na 20x20 diskretních bodů s indexy  $i$  a  $j$  na podélné a příčné ose. Hlavní změnou oproti původnímu FASTSIM algoritmu je v tomto případě úprava Kalkerova součinitele flexibility a zavedení proměnného smykového napětí po dosažení trakčního maxima. Součinitel flexibility je upraven tak, že je k němu přičtena flexibilita způsobená kontaktním rozhraním. Tato kontaktní flexibilita rozhraní  $L_e$  v rovnici pro elastickou část deformace (1) může být způsobena plastizací, materiálovým zpevněním povrchu, oxidací nebo přítomností cizích látek jako například modifikátorů tření. Dojde tím k celkovému zvýšení flexibility, a tedy i poddajnosti kontaktu. Tato dodatečná flexibilita je zjištěna z experimentu na vysokotlakém torzním zařízení jako počáteční elastická odezva k smykovému namáhání. Proměnné smykové napětí v pseudo-plastické oblasti je implementováno pomocí Voceho materiálového modelu, jak ukazuje rovnice (2). V modelu je dále uvažována lineární závislost mezi tlakem a smykovým napětím, jedná se tedy o využití Amontonsova zákona o tření.

$$\tau_e = \tau - \frac{2a}{vm} \frac{c}{L_e} \quad (1)$$

$$\tau_{pp} = \tau_{c1} + (\tau_{c2} - \tau_{c1})(1 - e^{(-u + \tau_{c1}L_e)/L_p}) \quad (2)$$

$$\tau_{c1} = \mu_{c1}p; \tau_{c2} = \mu_{c2}p; L_e = L_{\mu e}/p \quad (3,4,5)$$

Parametry  $\mu_{c1}, \mu_{c2}, L_{\mu e}, L_p$  využitě v rovnicích (3,4,5) jsou určeny na základě experimentálního měření na vysokotlakém torzním reometru. Výsledky jsou simulovány pro kontakt tramvajového kola o poloměru 350 mm a profilu kolejnice S49. Výsledný kontakt má rozměry 7,4 mm na podélné a 6,6 mm na příčné ose. Normálové zatížení kontaktu je 20 kN, způsobující maximální Hertzův tlak 790 MPa.

## 2.3 Testované produkty

Testovány byly komerční produkty pro modifikaci tření temene kolejnice. Vybrány byly tři typy produktů – vodní, olejový a tuhý. Olejový produkt je na bázi esterového oleje s kovovými částicemi a tuhým mazivem s viskozitní NLGI třídou 0. Vodní produkt obsahuje zahušťovadlo a pevné minerální částice a tuhé mazivo. Tuhý modifikátor tření je na polymerní bázi s obsahem pevných částic a tuhého maziva.

## 2.3 Experimentální podmínky

Experimenty na vysokotlakém torzním zařízení byly provedeny za kontaktního tlaku 750 MPa. Rychlost otáčení vzorku na efektivním poloměru byla 1  $\mu\text{m/s}$ , až do dosažení hranice 400  $\mu\text{m}$ . Tento proces byl navíc proveden před samotnou aplikací maziva, aby bylo ověřeno že součinitel tření za sucha dosahuje hodnot 0,5 jak bylo zjištěno referenčním měření. Po každém měření byly vzorky očištěny acetonem, a byla změřena drsnost povrchu. Stabilní drsnost povrchu byla mezi  $R_q$  0,3 – 0,4  $\mu\text{m}$ . Pokud byla tato hodnota jakkoliv překročena, došlo k reprofiliaci povrchu a opětovnému zaběhnutí na stabilní hodnotu drsnosti pro hlavní experiment. Aplikace testovaného produktu probíhala mikropipetou. Objemy olejového a vodního modifikátoru tření byly získány z mikropipety. Hmotnosti aplikovaného tuhého modifikátoru byly zjištěny vážením nadrceného prášku na laboratorní váze.



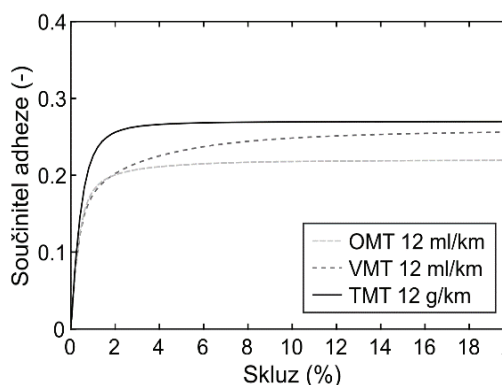
Na základě naměřených křivek na **obr. 3** byly zjištěny parametry modelu popsané v kapitole **2.2**. Bylo vybráno nejmenší testované množství 12 ml(g)/km, jelikož je to množství kde žádný z produktů nedosáhl spodní hranice součinitele tření, a tedy přemazání kontaktu. Tyto parametry jsou uvedeny v **TAB. 1**.

