

ADHEZNÍ PODMÍNKY S VLIVEM TUHÉHO MAZIVA NA OKOLKY – TESTY NA KLADKOVÉM STAVU

ADHESION CONDITIONS UNDER THE INFLUENCE OF SOLID FLANGE LUBRICANTS – FULL-SCALE ROLLER RIG TESTS

Petr VOLTR¹, Adam BÍLEK², Michael LATA³

e-ISBN: 978-80-7560-564-1
DOI: 10.46585/spkv20252663

ISSN: 3029-8342



Abstrakt

Při vývoji a testování maziv pro kontakt kolo–kolejnice se často používají laboratorní zařízení s náhradními tělesy malého měřítka. Takováto zařízení jsou vhodná, ba nezbytná pro jakoukoli jednoduchou zkušební metodiku, avšak nemusí přesně reprezentovat všechny podmínky skutečného kontaktu kola a kolejnice; speciální zkušební zařízení většího měřítka se k nim mohou přiblížit lépe. Tento příspěvek předkládá zjištění ohledně vlivu tuhých maziv okolů na adhezní podmínky, jak je lze vyšetřit na kladkovém stavu v plném měřítku. K hodnocení jsou využity adhezní charakteristiky, které postihují adhezní podmínky ve větší úplnosti než jen časové průběhy součinitele tření při konstantním skluzu.

Klíčová slova

kontakt kolo–kolejnice, adheze, součinitel tření, mazivo na okolky, kladkový stav

Abstract

Small-scale laboratory equipment with balls or discs representing the wheels and rails is often used in the development and testing of lubricants for the wheel–rail interface. Such devices are suitable, even necessary, for any standard test methodology, but they may not accurately represent all the conditions of actual wheel–rail contact; special test equipment of a larger scale can get closer to reality. This paper presents findings on the influence of flange lubricants on adhesion conditions, as they can be investigated on a full-scale roller rig. Adhesion characteristics (traction curves) are used for the evaluation, describing the adhesion conditions in greater completeness than just the time histories of the coefficient of friction at constant slip.

Keywords

wheel–rail contact, adhesion, friction coefficient, solid flange lubricant, roller rig

¹ **doc. Ing. Petr Voltr, Ph.D.**,  0000-0001-7516-1069. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Výukové a výzkumné centrum v dopravě. Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika, tel.: +420 466 038 505, e-mail: petr.voltr@upce.cz

² **Ing. Adam Bílek.** České dráhy, a.s., Generální ředitelství, Odbor servisu kolejových vozidel, Oddělení servisu hnacích vozidel. Nábřeží Ludvíka Svobody 1222/12, 110 15 Praha 1, Česká republika, tel.: +420 720 847 745, e-mail: adam.bilek@cd.cz

³ **doc. Ing. Michael Lata, Ph.D.**,  0000-0002-3334-4710. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky. Dislokované pracoviště DFJP, Nádražní 547, 560 02 Česká Třebová, Česká republika, tel.: +420 466 037 429, e-mail: michael.lata@upce.cz

1 ÚVOD

V současné době se stále více pozornosti věnuje snižování opotřebení kol a emisí hluku při jízdě kolejových vozidel. Obojí je do značné míry určeno třecími podmínkami na rozhraní kola a kolejnice, takže ovlivněním těchto podmínek pomocí vhodných nástrojů *friction managementu* (řízení tření) lze dosáhnout příznivých výsledků.

Na jízdní ploše kola je nízký součinitel tření nežádoucí, jelikož to vede k omezení dostupné tažné nebo brzdící síly – v tomto ohledu je popsán zejména vliv vody v určitých kombinacích s oxidy železa [1, 2] či rostlinného materiálu [3]. Určité snížení adheze oproti dokonale čistému, suchému stavu nicméně není na škodu – k tomu se používají *top-of-rail produkty* (materiály pro aplikaci na temeno kolejnice) [4, 5], jejichž optimální funkce závisí na dávkování a na přítomnosti jiných látek v kontaktu.

Pro kontakt v oblasti okolku a pojižděné hrany kolejnice je situace jednodušší. Zásadu „mazat, mazat, mazat“ lze naplňovat užitím stacionárních kolejnicových mazníků (plastické mazivo) či mazacím zařízením na vozidlech. V případě instalace na vozidle se jedná o tlakové systémy pro stříkání kapalného maziva anebo aplikátory tuhých maziv; tato práce se zabývá konkrétně tuhými mazivy, o jejichž tribologických účincích pojednávají např. články [6, 7].

Pro testování tuhých maziv na okolky je v normě ČSN EN 15427-2-1 [8] definována metodika srovnávacích zkoušek na dvoukotočovém stroji zmenšeného měřítka – o zkušenostech s těmito testy jsme referovali v předcházejícím příspěvku [9]. Pro přiblížení k reálným podmínkám kontaktu kola a kolejnice byly aktivity rozšířeny o experimenty na kladkovém stavu v plném měřítku, přičemž zásadní část tohoto výzkumu byla provedena v rámci diplomové práce [10].

2 ÚPRAVA KLADKOVÉHO STAVU

Pro experimenty, jejichž výsledky jsou prezentovány a analyzovány dále, byl využit zkušební stav tramvajového kola. Jedná se o laboratorní zařízení, v němž je vozidlo zastoupeno jedním kolem s pohonem pomocí synchronního motoru, přičemž jízda po koleji se simuluje odvalováním proti kladce – „rotující kolejnici“. Stroj umožňuje plynulou regulaci motoru kola v režimu trakce i brzdy, a díky měření úhlových rychlostí a silových účinků lze zaznamenávat adhezní charakteristiky. Popis stroje netřeba znovu uvádět, lze jej nalézt, spolu s experimentálními výsledky, v předcházejících publikacích, např. [11, 12].

Pro realizaci experimentů s tuhými mazivy bylo zapotřebí uzpůsobit stroj pro aplikaci takových materiálů. Tuhé mazivo se v provozních podmínkách samozřejmě aplikuje na okolek, ovšem kontakt na okolku s sebou nese odchýlení svislé kolové síly od normálové síly v kontaktu, a taktéž nárůst vlivu spinu. Obojí by v podmínkách daného zkušebního zařízení znesnadňovalo měření a narušovalo podmínky prakticky čistého podélného skluzu, při kterém lze změřit adhezní charakteristiku s minimem nezachycených vlivů. Proto bylo rozhodnuto, že i tuhé mazivo na okolky bude zkoušeno v kontaktu na jízdní ploše.

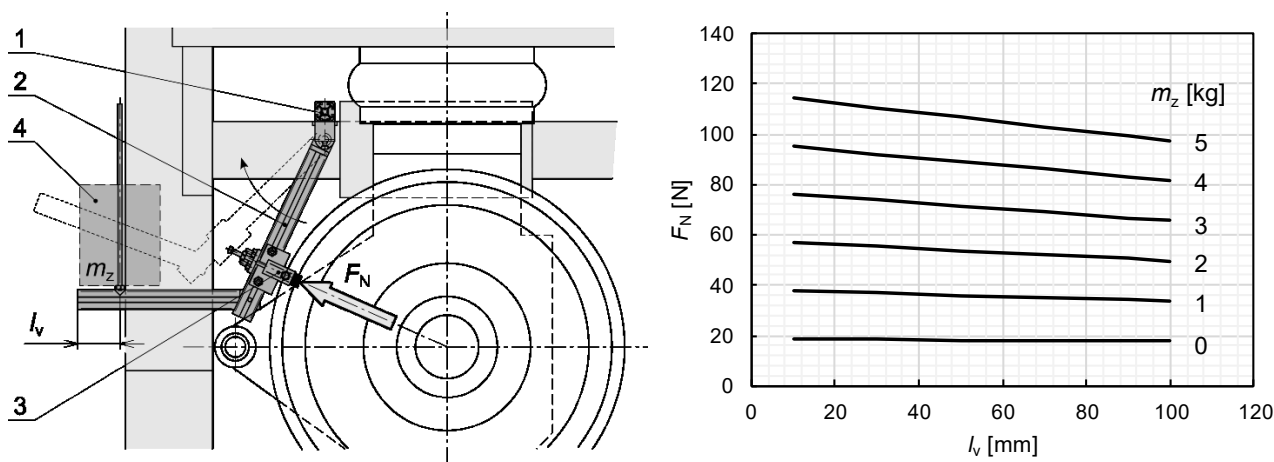
Konstrukce aplikátoru tuhého maziva vycházela z následujících požadavků:

- zařízení musí umožnit upnutí standardních mazacích tyčinek různých velikostí (i kdyby k tomu měly být zapotřebí vyměnitelné držáky);
- zařízení musí umožnit nastavování přítlaku mazací tyčinky ke kolu (např. závažím nebo pružinou);
- zařízení musí umožnit ruční přiložení nebo odejmutí vzorku i za chodu stroje.

Pro zástavbu zařízení bylo nakonec k dispozici jediné vhodné umístění, s nímž se konstrukce vypořádala podle obr. 1 vlevo. K pomocným podélníkům rámu byl pomocí svěrek upnut příčník 1, který na své spodní straně nese kloub. Na kloubu je otočně zavěšeno lomené rameno 2, jež je stejně jako příčník zhotoveno z hliníkových profilů, které byly na pracovišti k dispozici. K ramenu je šroubově připevněna ocelová kapsa 3, do které se vkládá vzorek tuhého maziva, přičemž pozice vzorku v kapse je vymezena stavěcími šrouby. Na konci ramene vyčnívá závitová tyč pro nasazení závaží požadované hmotnosti 4. Rameno lze vyklopit vzhůru a zajistit zavěšením háku na rám stroje (není zakresleno).

Geometrie aplikátoru je volena tak, aby třecí síla v kontaktu maziva s kolem měla jen zanedbatelný moment, který by ovlivňoval normálovou sílu v kontaktu maziva s kolem. Přítlak vzorku maziva se

nastavuje jednak hmotností závaží, jednak posunutím závitové tyče v drážce hliníkového profilu. Závislost síly v kontaktu maziva s kolem na těchto nastaveních je vykreslena na obr. 1 vpravo.



Obr. 1 Vlevo schéma aplikátoru tuhého maziva na zkušebním stavu tramvajového kola; vpravo závislost přítláčné síly vzorku maziva F_N na hmotnosti závaží m_z (která nezahrnuje hmotnost ramene s držákem závaží) a vzdálenosti od konce ramene l_v

3 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A JEJICH VÝSLEDKY

3.1 Podmínky experimentů

Byly provedeny experimentální zkoušky, které v převážné většině byly součástí diplomové práce [10] (odd. 3.2), a v návaznosti na to pak zkoušky doplňkové (odd. 3.3). K provedení základních experimentálních zkoušek účinku tuhého maziva na adhezní jevy mezi kolem a kolejnicí na kladkovém stavu bylo zapotřebí v první řadě určit parametry, které mohou mít na adhezní charakteristiky vliv – jedná se o následující veličiny:

- obvodová rychlost kola a kladky,
- stav povrchu kola a kladky,
- velikost přítláčné síly v kontaktu aplikátoru maziva a kola F_N ,
- velikost svislé síly v kontaktu kola a kladky (rotující kolejnice) Q .

Celkem bylo provedeno 38 měření se dvěma materiály tuhých maziv, nadále označovaných jako A a B. Během experimentů bylo přistoupeno k nastavení těchto parametrů. Otáčky kladky byly nastavovány tak, aby odpovídaly rychlosti jízdy 9, 15, 25, 35 a 45 km·h⁻¹.

Pokud jde o řízení stavu povrchů kol a kladky, dosahovaly se ručním čistěním a odmašťováním a lze je charakterizovat jako „suchý a čistý povrch“, „mírně zaseté mazivo“, „zaseté mazivo“ a „zaseté mazivo + čistění ploch broušením“. Očištěním ploch kola a kolejnice se odstraňují zbytky maziva a jiné nečistoty, avšak nelze docílit dokonale čisté plochy. Na mikronerovnostech povrchů zůstává malé množství nečistot, jakož i zbytků maziva z předchozích experimentů. Za „suchý a čistý stav“ se považuje takový, kdy součinitel tření vzrůstá nad 0,4 a chování vykazuje i další znaky suchého tření – vysoká počáteční strmost adhezní charakteristiky a znatelný pokles za vrcholem, akustické projevy.

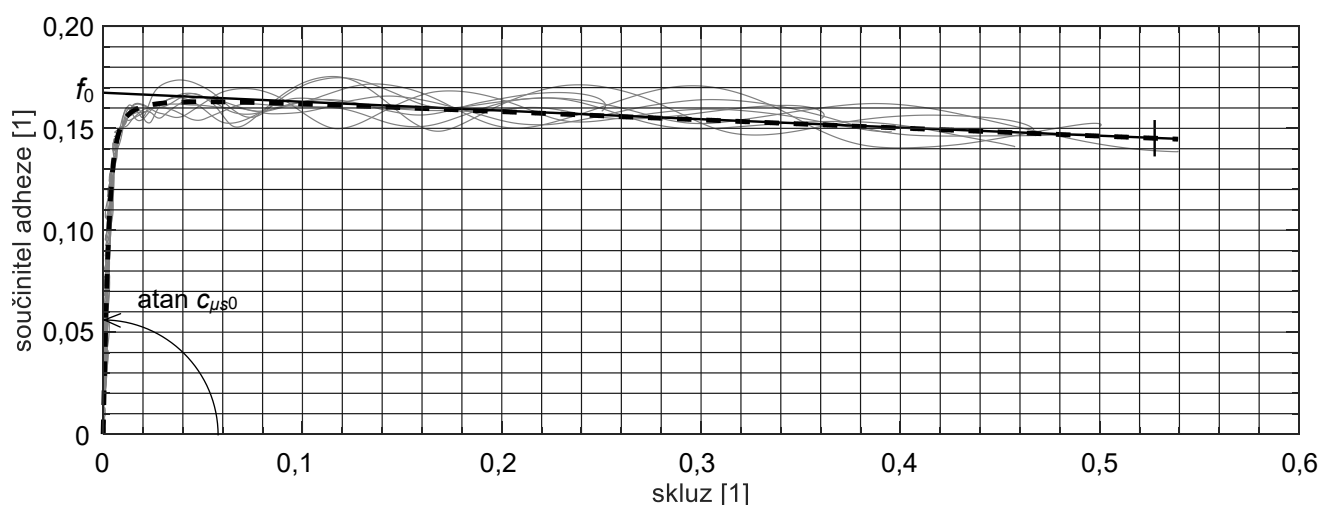
Velikost přítlaku maziva ke kolu se nastavovala přidáváním a ubíráním závaží, přičemž podstatná část měření byla provedena s přítláčnou silou $F_N \approx 110$ N. Při aktuální ploše vzorku maziva, která přichází do kontaktu s kolem, tomu odpovídá tlak cca 14 N/cm², tedy poněkud výše, než je charakteristické pro skutečnou aplikaci. Z počátečních experimentů se ukázalo, že je důležité dbát na zasetí vzorku maziva do kontaktu s jízdní plochou kola – pokud zóna kontaktu kola s kladkou není zároveň v kontaktu s mazivem, nelze vůbec hodnotit mazací účinek.

Svislá síla mezi kolem a rotující kolejnicí (která je zároveň použita jako normálová síla v kontaktu) byla v převážné části měření nastavena na svou minimální hodnotu $Q = 4,26$ kN, což odpovídá vlastní

hmotnosti kola a horního ramene experimentálního stavu. Při vyšší síle je omezena schopnost dosáhnout prokluzu, a tedy zaznamenat celou adhezní charakteristiku za lepších podmínek. Vzhledem k aktuálnímu opotřebenému tvaru kola a kladky nelze specifikovat parametry hertzovské kontaktní geometrie, ale na základě známých poloměrů křivosti v podélném směru a otisků dotykové oblasti na tlakocitlivou fólii lze odhadnout maximální kontaktní tlak cca 700 MPa.

3.2 Vyhodnocení adhezních charakteristik

Z veličin zaznamenávaných v průběhu experimentů byl vypočten zejména poměrný skluz s a součinitel adheze μ – tyto veličiny určují adhezní charakteristiku, která je hlavním výsledkem experimentu (viz obr. 2). K vyhodnocení dat byla využita aplikace ROLA, vytvořená zvláště pro tento účel. Použitá data byla za pomoci tohoto programu zpracována včetně vhodné filtrace a aproximace teoretickou adhezní křivkou s využitím Poláchova modelu s parametry $c_{\mu s0}$, λ , f_0 , c_{f0} , A (definice viz [11]). Pro porovnávání byl zvolen statický součinitel tření f_0 a počáteční strmost adhezní charakteristiky $c_{\mu s0}$.



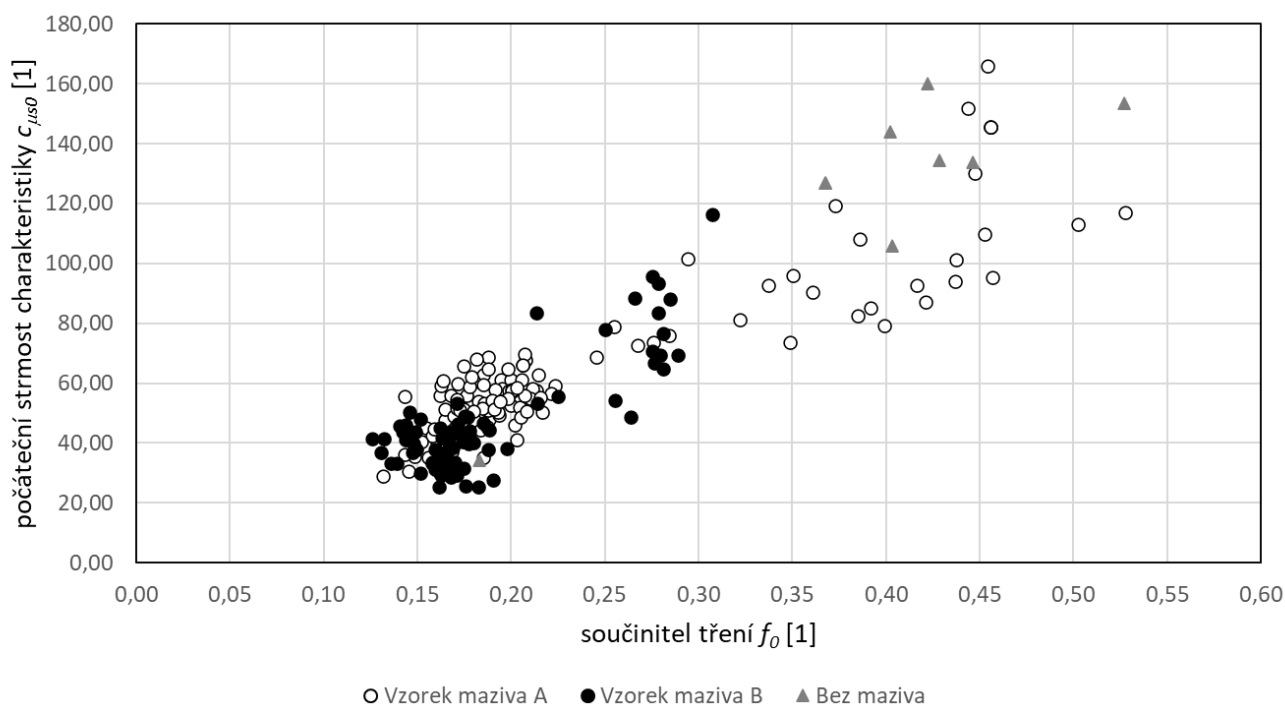
Obr. 2 Ukázka adhezních charakteristik v ustáleném stavu s aplikací tuhého maziva na okolky (rychlost $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$): šedé čáry jsou zaznamenané průběhy, silnou čárkovanou čarou je doplněna aproximace pomocí Poláchova modelu s $c_{\mu s0} = 43$, $\lambda = 0,8$, $f_0 = 0,168$, $c_{f0} = 0,010$.

Statický součinitel tření f_0 ukazuje nejvíce na změny třecích podmínek. Tedy vlastní přítomnost maziva bude nejspíše právě tímto parametrem charakterizovatelná nejlépe. Parametr f_0 lze charakterizovat jako míru únosnosti smyku (co lze kontaktem přenést, než dojde v kontaktu ke klouzání).

Počáteční strmost adhezní charakteristiky $c_{\mu s0}$ popisuje změnu součinitele adheze vztaženou na změnu skluzu. Z teorie je známa její vazba na tangenciální tuhost či poddajnost rozhraní kola a kolejnice; pakliže f_0 je mírou smykové pevnosti, $c_{\mu s0}$ vypovídá o modulu pružnosti. Zkušenosti ukazují, že tyto parametry spolu často korelují: je-li na rozhraní kola a kolejnice přítomna jiná látka, ovlivňuje jak součinitel tření, tak tangenciální tuhost. Na obr. 3 vidíme vyhodnocení aproximačních parametrů f_0 a $c_{\mu s0}$ z experimentů s tuhým mazivem; každý bod odpovídá jedné naměřené adhezní charakteristice.

Některé body odpovídají adhezním charakteristikám pro očištěné povrchy bez přiloženého maziva (šedé trojúhelníky); v případě ostatních bylo mazivo aplikováno, ale ještě nemusela být vytvořena účinná mazací vrstva. V úvodních testech to též zahrnovalo případy, kdy vzorek maziva nebyl ještě dostatečně zajetý proti kolu. Přibližně ustálené mazací podmínky odpovídají shluku bodů v levé dolní části grafu: dosahované hodnoty statického součinitele tření f_0 se pohybují v rozsahu 0,13–0,23.

Počáteční strmost adhezní charakteristiky z teorie závisí na normálové síle v kontaktu kola a kolejnice; v těchto experimentech byly použity i hodnoty odchylné od základní úrovně 4,26 kN, avšak v rámci celkového rozptylu se účinek neukázal jako významný. Proto body na obr. 3 zahrnují výsledky s různou normálovou silou bez rozlišení.



Obr. 3 Mapa parametrů f_0 a $c_{\mu s0}$ vyhodnocených z adhezních charakteristik

Korelace parametrů f_0 a $c_{\mu s0}$ se potvrdila i v experimentech s tuhým mazivem, podobně jako to bylo dříve zaznamenáno u plastického maziva: mezivrstva tuhého maziva se projevuje snížením součinitele tření i tangenciální tuhosti. Vztah obou parametrů je přibližně lineární.

3.3 Vyšetření přechodových dějů

V experimentech popsáných v předcházejícím oddílu sice byl zaznamenán postupný nástup účinku tuhého maziva, avšak ne systematicky, za neměnných podmínek, aby bylo možno jej srovnat například s časovým průběhem součinitele tření získaným na dvoukotoučovém stroji při stálé velikosti skluzu. Proto byly provedeny další zkoušky, jejichž cílem bylo důsledně zaznamenat změnu adhezních podmínek při započetí mazání a pak při odejmutí maziva.

Tyto zkoušky byly provedeny při rychlosti $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, přítlak kola ke kladce byl ponechán na základní úrovni $4,26 \text{ kN}$. Na počátku byly povrchy kola a kladky suché a čisté do té míry, že ani nedošlo k prokluzu. Po dvou zaznamenaných křivkách byl přiložen vzorek maziva A s přítláčnou silou $F_N \doteq 110 \text{ N}$, jiné zásahy nebyly prováděny. Periodicky byl zadáván požadavek na hnací moment motoru kola tak, aby mohly být zaznamenány adhezní charakteristiky; jak se na tělesech vytvářela účinná vrstva maziva, adhezní charakteristiky přirozeně ukazovaly pokles – to je zachyceno na obr. 4.

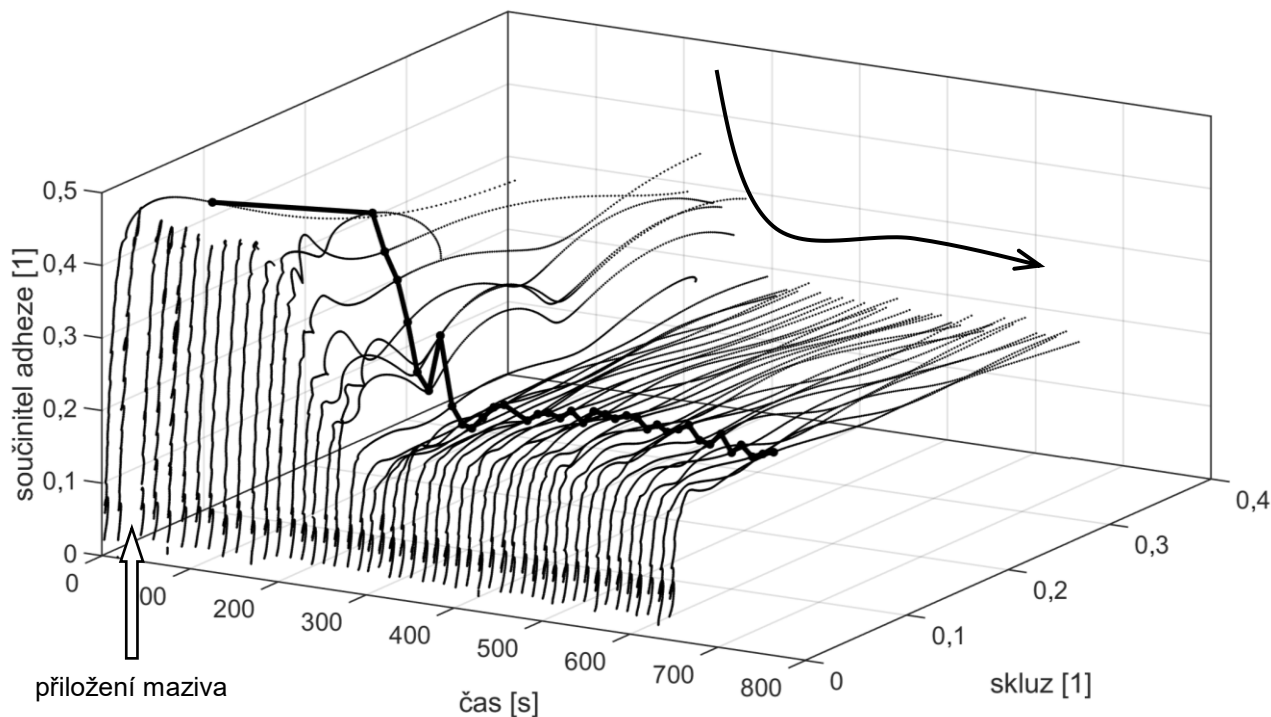
K poklesu součinitele tření však nedošlo okamžitě, nýbrž až po cca 150 s ; do té doby byly adhezní podmínky takové, že nebyl zaznamenán prokluz, subjektivně však byly vnímány změny hlukového projevu (kvílení). V této souvislosti lze odkázat na článek [13], kde byly v laboratoři měřeny adhezní podmínky a současně hluk – ukazuje se, že hlukové emise rovněž mohou vypovídat o adhezních podmínkách.

Dále byl pozorován poměrně rychlý pokles adhezních charakteristik, kde v přechodové fázi je patrné výraznější zvlnění křivek oproti teoretickým hladkým průběhům – toto může být projevem neustálených, nerovnoměrných adhezních podmínek na obvodu kola a kladky. V souladu s předchozími poznatky se snižovala jak úroveň tření, tak počáteční sklon. Vyhodnocovaný součinitel adheze při 10% skluzu měl minimální hodnotu cca $0,17$, potom v rámci několika minut rostl (max. hodnoty okolo $0,22$) a nakonec ještě mírně poklesl.

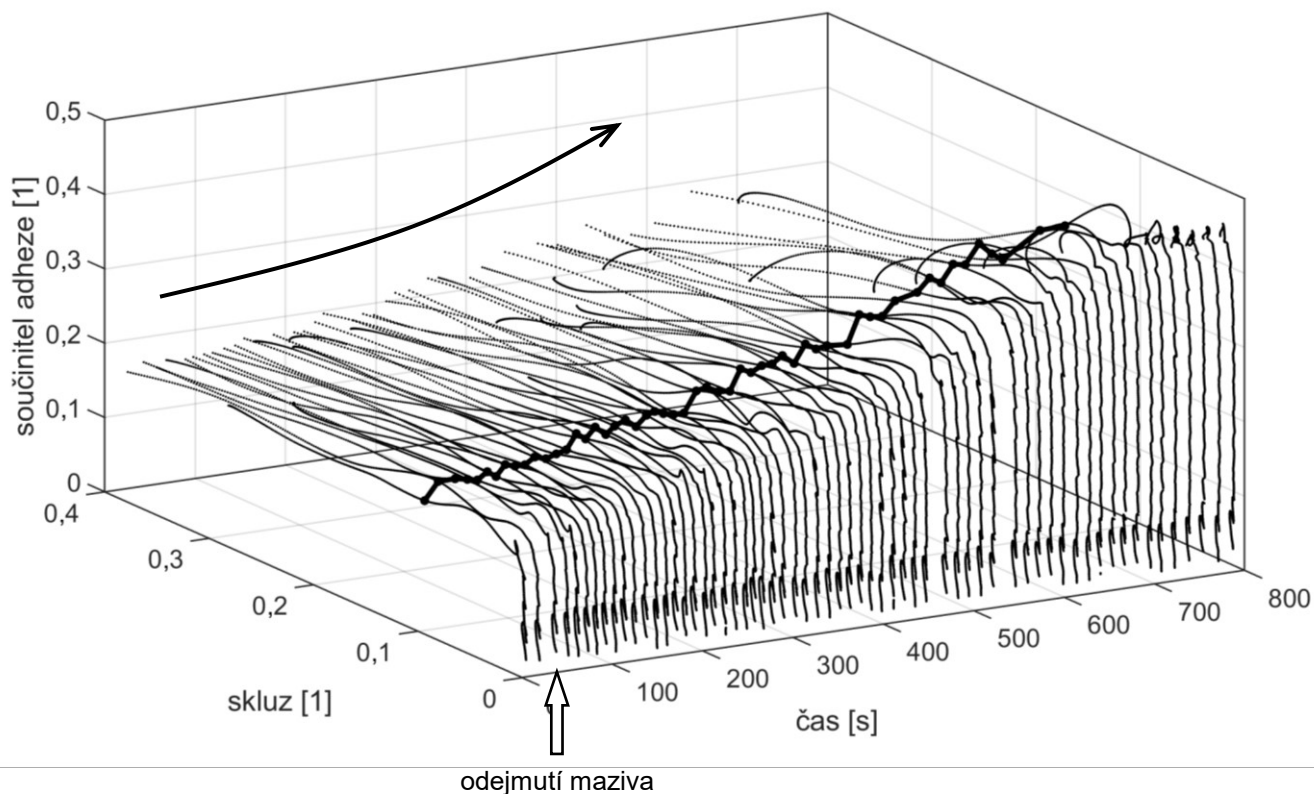
Obdobným způsobem byl vyhodnocen návrat adhezních podmínek k čistému stavu po odejmutí maziva. Obr. 5 ukazuje záznam z tohoto experimentu, který proběhl ihned po předchozím, jen s krátkým zastavením a kontrolou stroje. První dvě adhezní charakteristiky byly zaznamenány při přiloženém mazivu.

Potom byl držák odlehčen a nadzdvížen mimo kontakt. Vývoj adhezních podmínek byl sledován po dobu přibližně 13 minut.

Lze pozorovat, že po odejmutí maziva byl nárůst pozvolný, pomalý, avšak bez výrazné prodlevy v ustáleném stavu, během níž by sice mazivo z povrchů ubývalo, ale součinitel tření ještě zůstal. Po cca 10 minutách byl dosažen suchý stav bez prokluzování.



Obr. 4 Vývoj adhezních charakteristik po přiložení tuhého maziva – záznam z experimentu; silou čarou je doplněn vývoj součinitele adheze při 10% skluzu



Obr. 5 Vývoj adhezních charakteristik po odejmutí tuhého maziva – záznam z experimentu; silou čarou je doplněn vývoj součinitele adheze při 10% skluzu; pro přehlednost vyobrazení je osa skluzu otočena

Jednotlivé adhezní charakteristiky byly hodnoceny aproximací jako v odd. 3.2. Mezi parametry f_0 a $c_{\mu s0}$ se projevila přibližně lineární závislost jako na obr. 3, což vypovídá o současném vlivu maziva na míru pevnosti i poddajnosti mezivrstvy. Nebyly nalezeny doklady toho, že by se mazivo v jednotlivých fázích průběhu projevovalo různě v různých ukazatelích.

4 ZÁVĚR

Pro testování tuhých maziv pro okolky kolejových vozidel je k dispozici standardní metodika využívající dvoukotoučového stroje v malém měřítku [8]. Tento způsob testování je předmětem zájmu na pracovišti autorů již delší dobu (viz např. [9]); v aktuálním příspěvku je představeno rozšíření experimentální činnosti na kladkový stav v plném měřítku, který se lépe přibližuje skutečným podmínkám kontaktu kola a kolejnice.

Kladkový stav byl využit pro výzkum adheze v podmínkách kapalných či plastických maziv a různých jiných kontaminantů, viz např. [1, 11,12]. V rámci diplomové práce [10] bylo provedeno doplnění pro možnost testování tuhých maziv. Do volného prostoru nad kolem byl doplněn držák v podobě sklopného ramene, do kterého se upevňuje vzorek tuhého maziva – mazací tyčinka běžných rozměrů. Pro přitlačování vzorku maziva ke kolu slouží závaží. S tímto zařízením lze účinek maziva hodnotit nejen prostřednictvím součinitele tření při daném skluzu, nýbrž s využitím celé adhezní charakteristiky, tedy zaznamenané závislosti součinitele adheze na skluzu.

Experimenty dle očekávání ukazují, že aplikace tuhého maziva snižuje součinitel adheze a součinitel tření. Nebyly však zaznamenány tak nízké hodnoty, jako při některých zkouškách na dvoukotoučovém stroji (až 0,05) – součinitel tření byl ve většině případů poněkud vyšší než 0,15, což je podle normy (pro zkoušky na dvoukotoučovém stroji) požadovaná hodnota, vypovídající o dostatečné účinnosti maziva.

Se součinitelem tření klesá také počáteční strmost adhezní charakteristiky, což je jev pozorovaný i u jiných kontaminantů.

Vývoj adhezních podmínek po přiložení a po odejmutí maziva lze sledovat opakovaným měřením adhezních charakteristik, viz obr. 4 a obr. 5. Tímto způsobem je získána kompletní plocha, jakási „trojrozměrná adhezní charakteristika“, z níž výsledek z měření na dvoukotoučovém stroji se stálým skluzem je jen jedním řezem. Toto provedení experimentu se nakonec jeví jako optimální způsob testování na daném stroji: pokud by se místo toho měl testovat jen ustálený stav s mazivem, stejně je třeba provést zajetí do ustáleného stavu a potom zase čištění do výchozích podmínek, což zabere čas; takto se ten čas zužitkuje k získání poznatků o vývoji adhezních podmínek.

Pokud se z dat extrahují hodnoty součinitele adheze pro daný skluz, vzniká časový průběh, který lze porovnávat s průběhy získanými na dvoukotoučovém stroji. Záznamy, které jsou zde prezentovány, v některých ohledech odpovídají výsledkům z dvoukotoučového stroje, např. že pokles součinitele tření na začátku aplikace maziva je strmější než nárůst po jejím ukončení; že nejnižší hodnoty součinitele tření jsou zaznamenány krátce po úvodním poklesu. Jiné vlastnosti jsou naopak odlišné (prodleva před začátkem účinkování maziva po přiložení).

Představené poznatky reprezentují základ pro testování tuhých maziv na kladkovém stavu na pracovišti autorů. Obsahem další činnosti, pro získání kvantitativně významnějších výsledků, bude jednoznačně realizace experimentů ve větším počtu opakování a s různými variantami podmínek.

Výzkum byl financován Univerzitou Pardubice v rámci institucionální podpory na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace.



Literatura

- [1] BUCKLEY-JOHNSTONE, L. E. et al. *Full-scale testing of low adhesion effects with small amounts of water in the wheel/rail interface*. Online. Tribology International. Vol. 141 (2020), article 105907. ISSN 0301-679X. Dostupné z: 10.1016/j.triboint.2019.105907. [citováno 2025-05-19]

- [2] TRUMMER, G. et al. *Wheel-rail creep force model for predicting water induced low adhesion phenomena*. Online. Tribology International. Vol. 109 (2017), s. 409–415. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.12.056>. [citováno 2025-05-19]
- [3] LEWIS, R. et al. *Leaves on the line: Characterising leaf based low adhesion on railway rails*. Online. Tribology International. Vol. 185 (2023), article 108529. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108529>. [citováno 2025-05-19]
- [4] GALAS, R. et al. *Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface*. Online. Wear. Vol. 368–369 (2016), s. 230–238. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.09.015>. [citováno 2025-05-21]
- [5] STOCK, R. et al. *Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application*. Online. Wear. Vol. 366–367 (2016), s. 225–232. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.028>. [citováno 2025-05-21]
- [6] FASIHI, P. et al. *Effect of graphite and MoS₂ based solid lubricants for application at wheel-rail interface on the wear mechanism and surface morphology of hypereutectoid rails*. Online. Tribology International. Vol. 157 (2021), article 106886. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106886>. [citováno 2025-05-21]
- [7] REY, T., PAPIN, E., FRIDRICI, V., DASSENNOY, F. *Experimental study of the tribological performance of a solid lubricant stick with MoS₂ for wheel-rail contact*. Online. Wear. Vol. 570 (2025), article 205941. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205941>. [citováno 2025-05-21]
- [8] ČSN EN 15427-2-1:2022. *Železniční aplikace – Řízení tření mezi kolem a kolejnicí – Část 2-1: Vlastnosti a charakteristiky – Maziva okolku*.
- [9] VOLTR, P., LIBEROVÁ, S. Faktory ovlivňující hodnocení výkonnosti tuhých maziv pro kontakt kolo–kolejnice. In: *Současné problémy v kolejových vozidlech: XXV. konference s mezinárodní účastí, sborník příspěvků*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2021, s. 391–398. ISBN 978-80-7560-377-7.
- [10] BÍLEK, A. *Hodnocení tuhých maziv pro kontakt kolo–kolejnice s využitím kladkového stavu*. Diplomová práce. Pardubice: Univerzita Pardubice, DFJP, 2024. Dostupné z: <https://hdl.handle.net/10195/84128>. [citováno 2025-05-21]
- [11] VOLTR, P., LATA, M. *Transient wheel–rail adhesion characteristics under the cleaning effect of sliding*. Online. Vehicle System Dynamics. Vol. 53 (2015), no. 5, s. 605–618. ISSN 0042-3114. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.961488>. [citováno 2025-06-02]
- [12] VOLTR, P., ZIREK, A., KAYAALP, B. T. Nové zkušenosti a poznatky z experimentálního měření adheze na zkušebním stavu. In: *Současné problémy v kolejových vozidlech: XXIII. konference s mezinárodní účastí, sborník příspěvků*. Pardubice: DFJP Univerzity Pardubice, 2017, s. 423–432. ISBN 978-80-7560-085-1.
- [13] NAVRÁTIL, V. et al. *Wheel Squeal Mitigation Under Water Lubrication*. Online. Tribology in Industry. Vol. 46 (2024), no. 3, s. 418–431. ISSN 2217-7965. Dostupné z: <https://doi.org/10.24874/ti.1579.11.23.01>. [citováno 2025-06-02]

Zasláno / received: 14. 06. 2025, přijato / accepted: 15. 07. 2025, publikováno / published: 17. 09. 2025.

Příspěvek recenzovali / The paper was reviewed by: doc. Ing. Milan Omasta, Ph.D. (Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství), prof. Ing. Daniel Kalinčák, PhD. (Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta).