

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Kontaktně-únavová zkouška materiálů v kontaktu kolo-kolejnice.

Autoři: prof. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.¹⁾
Ing. Petr Voltr, Ph.D.¹⁾
prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.¹⁾

¹⁾ Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera

Certifikovaná metodika je výstupem z řešení projektu TE01020038

„Centrum kompetence drážních vozidel“.

Pardubice, 7. 2015

Obsah

| | |
|--|----|
| 1. Úvod..... | 2 |
| 2. Cíl metodiky..... | 3 |
| 3. Pojmy a zkratky | 3 |
| 4. Popis metodiky..... | 4 |
| 4.1 Postup zkoušky..... | 5 |
| 4.2 Výstupy zkoušky | 5 |
| 5. Strukturní charakteristika ovlivněné vrstvy materiálu | 9 |
| 6. Novost postupů a zdůvodnění metodiky | 10 |
| 7. Popis uplatnění certifikované metodiky..... | 10 |
| 8. Ekonomické aspekty | 11 |
| 9. Seznam použité literatury: | 11 |
| 10. Seznam publikací, které předcházely metodice | 12 |

1. Úvod

Provozní odolnost železničních kol i součástí kolejového svršku (kolejnic, výhybek..) je z podstatné části ovlivněna jakostí materiálu především v povrchových vrstvách zatěžovaných profilů kol, resp. kolejnic. Provozní zatížení v systému kolo-kolejnice je komplexní a vede ke specifickému procesu poškozování kontaktních ploch; intenzivní dynamické zpevnění je zdrojem vzniku povrchových trhlin s rizikem rozvoje do průřezu kola (kolejnice).

Reálná odolnost materiálů kol a kolejnice v daném režimu zatěžování je proto i jedním z rozhodujících parametrů bezpečnosti provozu kol, kolejnic a částí výhybek. Související normy [1, 2, 3] limitují kvalitu jednotlivých materiálů na základě standardizovaných materiálových zkoušek; vedle chemického složení, mikročistoty, limitů oduhličení a dalších strukturních parametrů se jedná o standardní statické a dynamické mechanické parametry materiálu - mez kluzu, mez pevnosti, tažnost, tvrdost, rázovou houževnatost, lomovou houževnatost.

Tyto mechanické parametry nevyjadřují odolnost materiálu proti komplexnímu provoznímu namáhání. Exaktní zkoušky provozní odolnosti je nutno provádět při kontaktně-únavovém zatížení za spolupůsobení podélného a příčného skluzu, což jsou rozhodující složky degradačního procesu materiálu při provozním zatížení, při přesně definovaných geometrických poměrech zatěžující dvojice zkušebních těles.

Uvedené zkoušky materiálů, používaných pro výrobu kol i kolejnic, nejsou v současnosti řešeny žádným předpisem či normou.

2. Cíl metodiky

Cílem dále popsané metodiky je stanovení postupu zkoušek kontaktně – únavové odolnosti materiálů, používaných pro výrobu železničních kol a kolejnice (popř. výhybek). Metodika zahrnuje současné požadavky z provozní praxe na regulovatelnost zátěžových parametrů pro možnost simulace konkrétních provozních podmínek a rovněž požadavky na evidenci rozhodujících složek reálného provozního poškozování kontaktních ploch kol a kolejnic.

Metodika stanovuje způsob zatížení, přípravu vzorků testovaného materiálu, způsob upevnění zkušebních vzorků a způsob vyhodnocení zkoušky.

3. Pojmy, zkratky, použité přístroje

Pojmy a zkratky:

Jsou vysvětleny dále v textu této metodiky.

