

FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ HODNOCENÍ VÝKONNOSTI TUHÝCH MAZIV PRO KONTAKT KOLO–KOLEJNICE

INFLUENCING FACTORS IN PERFORMANCE ASSESSMENT OF SOLID LUBRICANTS FOR THE WHEEL–RAIL INTERFACE

Petr VOLTR¹, Stanislava LIBEROVÁ²

Abstrakt

Mazání okolků je nástrojem řízení tření v kontaktu kola a kolejnice, jehož účelem je snížení opotřebení a hluku vznikajícího při styku okolku s bokem hlavy kolejnice. Jedním z možných řešení jsou tuhá maziva – tyčinky přitlačované ke kolům vozidla. Pro srovnávací hodnocení výkonnosti tuhých maziv je v normě EN 16028 předepsána, byť dosti volně, metodika využívající dvoukotoučového zkušebního stroje. Při těchto zkouškách je kontaktní dvojice kolo–kolejnica nahrazena dvěma ocelovými kotouči, které se proti sobě odvalují se stálým skluzem, přičemž se určeným způsobem přikládá a odnímá vzorek maziva. Příspěvek uvádí přehled problematiky, zkušenosti a poznatky vycházející z experimentální činnosti, která byla na Doprvní fakultě Jana Pernera realizována v posledních letech a která zahrnovala zakázky komerčního výzkumu pro dodavatele a výrobce tuhých maziv a modifikátorů tření.

Klíčová slova

mazání okolků, modifikátor tření, součinitel tření, metodika zkoušení, dvoukotoučový stroj

Abstract

Flange lubrication is a tool of friction modification at the wheel–rail interface, with the purpose of reducing wear and noise occurring at the contact of the flange with the rail head side. Possible solutions include solid lubricants – lubrication sticks pressed on the wheels of rail vehicles. For comparative testing of performance of solid lubricants, the European standard EN 16028 prescribes, albeit quite loosely, a method that employs a twin-disc test machine. In these tests, the wheel–rail contact pair is represented by two steel discs rolling on each other with constant creepage, and a specimen of the lubricant is applied and removed in a defined way. The paper gives an overview of the current state and presents the experience and findings of experimental activities that took place at the Faculty of Transport Engineering in recent years, including commercial research tasks carried out for suppliers and manufacturers of solid lubricants.

Keywords

flange lubrication, friction modifier, coefficient of friction, method of testing, twin-disc machine

1 ÚVOD

Jedním z klíčových pojmů v kolejové dopravě je adheze, která se – v neshodě s obecně fyzikálním významem toho slova – obvykle definuje jako schopnost rozhraní kola a kolejnice přenášet

¹ doc. Ing. Petr Voltr, Ph.D., University of Pardubice, Faculty of Transport Engineering. Výukové a výzkumné centrum v dopravě, Doubravice 41, 533 53 Pardubice. Tel.: +420 466 038 505, e-mail: petr.voltr@upce.cz

² Ing. Stanislava Liberová, Ph.D., University of Pardubice, Faculty of Transport Engineering. Dislokované pracoviště DFJP, Nádražní 547, 560 02 Česká Třebová. Tel.: +420 466 037 426, e-mail: stanislava.liberova@upce.cz

tečné síly při působení zatížení normálového. Tečné síly mohou být silami tažnými nebo brzdými, ale také mohou napomáhat vedení vozidla v koleji či směřovat naopak k vykolejení; jsou spojeny s namáháním materiálu kola a kolejnice a s více či méně závažným opotřebením.

Poměr velikostí tečné a normálové síly je omezen součinitelem tření, který je zjednodušenou charakteristikou tribologických podmínek rozhraní kolo–kolejnice. Toto rozhraní lze označit jako tribologický systém otevřený, přístupný vnějším vlivům přírodního i umělého původu, které mají za následek značnou variabilitu třecích podmínek. Je proto přirozené, že se věnuje pozornost možnostem jejich cíleného ovlivňování. Není to nová oblast – nástroje jako pískování nebo mazání okolků jsou známy dlouhou dobu. V kontextu dnešních praktických potřeb a teoretických znalostí se ale problém pojímá komplexně jako řízení tření, anglicky *friction management* [1, 2].

