SOUČASNÉ PROBLÉMY V KOLEJOVÝCH VOZIDLECH

XXVII. konference s mezinárodní účastí
17.–19. září 2025, Česká Třebová

TESTOVÁNÍ TUHÝCH MAZIV PRO KONTAKT KOLO–KOLEJNICE NA DVOUKOTOUČOVÉM STROJI – VLIV PŘÍTLAKU MAZIVA

TWIN-DISC TESTING OF SOLID LUBRICANTS FOR WHEEL–RAIL INTERFACE – THE INFLUENCE OF LUBRICANT STICK LOADING

Petr VOLTR[1], Jan NETOLICKÝ[2], Stanislava LIBEROVÁ[3]

e-ISBN: 978-80-7560-564-1
DOI: 10.46585/spkv20252704
ISSN: 3029-8342
CC BY

Abstrakt

Jedním z nástrojů pro snížení tření a opotřebení na rozhraní okolku a pojížděné hrany kolejnice jsou tuhá maziva, aplikovaná na okolek zařízením instalovaným na vozidle. Pro testování takových maziv je k dispozici metodika využívající dvoukotoučový stroj. Na výsledky zkoušky mají vliv různé faktory, z nichž tento příspěvek se zabývá silou přítlaku vzorku maziva. Z provedených experimentů vyplývá identifikace tohoto vlivu; s využitím jiných publikovaných výsledků je doplněno i vysvětlení jevů, které se odehrávají na rozhraní zkušebních těles a které určují vývoj součinitele tření během zkoušky.

Klíčová slova

dvoukotoučový stroj, tuhá maziva, kontakt kolo–kolejnice, mazání okolků, tření

Abstract

Solid lubricants, applied to flanges of rail vehicles by bogie-mounted devices, comprise one of the tools for reducing friction and wear at the interface of the flange and the rail gauge face. For testing these lubricants, a standard methodology using a twin-disc machine is available. Test results are affected by various factors, of which this paper deals with the application force of the lubricant sample. The experiments result not only in the identification of this effect, but also – in the context of other published results – an explanation of the phenomena that take place at the interface of the test discs and that determine the development of the friction coefficient during the test.

Keywords

twin-disc machine, solid lubricants, wheel–rail contact, flange lubrication, friction

1 ÚVOD

Mazání okolků je nástrojem řízení tření v kontaktu kola a kolejnice, jímž se cíleně snižuje součinitel tření mezi okolkem a pojížděnou hranou kolejnice. Toto opatření nijak nenarušuje geometrickou vodicí funkci okolků, a snižuje tangenciální silové působení, které je v této oblasti spíše nežádoucí. Podmínky

[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. Jan Netolický**. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky. Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika.

[3] **Ing. Stanislava Liberová, Ph.D.**, 0000-0003-0848-0726. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky. Dislokované pracoviště DFJP, Nádražní 547, 560 02 Česká Třebová, Česká republika, tel.: +420 466 037 426, e-mail: stanislava.liberova@upce.cz

skluzu spojeného s působením tečných sil vedou k opotřebení okolků a boků hlav kolejnic, což vyžaduje údržbové zásahy, mají-li se důležité rozměry zachovat v předepsaných tolerancích.

Mazání lze zajistit dodávkou plastického maziva stacionárním mazníkem anebo aplikací kapalného či tuhého maziva zařízením instalovaným na vozidle. Předmětem tohoto příspěvku je laboratorní zkoušení vlastností tuhých maziv, kterým se na pracovišti věnujeme dlouhodobě – k tomu byl publikován předcházející příspěvek [1]. V něm se mimo jiné vysvětluje potřeba důkladněji analyzovat podmínky, které mohou ovlivnit výsledky testů. Nyní předkládáme studii jednoho takového parametru – síly, která přitlačuje tuhé mazivo k ocelovému povrchu. Zásadní část této studie byla předmětem diplomové práce na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice [2].

2 ZAŘÍZENÍ PRO LABORATORNÍ ZKOUŠKY

2.1 Reprodukce kontaktu kolo–kolejnice v laboratorních podmínkách

Kontakt kola a kolejnice je důležitým prvkem dynamického systému vozidla a koleje, který však ve skutečném provozu je obtížně přístupný pro měření a pro řízení podmínek. Přirozeně tedy byla vyvinuta řada možností, jak přenést kontakt kola a kolejnice do laboratoře, viz např. [3–5]. V článku [5] se pozornost věnuje způsobům náhrady kola a kolejnice, a zejména měřítku náhradních těles. Kromě toho však je třeba uvážit vůbec druh relativního pohybu těles na modelových zařízeních, který může být kluzný nebo valivý (se skluzem). Kontaktní geometrie může být nekonformní (s teoreticky bodovým stykem), anebo konformní v jednom či dvou směrech (čárový nebo plošný styk). Různé možnosti jsou vhodné pro různé účely.