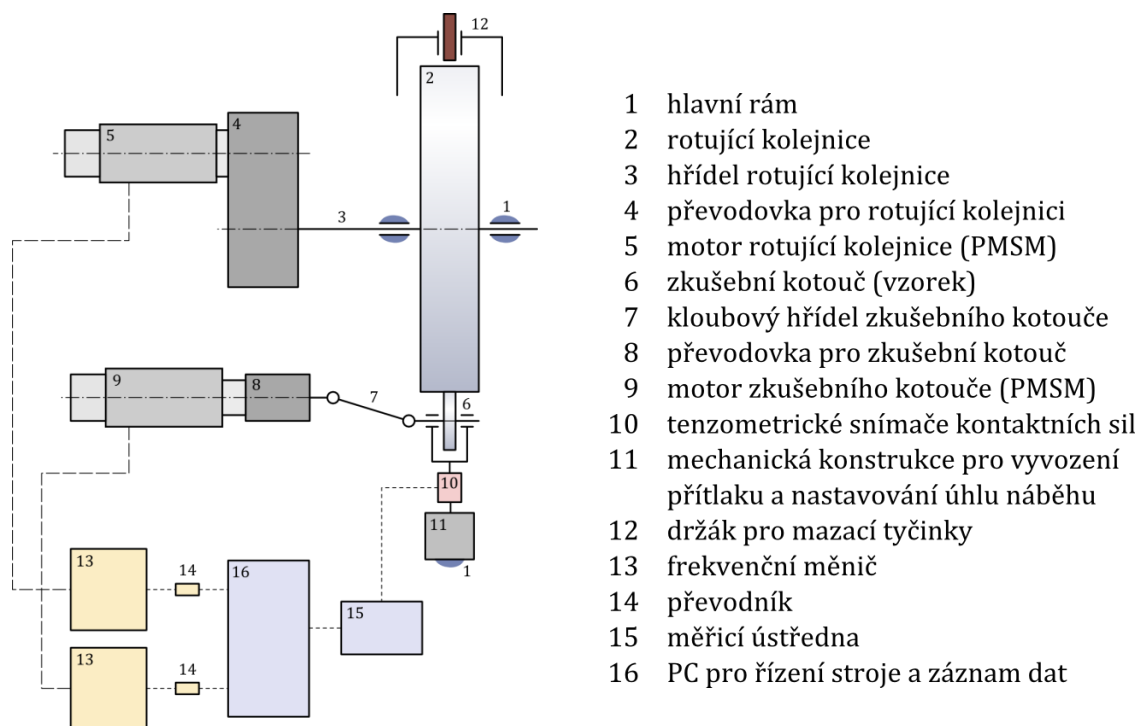
Použité přístroje:

rastrovací elektronový mikroskop TESCAN VEGA 5130SB, mikroanalyzátor EDX Bruker Quantanax 200, světelný metalografický mikroskop Neophot 32, obrazová analýza AnalySiS DOCU Olympus, tvrdoměr ZWICK ZHU 2.5/Z2.5, tvrdoměr Equotip 2, Stereomikroskop NIKON SMZ 800

4. Popis metodiky

Zkouška je založena na simulaci provozního kontaktně-únavového zatížení na speciálním zkušebním stavu (*obr.1*). Kontaktní dvojice je vytvořena kotoučem o průměru 920 mm a válcovým nosičem vzorků s průměrem 136 mm. Oba kotouče jsou poháněny servomotory s převodovými skříněmi, řízenými frekvenčními měniči se samostatnou plynulou regulací otáček. Zařízení umožňuje realizovat dlouhodobý proces odvalování s podélným i příčným skluzem. Přítlak (normálová síla) se nastavuje plynule mechanickým přítlačným zařízením. Podélný skluz je vyvozen samostatně řízeným elektromotorem s plynulou regulací brzdného výkonu, příčný skluz se nastavuje úhlem náběhu kotouče (nosiče vzorků).

Válcový nosič vzorků slouží pro upnutí sady vzorků, tj. umožňuje souběžné testování několika variant materiálů, popř. průběžné hodnocení stavu poškození v závislosti na době zatěžování.



Obr.1 Schéma zařízení pro kontaktně – únavové zkoušky (PMSM ... synchronní motor s permanentními magnety)

4.1 Postup zkoušky

Provedení zkoušky vyžaduje následující kroky:

- (1) Z testovaného materiálu jsou odebrány vzorky - válečky volitelného průměru 10-15mm, s výškou 20mm a osazeny do nosiče vzorků (zkušební kotouč-*obr.1*, pozice 6).
- (2) Následuje úprava kontaktní plochy nosiče vzorků. Kontaktní plocha nosiče má volitelnou geometrii - meridiánový profil se zaoblením $R=300\text{mm}$, případně válcový profil definované šířky v závislosti na požadovaném kontaktním tlaku.
- (3) Součástí postupu je propočítání požadovaného kontaktního tlaku na normálové zatížení v závislosti na použitém profilu nosiče vzorků, ve volitelném rozsahu kontaktního tlaku.
- (4) Nastavení podélného, respektive příčného skluzu podle požadavků a ve vztahu k definovanému kontaktnímu tlaku.
- (5) Renovace kontaktní plochy kotouče broušením povrchu pro odstranění příp. vlivu předchozích zkoušek na stav povrchu (ve smyslu povrchové tvrdosti, příp. poškození).
- (6) Zkouška zahrnuje průběžnou evidenci normálové a tečné zatěžující síly, s možností záznamu ve vybraných časových intervalech. Během zkoušky je ve zvolených intervalech zatěžování prováděna úprava přítláčné síly v závislosti na aktuální šířce kontaktní stopy pro eliminaci vlivu opotřebení povrchu na velikost kontaktního zatížení.

4.2 Výstupy zkoušky

Metodika zkoušky je navržena tak, aby umožňovala souběžné hodnocení maximálně 8-mi vzorků (variantně jednoho celistvého vzorku). Výstupem zkoušky jsou podle konkrétních požadavků zadavatele následující parametry kontaktně-únavové odezvy testovaného materiálu:

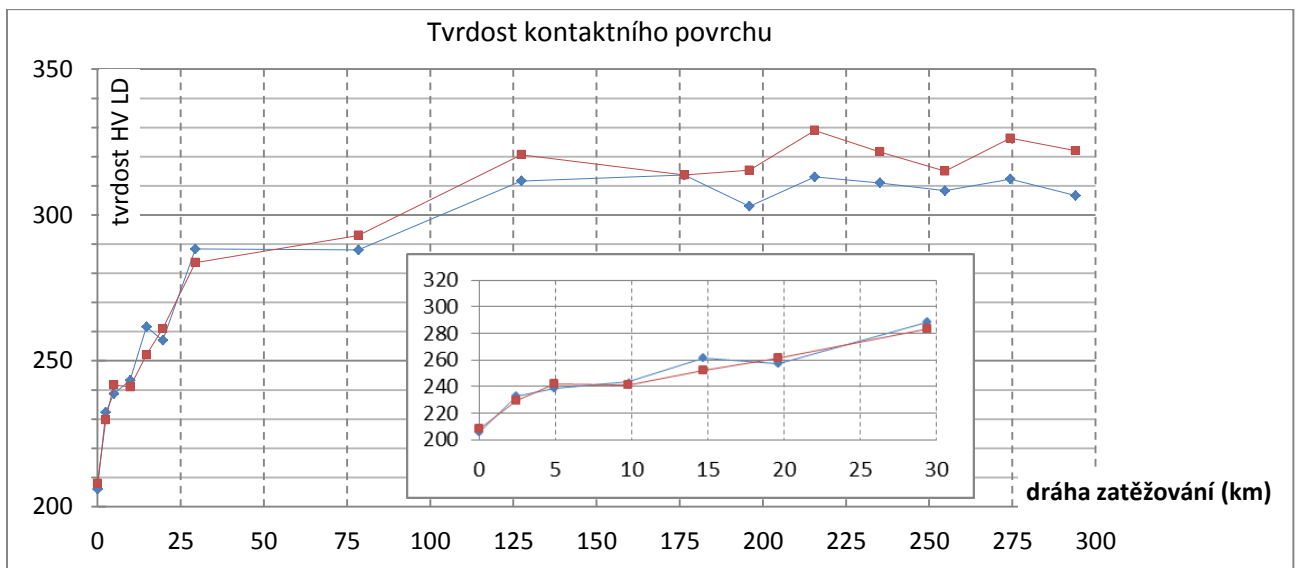
4.2.1 Povrchové zpevnění kontaktní vrstvy

Degradační proces v kontaktu kolo-kolejnice je principiálně spojen s procesem kumulativního dynamického zpevnění zatěžovaných vrstev; míra zpevnění je hodnotitelná změnou tvrdosti. Měření tvrdosti je prováděno ve třech krocích:

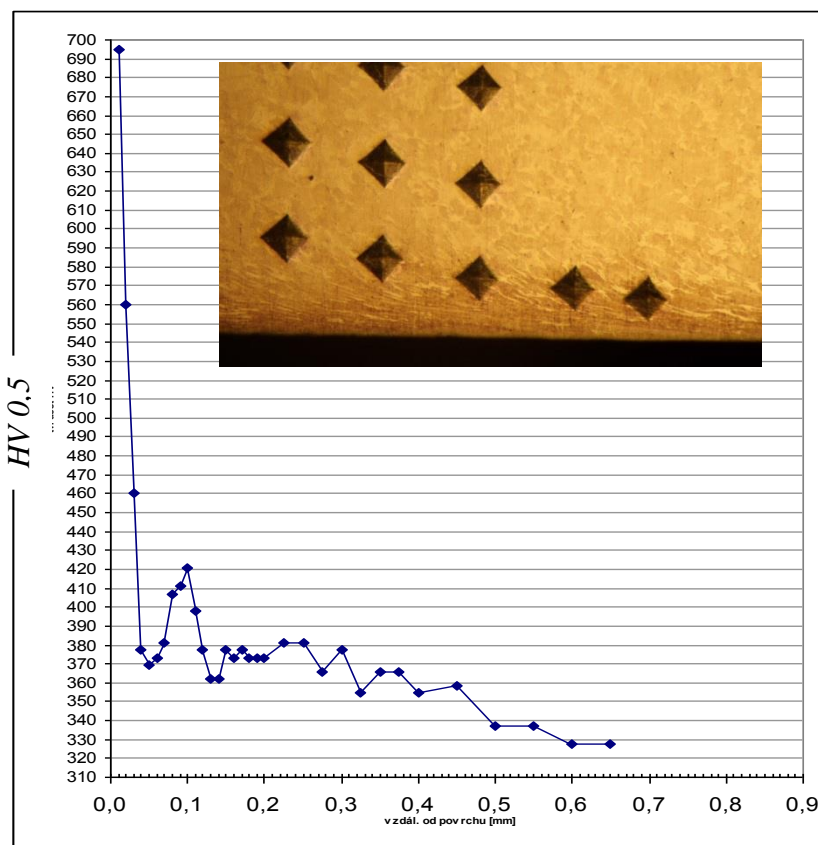
- (i) Vzhledem k tomu, že v reálném provozu jsou zejména pro kontrolu možného výskytu zakalených vrstev vlivem prokluzu používané přenosné tvrdoměry (nejčastěji založené na dynamické odrazové metodě), je během zkoušky prováděno měření povrchu dynamickou metodou (zařízení Equotip 2). To umožňuje přímé porovnání hodnot zpevnění, vyvolaných za definovaných podmínek zatěžování, s reálným provozním stavem povrchu kol (kolejnic). Pro každý vzorek a etapu zatěžování je provedeno minimálně 5 měření (příklad výstupu z měření viz *obr.2*).
- (ii) Pro přesné vyhodnocení podle souvisejících norem zahrnuje postup hodnocení statické měření povrchové tvrdosti, metodou podle Brinella nebo Vickerse. Pro

každý vzorek a etapu zatěžování je provedeno minimálně 5 měření ve vzdálenosti podle limitů odpovídající normy [4, 5].

- (iii) Z hlediska vlivu na bezpečnost provozu je podstatná hloubka dynamicky zpevněné vrstvy. Hloubka zpevnění je hodnocena na základě měření mikrotvrdomosti (HV0,1) až tvrdosti při nízkém zatížení (HV0,2 až HV1) v závislosti na typu zkoušeného materiálu. Měření je prováděno v řezech kolmo k zatěžovanému povrchu, v liniích pod definovaným úhlem k povrchu tak, aby měření zabezpečovalo dostatečný počet hodnot tvrdosti pro jednotlivé subvrstvy materiálu, ovlivněné kontaktním zatížením (příklad výstupu z měření viz *obr.3*).



Obr.2 Hodnocení změn povrchové tvrdosti dynamickou metodou měření tvrdosti



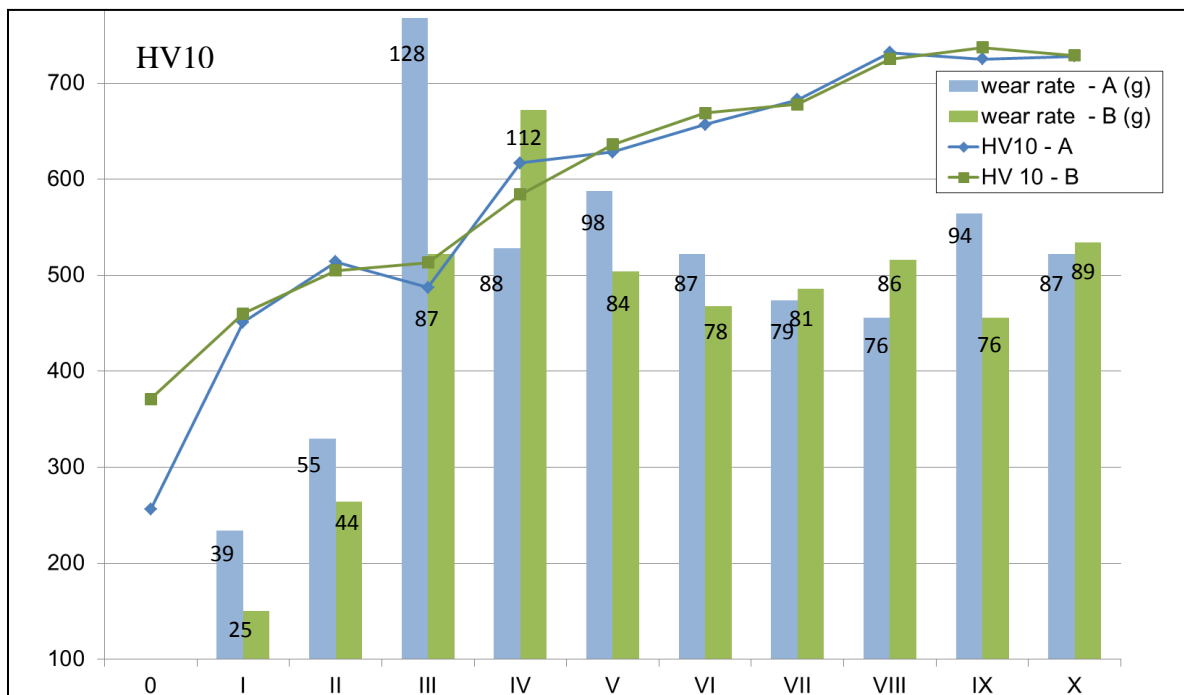
Obr.3 Hodnocení hloubky zpevnění

Souběžné měření tvrdosti uvedenými metodami v odpovídajících etapách zatěžování přináší informaci o časové závislosti intenzity a dosahu zpevnění, v hodnotách srovnatelných s provozním stavem, u kterého je obtížné stanovit historii zatěžování.

4.2.2 Hodnocení opotřebení

Materiál v kontaktu kolo-kolejnice podléhá kombinaci převážně adhezivně-abrazivního opotřebení. Intenzita opotřebení významně ovlivňuje životnost (opotřebením profilů kol/kolejnic) i bezpečnost provozu - opotřebení představuje přirozený proces obnovy povrchových vrstev v určitém stadiu změny výchozích mechanických parametrů, popř. již ve stadiu iniciace povrchových trhlin.

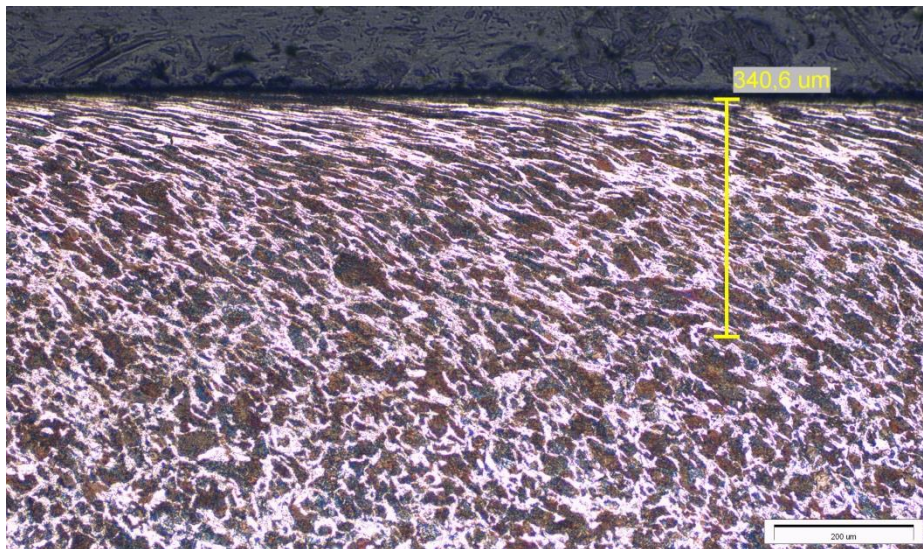
Opotřebení je v rámci zkoušky hodnoceno hmotnostními úbytky testovaných vzorků materiálu v definovaných etapách zatěžování (příklad výstupu z měření viz **obr.4**).



Obr.4 Hodnocení intenzity opotřebení ve srovnání s intenzitou zpevnění povrchu, měřenou statickou metodou (HV10) v odpovídajících etapách zatěžování vzorků A, B

4.2.3 Hodnocení hloubky plastické deformace

Dosah plastické deformace povrchu je měřen na metalografických výbrusech, vyhotovených souběžně s tangenciální složkou zatížení, kolmo na zatěžovaný povrch. Měření je prováděno obrazovou analýzou, při současné fotodokumentaci měřené hloubky (příklad výstupu z hodnocení viz **obr.5**).

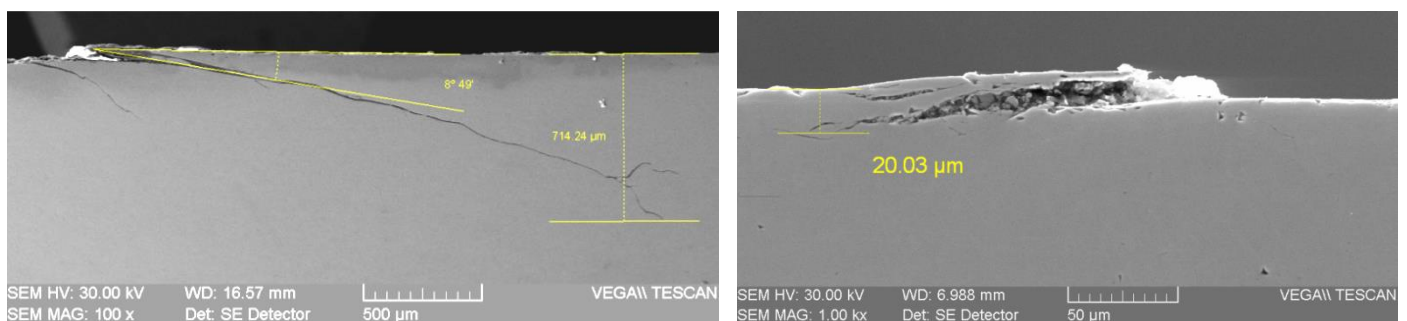


Obr.5 Hodnocení hloubky plastické deformace

4.2.4 Vyhodnocení povrchově iniciovaných vad

Provádí se měření hloubky povrchově iniciovaných trhlin; použitím metod obrazové analýzy se eviduje maximální dosah trhlin a úhel jejich sklonu od povrchu.

V případě, že trhliny přesáhnou dosah plastické deformace, měří se hloubka a změna orientace trhlin (příklad výstupu z měření viz **obr.6**).



Obr.6 Hodnocení intenzity a charakteru povrchově iniciovaných vad

4.2.5 Hodnocení vlivu mazání

Předložená metodika zahrnuje možnost přímého zkoušení vlivu mazání na kontaktně-únavové opotřebení, resp. tvorbu kontaktně-únavových vad. Součástí speciálního zkušebního zařízení je držák vzorků tuhého maziva, nanášeného na rotující povrch kotouče (*obr.1*).

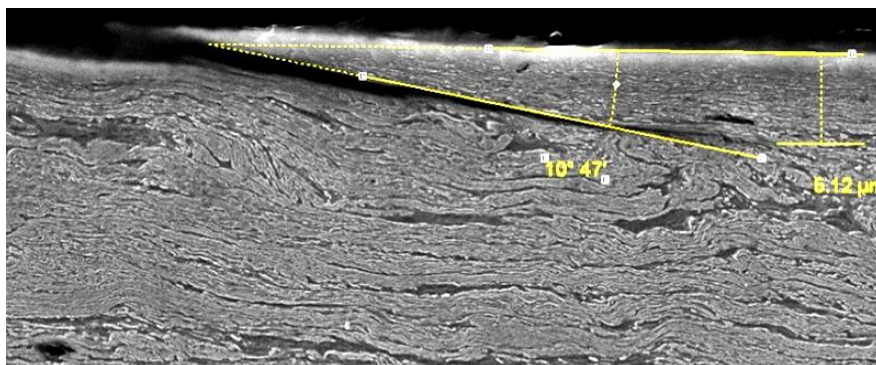
Hodnocení vlivu maziva je možné zahrnout do všech uvedených výstupů zkoušky směrem k odezvě zkoušeného materiálu kola/kolejnice, popř. je možné souběžně sledovat opotřebení maziva měřením hmotnostních úbytků.

5. Strukturní charakteristika ovlivněné vrstvy materiálu

Součástí metodiky hodnocení je fotodokumentace struktury ovlivněné vrstvy s vyhodnocením následujících efektů:

- vlivu mikrostruktury na orientaci plastického toku a na charakter rozvoje povrchově iniciovaných trhlin, tj. např. v souvislosti s výskytem proeutektoidního feritu u perlitických ocelí;
- vlivu výchozí metalurgické kvality na sledované parametry (zejména výskytu nečistot na iniciaci mikrotrhlin);
- výskytu lokalizované strukturní degradace (tvorbu tzv. "WEL" – „bíle leptatelných vrstev)

Příklad výstupu z hodnocení viz *obr.7*.



Obr.5 Hodnocení strukturní souvislosti iniciace a rozvoje trhlin

Součástí zkoušky je vyhodnocení výchozího stavu testovaného materiálu (metodami světelné a elektronové metalografie, chemických mikroanalýz).

V závislosti na požadavcích zadavatele zkoušky může být hodnoceno např. povrchové oduhličení hlav kolejnic, měřena mezilamelární vzdálenost perlitické oceli, velikost austenitického zrna, hodnocena mikročistota apod.

6. Novost postupů a zdůvodnění metodiky

Zavedená hodnocení odolnosti materiálů kol i kolejnic vycházejí ze standardních mechanických zkoušek materiálů, např. dle ČSN EN 13674-1, UIC 812-3 ze statické tahové zkoušky (předepsané hodnoty meze kluzu, meze pevnosti, tažnosti), rázové zkoušky v ohybu (hodnota rázové houževnatosti), tvrdosti, zkoušky lomové houževnatosti. Jednotlivé jakostní třídy materiálů železničních kol a kolejnic jsou odstupňovány podle statické pevnosti, v závislosti zejména na obsahu uhlíku.

Žádná z normativně předepsaných a popsanych zkoušek nezahrnuje zkoušení odolnosti materiálu při kontaktně-únavovému zatěžování, tj. proti reálnému procesu zatěžování kontaktních vrstev v provozu kol, resp. kolejnic.

Předložená metodika představuje nový způsob zkoušení a vyhodnocení materiálů v kontaktní dvojici kolo-kolejnice z hlediska vstupů (řízených parametrů zatěžování) i výstupů zkoušky. Metodika umožňuje řízení a měření zatížení i relativního skluzu v kontaktu, což jsou rozhodující parametry provozního zatížení.

Výstupy zkoušky dle nové metodiky představují základní parametry reálné odezvy materiálů na provozní zatížení, tj. tvorbu kontaktně únavových vad a opotřebení, a to při kompletní informaci o vlivu struktury a výchozí kvality testovaného materiálu.

7. Popis uplatnění certifikované metodiky

Předložená metodika je určena pro zkoušení variantních materiálů nebo jejich technologických úprav před zavedením do provozu. V současnosti jsou zvyšující se nároky na únosnost aplikovaných materiálů spojeny se zvyšováním přepravních zátěží i provozních rychlostí. Aktuální situace tak vede především k vývoji a aplikaci nových technologií pro zvýšení provozní odolnosti kontaktních ploch kol, resp. kolejnic – jedná se o nové postupy tepelného zpracování, v některých případech ve spojení s mikrolegováním.

Druhou, stejně významnou oblastí pro uplatnění předložené metodiky zkoušení, jsou problémy spojené s kontrolou kvality materiálů. V současnosti je podstatně rozšířený sortiment výrobců, resp. dodavatelů materiálů i finálních výrobků, což přináší zvýšenou potřebu kontroly kvality nejenom podle již zavedených kritérií, která často nedostatečným způsobem hodnotí odolnost materiálu v provozních podmínkách.

Další uplatnění je spojeno s potřebou testování dosažených parametrů kontaktně-únavové odolnosti profilů kolejnic v částech tratě, kde je nutno aplikovat svarové spoje. Reálně se jedná o velice široké spektrum používaných technologií svařování (odporové, aluminotermické, navařování opotřebovaných částí profilů kolejnice nebo výhybek apod.).

8. Ekonomické aspekty

Náklady na zkoušení materiálů podle předložené metodiky lze srovnávat pouze s dlouhodobými zkouškami únavové odolnosti. Tyto náklady jsou tvořeny s převážně částí energetickými nároky pro zkoušku. Z tohoto pohledu jsou u předložené metodiky náklady podstatně nižší, což je dáno principem zkoušky, kdy mezní stav v kontaktu kolo-kolejnice představuje proces kumulace plasticity (nizkocyklové únavy). Náklady na přípravu vzorků a jednotlivá hodnocení (měření tvrdosti, metalografické rozbor) odpovídají standardním nákladům na konkrétní analýzu.

Podstatná úspora při zavedení zkoušky dle předložené metodiky spočívá v tom, že její výstupy snižují nároky na provozní zkoušky. Ekonomický přínos této metodiky je zejména v zúžení provozně testovaných variant materiálů, resp. jejich technologických úprav, při zavádění do provozu. Předložená metodika zkoušky při zvolených stejných parametrech zatěžování umožní korektní výběr optimální varianty finální provozní zkoušky, kdy realizace provozní zkoušky je velice ekonomicky náročná jak z hlediska výroby prototypů, tak nutností výluky kupř. při instalaci testovaného dílu kolejnice do koleje.

9. Seznam použité literatury:

1. ČSN EN 13674-1 Železniční aplikace – Kolej – Kolejnice - Část 1, září 2011.
2. ČSN EN 13260 Železniční aplikace – Dvojkolí a podvozky – Dvojkolí – Požadavky na výrobky, říjen 2009.
3. UIC Code 812 -3 -0; Technical Specification for the Supply of Rolled Solid (Monobloc) Wheels of Non-Alloy Steel for Traction and Rolling Stock.
4. ČSN EN ISO 6507 - Kovové materiály - Zkouška tvrdosti dle Vickerse
5. ČSN EN ISO 6506 - Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella

10. Seznam publikací, které předcházely metodice

1. Schmidová, E., Švanda, P., Zbořil, J., Konečný, M., Tomanovič, J., Hylský, J., Kyncl, Z.: Výzkum v oblasti vývoje nových materiálů kol se zvýšenou odolností proti zjištěným degradačním procesům. Zpráva č. A12-01/2009 Výzkumné centrum kolejových vozidel, Pardubice, 2010.
2. Schmidová, E., Janíček, P., Švanda, P.: Výzkumu materiálů železničních kol, konkrétně příčiny poškození jízdní plochy kol u el. jednotky 471. Zpráva č. A1-U1a-01/2010. Výzkumné centrum kolejových vozidel, Pardubice, 2010.
3. Schmidová, E., Zbořil, J., Mohyla, P., Konečný, M.: The Differences of the Rail Steels Degradation. *Perner's Contacts*, Issue 2, Volume VI, ISSN: 1801-674X, Pardubice, 2011
4. Zbořil, J.: Degradací proces železniční výhybky, dizertační práce, Univerzita Pardubice, 2011
5. Schmidová, E., Voltr, P., Hanus, P.: Experimentální analýzy bainitické oceli pro kontaktně-únavové zatížení, etapa II; zpráva č. 2-2014/DFJP, Centrum kompetence drážních vozidel, Projekt TAČR, TE 01020038, Pardubice, 2013
6. Schmidová, E.: Srovnávací test vlivu tuhého maziva na opotřebení materiálu v kontaktu kolo-kolejnice, technická zpráva č. VVCD 67/2014, Výukové a výzkumné centrum v dopravě, Univerzita Pardubice, 2014
7. Schmidová, E., Voltr, P.: Comparative laboratory tests of solid friction modifiers, Report No. 76-14-1, MBM Industry & Rail Tech GmbH A-3002 Purkersdorf, Educational and Research Center in Transport, University of Pardubice, 2014
8. Schmidova Eva, Culek Bohumil, Kaya Utku: Effect of Rolling Contact Fatigue on the Elastic-Plastic Response of Hadfield steel, Metal 2015, Brno, 2015