Účelem řízení tření je dosažení určitých třecích podmínek v kontaktu kola a kolejnice; jeho nástroje lze obecně označit jako modifikátory tření (FM, *friction modifiers*). Obvykle se tento výraz ale používá v užším významu pro materiály aplikované pro udržení střední či vyšší úrovně tření, někdy dokonce jen pro určitou jejich skupinu; zatímco materiály, jež součinitel tření prostě snižují, jsou maziva.

Nízký součinitel tření představuje příznivé podmínky na okolků kola a na boku hlavy kolejnice – tedy v těch částech kol a kolejnic, které se převážně neúčastní vyvíjení tažné a brzdící síly, ale mají úlohu vedení vozidla v koleji. Redukce tečných sil v těchto zónách nenarušuje danou funkci a přispívá k nižšímu opotřebení se zřejmými důsledky na náklady na údržbu kol a kolejnic. Třecí charakteristika mazaných povrchů rovněž určuje menší náchylnost k produkci kvilivého hluku.

Pro snižování součinitele tření se v provozu kolejových vozidel užívají maziva (materiály LCF – z angl. *low coefficient of friction*), která mohou být tuhá, plastická anebo ve formě aerosolu. Z hlediska umístění mazacího zařízení se rozeznává mazání na vozidle (palubní) a na trati. Existuje i možnost aplikace maziva na trať speciálním vozidlem (např. „mazací tramvaj“).

Konečným projevem účinnosti (výkonnosti) maziva je snížení opotřebení kol a kolejnic, které ovšem ve skutečném provozu vyžaduje dlouhodobé sledování. Je proto přirozená snaha testovat výkonnost maziv laboratorními experimenty, které se využívají v průběhu vývoje nových materiálů i pro závěrečné ověření před uvedením produktu na trh.

Tento příspěvek se věnuje experimentálnímu hodnocení výkonnosti maziv pro kontakt kola a kolejnice, s omezením na tuhá maziva okolků. Podkladem jsou zkušenosti autorů s testy prováděnými v rámci komerčního výzkumu pro tuzemské i zahraniční zákazníky.

2 TUHÁ MAZIVA OKOLKŮ

Tuhá maziva pro rozhraní kola a kolejnice jsou dodávána v podobě tyčinek – hranolů s konci tvarovanými tak, že do sebe zapadají. Tyčinky se vkládají do aplikátoru – čtverhranné trubky, z níž jsou silou pružiny vytlačovány a udržovány v kontaktu s okollem. Tyčinka je suchá a kompaktní. Je tvořena polymerovou matricí, která má úlohu nosiče; váže k sobě částice zajišťující vlastní mazací funkci, jejichž hlavní složkou je zpravidla grafit (uhlík) nebo sulfid molybdeničitý (MoS_2 , molyka). Obě látky jsou v průmyslových aplikacích dobře známy jako účinná maziva; obě tvoří výrazně anizotropní krystaly s nízkou smykovou pevností v jedné rovině. Díky tomu se snadno dělí na tenké lamely, které se drží na kovových základech a tvoří hladké povrchové vrstvy, které po sobě kloužou s malým odporem. Grafit pro správnou funkci vyžaduje alespoň malé množství vzdušné vlhkosti, MoS_2 má příznivé vlastnosti i bez ní [3, 4].

Předností tuhých maziv okolků je mechanická jednoduchost systému, z níž plynou nízké náklady na instalaci a údržbu. U těchto systémů nemůže dojít k úniku nebo přenosu plastické či kapalné látky na místa, kde by působila znečištění nebo nežádoucí mazací účinek (jízdni plocha kola).

Předmětem výzkumu v oblasti maziv pro rozhraní kolo–kolejnice je především zjišťování účinku maziv při různých podmínkách, daných velikostí skluzu, množstvím maziva, drsností povrchů apod. Mírou výkonnosti maziv je součinitel tření (okamžitě měřitelný) a charakteristiky opotřebení kovových

vzorků. Publikované vědecké studie se častěji zaměřují na maziva plastická a kapalná. Tuhým mazivům se důkladně věnuje nedávno vydaný článek [5], vycházející ze standardizované metodiky diskutované níže. Některé výsledky týkající se tuhých maziv jsou též zařazeny v publikacích [6, 7].

3 METODIKA ZKOUŠENÍ DLE EN 16028:2012

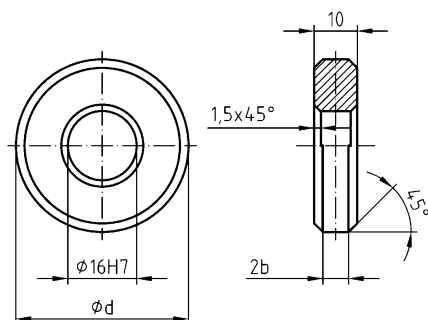
3.1 Stručný popis metodiky

Postup srovnávacího zkoušení vlivu tuhých maziv na součinitel tření mezi ocelovými kotouči je popsán v normě EN 16028, příl. L (informativní) [8]. Nově tato metodika přechází do normy prEN 15427-2-1 [9], která je v době psaní tohoto textu ve fázi návrhu. Postup popsany v normě lze ve stručnosti shrnout následujícím způsobem:

1. Po upnutí kotoučů a nastavení jejich přitlaku se stroj uvede do provozu při požadovaných otáčkách bez mazání testovacích kotoučů.
2. V okamžiku, kdy součinitel tření dosáhne hodnoty 0,4, se bez zastavení stroje přiloží vzorek tuhého maziva a zatíží se k vyvození předepsaného přitlaku. V případě, že je mazivo účinné, součinitel tření klesne.
3. Po uplynutí 200 sekund se vzorek maziva odejme opět bez zastavení stroje.
4. Po odejmutí maziva součinitel tření opět narůstá. Zkouška je ukončena v okamžiku, kdy součinitel tření dosáhne hodnoty 0,4.
5. Po ukončení zkoušky se vážením zjistí hmotnostní úbytek vzorku tuhého maziva, aby bylo možno stanovit i jeho spotřebu.

Pro testování se doporučuje dodržet skluz v rozmezí 10–20 %, rychlost 230–400 ot./min (bez uvedení průměru kotoučů) a tlak v kontaktu testovacích kotoučů 800–1000 MPa (bez upřesnění, zda se jedná o tlak střední, nebo maximální hertzovský). Síla přitlaku maziva k testovacímu kotouči není v normě předepsána.

Pro účely testování je vhodné vyrobít testovací kotouče z materiálů reálně používaných pro výrobu železničních kol a kolejnic tak, aby bylo možné při testování dosáhnout požadovaný Hertzův tlak (obr. 1). Vzorek tuhého maziva se získá řezem z dodaných tyčinek tak, aby jej bylo možné umístit do aplikátoru vhodného pro kotouče malých rozměrů (obr. 2). Před zahájením vlastního testování je podle normy třeba zajet vzorek maziva proti kotouči tak, aby se mu otěrem tvarově přizpůsobil – mezi tyčinkou a kotoučem vzniká konformní kontakt. Záběh může v závislosti na zkušebních podmínkách trvat i několik hodin. Negativním důsledkem tohoto procesu je, že může dojít k nežádoucímu ovlivnění povrchových vrstev zkušebních disků a tím k následnému ovlivnění výsledků testování účinků tuhých maziv na součinitel tření.



Obr. 1 Náčrtes testovacího kotouče pro zkušební zařízení Amsler A-135



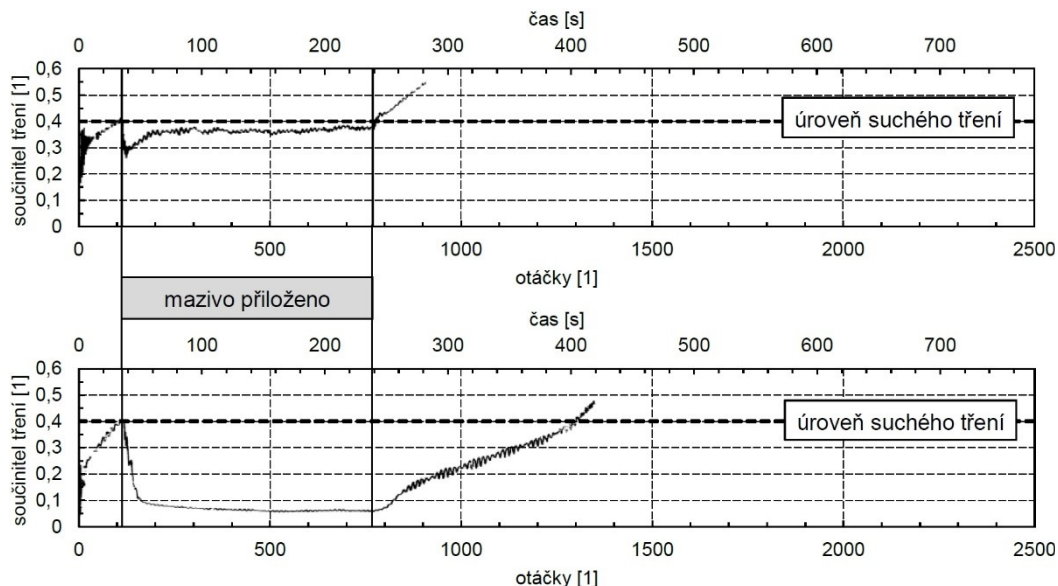
Obr. 2 Vzorek tuhého maziva pro dvoukotoučové zkušební zařízení

Norma stanovuje sledování následujících parametrů:

- rychlost poklesu součinitele tření po přiložení maziva,
- ustálená hodnota součinitele tření v době mazání kotoučů,
- rychlost návratu součinitele tření na hodnotu typickou pro suché povrchy (0,4) po odebrání maziva.

3.2 Výsledky měření

Průběh součinitele tření po spuštění stroje obvykle začíná nárůstem, během kterého se brzy dosáhne úrovně typické pro suché tření. Po přiložení vzorku maziva součinitel tření klesne. V závislosti na účinnosti maziva se vcelku výrazně liší nejen hodnoty sledovaných veličin, ale i charakter průběhu součinitele tření během mazání i po odejmutí vzorku tuhého maziva (obr. 3).



Obr. 3 Příklady záznamů součinitele tření při zkouškách různých tuhých maziv metodou podle EN 16028

Je nutné zdůraznit, že metodika je *srovnávací* – slouží pro srovnávání různých vzorků za stejných podmínek na stejném zkušebním zařízení. Norma vysloveně uvádí, že metodika není zamýšlena pro porovnávání výsledků zkoušek na různých zařízeních. Nicméně i tak se nepříznivě projevuje fakt, že požadavky na testování tuhých maziv nejsou v normě dostatečně definované – výsledky řady testů i na jednom zařízení vykazují ne vždy srovnatelné výsledky. V dalším oddílu jsou analyzovány pozorované vlivy a z nich vycházející body, v nichž by mohlo prospět upřesnění nebo úprava metodiky.

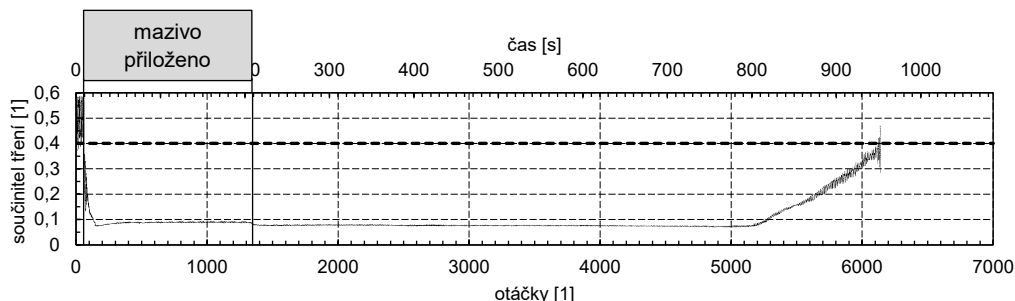
3.3 Diskuze k faktorům ovlivňujícím výsledky zkoušek

Teplota během testování

Norma uvádí, že se testování obvykle provádí v podmínkách přirozené teploty a vlhkosti vzduchu v laboratoři. Teplota povrchů zkušebních kotoučů, která je významným fyzikálním vlivem pro tribologické podmínky kontaktu, je nicméně výrazně ovlivněna zahříváním při tření; případné chlazení není v normě specifikováno. Podle [10] se doporučuje chlazení kotoučů vzduchem.

Dle zkušenosti autorů může mít teplota výrazný vliv na výsledky. Při nevhodných teplotních podmínkách je možné s danými parametry zkoušení dosáhnout zásadních změn na povrchu testovacích kotoučů. Vysoká teplota zejména podporuje vznik vrstvy oxidů na povrchu kotoučů (jak

je uvedeno i v [10]). Tato vrstva může být pro některé typy maziv prospěšná, neboť zajistí dobrou přilnavost maziva na povrchu kotouče a dokáže výrazně prodloužit dobu návratu součinitele tření na hodnotu typickou pro suché povrchy (obr. 4). Jiné typy maziv ovšem uvedeným způsobem nereagují.



Obr. 4 Ukázka záznamu z testu tuhého maziva se silně prodlouženou dobou návratu součinitele tření na hodnotu typickou pro suché povrchy

V článku [10] se doporučuje v průběhu zkoušky měřit teplotu povrchů kotoučů. Měření je možné kontaktním teploměrem (vyžaduje přerušení zkoušky), anebo bezkontaktně. Použití bezkontaktního infračerveného teploměru a termokamery na dvoukotoučovém zkušebním stroji je dokumentováno např. v [11]. Z fyzikální podstaty je však infračervené měření teploty hladkých, lesklých povrchů problematické, v [12] se popisuje postup kalibrace na zkušební kotouče. Kromě toho je třeba brát na vědomí, že teplota kotouče mimo kontakt je podstatně menší než blesková teplota, na niž se ohřívají malé objemy materiálu přímo při průchodu dotykovou oblastí.

Odebírání testovacích kotoučů a jejich povrchová úprava

Testovací kotouče mají být ideálně odebrány ze skutečných kol a kolejnic [8]. Způsob provedení výřezu není v normě uveden. Pro získání porovnatelných výsledků zkoušek je třeba volit takový odběr, aby materiál kotouče nebyl ovlivněn zpevněnou povrchovou vrstvou kola či kolejnice, pokud byla už nějakou dobu v provozu.

Nesmí se opomenout geometrická přesnost kotoučů. Z provedených testů je patrné, že nepřesnosti dané nedodržením válcovitosti nebo souososti mají za následek nerovnoměrné namáhání materiálu, které může při delším testování vést až ke vzniku některé z forem kontaktního únavového poškození (kontaktní úrava). Dalším důsledkem tohoto jevu je opět nekonzistentnost v provedených zkouškách.

Norma nestanovuje úpravu povrchu vzorků. Obecně lze konstatovat, že čím nižší drsnost povrchu testovací kotouč vykazuje, tím se snižuje délka (příp. i potřeba) záběhu kotouče. Kotouče vykazující hrubší povrchovou strukturu mají tendenci k „zalisování“ většího množství maziva do povrchu materiálu v průběhu testu, čímž se zlepší zjištěná účinnost tuhého maziva. Z hlediska vypovídací schopnosti provedených testů je tento jev nežádoucí.

Pro dosažení lepší konzistentnosti provedených testů se osvědčilo provádět průběžné kontaktní čištění toho testovacího kotouče, na který není aplikován modifikátor tření, od nežádoucích kontaminantů. Čištěním lze zamezit hromadění zoxidovaných částic opotřebení a vrstev tepelně ovlivněného maziva na površích kotoučů.

Přítlak vzorku tuhého maziva

Jedním z faktorů, který ovlivňuje účinnost maziva, je jeho přítlak k testovacímu kotouči. V praxi je možné přítlak maziva na okolek regulovat silou pružiny, která je součástí držáku tuhého maziva. Tento parametr je z hlediska uživatele velmi sledovaný, protože volba optimální hodnoty přítlaku ovlivňuje účinnost maziva a zároveň má vliv i na jeho spotřebu.

V normě není velikost přitlačné síly vzorku maziva předepsána. Uvádí se však, že „je možné“ nastavit přitlak podle skutečného provozu; že je třeba znát plochu průřezu vzorku a na základě ní vypočítat požadovanou přitlačnou sílu ($F = p \cdot S$).

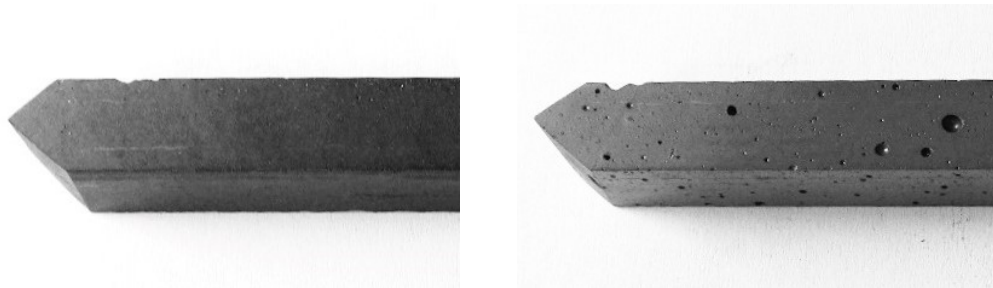
V tomto bodě však vyvstává otázka, zda je vůbec žádoucí vytvořit stejný tlak jako v provozu. V případě mazaného okolku kola v provozu je mazivo přiváděno neustále, zatímco k jeho využití a otěru z ocelového povrchu dochází jen občas (při krajní poloze dvojkolí ve volném kanálu koleje). Na dvoukotoučovém stroji je kontakt a skluz mazaných povrchů stálý, tudíž se mazivo z kotoučů více spotřebovává. Je pak pochopitelné, že k dosažení účinného množství maziva na povrchu kotoučů je zapotřebí jeho intenzivnější přísun. Ten lze vytvořit zvýšením přitlačné síly nebo zmenšením kontaktní plochy – což může být spojeno i s dalšími jevy, které jsou diskutovány dále.

U různých materiálů tuhých maziv se citlivost na přitlak vzorku maziva liší, avšak obecně zkušenost autorů potvrzuje, že při vyšším tlaku se dosahuje vyšší účinnosti. Tento jev je výraznější při vyšších hodnotách skluzu, kde nedostatečně přitlačované mazivo ani nemusí dostat šanci se řádně projevit.

Vzorek maziva a jeho aplikační plocha

Podle normy má být kontakt vzorku maziva s kotoučem konformní (plošný) jako ve skutečném provozu. Existuje však názor, že v takovém případě je stálost kontaktních podmínek problematická – při malém vzájemném vychýlení např. v rámci vůlí ve vedení mazací tyčinky se plocha dotyku skokem změní. Alternativní zkušební podmínky proto zahrnují rovný konec vzorku maziva, který se s kotoučem stýká teoreticky v úsečce, prakticky v malé ploše, která je stálá. V našich experimentech se držíme tohoto nastavení, které má za následek podstatně vyšší tlak v kontaktu maziva s kotoučem a spolehlivější tvorbu účinné vrstvy maziva.

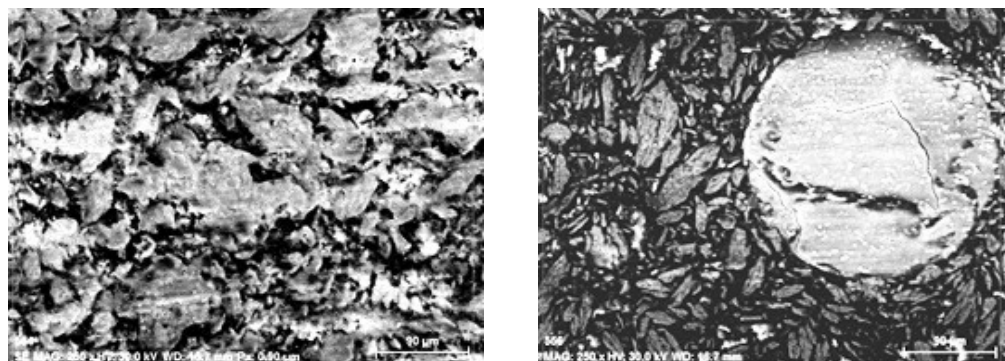
Zároveň se však ukazuje, že v tomto případě je třeba sledovat další ovlivňující faktory. Mezi ně lze zařadit pórovitost maziva, kdy některé vzorky v podstatě póry nevykazují, jiné je mají i poměrně velké (obr. 5). V případě, že by se v malé kontaktní ploše nacházela výrazná dutina, měl by tento fakt vliv na konzistentnost provedených testů včetně ovlivnění vlastní účinnosti maziva.



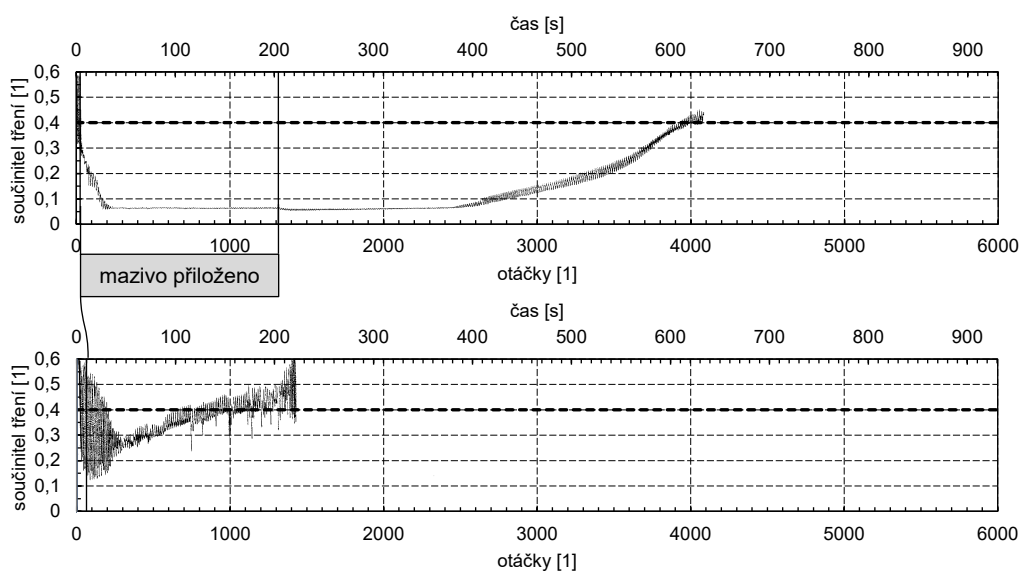
Obr. 5 Porovnání pórovitosti vzorků maziv

Dalším faktorem, který může ovlivnit výsledky testů, je vlastní složení maziv. Chemické složení maziv a modifikátorů tření je poměrně složité a různorodé. Výrobci často nezveřejňují složení produktů a pouze uvádějí, na jaké bázi produkty fungují a jaký je jejich efekt kontaminace. Modifikátory tření se často doplňují aditivy, které mohou ovlivňovat deformační vlastnosti, vnitřní zbytkovou magnetizaci, zvyšovat odolnost proti korozi, ovlivňovat hořlavost, zvyšovat odolnost proti mrazu atd. Ze sledování mikrostruktury vzorků tuhých maziv (obr. 6) je patrná nejen jejich heterogenita, ale také různé uložení a velikost jednotlivých složek maziva v základní matici.

Z provedených rozborů je patrné, že vzorky maziv vykazují přítomnost částic železa, oxidů železa, hliníku nebo titanu. Vzhledem k heterogenitě složení těchto materiálů a také velikosti částic v matici lze očekávat, že při zmenšené aplikační ploše maziva může docházet k výrazným rozdílům v účinnosti maziva při opakovaných testech v důsledku kontaktu větších částic jiných látek (např. Fe), které neplní vlastní mazací funkci a snižují tak účinnost maziva (obr. 7).



Obr. 6 Porovnání struktury tuhých maziv (snímky z elektronového mikroskopu, v téže měřítku)



Obr. 7 Porovnání výsledků testů ovlivněných kontaminací povrchu kotouče modifikátorem tření

4 ZÁVĚR

Jedním z důležitých požadavků na tuhá maziva pro okolky kolejových vozidel je vysoká výkonnost, čímž se rozumí mazací schopnost včetně přilnutí maziva k ocelovým povrchům a udržení se na nich. Metoda laboratorního zkoušení výkonnosti na dvoukotoučovém stroji je uvedena v normě EN 16028 [8] a předběžné normě prEN 15427-2-1 [9], která má první jmenovanou normu nahradit.

Metoda je určena pro srovnávání vlastností různých tuhých maziv na daném zkušebním zařízení a nezajišťuje získání absolutně platných hodnot ani porovnatelnost zkoušek mezi laboratořemi. V této souvislosti působí jako nesrovnalost, že normativní příloha dokumentu [8] i nově [9] předepisuje požadavek dosažení součinitele tření $f \leq 0,15$ právě podle této metody.

Zkušební podmínky nejsou v mnoha ohledech přesně definovány, což se jeví jako nedostatek i v případě, že se metoda využívá pro srovnávací zkoušky. Výsledky měření mohou být výrazně ovlivněny teplotními jevy (oteplování kotoučů během testování), úpravou kotoučů, přitlakem vzorku tuhého maziva a provedením jeho aplikační plochy. Diskuze k těmto vlivům na základě zkušenosti autorů je předložena v předcházejícím oddílu.

Sledování hmotnostních úbytků vzorku maziva, které norma předepisuje, se jeví jako nereálné – úbytek materiálu za čas zkoušky 200 sekund je téměř neměřitelný. Pokud se ze vzorku při manipulaci náhodně oddělí částice materiálu nebo na něm naopak ulpí kovová částice z kotouče, výrazně to zkreslí zjištěné hodnoty. Pro hodnocení spotřeby maziva byly na pracovišti autorů realizovány oddělené zkoušky na zkušebním zařízení většího měřítka, které probíhaly po delší dobu.

Při zkouškách se někdy mazivo ukáže jako neúčinné, třebaže výsledky z jiné laboratoře – nebo ze stejné laboratoře za mírně odlišných podmínek – jsou naopak příznivé. Otázkou je: na základě kterých výsledků se má rozhodnout o vhodnosti pro aplikaci v provozu? Zdokonalení metodiky testování tuhých maziv by mělo být předmětem dalšího výzkumu. Není jasné, zda vůbec lze metodiku předepsat tak, aby zaručovala absolutně platné a univerzálně srovnatelné výsledky. Lze však řešit problém, jak zajistit, aby mazivo ve spolupráci s ocelovými povrchy při zkoušce fungovalo v režimu, který je relevantní pro skutečný provoz.



Literatura

- [1] GALAS, R. *Friction Modification within Wheel-Rail Contact*. Brno, 2018. Disertační práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/70039>
- [2] BUCKLEY-JOHNSTONE, L. *Wheel/Rail Contact Tribology: Characterising Low Adhesion Mechanisms and Friction Management Products*. Sheffield, 2017. Disertační práce. University of Sheffield, Faculty of Engineering. Dostupné z: <https://etheses.whiterose.ac.uk/17291>
- [3] SCHARF, T. W., PRASAD, S. V. Solid lubricants: a review. *Journal of Materials Science*. 2013, **48**, 511–531. ISSN 1573-4803. DOI: 10.1007/s10853-012-7038-2
- [4] VAZIRISERESHK, M. R. et al. Solid Lubrication with MoS₂: A Review. *Lubricants*. 2019, **7**(7). ISSN 2075-4442. DOI: 10.3390/lubricants7070057
- [5] 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. *Tribology International*. 2021, **157**, 106886. ISSN 0301-679X. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.106886
- [6] FLETCHER, D. I., LEWIS, S. Creep curve measurement to support wear and adhesion modelling, using a continuously variable creep twin disc machine. *Wear*. 2013, **298–299**, 57–65. ISSN 0043-1648. DOI: 10.1016/j.wear.2012.11.065
- [7] CHEN, H. et al. Assessment of lubricant applied to wheel/rail interface in curves. *Wear*. 2014, **314**(1–2), 228–235. ISSN 0043-1648. DOI: 10.1016/j.wear.2013.12.006
- [8] EN 16028. *Railway applications – Wheel/rail friction management – Lubricants for trainborne and trackside applications*. Brussels: CEN, 2012.
- [9] prEN 15427-2-1. *Railway applications – Wheel/Rail friction management – Part 2-1: Properties and Characteristics – Flange lubricants*. Brussels: CEN, 2020.
- [10] LEWIS, R. et al. Towards a standard approach for the wear testing of wheel and rail materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2017, **231**(7). ISSN 2041-3017. DOI: 10.1177/0954409717700531
- [11] ZDRAVECKÁ, E., ONDÁČ, M., TKÁČOVÁ, J. The wear tribometer and digitalization of tribological tests data. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2013, **61**(2), 321–326. ISSN 1734-8412.
- [12] GALLARDO-HERNANDEZ, E. A., LEWIS, R., DWYER-JOYCE, R. S. Temperature in a twin-disc wheel/rail contact simulation. *Tribology International*. 2006, **39**(12), 1653–1663. ISSN 0301-679X. DOI: 10.1016/j.triboint.2006.01.028