

VÝVOJ TRAŤOVÉHO TRIBOMETRU PRO HODNOCENÍ ADHEZE NA REÁLNÉ KOLEJNICI

DEVELOPMENT OF A TRIBOMETER FOR EVALUATING ADHESION ON A REAL RAIL

Martin VALENA¹, Milan OMASTA², Radovan GALAS³, Martin HARTL⁴

Abstrakt

Jedním z nejdůležitějších parametrů, který se na trati zjišťuje, je součinitel adheze. Součinitel adheze se na reálné trati standardně stanovuje pomocí měřicí lokomotivy nebo měřicím vozíkem. Tyto varianty jsou poměrně nákladné, proto se používají stacionární nebo tlačené traťové tribometry. Vyvíjený traťový tribometr se pevně instaluje na kolejnici nad měřený úsek. Hlavní částí zařízení je měřicí vozík, který je motorem tažen po lineárním vedení umístěným na rámu. Součinitel adheze je získán pomocí řízené změny trakční síly, která je realizována brzděním měřicího kola. Při měření se zaznamenává brzdný moment a dvojice rychlostí – dopředná a rotační. Na základě těchto údajů je možné vykreslit adhezní křivku v měřeném úseku. Tento příspěvek diskutuje různé měřicí módy tribometru a představuje metodiku měření adheze. Součástí příspěvku jsou také experimenty provedeny v laboratorním prostředí pro různé stavy kontaminace kontaktu.

Klíčová slova

tribometr, adheze, skluz, hlava kolejnice

Abstract

One of the most important parameters, which are measured on the rail, is the coefficient of adhesion (CoA). CoA on real rail is measured by measuring locomotive or measuring carriage. These methods are quite expensive, therefore rail tribometers which are fixed or pushed are used. Developed track tribometer is mounted on a rail above the measured section. The main part of the device is a measuring module, which is dragged by a stepper along a linear guide mounted on the frame. CoA is obtained by controlling the change in traction force, which is realized by breaking the measuring wheel. During the measurement, the braking torque, forward and rotational speed are recorded. Based on these data, it is possible to plot the adhesion curve in the measured section. The paper discusses the various measuring modes of the tribometer and presents the methodology of adhesion measurement. Moreover, a series of measurements in the presence of various contaminants was performed in a laboratory.

Keywords

tribometer, adhesion, slip, top-of-rail

¹ Ing. Martin Valena, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování, Technická 2896/2, 616 69 Brno. Tel.: +420 541 143 209, e-mail: Martin.Valena@vut.cz

² 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

³ 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

⁴ 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

1 ÚVOD

Stanovení součinitele adheze v kontaktu kola a kolejnice je důležité pro optimalizaci třecích podmínek v kontaktu. Aplikací látek ovlivňující součinitel adheze lze v dlouhodobém hledisku dosáhnout zvýšení života kolejnice, snížení hluku, příčných sil a také opotřebení. Tyto produkty mají i svá úskalí v podobě potenciálního snížení součinitele adheze pod kritickou úroveň, což způsobí problémy s trakcí a bržděním. Z toho důvodu je potřebné znát jejich chování po aplikaci na koleje.

Existuje několik způsobů, jak stanovit součinitel adheze na kolejnici. Jeden z nejreprezentativnějších je měření pomocí lokomotivy vybavené měřícím systémem pro měření trakčních sil [1]. Díky těmto lokomotivám je možné provádět měření s plně loženými soupravami. Takovéto experimenty nebývají časté, neboť jsou finančně nákladné. Jako alternativa byly vyvinuty strojově tlačené tribometry např. tribometr TriboRailer od společnosti Salient Systems, Inc.[2]. Jedná se o zařízení s hmotností 90 kg, které umožňuje měřit součinitel tření na obou kolejnicích, rychlost a pomocí GPS polohu při rychlosti pohybu až 45 km/h. K vytvoření skluzu se zde používá natáčení měřicího kola. Maximální skluz dosahuje hodnoty 2,5 %. Měřicí kolo je umístěno mezi dvojicí kol, po kterých se zařízení pohybuje, čímž dochází k ovlivnění třecí vrstvy. Strojově tlačené tribometry dokáží zaznamenat data z dlouhých úseků, ovšem manipulace s nimi je problematická. Z toho důvodu vznikly ruční tribometry, které měří kratší části trati a jsou znatelně lehčí. Jako zástupce lze uvést ručně tlačенý tribometr TriboMetroFR101 [3]. Zařízení pracuje na principu vyvození podélného skluzu pomocí brzdy, která postupně zvětšuje brzdný moment. Pružina přitlačuje měřicí kolo, čímž vyvozuje konstantní normálovou sílu v průběhu experimentu. Řízení obstarává počítač s měřicí kartou, jež zároveň ukládá hodnoty normálové a tečné síly, a také hodnoty skluzu. Zařízení umožňuje měřit součinitel adheze jak na temenu kolejnice, tak na pojížděné hraně. Existují i další konfigurace na měření součinitele adheze, potažmo součinitele tření, ty ovšem dosahují většího modelového zjednodušení oproti reálnému kontaktu. Jako příklad lze uvést kyvadlo [4], které pracuje na principu energetické ztráty podobně jako Charpyho kladivo. Kyvné rameno je opatřeno vyměnitelnou pryžovou podložkou, kterou přitlačuje pružina, čímž vznikne konstantní normálová síla v kontaktu. Energetické ztráty se odečtou na stupnici připevněné k rámu kyvadla. Výhodou zařízení je jeho kompaktnost a možnost provést měření na velmi krátkém úseku kolejnice. Nevýhoda spočívá v nutnosti kontrolovat stav podložky kalibrem. Pokud jsou naměřená data mimo povolený rozsah, tak musí dojít k výměně podložky.

Uvedená zařízení vyhodnocují součinitel adheze na úsecích o délce od několika metrů do několika kilometrů. Je tedy obtížné opakovat měření po stejné dráze kontaktu a od stejného místa. Na základě opakovaných průjezdů je možné stanovit jejich vliv na vývoj součinitele adheze. Vyvinutý tribometr umožňuje několikanásobné měření stejné stopy o relativně krátké délce, což umožňuje detailně studovat jevy v kontaktu a změny, které nastávají v důsledku „čištění“ při opakovaných průjezdech. Zařízení využívá řízenou změnu tečné síly v kontaktu, která je realizována bržděním měřicího kola. Tento princip je analogií k brždění železničních vozidel. V průběhu experimentu se měřicí kolo odvaluje s prokluzem po kolejnici a v kritickém případě dochází pouze ke smyku. Příspěvek popisuje vyvinutý traťový tribometr spolu s metodikou měření. Výsledky měření suchého a kontaminovaného kontaktu jsou následně porovnány s literaturou.

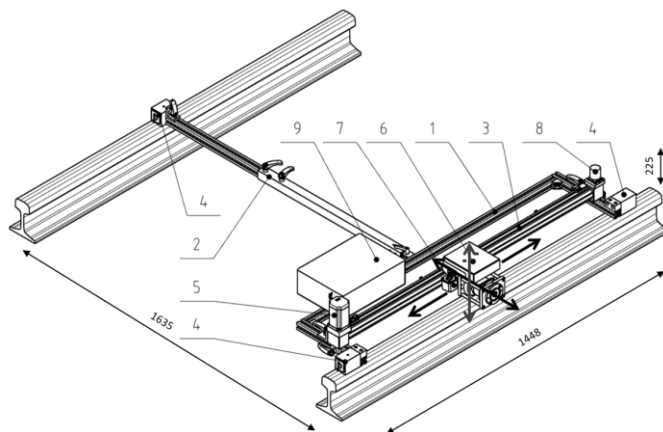
2 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

2.1 Konstrukce

Traťový tribometr na obr. 1 se skládá z rámu (1), teleskopického ramena (2), horizontálního lineárního vedení (3), magnetických základů (4), krokového motoru (5), měřicího modulu (6), klínového mechanismu (7), rotačního enkodéru (8) a elektroniky (9).

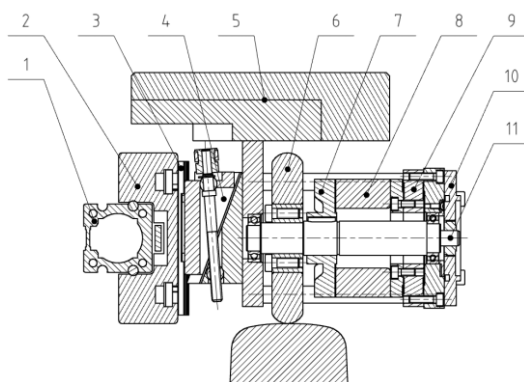
Rám traťového tribometru z hliníkových konstrukčních profilů se ke kolejnici připevňuje pomocí trojice magnetických základů, přičemž jedna je umístěna na teleskopickém rameni. Rameno působí

jako opora a zajišťuje stabilitu celého zařízení. Kloub spojující rám a teleskopické rameno umožňuje jeho sklopení a tím i lepší manipulaci. K rámu je přišroubováno horizontální lineární vedení s vozíkem, jehož pohyb obstarává krokový motor s nominálním kroutícím momentem 4,1 Nm. Na pravé straně lineárního vedení je umístěn rotační enkodér zaznamenávající polohu vozíku. K vozíku je připevněn klínový mechanismus spolu s měřicím modulem.



Obr. 1 Traťový tribometr

Měřicí modul (obr. 2) se skládá z měřicího kola (6), elektromagnetické třecí brzdy (7, 8), momentového snímače (9) a enkodéru (10). Měřicí kolo spolu s brzdovým diskem (7) jsou upevněny na hřídeli (11), která se otáčí ve dvojici ložisek. Přivedením elektrického napětí na tělo brzdy (8) dojde k vytvoření přitažné síly působící na brzdový disk (7), čímž vznikne brzdový moment. Reakce je přenášena na momentový snímač a následně měřena. Celý modul uzavírá dvojice přírub – velká a malá. Na horní straně velké příruby se nachází dvě závaží (9). Menší závaží dovažuje modul na váhu 7,6 kg a zároveň koriguje polohu těžiště tak, aby bylo přímo nad kontaktem. Druhé (přídavné) závaží zvyšuje hmotnost na 11,2 kg při zachování polohy těžiště. Poslední součástí modulu je magnetický rotační enkodér (10) zaznamenávající rotační polohu měřicího kola.



Obr. 2 Klínový mechanismus a měřicí modul

Průměr měřicího kola vychází z teoretického Hertzova tlaku pro eliptický kontakt a modelového zmenšení kontaktní oblasti v poměru 1:10. Měřicí kolo má průměr 100 mm a příčný rádius 10 mm. Je vyrobeno z ložiskové oceli ČSN 14 209. Použitím pouze malého závaží vzniká v kontaktu tlak 0,8 GPa. Přidáním přídavného závaží se docílí tlaku 0,9 GPa.

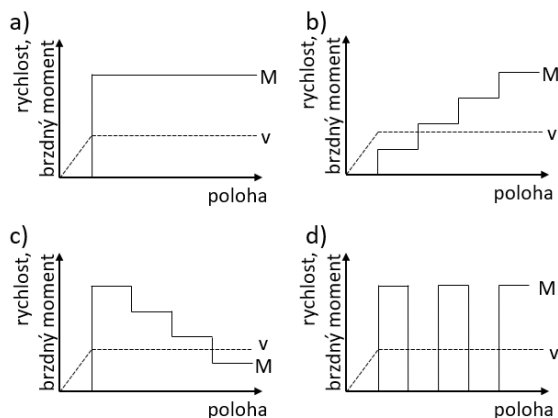
Klínový mechanismus (obr. 2, pozice 4) zajišťuje posun měřicího modulu od lineárního vedení (1) s vozíkem (2) v příčném směru za účelem automatické změny polohy měřené dráhy. Samotný

klínový mechanismus se skládá ze dvou klínů spojených přesným vedením. Pro udržení klínů v požadované poloze a její změně slouží šroub ovládaný krokovým motorem skrze ozubený řemen. Mechanismus umožňuje změnu hlavního rozměru o 8 mm při poměrně malé zástavbě 38 mm. Pokud by tento rozměr byl větší, docházelo by k nadměrnému zatěžování lineárního posuvu.

2.2 Postup měření

Po nastavení parametrů a měřicího režimu, lze přistoupit k samotnému měření. V průběhu experimentu je měřicí modul tažen konstantní rychlostí 265 mm/s. Po dosažení konstantní rychlosti začne brzda aplikovat počáteční brzdňý moment, jež vyvolá momentovou reakci na snímači a zároveň vznik skluzu. Podle nastaveného měřicího režimu se automaticky provádí další změny brzdňého momentu. Čas, lineární poloha, rotační poloha a moment jsou zaznamenávány ve vzorkovací frekvenci 96 Hz. Smyčka měřicí moment běží na vyšší frekvenci, ale ukládá se pouze průměrná hodnota spolu s ostatními hodnotami.

Jednotlivé režimy se odvíjí od nastavených parametrů – mód, elektrické napětí na začátku průjezdu, elektrické napětí na konci průjezdu a počet kroků. První režim (obr. 3, a) přejede měřený úsek s konstantním napětím na brzdě, a tedy i konstantním brzdňým momentem. Druhý režim (obr. 3, b, c) je „rampa“, který umožňuje postupné zvyšování nebo snižování elektrického napětí na brzdě v závislosti na zadáných hodnotách. Změna se provádí dle počtu kroků. Poslední režim (obr. 3, d) se nazývá „pulzní“ a umožňuje střídání dvou hodnot elektrického napětí na brzdě. Počet kroků udává, kolikrát dojde ke změně elektrického napětí na brzdě.



Obr. 3 Měřicí režimy (a) konstantní, (b),(c) rampa, (d) pulzní

2.3 Zpracování dat

Na záznam polohy měřicího modulu a rotační polohy se při vyhodnocení aplikuje Gaussův filtr. Numerickou derivací poloh podle času a následným přepočtem se stanoví rychlosti v mm/s. Skluz je dán poměrem rozdílu dopředné a rotační rychlosti ku dopředné rychlosti. Čistý prokluz tedy odpovídá 100 % skluzu. Poměr tečné a normálové síly definuje součinitel adheze. Normálová síla se neměří, a je tedy brána jako konstanta, která byla stanovena ze skutečné hmotnosti měřicího modulu. Tečná síla se počítá z brzdňého momentu.

Ze získaných dat lze vykreslit průběh součinitele adheze a skluzu v závislosti na poloze měřicího modulu (obr. 4), respektive vozíku. Na základě těchto grafů je možné stanovit, ve kterých místech došlo k prokluzu a jaký zde byl součinitel adheze. Toto vyhodnocení se provádí pro každý měřicí průjezd. Dále je možné sestavit adhezni křivku (obr. 5), která popisuje závislost součinitele adheze na skluzu v kontaktu. Do adhezni křivky se zahrnují pouze data získaná za konstantní rychlosti a může obsahovat i data z více měřicích průjezdů na stejném úseku. Z adhezni křivky se zpravidla stanovuje zejména nejvyšší součinitel adheze a bod saturace.

2.4 Podmínky experimentu

Všechna měření byla provedena v laboratorním prostředí. Celkem proběhly čtyři série testů za různých podmínek – suchý kontakt, kontakt kontaminovaný vodou, ricinovým olejem a TOR (top-of-rail) mazivem. Experimenty se prováděly na nové kolejnici, která nikdy nebyla v provozu. Před měřením byla kolejnice očištěna pomocí brusné houby a následně ořena ubrouskem s acetonem. Měřicí kolo bylo před každou sérií testů také očištěno acetonem. Měření bylo zastaveno po získání kompletní adhezní křivky. Všechna data byla získána pro kontaktní tlak 0,9 GPa. Délka měřeného úseku činila 800 mm, přičemž brzda začala aplikovat brzdny moment po ujetí 90 mm, kde došlo k ustálení dopředné rychlosti.

Pro zajištění suchých podmínek byly před testem kontaktní dvojice očištěny a současně bylo provedeno několik průjezdů se skluzem 100 %. Tímto postupem došlo k odstranění oxidů a jiných pevných částic, které na kolejnici zůstaly po čištění acetonem. Následovalo samotné měření, kde se využil měřicí režim „rampa“ (rostoucí i klesající) o sedmi krocích. V prvním měřicím průjezdu se nastavilo nízké počáteční a koncové elektrické napětí na brzdě a v dalších průjezdech se hodnoty zvyšovaly.

Druhá série experimentů byla měřena za přítomnosti vody. Před měřením došlo ke změně dráhy a aplikaci vody pomocí rozprašovače po celé délce kolejnice. Množství vedlo na podmínky podobné jemnému dešti. Tribometr byl nastaven na „konstantní“ režim a elektrické napětí na brzdě bylo v jednotlivých průjezdech zvětšováno. Ke konci experimentu byla snaha zpřesnit začátek adhezní křivky, proto došlo ke snížení elektrického napětí na brzdě.

Při třetí sérii měření se ricinový olej nanese pomocí ubrousku na hlavu kolejnice tak, aby byl rozetřený po celé měřicí dráze. V tomto případě se použil první měřicí režim – „konstantní“. První měřicí průjezd byl bez elektrického napětí na brzdě a v každém dalším se hodnota zvyšovala.

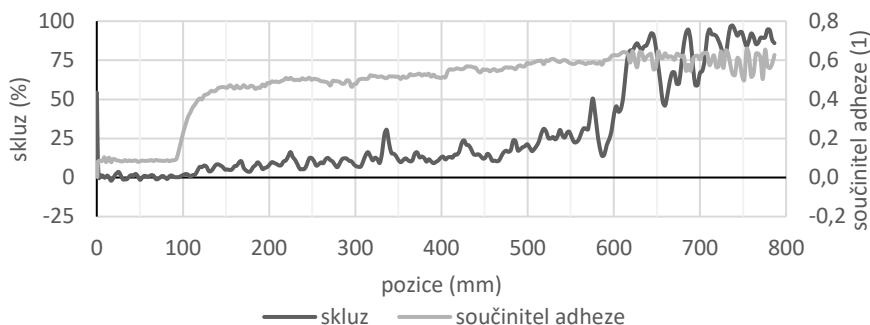
Čtvrtá série měření probíhala s TOR mazivem. Mazivo bylo rovnoměrně naneseno na temeno hlavy. Z prvních měřicích průjezdů bylo zřejmé, že kontakt je přemazaný, a proto se přistoupilo k snížení množství maziva. To se provedlo stíráním pomocí ubrousků, ovšem nepodařilo se odstranit všechno mazivo. Měřila se nově vzniklá třecí vrstva, která obsahovala zbytky maziva. I v této sérii měření se využíval „konstantní“ režim a elektrické napětí na brzdě se v jednotlivých průjezdech zvětšovalo. V druhé polovině měření byla snaha získat více dat v oblasti teoretického bodu saturace (skluz 0–10 %), proto se napětí na brzdě skokově snížilo a v dalších průjezdech se postupně zvyšovalo po menších krocích.

3 VÝSLEDKY A DISKUZE

Z každého měřicího průjezdu vznikne závislost součinitele adheze a skluzu na pozici měřicího modulu. Obr. 4 zobrazuje data pro „suchý“ kontakt, konkrétně se jedná o třetí průjezd. Ze záznamu lze vyčíst, že moment postupně narůstal a od pozice 600 mm začal mírně klesat. Skluz se do pozice 600 mm pomalu zvětšoval a poté se téměř skokově zvýšil na hodnoty blízké čistému skluzu. Záznam skluzu ukazuje, že po překročení hodnoty 90 % následně dochází k propadu. Vzhledem k filtrování dat, maxima nemohou dosáhnout 100 %, pokud se jedná pouze o chvilkový prokluz, neboť filtr používá pět po sobě jdoucích hodnot. Oblast vysokých skluzů ovšem není primárním cílem a je tedy možné tuto nepřesnost akceptovat.

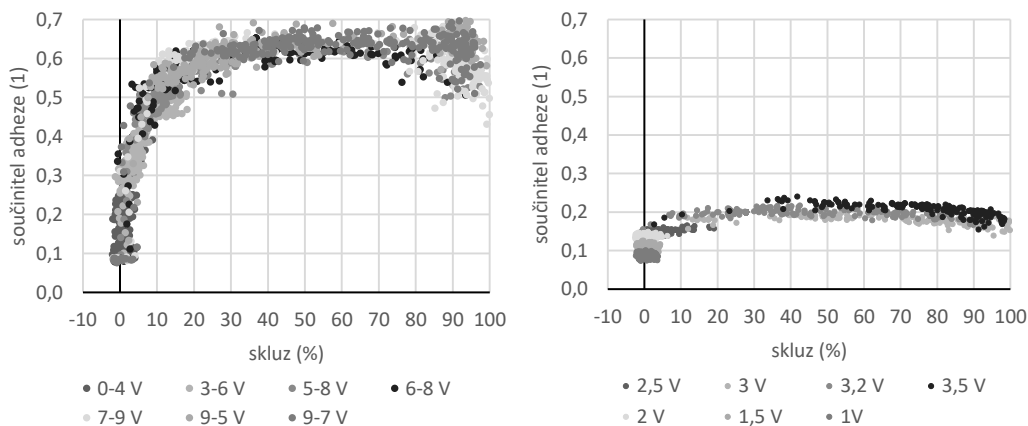
Pro sestavení adhezní křivky pro „suchý“ kontakt (obr. 5 vlevo) bylo zapotřebí provést sedm průjezdů. Označení v legendě odpovídá nastavenému elektrickému napětí na začátku a na konci průjezdu. Stanovený součinitel adheze má hodnotu 0,63. Z grafu je zřejmé, že křivka vykazuje rostoucí trend až do skluzu 40 %. K největšímu nárustu součinitele adheze dochází v počáteční fázi. V oblasti nad 80% skluzem má součinitel adheze větší rozptyl (stejně jako na obr. 4), což může být způsobeno dynamikou měřicího systému. Při porovnání dat s [3] lze konstatovat, že změřený součinitel adheze dosahuje poměrně vysokých hodnot a zároveň počáteční nárůst není tak strmý.

Vysoké hodnoty blížící se součiniteli tření pro čisté ocelové povrchy jsou dány tím, že před měřením proběhlo cca 50 průjezdů za vysokého skluzu, čímž se očistily kontaktní povrchy. Rozdíl může být dán také laboratorním prostředím, neboť publikovaná data jsou z reálné tratě. Další odlišnost je v metodice, kde autorka očistila měřicí kolo acetonem a metanolem, ale neprovedla úvodní průjezdy, takže výsledná hodnota součinitele adheze byla ovlivněna i vrstvami oxidů na povrchu kolejnice.



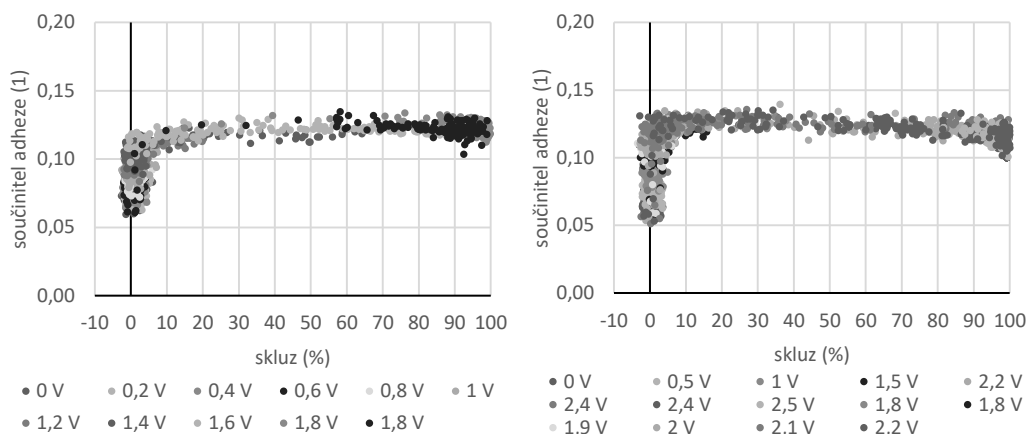
Obr. 4 Záznam skluzu a adheze pro suchý kontakt

Součinitel adheze pro vodou kontaminovaný kontakt (obr. 5 vpravo) dosahuje hodnoty 0,21, což je předpokládaná hodnota pro podmínky podobné dešti [5]. Adhezní křivka se skládá ze sedmi průjezdů. Lze vidět mírně klesající charakter po dosažení bodu saturace.



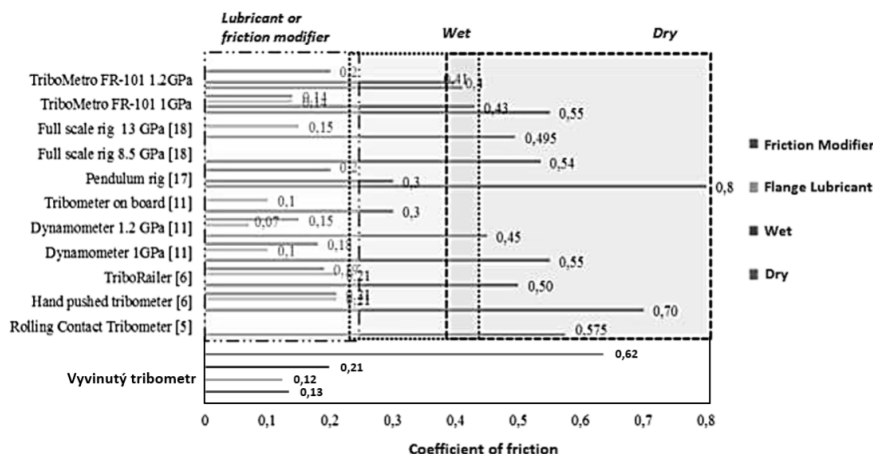
Obr. 5 Adhezní křivka pro suchý kontakt (vlevo) a vodu (vpravo)

Adhezní křivka pro ricinový olej (obr. 6 vlevo) se skládá z 11 průjezdů. Dosahuje se zde nízké adheze, přibližně 0,12. Adheze pro TOR mazivo má hodnotu 0,13 v oblasti bodu saturace (viz obr. 6 vpravo). Pro oba kontaminanty dochází k největšímu nárustu adheze v oblasti do 5 % skluzu. Tento poznatek přibližně koresponduje s daty uvedenými v [3, 6]. První křivka neustále roste a druhá po bodu saturace klesá. TOR maziva by měly vykazovat neutrální nebo pozitivní charakter adhezní křivky a měly by poskytovat střední úroveň součinitele adheze [7]. Ta spadá do rozsahu 0,3 až 0,4. S ohledem na tyto hodnoty lze tedy konstatovat, že testované TOR mazivo vede na spíše nižší hodnoty, které by mohly být nežádoucí z hlediska brzdění a rozjezdu vozidel. Pro další experimenty by bylo vhodné otestovat toto TOR mazivo pro nižší aplikované množství. Podobných výsledků dosáhla ve své studii Areiza [3], která testovala dva modifikátory tření.



Obr. 6 Adhezní křivka pro ricinový olej (vlevo) a TOR mazivo (vpravo)

Při vývoji zařízení byly vyhodnoceny nejistoty, které v průběhu měření mohou ovlivnit výsledky. První nejistota pramení z třecích ztrát v ložiscích, v nichž se otáčí hřídel s měřicím kolem. Vzhledem k tomu, že se měří reakční moment brzdy, tak tento moment bude vždy ponížen o ztráty v ložiscích. Z výpočtu dle SKF vychází ztrátový moment 1,2 Nmm. Pokud bude měřená hodnota součinitele adheze 0,1, tak chyba bude činit pouze 0,23 % a se vzrůstajícím součinitelem adheze bude klesat. Další nejistota pramení z nepřesně změřeného, nebo již opotřebovaného průměru měřicího kola. Při odchylce 0,1 mm od hodnoty zadané v programu bude nejistota činit 0,2 %. Větší nejistota pramení ze změny normálové síly v důsledku třecích ztrát ve svislých lineárních vedeních. Tření se zde objevuje při pohybu měřicího modulu reagujícího na nerovnosti na kolejnici. Odhad nejistoty činí přibližně 5 %. Poslední nejistotu způsobuje deformace, která ovlivní úhel náběhu měřicího kola. Nenulový úhel náběhu způsobí skluz v laterálním směru [2], čímž se poníží skluz v dopředném směru, jež se vyhodnocuje. V důsledku toho se bod saturace posune do nižších hodnot skluzu.



Obr. 7 Porovnání změřeného součinitele adheze s literaturou (upraveno) [5]

Každý z měřicích režimů lze použít v jiném případě. „Konstantní“ režim má výhodu v aplikování pouze jednoho brzdného momentu v průběhu celého průjezdu. Lze ho tedy použít v případě stanovování lokálních změn skluzu při stejném součiniteli adheze. Aby bylo možné sestavit kompletní adhezní křivku, je zapotřebí většího počtu průjezdů. Při těchto průjezdech může docházet ke změně součinitele adheze s rostoucím počtem průjezdů. Měřicí režim „rampa“ snižuje počet potřebných průjezdů pro stanovení adhezní křivky, neboť v rámci jednoho průjezdu se aplikuje několik brzdných

momentů v závislosti na nastavení. Tento režim má ovšem nevýhodu v tom, že bude docházet ke zvyšování brzdného momentu, i když nastane prokluz. „Pulzní“ režim střídá dvojicí brzdných momentů a lze jej použít tam, kde je zapotřebí opakovaně vytvořit skluz v rámci jednoho průjezdu a znovu ho nechat zaniknout. Pomocí tohoto režimu jde teoreticky sestavit adhezní křivka jedním průjezdem.

Na obr. 7 se nachází porovnání vyvinutého tribometru s dalšími zařízeními [7]. Lze si povšimnout, že hodnota pro „suchý“ kontakt je vyšší, což vychází z laboratorního prostředí a počtu průjezdů před samotným testem. Pokud by se měřilo na reálné trati, je možné očekávat nižší hodnotu. Voda vykazuje mírně nižší hodnoty oproti ostatním zařízením. Olej a TOR mazivo jsou v dobré shodě.

Při měření měl součinitel adheze tendenci růst s každým dalším průjezdem. Stejný trend zaznamenal Harrison [6], který i poukázal na potřebu řešit otázku, v jakém stavu se nachází měřicí kolo. Výsledky se mírně liší pro případ čistého kola a kola pokrytého třecí vrstvou.

4 ZÁVĚR

Příspěvek popisuje vyvinutý traťový tribometr, který umožňuje stanovit součinitel adheze na reálné kolejnici. Využívá řízenou změnu trakční síly realizovanou třecí brzdou. V průběhu měření se zaznamenává dopředná poloha, rotační poloha a brzdny moment. Na základě dat je možné sestavit průběh součinitele adheze a skluzu v závislosti na poloze měřicího modulu a taktěž adhezní křivku.

Měření byla realizována na kolejnici v laboratorním prostředí pro následující podmínky: suchý kontakt, voda, ricinový olej a TOR mazivo. Součinitel adheze pro suchý kontakt činí 0,63, pro vodu 0,21, pro ricinový olej 0,12 a pro TOR mazivo 0,13. U suchého kontaktu a ricinového oleje byl změřen pozitivní charakter trakční křivky.

Tento výzkum byl realizován v rámci projektu TN01000026 Národní centrum kompetence Josefa Božka pro pozemní dopravní prostředky, který je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu Národní centra kompetence.



Literatura

- [1] LUNDBERG, J., RANTATALO, M., WANHAINEN, Ch., CASSELGREN, J. Measurements of friction coefficients between rails lubricated with a friction modifier and the wheels of an IORE locomotive during real working conditions. *Wear*. 2015, **324–325**, 109–117. ISSN 0043-1648. DOI: 10.1016/j.wear.2014.12.002
- [2] HARRISON, H., MCCANNEY, T., COTTER, J. Recent developments in coefficient of friction measurements at the rail/wheel interface. *Wear*. 2002, **253**(1–2), 114–123. ISSN 0043-1648. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00090-X
- [3] AREIZA, Y. A., GARCÉS, S. I., SANTA, J. F., VARGAS, G., TORO, A. Field measurement of coefficient of friction in rails using a hand-pushed tribometer. *Tribology International*. 2015, **82**, Part B, 274–279. ISSN 0301-679X. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.08.009
- [4] LEWIS, S. R., LEWIS, R., OLOFSSON, U. An alternative method for the assessment of railhead traction. *Wear*. 2011, **271**(1–2), 62–70. ISSN 0043-1648. DOI: 10.1016/j.wear.2010.10.035
- [5] VAN STEENIS, N. H. *Monitoring train performance in case of low adhesion: acquiring knowledge for the development of low adhesion measures*. Enschede, 2010. Ph.D. Thesis. University of Twente. DOI: 10.3990/1.9789036530125
- [6] HARRISON, H. Producing and measuring the 3rd body layer. In: *2020 Joint Rail Conference*, conference proceedings. ASME/IEEE, 2020. ISBN: 978-0-7918-8358-7. DOI: 10.1115/JRC2020-8095
- [7] HARMON, M., LEWIS, R. Review of top of rail friction modifier tribology. *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*. 2016, **10**(3), 150–162. ISSN 1751-584X. DOI: 10.1080/17515831.2016.1216265