Dvoukotoučový stroj je zařízení výrazně zmenšeného měřítka, s valivým kontaktem a s kontaktní geometrií závislou na příčném profilu kotoučů. Kotouče s příčným rádiusem umožňují vytvořit eliptickou dotykovou oblast s vysokým tlakem, avšak kontaktní geometrie se opotřebením výrazně mění. Proto se častěji používají kotouče válcového tvaru s čárovým stykem, který zůstává i při opotřebení beze změny.

2.2 Dvoukotoučové zkušební stroje

Klasickým typem dvoukotoučového zkušebního stroje, dříve rozšířeným v tribologických laboratořích, je stroj Amsler A-135. Zkušební tělesa mají podobu kotoučů o poloměru 30–70 mm. Obě jsou hnána přes převodové ústrojí jedním motorem. Výhodou tohoto uspořádání je přesné, mechanicky tvrdé nastavení skluzu bez nároků na regulaci pohonu; nevýhodou je, že skluz lze nastavovat jen změnou průměru kotoučů.

Stroj umožňuje nastavení otáček (jen ve dvou stupních), přítlaku kotoučů, periodického axiálního i radiálního pohybu. Součinitel tření lze přepočítat z momentu měřeného mechanickým zařízením (planetovým mechanismem s kyvadlem) a zaznamenávaného pisátkem na papír. Všechny indikace jsou pouze vizuální. Proto už ve starší práci [6] je popisována úprava, kde je kyvadlo zablokováno a reakce se přenáší na rám siloměrným členem. Článek [7] referuje o instalaci snímače momentu, navíc je použita siloměrná podložka pro měření přítlačné síly a motor je napájen z frekvenčního měniče pro možnost plynulého nastavování otáček. Na jiném pracovišti, viz [8], byl mechanismus s kyvadlem zcela vymontován a nahrazen snímačem momentu; podle fotodokumentace se zřejmě přítlačná síla nastavuje pomocí servomotoru.

V současné době je dodávána na trh řada nových zkušebních zařízení, na kterých lze provádět tribologická měření různého charakteru. V závislosti na charakteru zkoušených veličin jsou rozdílné i konstrukce jednotlivých zařízení. Současná dvoukotoučová zařízení mají oproti původnímu stroji Amsler následující charakteristiky:

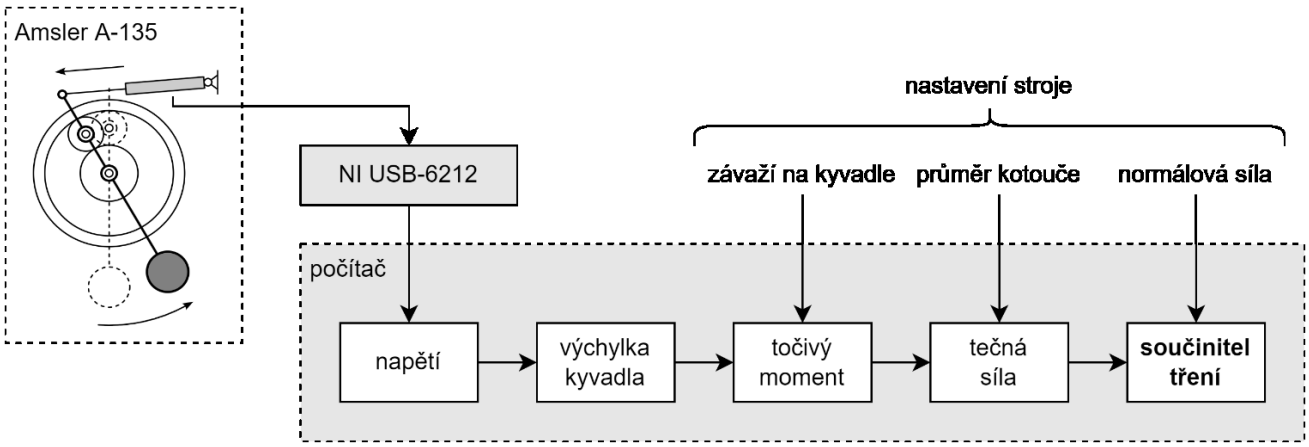
- Zařízení jsou poháněna servomotorem, umožňujícím nastavení široké škály rychlostí.
- Některá zkušební zařízení jsou konstruována s pohonem pro každý disk samostatně, čímž je umožněno řízení skluzu.
- Normálové zatížení je nastavované elektrickým nebo pneumatickým členem.

- Zařízení jsou osazena snímačem točivého momentu, případně snímači dalších veličin – například se jedná o piezoelektrický snímač vibrací, který detekuje povrchové poškození testovaných kotoučů.
- Zařízení jsou vybavena softwarem pro nastavení zkušebních podmínek a následný sběr dat, které se přenáší do PC.
- Vybrané modely jsou rozšířeny o teplotně řízenou testovací komoru.

