

HODNOCENÍ UŽITNÝCH VLASTNOSTÍ MAZIV A MODIFIKÁTORŮ TŘENÍ PRO TEMENO KOLEJNICE

AN EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF TOP-OF-RAIL LUBRICANTS AND FRICTION MODIFIERS

Milan OMASTA¹, Radovan GALAS², Martin VALENA³, Martin HARTL⁴

Abstrakt

Poměrně novým trendem v oblasti řízení tření mezi kolem a kolejnicí je aplikace tzv. modifikátorů tření nebo maziv na temeno kolejnice s cílem optimalizovat hodnotu součinitele adheze. Cílem příspěvku je představit tuto problematiku a demonstrovat možnosti laboratorního hodnocení výkonových parametrů maziv a modifikátorů tření určených pro aplikaci na temeno kolejnice. Diskutovány jsou důležité implikace pro předpis jejich aplikace.

Klíčová slova

modifikace tření, mazání, temeno kolejnice, součinitel adheze

Abstract

A relatively new trend in the management of the friction between the wheel and rail is the application of so-called friction modifiers or lubricants on top of the rail in order to optimise coefficient of adhesion. The aim of this paper is to present this issue and to demonstrate the possibilities of laboratory evaluation of performance parameters of top-of-rail lubricants and friction modifiers. Important implications for the prescription of their application are discussed.

Keywords

friction modification, lubrication, top of the rail, coefficient of adhesion

1 ÚVOD

Oblast řízení tření mezi kolem a kolejnicí zahrnuje vedle mazání okolků také aplikaci maziv a tzv. modifikátorů tření na temeno kolejnice. Účelem je snížení opotřebení a omezení hlukových projevů v důsledku příčného skluzu kola v traťových obloucích, a to při zajištění dostatečných trakčních a brzdných účinků. Rozvoj v této oblasti je doménou posledních zhruba 20 let, během kterých byly reportovány pozitivní dopady zejména u těžké nákladní železniční dopravy v Severní Americe a Austrálii [1], [2]. Různé systémy byly testovány u vozidel metra [3], [4] a v tramvajové a

¹ Ing. Milan Omasta, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Technická 2896/2, 616 69 Brno. Tel.: +420 541 143 323, e-mail: omasta@fme.vutbr.cz

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

³ Ing. Martin Valena, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Technická 2896/2, 616 69 Brno. Tel.: +420 541 143 209, e-mail: Martin.Valena@vut.cz

⁴ prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Technická 2896/2, 616 69 Brno. Tel.: +420 541 142 769, e-mail: martin.hartl@vut.cz

osobní železniční dopravě [5]. V současnosti se tento přístup dostává do popředí zájmu provozovatelů infrastruktury a kolejové dopravy.

Maziva a modifikátory tření určené pro aplikaci na temeno kolejnice zahrnují velké množství různých tuhých i polotekutých materiálů na olejové nebo vodní bázi [6]. Jejich užité vlastnosti se značně liší, což má dopad na optimální způsob aplikace a předpis aplikovaného množství a intervalu re aplikace. Stávající normy ČSN EN se dotýkají pouze problematiky mazání okolků (ČSN EN 15427+A1 a ČSN EN 16028). Specifikace materiálů pro temeno kolejnice je předmětem velmi „čerstvé“ technické specifikace CEN/TS 15427 (03/2021), která dosud nebyla přenesena do evropské normy. Informacemi o vhodném způsobu hodnocení těchto materiálů a předpisu parametrů jejich aplikace často nedisponují ani výrobci a prodejci maziv.

Ke studiu vlivu těchto látek na součinitel adheze se nejčastěji využívají laboratorní zařízení s opakujícím se kontaktem. Jedná se zejména o dvoudisková zařízení v malém měřítku [7] případně tribometry typu ball-on-disc [8]. Výsledky takových experimentů lze hodnotit různým způsobem. Cílem tohoto příspěvku je představit možný přístup k hodnocení výkonových parametrů maziv a modifikátorů tření určených pro aplikaci na temeno kolejnice.

2 MAZIVA A MODIFIKÁTORY TŘENÍ A JEJICH APLIKACE

S materiály pro řízení tření se lze setkat v tuhém i tekutém provedení. Tuhé materiály jsou tradičně v podobě tyčinek (*Solid Stick*), které jsou během provozu přitlačovány na jízdní plochu kola kolejového vozidla. Tyčinky zpravidla obsahují pojivo a částice pro modifikaci tření v podobě tuhých maziv. Tekutou obdobou těchto materiálů jsou modifikátory na vodní bázi. Jedná se o směs vody, tuhých maziv a částic pro zajištění dostatečné adheze. Voda zde plní funkci nosného média, které umožňuje nanášení na temeno kolejnice. V pevninské části Evropy jsou častěji využívány materiály na olejové bázi, které jsou obecně označovány jako maziva (pro temeno kolejnice). Tyto materiály často vycházejí z plastických maziv určených pro mazání okolků, přičemž jsou doplněny o různé kovové a minerální částice, jejichž cílem je zajistit dostatečnou míru adheze.

Tekuté a polotekuté materiály mohou být na temeno kolejnice nanášeny pomocí traťových mazníků nebo z vozidla. Mazníky bývají umístěny v blízkosti problematických úseků, např. traťových oblouků, a aplikace bývá většinou řízena podle počtu detekovaných průjezdů náprav. V případě palubní aplikace je materiál nanášen v daných úsecích a intervalech. U maziv na olejové bázi je materiál zpravidla „využit“ vozem, ze kterého aplikace probíhá, u vodních modifikátorů tření aplikace probíhá až za poslední nápravu hnacího vozu tak, aby nedošlo k omezení trakčních a brzdných účinků před tím, než dojde k odpaření nosného média. Ve všech případech jsou pro řízení aplikace tekutých a polotekutých materiálů důležité následující otázky:

1. Kde aplikovat?
2. Jaké množství aplikovat?
3. Po jaké době aplikaci zopakovat?

Místa aplikace jsou u traťových mazníků dána jejich umístěním, u palubní aplikace lze využít řízení podle aktuální polohy. Aplikace by měla předcházet problematickému úseku (traťový oblouk, smyčka, úsek s projevy vlnkovitého opotřebení). Důležitým parametrem je vzdálenost, na kterou je materiál od místa aplikace „roznesen“ projíždějícími soupravami, a po kterou dokáže pozitivně ovlivňovat chování kontaktu kolo–kolejnice. Zatímco některé studie odhadují vzdálenost v řádu desítek metrů, jiné uvádějí roznesení až v řádu jednotek kilometrů. Správné aplikované množství je velmi důležité s ohledem na bezpečnost provozu. Oproti mazání okolků může vést i relativně malé „přemazání“ k problémům s trakcí a brzděním. Při nedostatečné aplikaci zase nemusí být dosaženo očekávaných přínosů. Optimální doba re aplikace závisí na mnoha parametrech a obecně ji nelze jednoduše vztahovat k ujeté dráze, času nebo počtu průjezdů. Významnou roli hrají také povětrnostní podmínky. Odpovědi na výše zmíněné otázky jsou naznačeny v následujících kapitolách.

3 EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM CHOVÁNÍ MAZIV A MODIFIKÁTORŮ TŘENÍ

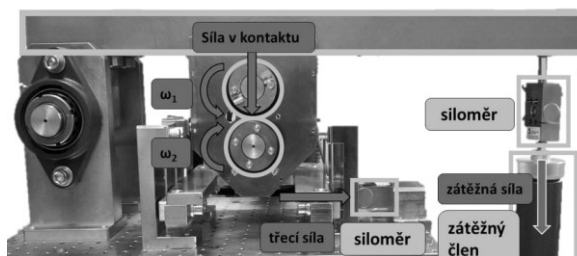
3.1 Laboratorní zařízení

Při implementaci systémů pro úpravu tření na temenu kolejnice hrají nezastupitelnou roli traťové testy, zejména pro konečné ověření vlivu aplikovaného množství na brzdnu dráhu apod. [9]. Nicméně v rámci experimentálního vývoje a výzkumu jsou s výhodou využívána laboratorní zařízení. Nejčastěji se jedná o dvoudiskové zařízení simulující kluzně-valivý kontakt. Schéma zařízení použitého v této práci je uvedeno na obr. 1. Zařízení sestává ze dvojice disků průměru 80 mm a šířky 8 mm nezávisle poháněných asynchronními elektromotory pro dosažení požadované valivé rychlosti a skluzu. Skluz je definován pomocí úhlové rychlosti ω a poloměru disků r dle rovnice 1:

$$Skluz = \frac{\omega_1 \cdot r_1 - \omega_2 \cdot r_2}{\omega_1 \cdot r_1 + \omega_2 \cdot r_2} \cdot 200 (\%) \quad (1)$$

Horní disk je uložen na kyvném rameni, přes které je na disk aplikováno svislé zatížení. Spodní disk je uložen na poddajném členu umožňujícím deformaci ve směru třecí síly. Normálová a třecí síla jsou měřeny pomocí siloměrů a dle rovnice 2 je stanoven součinitel adheze (CoA):

$$CoA = \frac{F_t}{F_n} (-) \quad (2)$$



Obr. 1 Schéma dvoudiskového zařízení

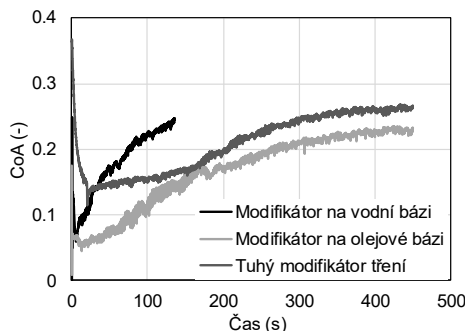
V této studii byly použity disky z materiálu C45 s povrchovou tvrdostí 245 HB resp. 300 HB. Experimenty spočívají v aplikaci malého množství maziva nebo modifikátoru tření do kontaktu a sledování vývoje součinitele adheze v čase za definovaných podmínek. Prezentovány jsou výsledky s různými komerčně dostupnými materiály, a zejména pak se třemi modifikátory tření na olejové bázi označenými jako FMA, FMB a FMC.

3.2 Experimentální výsledky

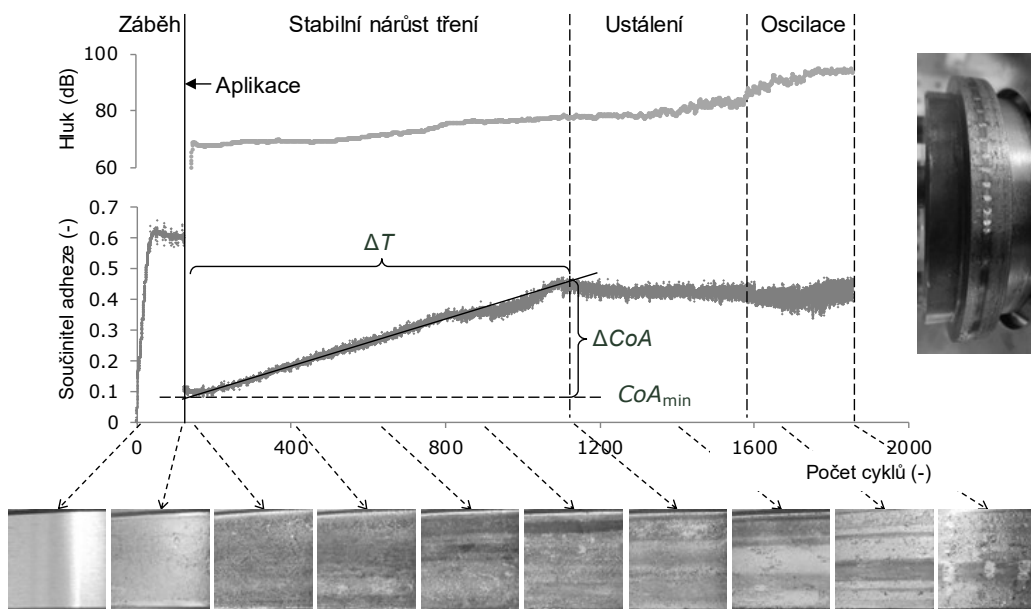
Srovnání časového průběhu po aplikaci různých typů modifikátorů je provedeno v grafu na obr. 1. Typický je pokles CoA bezprostředně po aplikaci následovaný nárůstem. Jednotlivé materiály se liší zejména v minimální hodnotě CoA, která je pro tekuté materiály výrazně nižší než pro materiály tuhé, a to díky hydrodynamickému účinku kapaliny ve smíšeném režimu mazání. Následující vývoj je dán vlastnostmi a „výdrží“ vytvořené třecí vrstvy. Obecně lze říci, že tuhé modifikátory a modifikátory na vodní bázi poskytují stabilnější chování v oblasti optimální hodnoty CoA, která je často uváděna jako 0,15 až 0,25.

Typický průběh časového testu pro modifikátor na olejové bázi je spolu s fotografiemi povrchu disku v jednotlivých okamžicích uveden na obr. 3. Kromě průběhu CoA je uveden také vývoj hlukového projevu. U hladkého disku dochází záběhem k jeho zdrsnění. Již krátce po aplikaci modifikátoru tření dochází k poklesu CoA a vytvoření homogenní třecí vrstvy na povrchu obou disků. Tato vrstva je působením skluzu „opotřebovávána“, což je provázáno postupným nárůstem CoA a hladiny hluku. CoA se ustálí na hodnotě nižší, než je hodnota pro „suchý“ kontakt, nicméně hladina

hluku dále roste a evidentní je postupný rozvoj poškození. Po určité době dojde k oscilaci třecí síly v důsledku tzv. stick-slip jevu a k nárůstu hluku. Patrné je i specifické opotřebení povrchu disků.



Obr. 2 Časový průběh CoA po aplikaci základních druhů modifikátorů tření (4 μ l pro tekuté materiály, přítlak 15 N pro tuhý materiál



Obr. 3 Časový průběh CoA a hladiny hluku po aplikaci se stavem povrchu disku (valivá rychlost 1 m/s; skluz 8 %; modifikátor na olejové bázi 5 μ l)

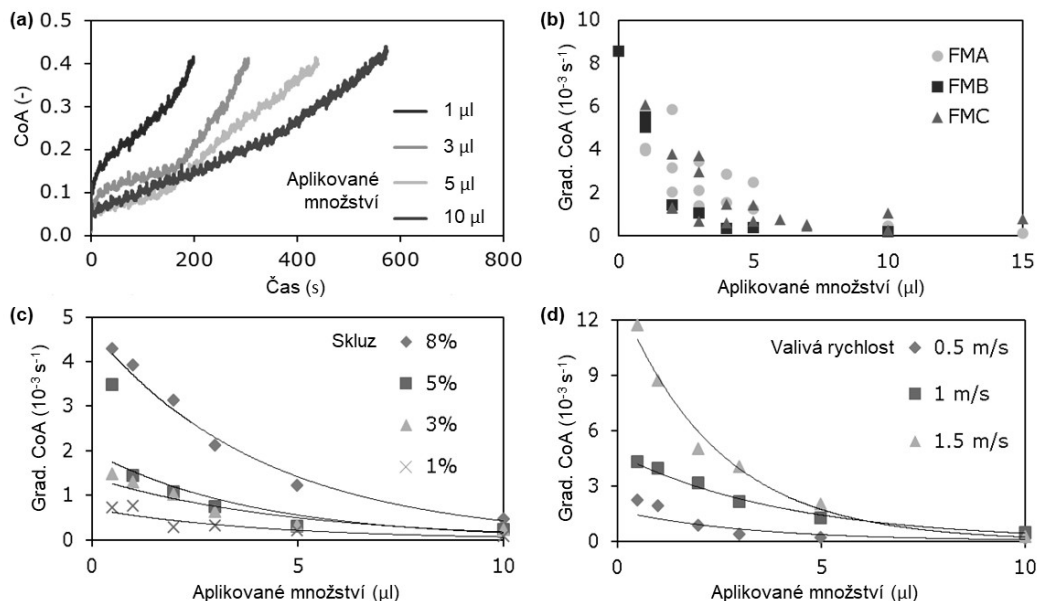
Pro kvalitativní předpis re aplikace je vhodné stanovit míru nárůstu CoA v podobě jeho gradientu, který lze stanovit jako poměr změny CoA za daný časový úsek dle vztahu:

$$\text{grad. CoA} = \frac{\Delta \text{CoA}}{\Delta T} \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (3)$$

Tento gradient je závislý na provozních podmínkách, a zejména pak aplikovaném množství, jak je vidět na obr. 4 (a). Aplikované množství má také vliv na nejnižší hodnotu CoA dosaženou bezprostředně po aplikaci.

Závislost gradientu CoA na aplikovaném množství pro různé provozní podmínky je znázorněna na grafech na obr. 4 (b)-(c). Pro tyto grafy byl gradient hodnocen mezi minimální hodnotou CoA a hodnotou 0,3. Tento gradient vyjadřuje, jak rychle je vytvořená třecí vrstva opotřebena smykovým napětím v kontaktu. Vliv skluzu a rychlosti není překvapivý. Různé modifikátory mohou poskytovat

různé vlastnosti třecí vrstvy, nicméně kvalitativně i kvantitativně je vliv aplikovaného množství podobný (viz obr. 4 (b)).

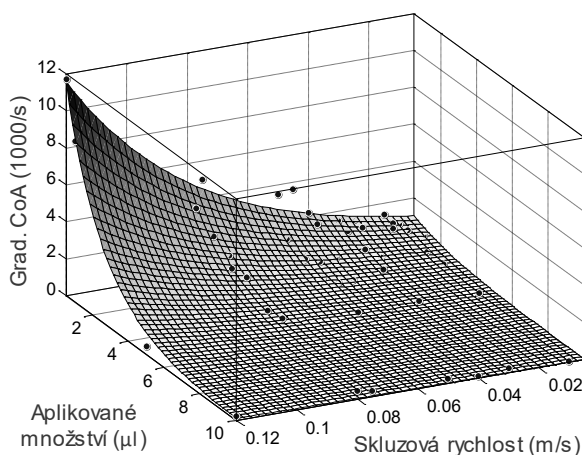


Obr. 4 Vliv aplikovaného množství na CoA a jeho gradient pro různé provozní podmínky

Účinek skluzu a valivé rychlosti lze přepočítat na vliv skluzové rychlosti, a tyto účinky tak sloučit. Toto lze provést spíše u nízkých rychlostí, kdy je vliv valivé rychlosti na CoA ještě zanedbatelný. Při vysoké rychlosti by bylo potřeba jej kompenzovat dle známých predikčních vztahů. Výsledkem sloučení vlivu skluzu a rychlosti je graf, který znázorňuje míru změny CoA jako funkci aplikovaného množství a skluzové rychlosti (obr. 5). Experimentální výsledky lze proložit exponenciální funkcí v následujícím tvaru:

$$\text{grad. CoA} = a \cdot \exp(b \cdot v_s - c \cdot q) \quad (4)$$

kde v_s je skluzová rychlost a q aplikované množství.

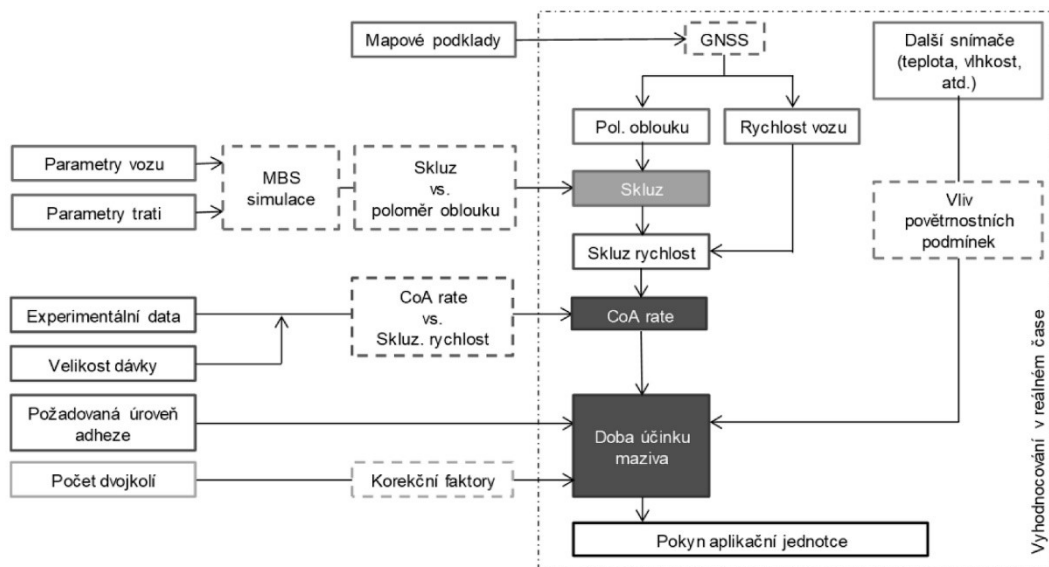


Obr. 5 Závislost změny CoA a aplikovaném množství a skluzové vzdálenosti ($a = 0,637 \cdot 10^{-3}$; $b = 0,259$; $c = 0,286$; $R = 0,977$)

4 DISKUZE

4.1 Řízení aplikace

Výše uvedené závislosti lze využít pro řízení aplikace maziv a modifikátorů tření. Příkladem může být palubní aplikace, jejíž schéma řízení je znázorněno na obr. 6. Základem je stanovení okamžité skluzové rychlosti v kontaktu, ze které je následně predikována zbytková doba účinku modifikátoru tření. Skluzová rychlost na temeni kolejnice závisí kromě podélného skazu a valivé rychlosti také na příčném skazu při průjezdu traťovým obloukem. Proto je zahrnut blok, který slouží k odhadu této rychlosti na základě parametrů trati v daném místě.



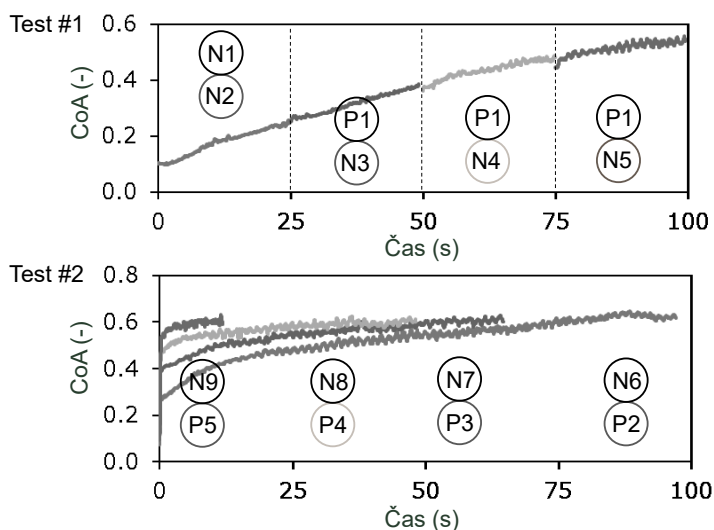
Obr. 6 Schéma palubního systému pro řízení aplikace maziva nebo modifikátoru tření

4.2 Přenositelnost výsledků

Predikce doby účinku modifikátoru tření je výsledkem experimentů na laboratorním zařízení s omezenou velikostí kontaktu a opakujícím se valivým kontaktem. Tyto skutečnosti je při implementaci na reálnou aplikaci zohlednit. Velikost kontaktu lze vztáhnout k velikosti aplikované dávky. Odhad přepočtu velikosti dávky lze provést pomocí teorie elastohydrodynamického mazání, která umožňuje stanovit odhad režimu mazání prostřednictvím tloušťky mazacího filmu jako funkce provozních podmínek. Relevantnější a prakticky častěji využívané je provedení brzdných zkoušek v reálných podmínkách pro stanovení aplikovaného množství podle toho, do jaké míry dochází k ovlivnění brzdné dráhy. Zpravidla však nelze očekávat výrazné přínosy (snížení opotřebení a hluku), aniž by došlo k určitému negativnímu ovlivnění brzdné dráhy. Zatímco při laboratorních experimentech se aplikovaná množství pohybují v řádu jednotek μl , pro reálnou aplikaci to jsou jednotky ml [9].

Otázka přenositelnosti predikovaného intervalu reaplikace se týká především redistribuce tribologické vrstvy mezi kolem a kolejnicí a následně mezi kolejnicí a dalším kolem. Na vrstvu modifikátoru tření lze v krajních případech pohlížet jako na kapalnou vrstvu, jejíž tloušťka je při průchodu kontaktem rovnoměrně rozdělena mezi dva povrchy, nebo jako na meznou třecí vrstvu, která se mezi povrchy nepřenáší. Pro účely posouzení redistribuce třecí vrstvy byly provedeny experimenty, při kterých byly postupně vyměňovány disky na dvoudiskovém stroji. První test na obr. 7 zobrazuje průběh CoA v případě, kdy byl použit stejný horní disk (nejprve označený jako N – nový, poté P – použitý) a po 25 s (cca 8 otáček disků) byl spodní disk nahrazen novým diskem. Z výsledku

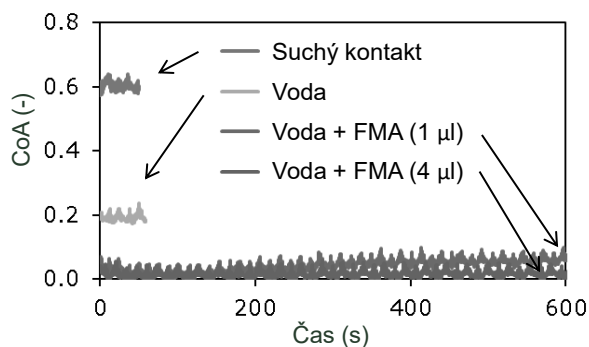
je zřejmé, že po výměně nedochází k významnému nárůstu CoA, a tento pokračuje téměř nepřerušovaně v nárůstu. V druhém testu byly spodní disky z prvního testu použity v páru s novými disky. Je patrné, že k určitému přenosu média na nový disk v prvním testu došlo, a tento přenos se snižoval s dobou provozu horního disku, jelikož rychlost nárůstu CoA je pro „pozdější“ disky rychlejší. Je rovněž zřejmé, že na hodnotě CoA, při které došlo k výměně disku „pokračuje“ i s vyměněným diskem v kontaktu s novým diskem. Závěrem lze tedy konstatovat, že „opotřeбенí“ třecí vrstvy vytvořené na povrchu není negativně ovlivněno vstupem do kontaktu s „čistým“ povrchem a přenesená třecí vrstva poskytuje CoA odpovídající okamžiku přenosu.



Obr. 7 Výsledky experimentu simulujícího redistribuci materiálu (N = nový disk; P = použitý disk)

4.3 Ostatní vlivy

V rámci implementace je třeba uvážit součinnost maziv a modifikátorů tření s dalšími vlivy, zejména povětrnostními a přirozenými kontaminanty vyskytujícími se na kolejnici. Jedním z nejběžnějších je voda. Ta je často „spouštěčem“ problémů s nízkou adhezí v případě další kontaminace (např. listím). Podobný účinek lze pozorovat i u modifikátorů tření, viz obr. 8. Při samotné aplikaci vody je dosaženo CoA 0,2. V kombinaci s modifikátorem tření na olejové bázi hodnota klesá až pod hodnotu 0,05. Voda velmi výrazně prodlužuje „výdrž“ takto nízké adheze, což může mít v praxi negativní dopad na délku brzdné dráhy.



Obr. 8 Vliv aplikace vody na chování kontaktu po aplikaci modifikátoru tření (valivá rychlost 1 m/s; skluz 8 %)

5 ZÁVĚR

Cílem příspěvku bylo představit možný přístup k hodnocení maziv a modifikátorů tření určených k aplikaci na temeno kolejnice. Tento přístup využívá dvoudiskové zařízení ke stanovení časového průběhu CoA po aplikaci. Z výsledků lze stanovit gradient nárůstu CoA, který vyjadřuje „výdrž“ těchto látek. Tato data lze dále využít jako vstupní pro algoritmy řízení aplikace (např. pomocí palubní jednotky). Závislosti získané v laboratorním prostředí je třeba interpretovat jako kvalitativní, umožňující např. porovnávat různá maziva a hodnotit vliv aplikovaného množství a dalších parametrů. Pro reálnou aplikaci je třeba tyto závislosti vztáhnout ke kvantitativním výsledkům traťových testů, případně s využitím modelu redistribuce těchto látek. U těchto látek je dále třeba zohlednit možné ovlivnění dalšími kontaminanty, zejména vodou, což může mít negativní dopad na úroveň adheze.

Výzkum byl spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci projektu TN01000026 v programu Národní centra kompetence.



Literatura

- [1] STOCK, R., OLDKNOW, K., MITCHELL, D., VANDERMAREL, J. *Top of rail friction control for heavy haul: status and opportunities*. Melbourne, Australia: AusRail Plus 2015 Conference, 24.–26. 11. 2015.
- [2] SPIRYAGIN, M., SAJJAD, M., NIELSEN, D., SUN, Y.Q., RAMAN, D., CHATTOPADHYAY, D. Research methodology for evaluation of top-of-rail friction management in Australian heavy haul networks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2014, **228**(6), 631–641. DOI: 10.1177/0954409714539943
- [3] EADIE, D., SANTORO, M., OLDKNOW, K., OKA, Y. Field studies of the effect of friction modifiers on short pitch corrugation generation in curves. *Wear*. 2008, **265**(9–10), 1212–1221. DOI: 10.1016/j.wear.2008.02.028
- [4] EGANA, J. I., VINOLAS, J., GIL-NEGRETE, N. Effect of liquid high positive friction (HPF) modifier on wheel-rail contact and rail corrugation. *Tribology International*. 2005, **38**(8), 769–774. DOI: 10.1016/j.triboint.2004.11.006
- [5] SUDA, Y., IWASA, T., KOMINE, H., TOMEOKA, M., NAKAZAWA, H., MATSUMOTO, K. et al. Development of onboard friction control. *Wear*. 2005, **258**(7–8), 1109–1114. DOI: 10.1016/j.wear.2004.03.059
- [6] 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**, 225–232. DOI: 10.1016/j.wear.2016.05.028
- [7] LEWIS, S. R., LEWIS, R., EVANS, G., BUCKLEY-JOHNSTONE, L. E. Assessment of railway curve lubricant performance using a twin-disc tester. *Wear*. 2014, **314**(1–2), 205–212. DOI: 10.1016/j.wear.2013.11.033
- [8] GALAS, R., OMASTA, M., KRUPKA, I., HARTL, M. Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface. *Wear*. 2016, **368–369**, 230–238. DOI: 10.1016/j.wear.2016.09.015
- [9] GALAS, R., OMASTA, M., KRUPKA, I., HARTL, M. Case study: The influence of oil-based friction modifier quantity on tram braking distance and noise. *Tribology in Industry*. 2017, **39**(2), 198–206. DOI: 10.24874/ti.2017.39.02.06