

K PROBLEMATICE PLASTICKÝCH PŘETVOŘENÍ POVRCHOVÝCH VRSTEV ŽELEZNIČNÍHO KOLA

Libor BENEŠ, Eva SCHMIDOVÁ, Rudolf KALOČ

Katedra dopravních prostředků,
Katedra provozní spolehlivosti, diagnostiky a mechaniky v dopravě

Úvod - souhrnná charakteristika problému

Trvající problémy poškozování kontaktních povrchů železničních kol vyžadují rozšíření výzkumných prací, jejichž zaměření bude obsahovat některé nové přístupy k problematice mezních stavů prostředí, které je pojížděním všeobecně zatěžovaného kola vytvořeno v oblasti povrchových vrstev jízdní plochy. Navrhovaný výzkumný program především vychází z prokázané skutečnosti, že specifické problémy životnosti železničního kola vycházejí z degradačních dějů, způsobených komplikovaných zatěžováním v oblasti kontaktu, **které je specifické u kol brzděných kotoučovými brzdami**. Tento systém brzdění je v současné době důsledně aplikován zejména u souprav osobních vlaků a jeví se tendence jeho rozšiřování i na vozy souprav nákladních. Specifičnost problematiky takto brzděných kol byla bezpečně prokázána výskytem pokračujících poškození povrchů kol při srovnání s koly, jež jsou brzděna klasickými brzdami zdržovými a lze ji především přisuzovat diametrálně rozdílným tepelným režimům v oblasti kontaktu. Tepelné efekty u kol, která nejsou v kontaktu s brzdovými špalky, mají charakter vyžadující pohledy z hlediska mikroskopického šíření tepla, což nevylučuje jeho vlnové šíření v tenké povrchové vrstvě se všemi možnými důsledky vzhledem k mezním stavům [1, 2].

V práci [3] i v dalších, zde citovaných dalších literárních zdrojích, bylo poukázáno na vznikající mikrostrukturní změny kombinované s mechanickým poškozováním kontaktních povrchů, přičemž tloušťka ovlivněných vrstev byla předpokládána rozměrem řádu 10^{-4} m. To např. koresponduje s výsledky analýz, objevujících doposud neobjasněné tvrdé struktury, označované jako tzv. White Etching Layers (WEL), viz např. [4, 5].

Dalším poznatkem, který vyplývá ze závěrů provedených výzkumů je skutečnost, že veškeré anomálie se lokalizují v povrchové vrstvě, která se stává potenciální oblastí, z níž se mohou šířit defekty do základního a neovlivněného materiálu kola. Bude zde vycházeno z pracovní hypotézy, že veškeré děje v povrchové oblasti mají dynamický charakter a odlišují se od dějů, vznikajících v základním materiálu. Jinak řečeno, **kontaktními účinky může být vytvořena výrazná materiálová diskontinuita.**

Jedním ze základních problémů je podrobnější studium procesu zplastizování povrchových vrstev. Záměrem je teoretické a experimentální studium. Z hlediska metalografických experimentů jde především výzkum stupně homogennosti plastických deformací, jejího vzniku vlivem kontaktního zatížení a důsledků, které plynou z další exploatace vznikající pokračujícím odvalováním zatíženého kola.

Nedostatečná pozornost byla doposud věnována kmitavým pohybům částic povrchové vrstvy. Z některých publikovaných prací [6, 7] plyne, že charakter pohybu povrchových částic, které jsou evokovány skluzovými ději, může být považován za samobuzené kmitání relaxačního typu, což může mít za následek vznik rasantních dynamických sil v tečném směru, jež mají rázový charakter. Adhezní valení kola zřejmě vede k tribologickým efektům dynamického charakteru.

Problém plastizace je také sledován na základě teoretických studií, které jsou založeny na numerickém modelování. Závažné studie, postavené na bilineární materiálové charakteristice, jsou uvedeny např. v [8, 9]. Základní orientaci o energetické bilanci plastických deformací lze vytvořit studiem energetické bilance kontaktu na základě fenomenologické plasticity. Experimentálně budou tyto procesy, jejichž důsledkem je výrazné zpevnění povrchové vrstvy materiálu, studovány na stávajícím zkušebním zařízení, jež je budováno v laboratořích DFJP, Univerzity Pardubice.

Především je zamýšlena generace plastických deformací a následných zpevnění povrchových vrstev zvolených vzorků materiálu v podmínkách blízkých skutečnému provozu. Ovlivnění povrchových vrstev vzorků materiálů v různých stádiích zatěžování bude metodami metalografických analýz porovnáváno s výsledky, získaných na vzorcích materiálů, vyňatých z provozovaných železničních kol. Touto cestou bude hledána metodika mapování historie zatížení jízdní plochy, jejíž znalost je nezbytná pro vyslovení nových představ o mezních stavech v oblasti kontaktu. Jako sekundární výsledky jsou očekávány původní poznatky, na jejichž základě bude možno přispět k zdokonalení poznání mechanismů adhezního přenosu.

Z materiálového hlediska jsou očekávány poznatky k procesu optimalizace výběru vhodného konstrukčního materiálu kola, vzhledem ke konstantnímu standardu materiálu

kolejnice. Vnímáme-li skutečnost, že nevratný proces změn vlastností povrchových vrstev nelze popsat jednoznačnými závislostmi mezi napětím a deformací, nelze bez výhrad akceptovat popis mezních stavů na základě klasických teorií plasticity, u kterých schází respektování vlivu historie zatížení. Dalším problémem je skutečnost, že materiálová odezva v procesu zpevňování může vykazovat neizotropičnost. Podstatnost tohoto fyzikálního jevu bude, v souvislosti se sledovatelnou historií zatížení, studována na výše uvedeném zařízení experimentálně. Pro kontaktní problémy je typické, že deformační gradienty jsou velmi vysoké. Lze tedy přijmout předpoklad, že přírůstky plastických deformací v tomto „úzkém“ sektoru objemu mohou být předběžně hodnoceny pomocí invariant tenzorů napětí a deformace.

Strukturní charakteristiky na základě provedených metalografických analýz

Studium vzniku plastické zóny a souvislosti s degradačním mechanismem povrchových vrstev kontaktních ploch v dané etapě prací lze opřít o rozbor oblastí, kde dochází k typickým vizuálním projevům kontaktně - únavového opotřebení kol.

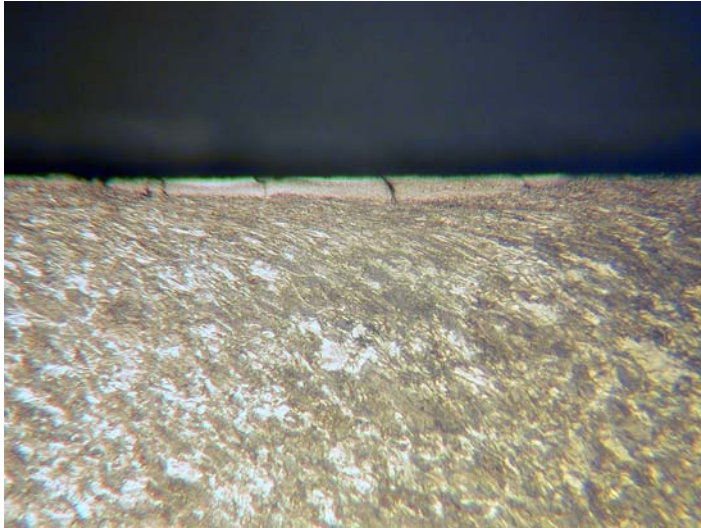
Vedle vydrolování materiálu, které zasahovalo značnou část pojezdové plochy, bylo na studovaném segmentu celistvého kola pozorováno poškození formou pásma drobných trhlinek, ve sklonu cca 73° k ose kola. Síť trhlinek byla zjištěna v blízkosti radiusu na přechodu do okolku v různé intenzitě po celém obvodu dodané části věnce. V této oblasti byla provedena samostatná sada materiálových analýz, zaměřených na studium mechanismu poškozování a případného vlivu jakosti oceli.

Na analyzovaných výbrusech s radiální i tangenciální orientací byly metalograficky pozorovány vrstvy s rozdílnou strukturní charakteristikou. Nejpodstatnější strukturní heterogenitu představují oblasti s výrazným kontrastem, dokumentovány na **obr. 1**. Tyto mikroskopické objemy pod kontaktní plochou odpovídají svým tvarem charakteru tepelného ovlivnění v kontaktu kolo-kolejnice, tj. šíření tepla do objemu kola. Oproti výsledkům šetření okolností vzniku povrchových vydrolenin byla v souvislosti s tvorbou pásma jemných trhlin zjištěna řada podstatných rozdílů; mechanismus degradace jako výsledek spolupůsobení jednotlivých vlivů je odlišný.

Především je nutno uvést, že na rozdíl od částí profilu, kde martensitická transformace vedla k vydrolování povrchových vrstev, zde nebylo možno přímo pozorovat typickou strukturu vysokouhlíkové formy martensitu v kontrastních mikroskopických vrstvách. Potlačení morfologických znaků martensitu lze přičíst na konto spolupůsobení vysokého tlaku v bezprostředních povrchových vrstvách, přičemž v těchto částech kontaktních ploch, dle provedených pozorování, podléhají tepelnému působení pouze objemy tloušťky cca 0,1mm.

Tento předpoklad podporuje pozorované intenzivní plastické přetvoření okolních oblastí. Mikroobjemy po tepelném ovlivněním jsou součástí vrstev ve stavu výrazného deformačního zpevnění. Vrstvy materiálu, podléhající plastickému přetvoření, mají výrazně usměrněnou mikrostrukturu v závislosti na orientaci složek provozního zatížení. Tato

orientace podstatnou mírou modifikuje charakter poškození vrstev (v závislosti na typu vady se uplatňuje v etapě iniciace nebo rozvoje trhlin); dále je v jednotlivých souvislostech diskutována jako tzv. „plastický tok“ oceli.



Obr. 1 Radiální řez, porušování kontrastních vrstev, zv. 250x.

Fig. 1 Radial section, damage of contrast layers, magn. 250x.

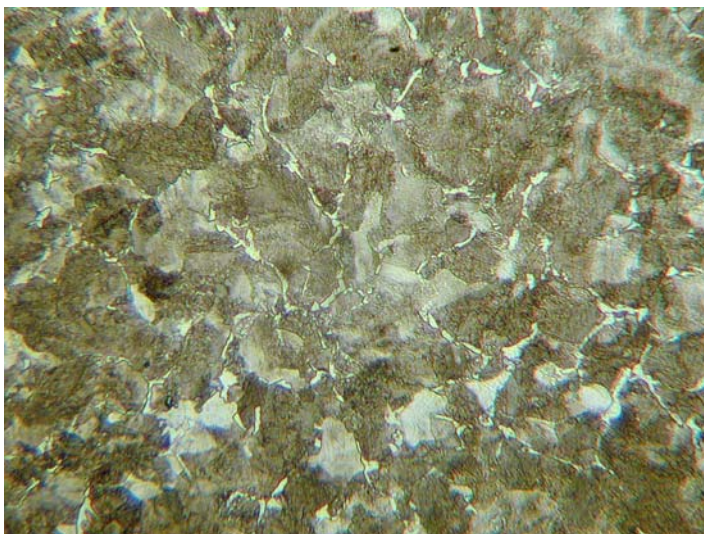
Dalším výrazným specifickým takto poškozených vrstev je charakter tepelného ovlivnění. Vydrolování kontaktních ploch je spojeno s ohřevem, který vede k relativně rozsáhlé transformaci na martensit ve spojení se vznikem typických přechodových pásem po částečné austenitizaci. Oproti tomu v oblasti tvorby drobných souběžných trhlinek vzniká ostré rozhraní na přechodu do okolních vrstev bez známek tvorby charakteristických „přechodových“ strukturních složek - jako bainit, troostit apod. Výšku teplotního ovlivnění není možno stanovit, nelze ani jednoznačně uvést, zdali zde došlo k fázové transformaci, i když ostrý metalografický kontrast, vykreslující tyto mikroobjemy z okolních vrstev, vede k předpokladu plné austenitizace při ohřevu. Tento předpoklad podporuje skutečnost, že místně byly pozorovány známky opakovaného teplotního ovlivnění.

Jednotlivé subvrstvy, odlišitelné metalograficky jako pásma s odlišnou strukturní charakteristikou, byly studovány podrobněji s rozlišením na úrovni světelné a elektronové mikroskopie. Studium bylo s ohledem na výše uvedené výsledky zaměřeno především na strukturní změny pod kontaktní plochou a tedy okolnosti vzniku mikrotrhlin. Mikrostruktura mimo dosah mechanického, popř. teplotního vlivu je pro srovnání dokumentována na **obr. 2**, konkrétně v hloubce 20mm pod kontaktní plochou. Rozsah plastické deformace v oblasti přechodu do okolku je zobrazen na **obr. 3**.



Obr. 2 Hloubka deformační zóny na přechodu do okolku, zv. 200x.

Fig. 2 Depth of deformational zone in the tread radius, magn. 200x.



Obr.3 Struktura neovlivněného materiálu - příčný řez, zv. 500x.

Fig.3 Microstructure of unaffected material - cross section, magn. 500x.

Z rozboru struktury v bezprostředním okolí trhlin vyplývá, že postup poškození je závislý nejen na orientaci, ale i na intenzitě deformačního přetvoření vrstev. Další zatěžování oblasti, již poškozené iniciovanou trhlinou, vede k lokalizaci plastické deformace oddělených vrstev. Tomu odpovídá lokální nárůst deformačního zpevnění a pokles plasticity povrchových vrstev. S rostoucí vzdáleností od povrchu klesá intenzita

plastické deformace. To souběžně způsobuje pokles deformačního zpevnění (celkově i strukturně volného feritu), ztrátu preferenční orientace trhlín na proeutektoidní fázi, jakož i dezorientaci trhlín, které jsou v podpovrchové vrstvě vedeny směrem plastického toku.

Dílčí analytická bilance procesu plastizace

Existence plastických deformací v povrchových vrstvách kontaktní oblasti je zřejmý zákonitým jevem [10]. Míra a rozsah těchto deformací může představovat rozhodující faktor v souvislosti s všeobecnou degradací kontaktních povrchů, která z hlediska teorií plasticity je vesměs označována termínem mezní stav. Dále naznačená dílčí analytická úvaha má především poskytnout inspiraci pro inovaci softwarových produktů pro řešení stavů napjatosti v kontaktní oblasti [11]. Zdůrazněme, že na základě fenomenologické plasticity nelze očekávat objasnění důsledků deformačních stavů v kontaktní oblasti, jelikož ve výpočtech doposud neexistují prostředky explicitního podchycení skutečné struktury skutečného materiálu. Dle názorů autorů je však nutno usilovat o formulaci kritéria kritické kumulace plastické deformace, které zřejmě může být definováno jen jako kritérium formální, jak je tomu ostatně u všech klasických teorií mezních stavů.

Vznik plastických deformací je způsoben procesem tváření a představuje trvalou změnu příslušných objemů. Energie N_E k tomu potřebná je daná součinem intenzity napětí S_N a intenzity deformace S_D , což podle teorie plasticity představuje prostředek k popisu existující nestejnorodosti deformačních stavů adekvátních objemů V :

$$N_E = \iiint_V S_N S_D = \frac{3}{1 + \mu} \iiint_V \sqrt{J_{2N}} \sqrt{J_{2D}} dV \quad (1)$$

V souladu se zavedením druhých invariant deviatorů napětí a deformace (J_{2N} , J_{2D}) vyjadřujících dominantnost tvarových změn, nutno pro Poissonovo číslo položit $\mu = 0,5$, takže hledané energetické kritérium má tvar:

$$N_E = 2 \iiint_V \sqrt{J_{2N}} \sqrt{J_{2D}} dV \quad (2)$$

S ohledem na dynamičnost dějů v kontaktní oblasti je potřebné stanovit výkonové kritérium mezního stavu, které vedle stavu napjatosti zřejmě souvisí s rychlostí deformačních procesů. V podstatě jde o popis výkonu vnitřních sil N_F :

$$N_F = \iiint_V S_N S_R dV \quad (3)$$

kde intenzita rychlosti deformace S_R je definovaná složkami normálových (c_{xyz}) a smykových (u_{xyz}) deformačních rychlostí:

$$S_R = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{(c_x - c_y)^2 + (c_y - c_z)^2 + (c_z - c_x)^2 + 1,5(u_{xy}^2 + u_{yz}^2 + u_{zx}^2)}$$

Mez kluzu σ_K materiálu zavedeme pomocí tvaru intenzity napětí S_N pro jednoosý stav napjatosti:

$$S_N = \frac{\sigma_K}{\sqrt{3}} = 0,577\sigma_K$$

Za předpokladu stálé hodnoty meze kluzu v oblasti tvářeného objemu můžeme vztah (3) přepsat na tvar:

$$N_F = 0,577\sigma_K \iiint_V S_R dV$$

Součin $0,577\sigma_K$ představuje míru deformačního odporu proti plastické deformaci. Vyhodnocení integrálu podle posledně uvedené rovnice nutně vyžaduje numerické řešení použitím vhodného software. Pro získání základní orientace o jeho hodnotě naznačíme přibližné řešení zavedením čísla $k = c_y / c_z$ vyjadřujícího poměr deformačních rychlostí ve směru tečného příčného šíření a ve směru normály. Odhadneme-li tento poměr číslem $k = 0,9$ a zavedeme-li pomocný bezrozměrný faktor m :

$$m = 3,64 \frac{C_z^2}{u_{xy}^2 + u_{yz}^2 + u_{zx}^2},$$

obdržíme pro výkon vnitřních sil rovnici:

$$N_F = 0,637\sigma_K (I_1 + mI_2) \quad (4)$$

kde

$$I_1 = \iiint_V c_z dV$$

$$I_2 = \iiint_V \sqrt{u_{xy}^2 + u_{yz}^2 + u_{zx}^2} dV$$

Pro vyčíslení výše uvedených integrálů musíme stanovit složky deformačních rychlostí toku kovu ve směrech souřadnic \mathbf{x} , \mathbf{y} , \mathbf{z} . Dominantní bude zřejmě deformační rychlost c_z ve směru normály \mathbf{z} (pěchování materiálu), která je definovaná vztahem (5). Rychlost v_z deformace ve směru normály \mathbf{z} přibližně odpovídá rovnici, vyjadřující závislost poloměru kola R , jeho úhlové rychlosti ω , souřadnice z určující polohu plasticky deformovaného elementu v radiálním směru okamžité tloušťky zplastizované vrstvy h a úhlu α , kterým je definována poloha objemového elementu vzhledem k normále \mathbf{z} .

$$c_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (5)$$

$$v_z \doteq R \omega \frac{z}{h} \operatorname{tg} \alpha$$

Např. pro poloměr kola $R=0,46\text{m}$, $z/h = 0,8$. a rychlost jízdy 100 km/hod , $\alpha = 3^\circ$, $v_z=1,15\text{ ms}^{-1}$.