2.3 Použité zkušební zařízení

Na pracovišti autorů je k dispozici stroj Amsler A-135, u něhož byla realizována méně náročná úprava oproti možnostem zmíněným výše. Tato úprava umožňuje elektronický záznam dat, aniž by zasahovala do konstrukce, takže dovoluje používat stroj i původním způsobem. Kyvadlo, jehož výchylka je úměrná momentu na hřídeli dolního kotouče, se ponechává pohyblivé; jeho výchylka se měří posuvným snímačem dráhy. Snímač je na stroj uchycen pomocí vhodně navržených plechových držáků, upevněných pomocí již existujících děr a šroubů.

V měřicím řetězci je použit potenciometrický snímač dráhy Novotechnik TX2-0200-716, připojený k měřicí ústředně NI USB-6212 jako dělič napětí. Do téže ústředny je zapojen i snímač teploty a vlhkosti vzduchu pro dokumentaci podmínek v laboratoři a je zde možnost doplnění ještě dalších vstupů. Schéma měřicího řetězce a způsobu přepočítávání veličin je na obr. 1.



Obr. 1 Schéma měření a přepočítávání pro digitální záznam součinitele tření na dvoukotoučovém stroji

Kalibrace byla provedena staticky, tj. při zablokovaném stroji bylo nastavováno zatížení momentem (rameno známé délky a závaží) a byl zaznamenáván napěťový signál. Závislost momentu na napětí byla proložena lineární funkcí s minimálními odchylkami. Bylo ověřeno, že měřené hodnoty jsou jen zanedbatelně ovlivněny odporem snímače proti výsuvu, jakož i třecí silou v kontaktu vzorku maziva s kotoučem.

K měřicímu řetězci byla vytvořena aplikace v prostředí MATLAB, která zaznamenává signály a umožňuje manuální zadání parametrů, které se neměří elektrickou cestou (rozsah měření momentu daný závažím na kyvadle, průměr kotouče a normálová síla v kontaktu kotoučů), aby bylo možno přepočítat vstup na součinitel tření.

3 TESTOVÁNÍ VLIVU PŘÍTLAKU MAZIVA

3.1 Zkušební podmínky

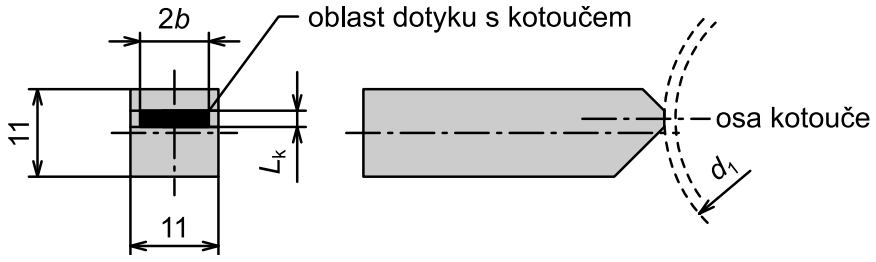
Smyslem experimentů bylo získat poznatky aplikovatelné na testování tuhých maziv na okolky kolejových vozidel podle normy ČSN EN 15427-1-1 [9]. Postup zkoušky byl tedy založen na této normě. Zkušební podmínky jsou uvedeny v tab. 1. Veličiny popisující kontakt kotoučů byly dopočteny podle Hertzovy teorie pro kontakt rovnoběžných válců.

Tab. 1 Základní parametry experimentů

			horní kotouč	dolní kotouč
průměr kotouče	d_i	[mm]	41,8	41,9
šířka válcové části	$2b$	[mm]	5,0	5,0
obvodová rychlost	v_i	[m/s]	0,845	0,767
poměrný skluz	s	[%]	9,7	
normálová síla	N	[N]	932	
max. hertzovský tlak	p_{max}	[MPa]	810	
plocha dotykové oblasti kotoučů	S	[mm^2]	1,5	
síla přítlaku vzorku maziva	F_z	[N]	7,5–52	

Vzorky tuhého maziva měly podobu tyčinek čtvercového průřezu o rozměrech 11 × 11 mm, avšak na konci upravených do špičky podle obr. 2 tak, že jejich styčná plocha s kotoučem měla délku L_k jen cca 1 mm. Opotřebením během zkoušky se kontaktní délka poněkud zvětšovala, ale před každou sadou měření pro danou úroveň přítlaku byl konec vzorku maziva upraven na původní rozměry pro vyloučení systematického zkreslení výsledků. Byly testovány dva materiály tuhých maziv, zde označované jen jako „M1“ a „M2“.

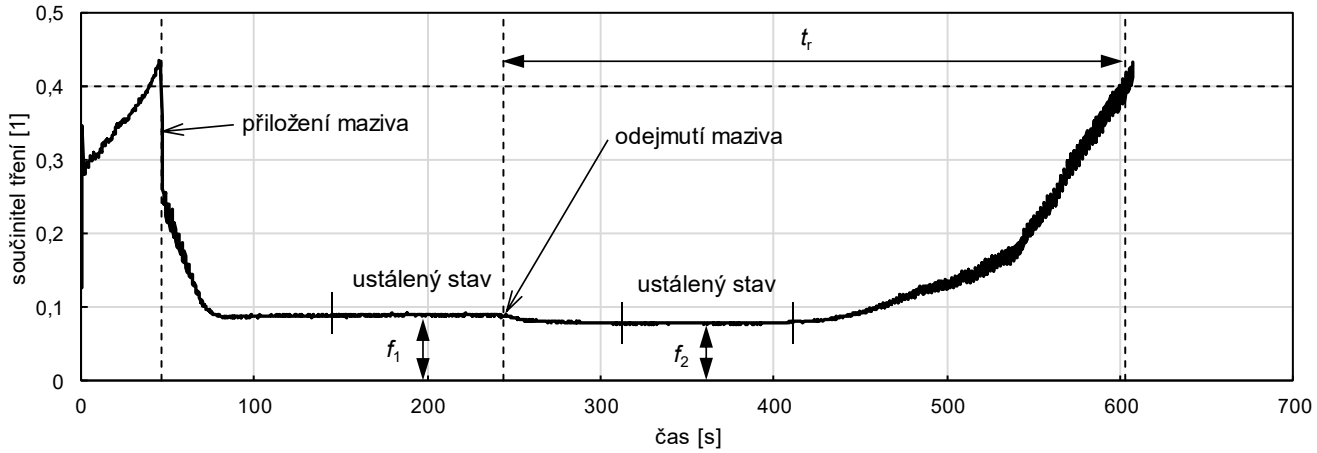
Ve zvláštních případech (vždy specificky zmíněných v následujícím textu) bylo po celou dobu zkoušky anebo od určitého okamžiku použito čisticí zařízení – plechový pásek s jemným brusným papírem, přitlačovaný vlastní pružností k dolnímu kotouči.



Obr. 2 Nákres vzorku tuhého maziva pro použití na dvoukotoučovém stroji

3.2 Postup zkoušek a hodnocené veličiny

Po uvedení stroje do chodu byly třecí podmínky ponechány bez úpravy, dokud se nedosáhlo hodnoty součinitele tření f = 0,4. Potom byl přiložen vzorek tuhého maziva, přitlačovaný závažím. Aplikace maziva trvala cca 200 s, poté bylo mazivo odejmuto a bez zastavení stroje měření pokračovalo, dokud součinitel tření nevystoupal zpět na hodnotu 0,4. Typický časový průběh součinitele tření při takovém testu je na obr. 3.



Obr. 3 Příklad naměřeného časového průběhu součinitele tření s vyznačením hodnocených veličin

Z časového záznamu byly odečteny tři charakteristické veličiny, vyznačené na obr. 3:

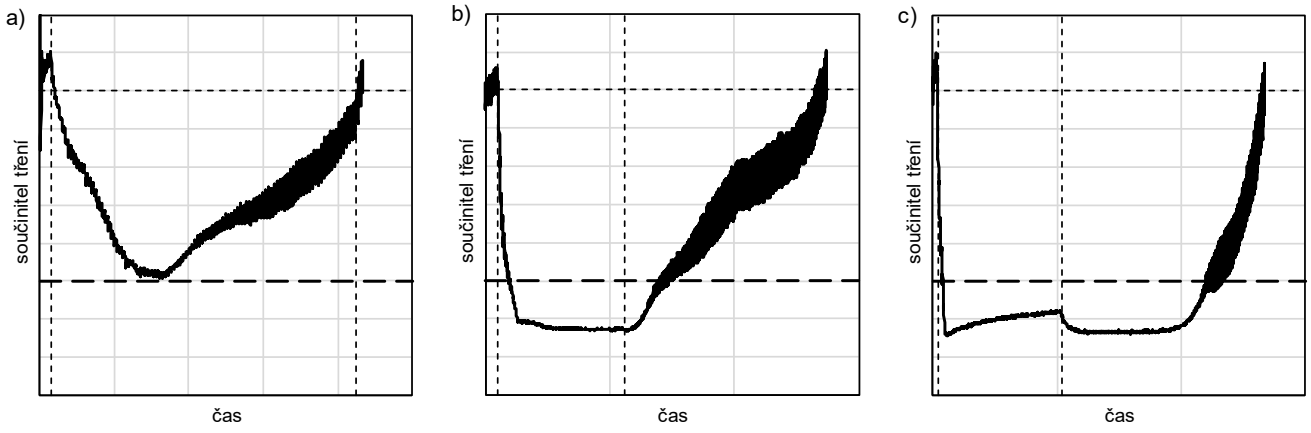
- f_1 – ustálený součinitel tření během aplikace maziva,
- f_2 – ustálený součinitel tření po odejmutí maziva (pokud došlo k ustálení),
- t_r – retentivita, vyjádřená časem, který uplynul od odejmutí maziva do návratu součinitele tření na hodnotu 0,4.