**TAB. 1** Parametry testovaných produktů pro numerický model.

**TABLE 1** Parameters of tested products for numerical model.

	OMT (12 ml/km)	VMT (12 ml/km)	TMT (12 g/km)
$\mu_{c1}$ (-)	0,175	0,19	0,18
$\mu_{c2}$ (-)	0,26	0,22	0,27
$L_{\mu e}$ ( $\mu\text{m}$ )	60	60	50
$L_p$ ( $\mu\text{m}$ )	110	70	15

Výsledky modelu jsou zobrazeny na **obr. 5**. Jedná se o trakční křivky pro tři produkty při množství 12 ml(g)/km. Je zde vidět přímá spojitost s výsledky z vysokotlakého torzního reometru na **obr. 3**. To je dáno lineárním nárůstem deformace ve všech diskretních bodech kontaktu se zvyšujícím se skluzem, jelikož přepočtení povrchových deformací v pseudo-plastické oblasti vychází z parametru v elastické oblasti deformací  $L_e$ . Takovéto zjednodušení může způsobit odchylky od reality. Avšak, za vysokých deformací je součinitel



**Obr. 5** Simulované trakční křivky pro aplikované produkty.

**Fig. 5** Simulated traction curves for applied products.

tření pro modifikátory tření stabilní, viz **obr. 3**, a vyšší skluz tedy zásadně neovlivní výsledky součinitele adheze v modelu. Jeden z důležitých vlivů, který je zásadní pro suchý kontakt, je teplota. Ta však nebyla pozorována jako zásadní v článku [5] na kterém je tento příspěvek založený. Porovnání predikovaných hodnot se shrnutými výsledky na **obr. 1** ukazuje dobrou shodu v součiniteli adheze. Jelikož na zmíněném obrázku shrnující výsledky z různých zařízení [2] není uvedeno aplikované množství, lze předpokládat, že výsledky nejsou pro přemazaný kontakt. Dále model neukazuje negativní sklon trakční křivky při vyšších skluzech. Tento jev je často spojován s oscilacemi způsobujícími opotřebení a nežádoucí dynamické projevy kontaktu.

#### 4 ZÁVĚR

Výsledky experimentálního měření modifikátorů tření na vysokotlakém torzním reometru ukázali exponenciální pokles saturovaného součinitele tření se zvyšujícím se aplikovaným množstvím. Po aplikování dávky, která přemazala kontakt, již nedocházelo k dalšímu poklesu součinitele tření. Vodní modifikátor tření vykazoval největší odolnost vůči přemazání, zatímco olejový produkt dosahoval velmi nízkých hodnot součinitele tření za vyšších aplikovaných množství. Z těchto experimentů byly identifikovány parametry pro numerický model. Predikované trakční pro nejmenší aplikované množství vykazovali dosažení saturace na podobné hodnotě skluzu. Tvar trakční křivky také nevykazuje

negativn  sklon, ktorý je brán jako nežadoucí pro kontakt kola a kolejnice. V současn e publikované literatuře se ukazuje, že tuhý modifikátor tření obecn e dosahuje vyšších hodnot adheze proti olejovému a vodn mu modifikátoru tření. Využitý model lze vyu it  současn e s jednoduch m m řen m na vysokotlak m torzním reometru pro predikci součinitele adheze pro široké množství kontaktních podmínek.

Výzkum byl podporován projektem *N rodn  centrum kompetence inženýrství pozemních vozidel Josefa Bo ka* (TN02000054).

### Literatura

[1] Stock R, Stanlake L, Hardwick C, Yu M, Eadie D, Lewis R. Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application. *Wear* 2016;366–367:225–32. [2] Areiza YA, Garc es SI, Santa JF, Vargas G, Toro A. Field measurement of coefficient of friction in rails using a hand-pushed tribometer. *Tribology International* 2014;82:274–9. [3] Kalker JJ. *Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact*. vol. 2. Dordrecht: Springer Netherlands; 1990. [4] Kvarda D, Galas R, Omasta M, Shi L b., Ding H, Wang W j., et al. Asperity-based model for prediction of traction in water-contaminated wheel-rail contact. *Tribology International* 2021;157:106900. [5] Kvarda D, Galas R, Omasta M, Hartl M, Krupka I, Dzimko M. Shear properties of top-of-rail products in numerical modelling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 2023;237:796–805. [6] Evans M, Skipper WA, Buckley-Johnstone LE, Meierhofer A, Six K, Lewis R. The development of a high pressure torsion test methodology for simulating wheel/rail contacts. *Tribology International* 2021;156:106842.



### Resum e

*Tato studie kombinuje experiment ln i a simulačn i p stupy pro predikci součinitele adheze v kontaktu kola a kolejnice v p itomnosti maziva. Testovan e maziva jsou modifikátory tření pro temeno kolejnice ve formě olejového, vodn ho a tuhého produktu. Experimentální testování bylo provedeno na vysokotlak m torzním reometru. Využitý model je založen na upraven m algoritmu FASTSIM. Predikované trakční křivky jsou srovnateln e s hodnotami z předchozích experimentálních studií. Důležitým závěrem je, že olejový produkt při velk m aplikovan m množství dosahuje n i ších hodnot součinitele adheze ne  vodn i a tuh y produkt.*

### Summary

*This study combines experimental and simulation approaches to predict the wheel-rail contact adhesion coefficient in the presence of lubricant. The lubricants tested are friction modifiers for top of the rail in the form of an oil, water and solid product. Experimental testing was performed on a high-pressure torsion rheometer. The model used is based on a modified FASTSIM algorithm. The predicted traction curves are comparable to values from previous experimental studies. An important conclusion is that the oil product, with a large applied amount, achieves lower values of the adhesion coefficient than the water and solid product.*