Rychlosti smykových deformací jsou definovány derivacemi:

$$u_{xy} = \frac{\partial V_x}{\partial y} ; u_{yz} = \frac{\partial V_y}{\partial z} ; u_{zx} = \frac{\partial V_z}{\partial z}$$

Diskuse poznatků

Studium tvorby souběžných povrchových trhlin na kontaktní ploše vedlo k několika poznatkům na konto mechanismu vzniku a dalšího rozvoje kontaktně-únavového porušení.

V rámci provedených analýz byl zjištěn rozdíl od tvorby typických vydrolenin spojený především s **intenzivním plastickým přetvořením povrchových vrstev**. Vliv tepla, vyvinutého v kontaktní dvojici kolo-kolejnice je omezen na mikroskopické objemy pod kontaktní plochou, kde nevede ke vzniku typické zákalné struktury. Struktura těchto izolovaných objemů je amorfní, s obtížně pozorovatelným zastoupením karbidické fáze - její přítomnost prakticky vymezuje přítomnost martensitu. Byla identifikována povrchová vrstva o tloušťce cca $20\mu\text{m}$, kde intenzivní plastické přetvoření vede k úplné ztrátě původní strukturní morfologie. V uvedené mikrovrstvě dochází vlivem zpevnění k limitnímu poklesu plasticity oceli a k následné dekohezi vrstev.

Plastický tok pod zatěžovanou plochou vede k deformačnímu zpevnění, takto tvořícímu povrchovou vrstvu s modifikovanou mikrostrukturou a zvýšenou tvrdostí. Stříhový tok se rozvíjí a přitom rezultuje z přírůstků deformačních cyklů. Degradace povrchu je zahájena při vyčerpání tažnosti uvnitř deformačně zpevněné vrstvy, kdy se objeví trhliny, které dále absorbují deformační energii. Byl jednoznačně prokázán podíl mikroplastické deformace na konečné dekohezi oceli, s různým podílem křehkého mechanismu lomu. V mikroobjemech iniciace poškození mechanismus povrchové degradace začíná etapou vyčerpání plasticity oceli. Rozsah deformačního cyklu je funkcí kontaktních podmínek, a zvyšuje se s normálovou a tangenciální složkou zatížení. Trhliny, iniciované na kontaktním povrchu, následují směr deformace mikrostruktury materiálu. Po vyčerpání plastické deformace nastává proces delaminace deformovaných vrstev.

Pro perlitickou strukturu je podle některých autorů specifické, že plastická deformace na kontaktním povrchu vede k „přestavbě“ struktury. Cementitické lamely jsou usměřňovány paralelně k povrchu a zvyšují tak plošný podíl cementitu na kontaktní ploše. To vysvětluje vyšší abrazivní odolnost perlitické struktury v porovnání se strukturou martensitickou a bainitickou, které neadaptují strukturu touto cestou. V této souvislosti je nutno uvést, že v daném rozsahu prací nebyl zmíněný efekt pozorován. V kontrastu s citovanými názory, u materiálu železničního kola ozn. jako R8T, dochází k „nesměrovému drcení“ původní lamelární morfologie cementitu.

Teplotní vliv - v izolovaných mikroobjemech - souvisí podle provedených analýz s rozdíly ve výchozí orientaci povrchově iniciovaných trhlin. V částech kontaktní plochy, kde lze předpokládat teplotní spolupůsobení, dochází k plnému potlačení původní strukturní orientace.

Uvedený mechanismus vede ke vzniku oblastí se zvýšenou hustotou dislokací, postupně přes „drcení“ cementitických lamel, až limitně k úplné ztrátě původní morfologie struktury, vzniká nanokrystalická soustava α -železa a uhlíku. Extrémní nárůst zpevnění a odpovídajícího poklesu houževnatosti vede k iniciaci mikroskopických příčných - radiálních trhlin. Radiální rozvoj je omezen na mikroobjemy „bílých vrstev“ (WEL); přestupem trhlin do hloubky materiálu se mění orientace v souladu s plastickým tokem pod povrchem věnce kola. Ve zbývajících částech profilu vede limitní dynamické zpevnění k iniciaci trhlin ve směru deformačně modifikované struktury dané subvrstvy. V obou případech spočívá mechanismus degradace v kritické kumulaci plastické deformace, vedoucí k limitující změně dynamické únosnosti povrchových vrstev.

Hodnocení povrchového zpevnění potvrdilo metalograficky stanovené závislosti; kvantitativně upřesnily dosah i gradient plastického přetvoření. Z hlediska predikce dalšího rozvoje poškození je podstatné, že pozorovaná hloubka poškození (naměřeno max. 0,2mm) nepřesahuje rozsah plasticky modifikované vrstvy (v tloušťce 0,2 až 0,3mm). Postup trhlin je v rámci této vrstvy řízen orientací plastického toku, který omezuje případný radiální rozvoj vady. Další šíření tedy závisí na poměru rychlost postupu trhliny versus. radiálního rozvoje plastické deformace (popř. vliv povrchového úbytku materiálu, průběžně odstraňovaného abrazí). Překročení poškození přes plasticky modifikovanou vrstvu dává předpoklad pro rozsáhlejší větvení. S tím souvisí jednak postupné odlupování povrchových vrstev, oddělených souběžně orientovanými trhlinami (typický projev kontaktně-únavového poškození v pokročilém stádiu) a jednak možnost příčného větvení, které ale v rozsahu poškození dodaného materiálu nebylo pozorováno.

Působící degradační mechanismus je do určité míry závislý na jakosti oceli. Ve smyslu vlivu strukturních parametrů se uplatňuje především obsah proeutektoidní fáze. Rozvoj trhlin v rámci vrstvy po plastickém přetvoření probíhá preferenčně přes mikroobjemy strukturně volného feritu. Intenzita a charakter znečištění má významnější vliv především v etapě iniciace kontaktně-únavového poškození; vzhledem k frekvenci výskytu se uplatňují zejména sulfidické vměstky. Iniciační vliv inkluzí působí v aktuální hloubce plastického přetvoření materiálu. Vzhledem k tomu, že iniciaci mikrotrhlin předchází intenzivní plastická deformace matrice, dalším cyklickým zatížením dochází k rozvoji trhlin ve směru plastického toku oceli. Postupem magistrálních trhlin (prakticky souběžně s kontaktní plochou) je izolována povrchová část objemu oceli; dochází k zamezení rozvoje plastické deformace do hloubky a tedy k urychlené ztrátě tažnosti nejvíce zatížených vrstev. Proces vede vedle k limitním změnám mechanických vlastností a současně k zvýšení vlivu vyloučených vměstků v podpovrchové oblasti.

Závěr

Pro silové účinky v kontaktní oblasti adhezně poháněného železničního kola jsou charakteristické značné normálové a tečné síly. Zejména tečné síly mají, v důsledku změn vlastností povrchových vrstev jízdní plochy kola, značně proměnlivý charakter, zvláště pak jako následek existence kontaktních teplot. Problém je navíc komplikován skutečností, že adhezní proces se odehrává za vzniku deformací v oblasti styku, které mají dynamický charakter.

Hmotné částice povrchových vrstev jsou uváděny do kmitavých pohybů, vesměs charakteru samobuzených kmitů, včetně možného výskytu tzv. relaxačního kmitání. Zejména tento druh kmitavého pohybu v oblasti povrchu může podporovat agresivitu tribologických dějů a stěžejí jej lze úspěšně popisovat teoreticky na základě jednodemálních modelů. Při snahách o analýzu problémů adhezního pohonu vzniká zásadní problém, který tkví v nesnadnosti experimentálního prověření kontaktních teplot na rotujícím kole, což zřejmě platí i pro pokusy realizované na zkušebních zařízeních kolo - rotující kolejnice.

Vzhledem k tomu, že teoretické prognózy formulované v oblasti tribologie je nutno ověřovat experimentálně, bylo v laboratořích DFJP adaptováno zkušební zařízení, jehož základem je stávající brzdový stand. Úprava zmíněného zkušebního celku spočívá v instalaci dodatečného zařízení, které především umožňuje studovat charakter kmitavých pohybů v oblasti kontaktu.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory projektu MŠMT 1M0519 - **Výzkumné centrum kolejových vozidel**. Práce byla realizována rovněž za přispění **GAČR** - z prostředků **grantového projektu č.reg.101/04/0033** s názvem „Analýza mezních stavů povrchových vrstev temene kolejnice z hlediska kontaktního zatížení účinkem kolových sil při průjezdu kolejového vozidla“.

Lektoroval: doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.

Předloženo: 25.6.2006

Literatura

- [1] ALLEN, P.B. *Theory of Thermal Relaxation of Electrons in Metals*, Phys.Rev.Lett. 59, pp. 1460-1463, (1987).
- [2] HONNER, M. *Simulace vlnově difúzního šíření tepla pomocí Laplaceovy transformace*. Výzkumná zpráva grantového projektu GAČR č.101/94/0408/G2, ZČU Plzeň (1994).
- [3] BENEŠ, L. - MENČÍK, J. *Formation of Hard Layers on Railway Wheel / Rail Head and Their Role in The Surface Deterioration*. Proceedings of the Second international conference "Reliability, Safety and Diagnostics of Transport Structures and Means 2005". University of Pardubice, Czech Republic, 7-8 July 2005.

Libor Beneš, Eva Schmidová, Rudolf Kaloč:

- [4] KOUT, J. - KALOČ, R. *Porušování jízdní plochy železničních kol*. Scientific Papers of the University of Pardubice, Series B, 6, str. 39-51 (2000).
- [5] BENEŠ, L. *Kontakt kolo-kolejnice z pohledu materiálového inženýrství*. Habilitační práce, VA Brno, 2003.
- [6] KALOČ, R. - BENEŠ, L. - KOUT, J. *Valivý kontakt jako dynamický tribologický problém*. Scientific Papers of the University of Pardubice, Series B, 10, str. 45-62 (2004).
- [7] BENEŠ, L. - KALOČ, R. - GUZMÁN, B. *Možný vznik tečných relaxačních kmitů v povrchové vrstvě železničního kola*. Sborník konference TechMat 04, Česká Třebová, str. 22-29 (2004).
- [8] PETRUŠKA, J. *Deformačně napětové a tepelné poměry v kontaktu železničního kola a kolejnice*. Zpráva o řešení výzkumného úkolu, VUT FSI Brno (1998).
- [9] BREPTA, R. *Vlny napětí a rázové jevy v lineárně elastických a viskoelastických prostředích*. LENAM s.r.o, Liberec, 1997.
- [10] LAUWERIER, H. - KOITER, W. *Applied Mathematics and Mechanics*. Vol.16, North-Holland Publishing Company (1996).
- [11] TELLISKIVI, T. *Wheel-Rail Interaction Analysis*. Doctoral thesis, Royal Institute of Technology, Department of Machine Design, Stockholm (2002).

Resumé

K PROBLEMATICE PLASTICKÝCH PŘETVOŘENÍ POVRCHOVÝCH VRSTEV ŽELEZNIČNÍHO KOLA

Libor BENEŠ, Eva SCHMIDOVÁ, Rudolf KALOČ

Trvající problémy vzniku poruch v oblasti jízdní plochy železničních kol vyžadují nové přístupy výzkumu zejména v oblasti experimentů, jelikož doposud nelze věrohodně modelovat fyzikální procesy pomocí programových systémů. Tyto děje se odehrávají v povrchových vrstvách kontaktně vázaných těles s rozměrem 10^{-4} - 10^{-5} m, kde dochází ke strukturálním změnám, včetně vzniku oblastí doposud metalograficky nepopsaných. Pro získání informací, které vedou k modifikaci v současné době akceptovaných mezních stavů je nezbytné realizovat řízený experiment sledující historii kontaktního zatížení. Z dosavadních metalografických sledování lze považovat za prokázané, že prvotně probíhající proces plastických deformací, jehož důsledkem je zpevnění objemů materiálu v kontaktní oblasti, má dominantní vliv na vznik a rozvoj povrchových vad. Jelikož při analýze se nelze opírat o fenomenologické konstanty materiálu, musí numerické modelování selhávat a naopak, experimentální výzkum nelze opírat o konvenční zařízení (např. Amsler). Z uvedených důvodů je na DFJP vyvinuto a realizováno speciální zkušební zařízení, jehož funkce je v příspěvku diskutována.

Summary

PROBLEMS OF PLASTIC DEFORMATION OF SURFACE LAYERS ON RAILWAY WHEEL

Libor BENEŠ, Eva SCHMIDOVÁ, Rudolf KALOČ

Long-standing problems of damaging contact surfaces of rail wheels demand an extension of research works which will aim at some of the new approaches towards the issue of limiting state of environment which is formed, by rolling of generally loaded wheel, in the area of surface layers of running surface. The presented research programme is mainly based on the proven fact that specific problems of a rail wheel life are based on degradation actions caused by a complicated loading in the area of contact which is specific for the wheels that are braked by disk brakes. Such

system of braking is, at present, consistently applied mainly to the sets of passenger train carriages and tends to extend also to sets of goods trains. Specificity of the issue of such braked wheels was reliably proven by the occurrence of continuing damages of wheel surfaces when compared with the wheels that are braked by block brakes. The specificity is mainly caused by diametrically different thermal processes in the area of contact.

The character of thermal effects of wheels, which are not in contact with brake blocks, requires the viewpoint of microscopic transmission of heat, which does not exclude its wave propagation in a thin surface layer with all possible effects owing to the limiting states. Lot of works, see herein cited literary sources, point out emerging microstructural changes combined with mechanical damaging of contact surfaces, and the thickness of affected layers was predicted by dimension to order 10^{-4} mm. It also corresponds with the results of analyses describing so far insufficiently explained hard structures termed as White Etching Layers.

Another finding, arising from conclusions of performed researches, is the fact that the entire structural anomalies are localized right in the surface layer that is becoming a potential area from which the defects can be spread into a basic and unaffected material of the wheel. It can be started from the work hypothesis that the entire actions in the surface layer have a dynamic character and that they differ from the actions rising in the basic material. In other words, a distinct material discontinuity can be formed by contact effects. One of the essential problems is a detailed study of the process of surface layer plastization, therefore the main aim of the presented investigation is both theoretical and experimental study of that contact area. From the point of view of metallographic experiments, the research was focussed on the level of homogeneity of plastic deformations, its rise influenced by contact loading and the effects resulting from further exploitation arising from continuous generating of a loaded wheel.

Insufficient attention has been drawn to vibratory motions of surface layer particles. It is obvious from some of the published works, that the character of motion of surface particles, which are evoked by slip processes, can be considered as self-excited oscillation of relaxation type, which can result in the rise of penetrative dynamic powers in tangential direction having impulse character. Adhesive wheel rolling leads to tribologic effects of dynamic character.

Dynamic aspects of wheel contact with rail have not been studied from the viewpoint of wave effect spreading yet. Therefore, the aim of the presented research is to study contact as dynamic joining of two continua in which, besides compression wave motion, surface Rayleigh and Love waves are propagated with respect to a limited environment. The answer to the problem of how much above mentioned wave effects could affect the limiting states of surface layers has been sought by a theoretical solution.

The issue of plastization is emphasised also on the basis of theoretical studies which are based on numerical modelling. Important studies which arise from bilinear material characteristics are stated in the above mentioned literature. The authors of the paper intend to form an essential orientation in energy balance of plastic deformations by the study of energy balance of contact on the base of phenomenological plasticity. These processes, whose results is a higher hardness level, can be comprehensively experimentally studied on the current testing equipment that has been assembled in laboratories of the Jan Perner Transport Faculty, University of Pardubice, for experimental observing of oscillation of surface layer particles on the railway wheel running surface interrelating to wear processes and processes clarifying adhesive transfer of power.

Within the realised research, a required modification of current testing equipment with a view to generating plastic deformations and consequent hardness of surface layers of inserted material samples was realised. The way of history mapping of running surface loading could be searched by this way. The way was necessary for the stating of new ideas about limiting state in the area of contact. Original know-how, on which bases it will be possible to contribute to improvement of the knowledge of adhesive transfer in contact, has been expected as secondary results of these investigations. From the point of view of material, the knowledge of optimization process of choice for suitable construction wheel material can be expected in near future, with regard to constant standard of rail as well as railway wheel applied material.

Zusammenfassung

ZUR PROBLEMATIK PLASTISCHER VERÄNDERUNGEN AN DER EISENBahnRÄDEROBERFLÄCHE

Libor BENEŠ, Eva SCHMIDOVÁ, Rudolf KALOČ

Andauernde Probleme mit dem Auftreten von Störungen an der Fahroberfläche der Eisenbahnräder erfordern neue experimentelle Forschungsmethoden, da es bisher nicht gelungen ist, die physikalischen Prozesse mit Hilfe der Programmmodelle darzustellen. Diese Phänomene spielen sich an der Oberfläche der sich berührenden Körper von 10^{-4} – 10^{-5} m ab, wo es zu strukturellen Veränderungen kommt, insbesondere in den bisher metallographisch nicht erfassten Bereichen. Um die für die Auskunft bezüglich der Modifizierungen der derzeit akzeptierten Grenzwerte zu gewinnen, ist es unerlässlich, ein Experiment durchzuführen, das den Ablauf der Berührungsbelastung verfolgen wird. Aus den bisherigen metallographischen Beobachtungen gilt als erwiesen, dass der primäre Prozess der plastischen Deformation auf die Entstehung und Fortentwicklung der Oberflächenmängel einen dominanten Einfluss ausübt. Da die Analysen keineswegs auf den phänomenologischen Materialkonstanten basieren, muss die numerische Modellbildung einerseits versagen, andererseits kann man sich nicht auf die konventionellen Einrichtungen (z.B. Armsler) verlassen. Aus obigen Gründen wurde auf der DFJP ein spezielles Testvorrichtung entwickelt, deren Funktion im vorliegenden Beitrag beschrieben wird.