3.3 Odezva součinitele tření na aplikaci maziva

Zaznamenaný průběh součinitele tření ve většině z 54 provedených testů by se dal charakterem zařadit do jedné ze skupin znázorněných na obr. 4:

a) Nedostatečný mazací účinek: součinitel tření po přiložení maziva sice klesá, ale pomalu a ne příliš nízko, a začíná růst často ještě před odejmutím maziva.
b) Dostatečný, avšak ne trvanlivý mazací účinek: součinitel tření klesá, obvykle se (téměř) ustálí na nízké hodnotě, přičemž nikdy nevzrůstá. Až po odejmutí maziva začne okamžitě anebo po krátké prodlevě součinitel tření růst.
c) Dostatečný a trvanlivý mazací účinek: součinitel tření po přiložení maziva klesne, ale postupně mírně narůstá, někdy se ustálí, někdy ne úplně. Po odejmutí maziva součinitel tření ještě klesne a drží se na nízké hodnotě (i přes deset minut), potom začne růst.

Případ a) se týkal pouze testů s nejnižším stupněm přítlaku maziva (F_z = 7,5 N). Případ b) nastal u menšího počtu testů s nižším přítlakem (do 32 N) a potom v případech, kdy bylo po celou dobu zkoušky použito čištění pro odstraňování přebytečného materiálu. Případ c) byl nejčastější; pokud při běhu po odejmutí maziva bylo v určitém okamžiku přiloženo čisticí zařízení, ustálená fáze se ukončila a součinitel tření rychle vzrostl.



Obr. 4 Tři zaznamenané charaktery časového průběhu součinitele tření; svislé čáry značí přiložení a odejmutí maziva (s odstupem cca 200 s od sebe), vodorovné čáry značí hodnoty součinitele tření 0,15 a 0,4

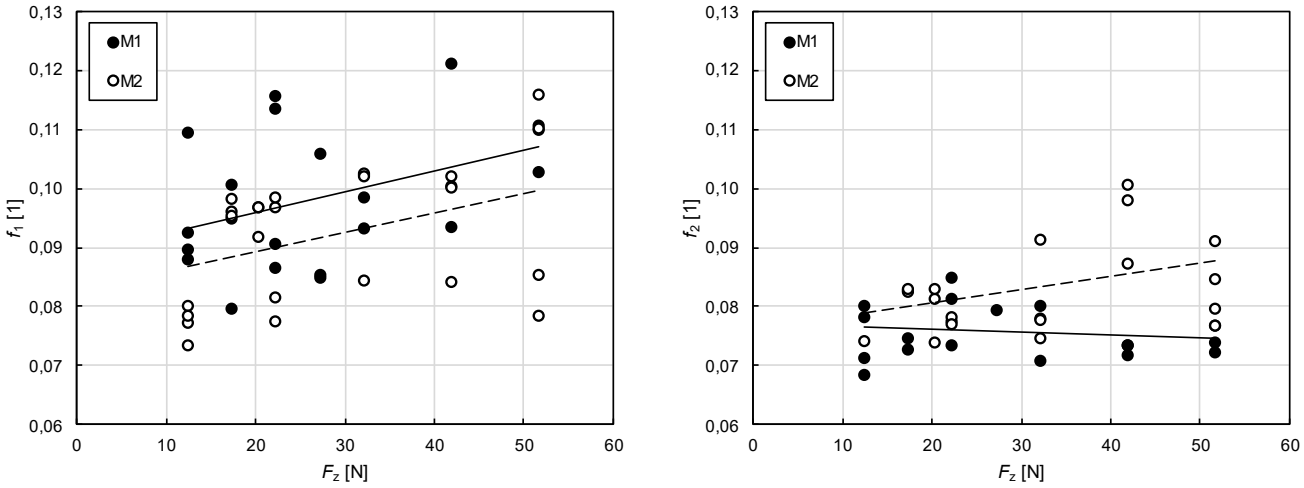
3.4 Kvantitativní vyhodnocení

Z jednotlivých časových průběhů bylo provedeno hodnocení veličin f_1, f_2 a t_r, definovaných v odd. 3.2. Pro stručnost jsou v tomto článku vynechány zvláštní případy a výsledky ovlivněné čištěním kotoučů během zkoušky, které nicméně v práci [2] jsou popsány. Grafy též nezahrnují výsledky pro nejnižší úroveň přítlaku (F_z = 7,5 N), kde nebyla zaznamenána plná účinnost maziva (průběhy jako na obr. 4 a).

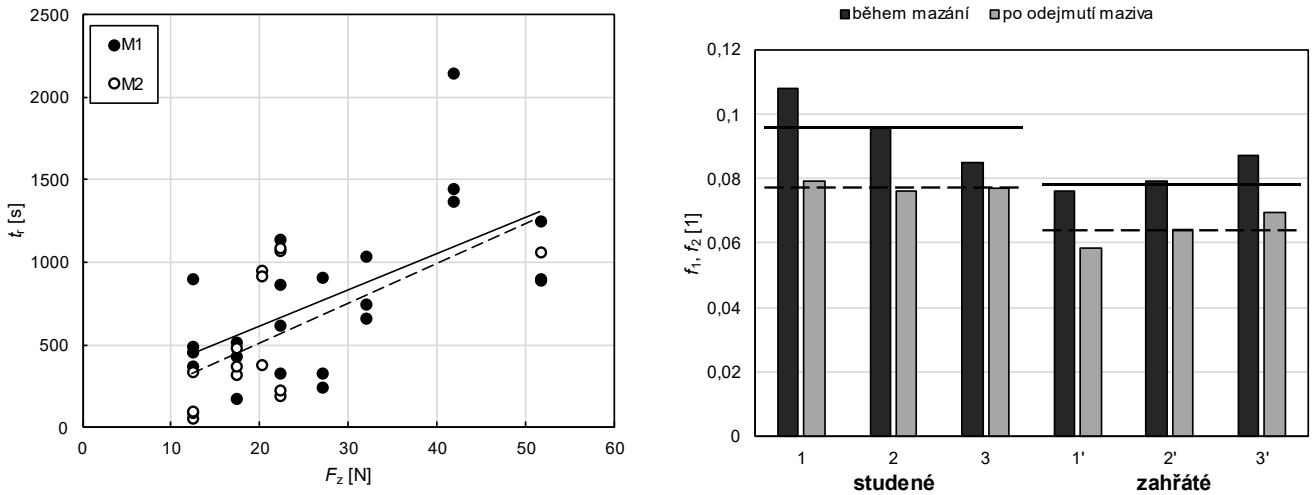
Ustálený součinitel tření během mazání f_1 měl hodnotu obvykle v rozmezí 0,08–0,12, jak je vidět na obr. 5 vlevo. Střední hodnota pro mazivo M1 byla poněkud vyšší než pro M2 (0,099 oproti 0,092, směrodatná odchylka 0,011 v obou případech). Součinitel tření během mazání ukázal slabě rostoucí trend s rostoucím přítlakem maziva.

Pokud se po odebrání vzorku maziva součinitel tření ustálil, pak se ustálil většinou na nižší hodnotě, než měl během mazání (viz obr. 5 vpravo; střední hodnota pro M1 je 0,076, pro M2 0,083). Závislost na přítlaku maziva během mazání je slabší a u obou vzorků maziva se liší.

Retentivita je zachycena na obr. 6 vlevo. Přes velký rozptyl nelze opomenout výrazný rostoucí trend: je-li mazivo ke kotouči přitlačováno větší silou, po odejmutí vydrží mazací vrstva na kotoučích déle. V grafu nejsou zahrnuty testy s průběžným čištěním (tam byl čas $t_r \leq 220$ s) a testy, kde pro zkrácení běhu už po cca 1100 s od odejmutí maziva bylo čištění zařazeno.



Obr. 5 Závislost ustáleného součinitele tření během mazání (vlevo) a po odejmutí maziva (vpravo) na síle, která přitlačuje vzorek maziva ke kotouči; lineární regrese, vyjádřená plnou čarou pro vzorek M1 a čárkovanou čarou pro vzorek M2, je vykreslena jako vizuální pomůcka, nehodnotí se



Obr. 6 Vlevo závislost doby návratu na úroveň suchého tření na síle, která přitlačuje vzorek maziva ke kotouči; vpravo vliv teploty kotoučů na součinitel tření během mazání f_1 a po odejmutí maziva f_2 (vodorovné čáry značí střední hodnoty)

V testech prezentovaných výše bylo vždy před zahájením měření zařazeno chlazení kotoučů v proudu vzduchu. Dále byl jen pro orientaci, s malým počtem opakování vyšetřen vliv teploty kotoučů. Na obr. 6 vpravo jsou výsledky tří měření se studenými kotouči (tj. teplota na začátku 23–24 °C, během testu zahřátí na 32–33 °C) a tří měření se zahřátými kotouči (na začátku 32–33 °C, na konci 38–39 °C). Zde byl použit vzorek maziva M1 a F_z = 22 N. Ukázalo se, že při vyšší teplotě součinitel tření poněkud klesá, ale pro získání statisticky významných výsledků by bylo zapotřebí pořídit větší množství dat.

4 DISKUZE

Ze samotných experimentů, které jsou zde prezentovány, lze učinit následující závěry: Přítlak vzorku tuhého maziva, *je-li dostatečný k vytvoření účinné mazací vrstvy*, už má na samotný součinitel tření malý dopad. Výrazněji však ovlivňuje retentivitu neboli trvanlivost mazací vrstvy, která se drží na kotoučích po

odejmutí maziva – s přítlakem během mazání narůstá doba, po kterou mazání zůstává účinné potom, co mazivo již není přiváděno.

V rámci našich experimentů nebyly prováděny mikroskopické rozbory, které by umožnily popsat množství a rozložení maziva a jiných látek na kotoučích v jednotlivých fázích zkoušky. Na základě poznatků z literatury [10–12] nicméně lze odvodit vysvětlení mechanismů, které jsou rozhodující pro vývoj třecích podmínek během standardní zkoušky na dvoukotoučovém stroji. Po přiložení maziva se začne tuhé mazivo (včetně částic plastové matrice) přenášet na povrch horního kotouče a z něj i na kotouč dolní. Součinitel tření pochopitelně klesá. Při utvoření optimální mazací vrstvy dosáhne součinitel tření minimální hodnoty. Pakliže ale na rozhraní přichází další mazivo, ocitá se mezi kotouči větší množství tuhého maziva v podobě lamel v náhodné orientaci, které nejsou ještě zajety do optimálního uspořádání „naplocho“, kde po sobě kloužou s malým odporem: součinitel tření proto během mazání poněkud roste (obr. 4 c).

Po odejmutí tyčinky se ukončí přívod dalších částic tuhého maziva, a přítomné mazivo, je-li ho tam dostatek, se po čase zajede do optimální mazací vrstvy – součinitel tření proto klesne. Během valení se skluzem částice maziva postupně z kontaktu odcházejí, ale dokud jich je tam dostatek, zajišťují stabilně nízký součinitel tření. Teprve při dosažení určitého kritického množství mazací účinek pomíjí a součinitel tření poměrně rychle vzroste. Pokud je přítlak maziva během mazání vyšší, přenese se ho na kotouče více, a proto pak mazací vrstva déle vydrží.

Pokud je kotouč na zkušebním stroji průběžně čištěn, zabraňuje se tím hromadění většího množství maziva. Během mazání to znamená *nižší* součinitel tření (není přítomna silnější vrstva ještě nezajetých částic), ale po odejmutí tyčinky se mazací účinek brzy ztrácí (povrchy nedrží „zásobu“ maziva) – to je znázorněno na obr. 4 b). Nutno zopakovat, že v několika málo případech byl takovýto výsledek zaznamenán i bez čištění: z nějakých důvodů na kotouče přecházelo menší množství maziva.

Není-li zajištěn přenos dostatečného množství maziva na kotouče (při nízkém přítlaku tyčinky), nedokáže v podmínkách stálého, vysokého skluzu utvořit stabilní mazací vrstvu. Průběh součinitele tření pak vypadá jako na obr. 4 a).

5 ZÁVĚR

Jedním z parametrů zkoušky tuhého maziva na dvoukotoučovém stroji podle ČSN EN 15427-1-1 je síla, která přitlačuje tyčinku tuhého maziva ke kotouči, reprezentujícímu kolo vozidla. Tato síla může zásadně ovlivnit výsledek zkoušky v tom smyslu, že je-li příliš nízká, nepřenáší se na kotouče dostatek maziva k vytvoření účinné mazací vrstvy. V normě se uvádí, že přítlak má odpovídat skutečné aplikaci; pokud ale použijeme takové zatížení, není v našich podmínkách obvykle dosažena správná funkce. Příčina je spatřována ve značném namáhání rozhraní stálým, vysokým skluzem – v článku [13] se v této souvislosti navrhuje testování s přerušovaným kontaktem kotoučů, zohledňujícím fakt, že okolek též nepřichází do kontaktu s kolejnicí souvisle a během jízdy v přímé koleji se vrstva maziva obnoví.

Aktuálně prezentovaný výzkum navazuje na náš předcházející příspěvek [1] tam, kde se uvádí, že „jedním z faktorů, který ovlivňuje účinnost maziva, je jeho přítlak k testovacímu kotouči“ a že „při vyšším tlaku se dosahuje vyšší účinnosti“. Nyní lze tato tvrzení upřesnit:

- Při vyšším přítlaku se dosahuje vyšší účinnosti v tom smyslu, že při překročení určité hranice (ve zde popsaném případě mezi 7,5 a 12 N) se mazivo dostává do režimu řádného fungování, ve kterém ale už součinitel tření na přítlaku tyčinky závisí velmi málo, a to s mírně rostoucím trendem. Ještě méně je na přítlaku závislý součinitel tření po odejmutí maziva.
- Při vyšším přítlaku je zaznamenána vyšší retentivita, tj. výdrž mazací vrstvy na kotoučích po odejmutí maziva. Tato vlastnost je ale potlačena při zkoušce s průběžným čištěním, které zásobu maziva nad rámec zajeté účinné vrstvy odstraňuje.

Výsledky měření jsou svým charakterem v souladu s poznatky z literatury, zejména [10], kde byla použita jiná metodika testování i jiné zkušební zařízení (typ *pin-on-disk*), avšak závěry k přenosu a usazování maziva mají obecnější platnost.

Jeví se vhodné v dalších experimentech na dvoukotoučovém stroji rozšířit základnu pro tyto poznatky testováním při různých úrovních normálové síly v kontaktu a různé velikosti aplikační plochy maziva, taktéž realizovat více zkoušek pro vyšetření vlivu teploty.

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

◆◆

Literatura

[1] 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: DFJP Univerzity Pardubice, 2021, s. 391–398. ISBN 978-80-7560-377-7.

[2] NETOLICKÝ, J. *Testování tuhých maziv pro okolky kolejových vozidel na dvoukotoučovém stroji*. Diplomová práce. Pardubice: Univerzita Pardubice, DFJP, 2025.

[3] IWNICKI, S., SPIRYAGIN, M., COLE, C., McSWEENEY, T. (eds.) *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. Online. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, 2019. ISBN 9780429469398. Dostupné z: https://doi.org/10.1201/9780429469398. [citováno 2025-06-20]

[4] JASCHINSKI, A., CHOLLET, H., IWNICKI, S., WICKENS, A., WÜRZEN, J. *The application of roller rigs to railway vehicle dynamics.* Online. Vehicle System Dynamics. Vol. 31 (1999), no. 5–6, s. 345–392. ISSN 0042-3114. Dostupné z: https://doi.org/10.1076/vesd.31.5.345.8360. [citováno 2025-06-20]

[5] VOLTR, P. *Simulation of wheel-rail contact conditions on experimental equipment*. Online. Železničná doprava a logistika. Vol. 2015, no. 2, s. 77–82. ISSN 1336-7943. Dostupné z: http://hdl.handle.net/10195/66673. [citováno 2025-06-20]

[6] GARNHAM, J. E. *The wear of bainitic and pearlitic steels.* Disertační práce. Leicester: University of Leicester, 1995.

[7] ZDRAVECKÁ, E., ONDÁČ, M., TKÁČOVÁ, J. The wear tribometer and digitalization of tribological tests data. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. Vol. 61 (2013), no. 2, s. 321–326. ISSN 1734-8412.

[8] *Tribology at component level.* Online. Fraunhofer IWM. Dostupné z: https://www.iwm.fraunhofer.de/en/services/tribology/triboconditioning_analytics/Tribology-at-component-level.html. [citováno 2025-06-23]

[9] ČSN EN 15427-1-1:2023. *Železniční aplikace – Řízení tření mezi kolem a kolejnicí – Část 1-1: Mazací zařízení a nanášení – Mazání okolků*.

[10] REY, T., PAPIN, E., FRIDRICI, V., DASSENOY, F. *Experimental study of the tribological performance of a solid lubricant stick with MoS_2 for wheel–rail contact.* Online. Wear. Vol. 570 (2025), article 205941. ISSN 1873-2577. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205941. [citováno 2025-06-23]

[11] STACHOWIAK, G., BATCHELOR, A. W. *Engineering Tribology.* 4th Edition. Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN 9780123977762.

[12] WONG, K. C., LU, X., COTTER, J., EADIE, D. T., WONG, P. C., MITCHELL, K. A. R. *Surface and friction characterization of MoS_2 and WS_2 third body thin films under simulated wheel/rail rolling–sliding contact.* Online. Wear. Vol. 264 (2008), no. 7–8, s. 526–534. ISSN 1873-2577. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.04.004. [citováno 2025-06-23]

[13] EVANS, M. D., LEWIS, R. *Alternative twin-disc assessment of solid stick flange lubricants.* Colorado Springs, Colorado, USA: 10th International Conference on Contact Mechanics – CM 2015, 30. 8.–3. 9. 2015.

Zasláno / received: 01. 07. 2025, přijato / accepted: 15. 07. 2025, publikováno / published: 17. 09. 2025.

Příspěvek recenzovali / The paper was reviewed by: Ing. Martin Valena, Ph.D. (Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství), doc. Ing. Ján Dižo, PhD. (Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta).