

SCIENTIFIC PAPERS  
OF THE UNIVERSITY OF PARDUBICE  
Series B  
The Jan Perner Transport Faculty  
10 (2004)

## VALIVÝ KONTAKT JAKO DYNAMICKÝ TRIBOLOGICKÝ PROBLÉM

Rudolf KALOČ <sup>1)</sup>, Libor BENEŠ <sup>2)</sup>, Jan KOUT <sup>1)</sup>

Katedra provozní spolehlivosti, diagnostiky a mechaniky v dopravě <sup>1)</sup>, Katedra dopravních prostředků <sup>2)</sup>, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice

### 1. Obecně o mechanismech opotřebení v kontaktu kolo-kolejnice

Geometrické poměry mezi kolem a kolejnicí se v průběhu provozu postupně, ale výrazně mění - následkem periodicky opakovaných mechanismů prokluzů, vedoucích k opotřebení. Potom, v určitém časovém okamžiku, existuje určité statistické rozdělení takto modifikovaných jízdních profilů kola, z nichž každý přichází do kontaktu s jízdní plochou kolejnice v jiném bodě. Proto je kontaktní zóna mezi kolem a kolejnicí časově proměnná a významně ovlivněná mnoha parametry, které je nutno uvažovat jako komplex [1]. Matematické metody simulace kontaktní plochy mezi kolem a kolejnicí, které byly presentovány v poslední době [2], prokázaly, že tvar a velikost kontaktní zóny hraje velice důležitou roli v procesu přenosu tečných sil v soustavě kolo/kolejnice. Např. na dlouhodobě používané železniční kolejnici s již vytvořeným povrchovým reliéfem ve formě zvlnění na jízdní ploše lze pás kontaktní oblasti pozorovat i pouhým okem, přičemž jeho poloha se mění podle odlišných podmínek provozu.

Vzhledem k vysoké tvrdosti jsou právě *mikroobjemy povrchové vrstvy* kritickým místem pro iniciaci a rozvoj trhlin, k jejímž rozevření dochází pod účinkem sil, působících v systému kolo/kolejnice. Výsledkem je pak oddělování (označované jako tzv. *odlupování*, resp. *vypadávání*) takto ohraničených objemů materiálu z povrchu jízdní plochy kolejnice, resp. kola, které se v zahraniční odborné literatuře popisuje jako tzv. *spalling*. Z provozního hlediska se tyto nerovnosti projevují zvýšenou hlučností a vznikem

vibrací. K odstranění zmíněných defektů je proto nutné provádět v pravidelných časových intervalech přesoustružení jízdních ploch kol, což ovšem z finančního hlediska představuje (v celosvětovém měřítku - u jednotlivých železničních správ) částky řádově dosahující milióny EUR ročně.

Identifikace defektů potvrzuje skutečnost, že přenos trakčních sil mezi kolem a kolejnicí je spojen se vznikem prokluzů v kontaktní oblasti, nejedná se tedy o ideální valivý kontakt. Nutno upozornit na práci Singera [3], který potvrdil představu o indukovaném teple v důsledku prokluzových procesů. Jelikož však měření teploty v kontaktu mezi kolem a kolejnicí je značně obtížné, byla této otázce věnována řada teoretických predikcí - pro různá zatížení kola, rozdílné jízdní podmínky i stupně prokluzu.

Mezi výsledky těchto prací však existují určité diference, dané skutečností, že jednotliví autoři použili rozdílné předpoklady pro určení tepelného toku a jeho rozdělení podél kontaktní plochy. Ovšem nelze pochybovat o tom, že v určitých bodech je dosaženo značně vysoké teploty [4, 5]. Např. Knothe [6] v této souvislosti uvádí teplotu v kontaktní oblasti cca 900°C pro výpočtovou rychlost jízdy 200km/hod. a dále zmiňuje, že teplota v oblasti kontaktu stoupá s kolísáním normálového zatížení, zatímco např. povrchová drsnost, zde nehraje výraznou roli. Poškozený povrch kontaktní plochy může významně ovlivnit teplotu v kontaktu. Za normálních podmínek v systému kolo-kolejnice (ideální valivý kontakt) Knothe [6] vylučuje překročení teplotní hranice 500°C. Při započítání prokluzů mezi kolem a kolejnicí může, podle téhož autora, teplota v kontaktní zóně přesáhnout 600°C, podle Tanvira [7] dokonce až 1000°C. Teplotní gradienty ve směru normály jsou dosti strmé. Vzniklá teplotní napětí jsou podle Baumanna [8] „zodpovědná“ za přídavné zpevnění povrchové vrstvy a rozpouštění lamel cementitu.

Enormní provozní namáhání ve stykové ploše kontaktu kola a kolejnice znamená pro aplikovaný materiál řadu omezení [9], ze kterých je nutno vycházet při hledání optimální kombinace mechanických vlastností zatěžovaného objemu. Při použití materiálu nižší pevnosti se příčný profil kolejnice rychle přizpůsobí profilu kola a snižují se tak rázy, které mají případně tendenci tvořit tzv. plochá místa na obvodu kol. Výsledkem je obecně nižší kontaktní napětí. Použitím tvrdší, tedy i pevnější kolejnicové oceli je tento proces „zaježdění“ kontaktních ploch na tzv. střední profil značně zdlouhavý a méně účinný, výhodnější je ale menší úbytek materiálu z jmenovitého profilu otěrem a oxidací. Přesuny mikroobjemů materiálu v povrchové oblasti oceli (tzv. *povrchový tok*) spolu s kontaktním napětím v podstatě nepřetržitě produkují drobné povrchové trhliny orientované pod malým úhlem k povrchu hlavy kolejnice.

Principiálním faktorem, který rozhodne, zda malé povrchové trhlinky přejdou v souvislou příčnou trhlínu, limitně vedoucí až k lomu kolejnice napříč profilem, nebo zda budou odstraněny příčnými a podélnými složkami sil od pojezdu, bude rovnováha mezi rychlostí šíření defektu a množstvím kovu odstraněného opotřebením a oxidací. Pevnější materiály ztrácejí na intenzitě obou impulsů; kontaktní napětí je vyšší a množství opotřebením odstraňovaného kovu nižší. Z hlediska iniciace a rozvoje porušení je vedle

podmínek vzniku a projevů plastické deformace na povrchu hlavy kolejnice, popřípadě těsně pod jejím povrchem (*oblast kontaktní únavy*) podstatný proces hromadění mřížkových poruch a jejich interakcí s překážkami v substruktuře a struktuře materiálu [10].

Vztah opotřebením a provozního zatížení je charakterizován nejenom mechanismy, ale i dynamikou opotřebením [9]. Výzkum kolejnicových materiálů, směřující ke zvýšení únosnosti, životnosti a odolnosti proti opotřebením, je nutno v současné etapě vývoje řešit v těsné vazbě na otázky tvaru jízdní plochy a problematiky interakce kolo/kolejnice. V nákladním železničním provozu nominální statická síla na kolo 160 kN vytváří kontaktní plošku velikosti asi 110 mm<sup>2</sup> v místě, kde kolo přichází do kontaktu s kolejnici. Periodické provozní namáhání, eventuálně rázové silové účinky od plochých kol, kol se *shellíngem* (jak martensiticky iniciovaným, tak vzniklým v důsledku kontaktní únavy) a neokrouhlých kol, mohou vést k dynamickým zatěžovacím cyklům, představujícím násobky nominálních statických hodnot [11].

## 2. Shrnutí hlavních poznatků získaných dosavadním rozbořením kontaktní zóny

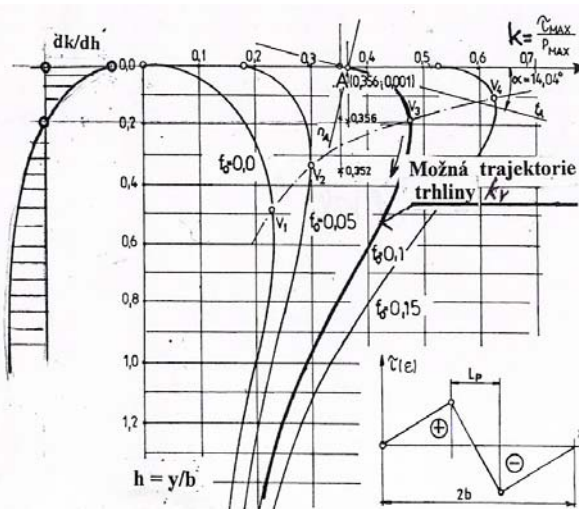
Prokazatelně bylo zjištěno [12], že v povrchové vrstvě železničních kol, brzděných kotoučovými brzdami, dochází k následujícím jevům:

- Probíhá transformace původní feriticko-perlitické mikrostruktury na strukturu martensitickou, resp. bainitickou. To znamená vznik teplot v místě kontaktu nad teplotou přeměny  $A_3$ . Tyto změny se odehrávají na různých místech povrchové vrstvy s adekvátní mikrotvrdostí v rozmezí 900 až 1400 HV<sub>0,05</sub>. Tloušťka této vrstvy se pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,9 mm.
- Bylo bezpečně prokázáno, že se v řadě případů pod martensitickou lokalitou, která se postupně od základní perliticko-feritické matrice oddělí trhlinou, nachází mikrostruktura se 100% sferoidizovaným perlitem, což svědčí o tom, že byla překročena teplota přeměny  $A_1$ .
- V souvislosti s výskytem lokálního martensitu je zřejmé, že kinetiku vzniku těchto tvrdých mikrostruktur charakterizuje vysoká rychlost jejich vytvoření, která je především závislá na okamžité teplotě. Rychlosti růstu jsou zde srovnatelné s rychlostí šíření elastických deformačních vln. Jedná se tedy o rychlosti řádu tisíců metrů za sec. V teorii tribologie, o které bude zmíněno v tomto příspěvku dále, se pojednává o okamžité teplotě kontaktu, označované jako *blesková teplota*. Její doba trvání může korespondovat s dobou děje materiálové transformace. Doba okamžitého kontaktu kola s kolejnici, která např. při rychlosti jízdy 120 km/hod odpovídá hodnotě cca  $2,4 \cdot 10^{-4}$  s, je srovnatelná s rychlostí šíření deformačních vln v hmotném kontinuu oceli.
- Teoretickým rozbořením nestacionárního radiálního tepelného toku v kole bylo v [12] prokázáno, že tloušťka tepelně ovlivněné vrstvy dobře koresponduje s tloušťkou

vrstvy uvedenou v bodě ad 1. Jelikož se v této oblasti jedná o kmitavý průběh teploty kolem jisté konstantní hodnoty, jsou rychlosti ochlazování v jistých časových okamžicích podstatně větší, nežli při stacionárním poklesu teplot. Eventuální vznik martensitické struktury je tedy reálný v povrchové oblasti.

- Následná trhlinka zřejmě iniciovaná lokální nehomogenitou (např. martensit) se pak může dále šířit. V práci [12] jsou uvedeny metalografické snímky, pořízené ze vzorku pojižděné obruče z materiálu B5T po době provozu cca 200 000 km. Za zásadní je nutno považovat skutečnost, že veškeré trhliny, vycházející od povrchové nehomogenity, směřují, vzhledem k tečně k povrchu, pod úhly v rozmezí 10° až 12°. U sledovaných vzorků vždy došlo k zastavení šíření trhlín v hloubkách 2 až 3mm pod povrchem. Autoři výše citovaného článku však upozornili na to, že není vyloučena možnost dalšího šíření trhlín, případně jejich větvení, a že je jen otázkou času, případně „šťastné náhody“, kdy se metalograficky podaří tento velmi nebezpečný jev potvrdit.
- Pravidelnost orientace trhlín, šířících se od kontaktního povrchu, vedla k úvahám směřujícím k formulaci zákonitostí tohoto jevu. Vzhledem k tomu, že vždy bylo zaznamenáno zastavení šíření trhliny, byla prvotní úvaha opřena o základní rozbor napjatosti. Úvaha byla redukována na průběhy hlavních smykových deformací

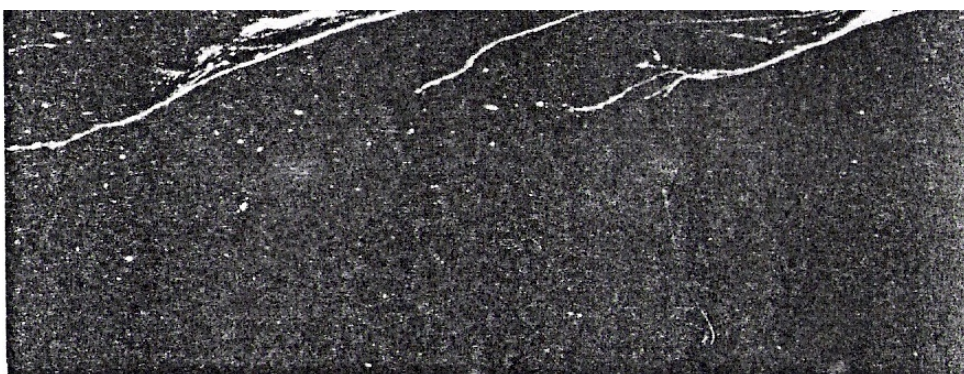
v poloprostoru, který je modelem celistvého kola. Z dislokační teorie vyplývá, že při známé hodnotě tenzoru napětí v daném bodě, lze explicitně stanovit hodnotu síly odpovídající každé kombinaci hnacího účinku trhliny v příslušné skluzové rovině. Lze tedy usuzovat, že kombinace, obsahující nejintenzivnější pole napětí, bude určovat pravděpodobnostní systém, ve kterém může probíhat plastická deformace, jež je podmínkou šíření trhliny. Extrémní hodnota tenzoru napětí je podle [12] uspokojivě prezentována hodnotou maximálního smykového napětí  $\tau_{max}$ , jež se nachází v určité hloubce



**Obr. 1** Prognóza trajektorie trhliny iniciované v povrchové oblasti (bod A).

**Fig. 1** Prognosis of a crack trajectory when initiated in the surface area (point A).

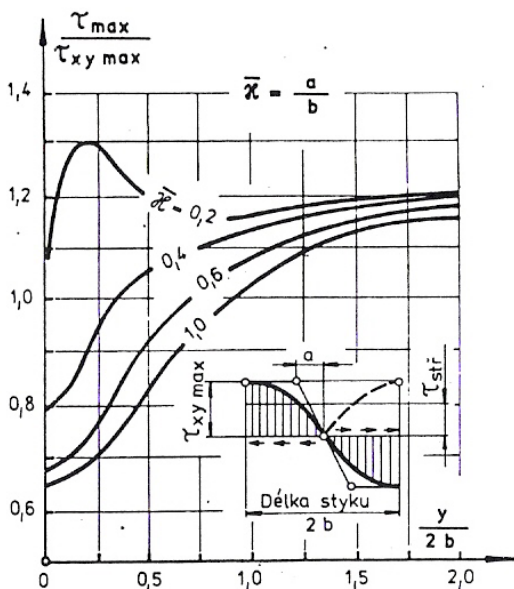
(y) pod povrchem jízdní plochy kola. Analytickým řešením kontaktu bylo prokázáno, že při různé hodnotě součinitele Coulombova tření  $f_0$  roste poměr  $k = \tau_{max} / p_{max}$  se vzrůstající hodnotou součinitele tření  $f_0$ . Tento součinitel vyjadřuje třecí síly v kontaktní ploše,  $p_{max}$  je maximální hodnota normálového tlaku. Na **obr. 1** je zakreslen vypočtený průběh závislosti  $k = f(y/b)$ , kde  $b$  je polovina délky kontaktní plošky, podél které je předpokládáno lineární rozložení třecích sil, vyjádřených napětím. Je zde uveden výsledek řešení pro součinitel tření  $f_0 = 0.1$  a délku kontaktní plochy  $2b = 8.0 \text{ mm}$ . Bodu  $\underline{A}$  (0.365, 0.001) ležícímu těsně pod povrchem kontaktní plochy ( $y = b h = 4 \times 0.001 = 0.004 \text{ mm}$ ) odpovídá tečna  $\underline{t}_A$ , svírající s povrchem úhel  $\underline{\alpha} = \arctg 0.25 = 14.04^\circ$ . Tato hodnota ve všech případech dobře odpovídá sklonu trhlin na počátku jejich šíření, viz příložený metalografický snímek, **obr. 2**.



**Obr. 2** Trhliny pod jízdní plochou železničního kola (zvětšeno 10 x).

**Fig. 2** The cracks in the material of the wheel (Magnified 10 times).

- S vysokou pravděpodobností lze tedy očekávat možné šíření trhliny podél trajektorie, vyjádřené funkcí  $k = f(h)$  směrem k bodu  $\underline{V}_{1,2,3,\dots}$ , který určuje maximální hodnotu smykového napětí a v daném případě leží v hloubce  $y = 4 \times 0.21 = 0.84 \text{ mm}$ . Se zvětšující se hodnotou součinitele  $f_0$  se bod  $\underline{V}$  přemísťuje směrem k povrchu (trajektorie  $\underline{k}_V$ ) a hodnota smykových napětí stoupá. Na **obr. 1** je zakreslena derivační křivka závislosti  $k = f(h)$ , zobrazující klesající gradient pravděpodobné trajektorie potenciálního šíření trhliny, pokud není její šíření ukončeno již dříve procesem kontaktní únavy, jež vede ke vzniku vydroleniny.
- Ukončení procesu šíření trhlín směrem od povrchu kontaktní plochy, které bylo doposud zaznamenáno ve všech sledovaných případech, může být zapříčiněno kontaktním únavovým procesem. Oddělená povrchová část materiálu, pokud je dále pojížděna, je podrobena cyklickému, nebo náhodnému ohybu, který musí poměrně v krátké době vést k oddělení jistého objemu materiálu - ke vzniku vydroleniny.



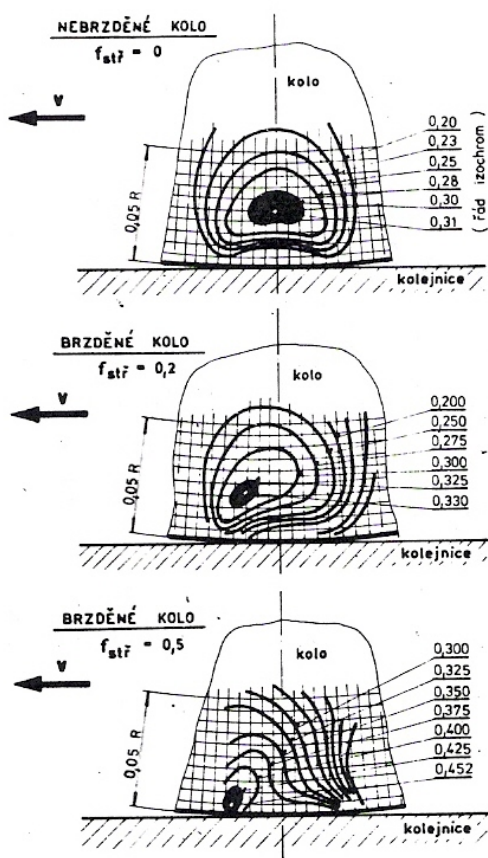
**Obr. 3** Průběh max. smykového napětí pro dvouzónální smyk podél stykové plochy.

**Fig. 3** The course of a maximum shear stress for two zonal slip along a contact face.

diskontinuitu, viz kap.1. Nelze proto vyloučit jistou možnost, že výskyt povrchových trhlin bude silně závislý na provozních podmínkách.

- Autoři dokonce nevyklučují představu, že pokud se oblasti maximálního smykového napětí přemístí do povrchových vrstev, které v práci [12] byly označeny jako *kontaktní vrstva*, může toto silně nehomogenní prostředí působit v tom smyslu, že klasické, výše popisované trhliny, se nevyvinou a ve vztahu k poškození jízdni plochy budou převládat abrazivní účinky.
- Pokud máme na mysli materiálové nehomogenity typu martensitických ostrůvků, které zřejmě mohou vzniknout při pojezdu kol z oceli podle UIC 812-3, je nasnadě otázka, *zda při zavádění kotoučových brzd není odstraněna možnost rozpadu vznikajících zákalných struktur tepelným účinkem brzdových zdrží.*

- Stojí za pozornost, že se stoupající exploatací kola, ve smyslu intenzivnějšího čerpání adhezivního přenosu (poháněné kolo, event. brzděné kolo), se oblast kolem bodu  $\underline{V}$ , tj. oblast s max. smykovým napětím, přemísťuje směrem k povrchu, viz názorná ukázka, uvedená na **obr. 3** (viz práce [13]). Totéž je dobře patrné z průběhu smykových napětí v závislosti na vzdálenosti od povrchu kola (viz **obr. 4**). Při hodnotě součinitele tření  $f_0 = 0.5$  se pak maximální hodnota smykového napětí vyskytuje těsně pod povrchem. Povrchová oblast, jsouc silně ovlivněna (abrazí, kontaktními silami, teplotou) zde potom představuje nepochybně silnou materiálovou



**Obr. 4** Vliv součinitele tření při prokluzu kola, vyjádřený řádem izochromat.

**Fig. 4** Influence of a friction coefficient expressed by means of an isochromate level.

- V článku [14] byl vysloven názor, že ovlivněná povrchová vrstva jízdni plochy kola může být chápána jako izolované prostředí, jemuž je nutno přiřadit všeobecné okrajové podmínky (dynamická deformace, tepelný spád, změny materiálových konstant, charakter odporových sil ...). Tato představa a její konkrétní realizace je nezbytná pro numerický výpočet. Pokud připouštíme fyzikální existenci všeobecné nehomogenity materiálu povrchové vrstvy, je pak nutno revidovat představu o lineárním homogenním kontinuu v tom smyslu, že v daném ohraničeném prostředí může existovat zvláštní typ vlnění, přičemž nevyklučujeme spojitost deformací. Jako analogii připomeňme radiální vlnění Rayleighovo, event. vlnění popsané Loevem.

V našich úvahách, vedoucích k popisu kmitání formou diskretních modelů, se v prvním přiblížení opíráme o modální modely, které mohou vést k popisu různých modifikací kmitání samobuzeného.

### 3. Valivý kontakt jako tribologický problém

Kontaktní plochy z hlediska mikromodelu v oblasti styku představují velký počet náhodně rozložených nerovností. Vzájemné zachytávání jednotlivých mikronerovností je provázeno pružnými i plastickými deformacemi. Dochází k mechanickému působení, jehož výsledek je v tribologii označován jako *abraze*. Vzájemně se dotýkající povrchy vykazují vlastnost zvanou *adhezní lpění*, které je vysvětlováno difúzí molekul a atomů obou povrchů a doprovázené vznikem mikrosvarů mezi stýkajícími se nerovnostmi. Adhezní jev je označován jako molekulární působení. Důsledkem tribologického procesu

je jev, označovaný jako *opotřebení*. Máme-li na mysli adhezni pohon realizovaný odvalováním kola po kolejnici, je situace specifická v tom smyslu, že oblast styku bude ohraničená a plynule proměnlivá. K abrazivnímu jevu u okamžité plochy styku dochází vždy za jedno otočení kola. Pokud je kolo nepoháněné (nebo nebrzděné), vznikají podél stykové plochy protisměrné deformační skluzu v okrajových částech stykové oblasti (v *pásmu předstihu* a v *pásmu zpoždování* - viz [12]).

U poháněného (brzděného) kola, vlivem hnacího (brzděného) momentu a s ohledem na skutečnost, že stýkající se tělesa představují deformovatelná prostředí, dochází k relativnímu posouvání stýkajících se povrchů v celém rozsahu stykové plochy, zvláště pak v tečném směru. Tento zákonitý jev se v teorii kolejových vozidel označuje termínem *skluz* ( $\underline{s}$ ). Nutno podotknout, že zatímco existence skluzu je podmínkou vzniku tečné hnací (brzděné) síly, z hlediska tribologického bude vždy jevem negativním. Je to zejména z toho důvodu, že se jedná o jev velice různorodý:

- součtový účinek obou popsanych skluzů, vedoucí k jeho nesymetrii podél stykové plochy,
- proměnlivost skluzu  $\underline{s}$  při přechodu od adhezni vazby k vazbě třecí,
- závislost Coulombova součinitele tření na relativní rychlosti stýkajících se povrchů,
- odklon vektoru tečné hnací (brzděné) síly od osy rovnoběžné s podélnou osou koleje (v teorii kolejových vozidel je pěstována představa, že tento odklon lze popsat dvěma dílčími jevy, tj. adhezni přenosem v podélném a příčném směru, což je v rozporu s fyzikální podstatou jevů, souvisejících s pasivními odpory),
- závislost součinitelů kvantifikujících adhezni a třecí síly na stavu povrchů, který je proměnlivý vlivem abrazivních účinků a zejména vlivem změn v důsledku tepla, vznikajících deformacemi a skluzu ve stykové oblasti,
- reálný vznik kmitavých pohybů v tečném směru, majících charakter samobuzeného kmitání, jehož některé modifikace, zejména tzv. *kmitání relaxační*, má v důsledku nespojitosti výchylek tečného kmitání v závislosti na čase (viz kap. 5), charakter rázových jevů,
- proces opotřebení je podle [15] dějem stochastickým; dominující je zde statisticky náhodný charakter třecích ploch v oblastech skluzů; následný vývoj poruch (trhlin) bude mít proto zákonitě stochastickou podobu, přičemž poškození bude kumulativního charakteru s konečnými důsledky únavového jevu,
- zvláštní význam má vymezení kritické hloubky (viz také [12]) pod povrchem, do které především zasahují teplotní pole iniciovaná skluzovými mechanismy; podle tribologického hlediska je hloubka  $\underline{h}$  funkcí náhodných veličin zatížení  $\underline{F}$ , času  $\underline{t}$  a materiálových, resp. geometrických parametrů  $\underline{X}$ , které vesměs podléhají např. normálnímu rozdělení.

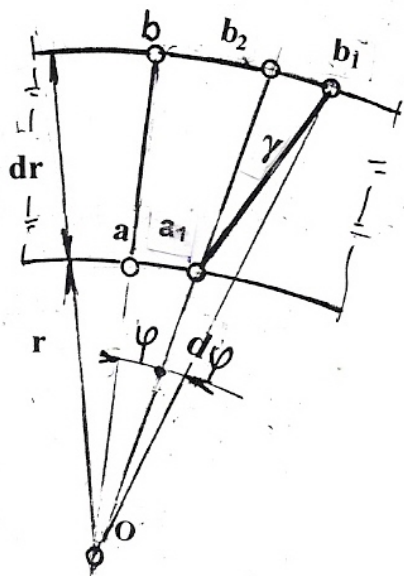


#### 4. Vliv spojitého prostředí železničního kola na fyzikální děje v povrchových vrstvách kontaktně zatížené oblasti

Děje, které byly v předcházejících kapitolách popisovány z hlediska tribologie, lze obtížně popisovat výpočtově. Nicméně, pokud máme na mysli dynamiku jevů, které se odehrávají v povrchových vrstvách jízdní plochy kola, je nezbytné si uvědomit, že tyto jsou spojitou součástí pružného prostředí (kola), jehož základní fyzikální vlastnost je popisována čárovým spektrem vlastních frekvencí. Při uplatnění představy o modálních vlastnostech pružného ohraničeného prostředí je výsledné kmitání, odpovídající čárovému spektru, vyvoláno periodickým buzením. Toto buzení u odvalujícího se kola lze očekávat v případě, kdy se odvalování odehrává v rovině stykové kružnice kola. Při nesplnění tohoto předpokladu je buzení definované stykové plošky náhodné a z hlediska silového se jedná o zatížení jednorázové, při kterém amplitudové spektrum je nahrazeno amplitudovou hustotou [16]. Vliv spojitého prostředí na fyzikální děje v povrchových vrstvách rozumíme jako jednoznačnou interakci v tom smyslu, že tribologické děje budou vlastnostmi kontinua ovlivněny a naopak; s ohledem na hmotnostní relace lze předpokládat, že čárové spektrum bude dějem v nehomogenních povrchových vrstvách ovlivněno nepodstatně.

Vlivem skluzů v kontaktní oblasti, lze očekávat dominantní vliv tečného buzení, jehož následkem je vznik tangenciálního kmitání kola. Pro stanovení základní frekvence příslušného čárového spektra vyjdeme z modelu kola ve tvaru prstence o vnitřním poloměru  $r_1$ , vnějším poloměru  $r_2$  a obecně proměnlivé šířce  $h$  [17]. Cílem dále uvedeného řešení je odvození vztahu pro základní frekvenci torzního kmitání a podepření úvahy o možnosti vzniku relaxačního (bezhmotového) kmitání tenké povrchové vrstvy,

pokud jízdní stopa, rozprostírající se podél stykové kružnice kola, představuje nekompatibilní prostředí vzhledem k základnímu materiálu, který považujeme za hmotné kontinuum. Tečnému kmitání odpovídá přemístění elementární úsečky  $ab$  do polohy  $a_1b_1$  (viz **obr. 5**). Radiusvektor  $r$  bodu  $a$  se odklání do polohy  $0a_1$ , radiusvektor bodu  $b$  se vlivem zkosu přemístí o úhel  $\varphi + d\varphi$ , úhlu  $\gamma$  odpovídá zkos.



**Obr. 5** Schéma deformace zkosem v oblasti věnce kola.

**Fig. 5** Scheme of a shear deformation in area of a railway wheel rim.

Přemístění, odpovídající úsečce  $b_2b_1$ , je potom definováno vztahem

$$\overline{b_1b_2} = (r + dr)d\varphi$$

Pro zkos potom platí

$$\gamma = r \frac{d\varphi}{dr} = r\varphi'$$

Popsanému schématu deformace přísluší na hranách elementu pouze smykové napětí, jež je funkcí poloměru  $r$

$$\tau = Gr \frac{d\varphi}{dr} = Gr\varphi', \quad (1)$$

kde  $G$  je modul pružnosti ve smyku ( $G = 0.8 \times 10^{11} \text{ Nm}^{-2}$ ). Označíme-li úhel uvažovaného elementu  $d\Phi$  (v rovině kolmo k nákresně), můžeme jeho pohybovou rovnici kompaktně vyjádřit v momentovém tvaru

$$\rho hr^2 dr d\Phi r \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = thr^2 d\Phi - \left[ thr + \frac{\partial(thr)}{\partial r} dr \right] (r + dr) d\Phi, \quad (2)$$

kde  $\rho = \gamma g^{-1}$  (pro ocel  $\rho = 0.794 \times 10^4 \text{ N s}^2 \text{ m}^{-4}$ ).

Před zavedením vztahu (1) do pohybové rovnice (2) určíme derivace

$$\frac{\partial(thr)}{\partial r} = \left( \frac{\partial \tau}{\partial r} hr + \tau \frac{\partial h}{\partial r} + th \right) dr; \quad \frac{\partial h}{\partial r} = h'$$

$$\frac{\partial}{\partial r} (Gr\varphi') = G(\varphi' + r\varphi''); \quad \frac{\partial \varphi}{\partial r} = \varphi'$$

Po úpravách potom obdržíme vztah (3):

$$\frac{\partial(thr)}{\partial r} = [2G\varphi'hr + Gr^2(h\varphi'' + \varphi'h')]dr \quad (3)$$

Pohybová rovnice (2) po zanedbání veličin druhého řádu nabude tvar (4):

$$\varphi'' + \left( \frac{3}{r} + \frac{h'}{h} \right) \varphi' + \frac{\rho}{G} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = 0 \quad (4)$$

Podle Bernoulliho zavedeme řešení ve tvaru součinu dvou funkcí

$$\varphi(r, t) = R(r) \cdot T(t)$$

Do funkce času  $T(t)$  zavedeme vlastní frekvenci  $\omega$  torzního kmitání vztahem

$$\frac{d^2T}{dt^2} = -\omega^2 T(t)$$

a rychlost šíření smykových vln

$$c_1 = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{0,8 \cdot 10^{11}}{0,794 \cdot 10^4}} = 3,177 \cdot 10^3 \text{ ms}^{-1}$$

Dospějeme tak k obyčejné diferenciální rovnici (5)

$$R'' + R' \left( \frac{3}{r} + \frac{h'}{h} \right) + R \frac{\omega^2}{c_1^2} = 0 \quad (5)$$

Nulová hodnota výrazu v závorce odpovídá hyperbolické změně šířky  $h$ . Řešení rovnice (5) potom je

$$R = A \sin \frac{\omega r}{c_1} + B \cos \frac{\omega r}{c_1}$$

a derivace

$$R' = A \frac{\omega}{c_1} \cos \frac{\omega r}{c_1} - B \frac{\omega}{c_1} \sin \frac{\omega r}{c_1}$$

Pro  $r = r_1$  bude  $R = 0$  (vetknutí) a pro  $r = r_2$  (volný povrch) bude mít frekvenční determinant tvar

$$\begin{vmatrix} \sin \frac{\omega r_1}{c_1} & \cos \frac{\omega r_1}{c_1} \\ \frac{\omega}{c_1} \cos \frac{\omega r_2}{c_1} & -\frac{\omega}{c_1} \sin \frac{\omega r_2}{c_1} \end{vmatrix} = 0 \quad (6)$$

Frekvenční rovnice potom je

$$\cos \frac{\omega(r_2 - r_1)}{c_1} = 0$$

a její nejmenší kořen, odpovídající torznímu kmitání, má hodnotu

$$\omega = \omega_1 \frac{c_1}{r_2 - r_1} \quad (7)$$

Z rovnice (7) přímo vyplývá, že pro  $(r_2 - r_1) \rightarrow 0$  bude  $\omega \rightarrow \infty$ . Tato úvaha signalizuje možnost vzniku relaxačního kmitání povrchové vrstvy.

### 5. Relaxační samobuzené kmitání

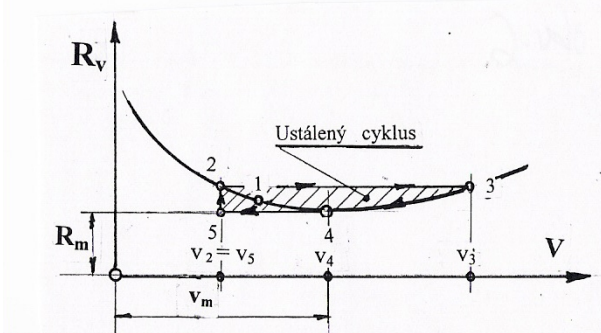
Skuzový mechanismus, který vždy doprovází trakčně poháněné (případně brzděné) železniční kolo (event. dvojkolí) je, s ohledem na značné hodnoty kolové síly, vždy provázen velkými tangenciálními silami, vyplývajícími z pružné vazby (síly elastické) a z vazby třecí (např. síly Coulombovy). Z předcházejících úvah, vázaných k tribologickému pojetí těchto procesů, vyplývá, že vzniklé kmitavé (tečné) pohyby budou v teoretickém mezním případě prosty sil setrvačných. Odtud pramení pojem *kmitání bezhmotové*. Podmínkou vzniku ustálených cyklů takového kmitání je nelineární závislost třecí síly na relativní rychlosti  $v$  stýkajících se ploch (viz **obr. 6**). Kmitání je v tomto případě popsáno jednoduchou relací, vyjadřující rovnost okamžité síly třecí  $R_v$  a síly elastické  $c \cdot x$ .

$$cx = R_v \tag{8}$$

V souvislosti s uvedenou rovnicí, která vyjadřuje úměrnost síly třecí a souřadnice  $x$  pružné vazby, je nutno si uvědomit, že síla  $R_v$  musí být spojitou funkcí času  $t$ , jelikož se souřadnice  $x$  nemůže, v závislosti na čase  $t$ , měnit skokem. S ohledem na podmínku (8) lze dedukovat, že v souřadnicích  $R_v = f(v)$  se kmitavý pohyb vždy ustálí na cyklu 2,3,4,5,2,3.... Tento samobuzený cyklus se nemůže vrátit na větev 4,1,2, pokud počátek pohybu vyšel z klesající větve charakteristiky, např. z bodu 1. Samobuzený cyklus

kmitání částice povrchové vrstvy kola vzhledem ke kolejnici sestává ze dvou etap:

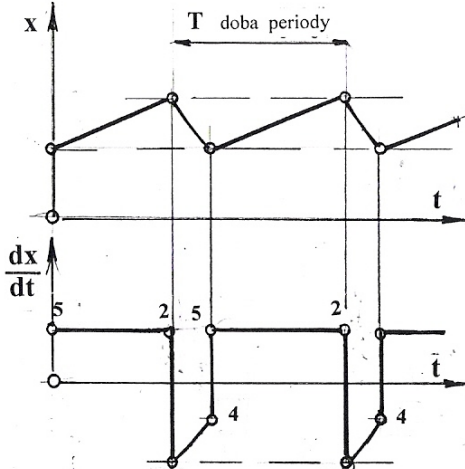
Prvá etapa (počínajíc v bodě 5) znamená pohyb částice rychlostí  $v_0$ , odpovídající rovnováze podle rovnice (8); přitom vztahem  $v = v_0 = dx/dt$  je definována tzv. skluzová rychlost. Této etapě odpovídá úsek 5,2. Deformace  $x$ , způsobená třecí silou, má v bodě 5 hodnotu  $x = x_5 = R_5/c$ . Na konci této etapy (v bodě 2) je  $x_2 = R_2/c$ .



**Obr. 6** Průběh třecí síly na rychlosti jízdy  $v$ , možný vznik cyklu relaxačního kmitání.

**Fig. 6** Dependence of a friction force on the running velocity  $v$ , and a possible rise of a relaxation oscillation cycle.

Navazující druhá etapa je charakteristická klesající relativní rychlostí částice (úsek 3,4). Na začátku této etapy, v bodě 3, je rychlost  $dx_3/dt = -(v_3 - v_0)$ , při deformaci  $x_3 = R_3/c$  (přičemž  $x_3 = x_2$ ). V bodě 4, tj. na konci etapy, platí, že  $dx_4/dt = -(v_4 - v_0)$ , při přemístění  $x_4 = R_4/c$  (a pro  $x_4 = x_5$ ).



**Obr. 7** Průběh dráhy a rychlosti kmitání při vzniku relaxačního cyklu.

**Fig. 7** Dependence of a trajectory and velocity for a case of a rise of a relaxation cycle.

Na **obr. 7** jsou zakresleny odpovídající průběhy dráhy a rychlosti kmitavého pohybu částice. V důsledku nespojitosti v průběhu výchylky  $x$  nastává u průběhu rychlosti kmitání  $dx/dt$  přetržitost, což upozorňuje na **rázový jev** odehrávající se na kontaktním povrchu, který může vyvolat intenzivní abrazivní účinky se všemi důsledky poškození kontaktní plošky v libovolném místě jízdní plochy kola.

S ohledem na lineární průběh výchylky v první etapě, je odpovídající čas  $t_1$  dán rovnicí

$$t_1 = \frac{R_2 - R_5}{cv_0}$$

Při stanovení času  $t_2$ , po který trvá druhá etapa vyjdeme z derivace

$$\frac{dR_v}{dx} = R'_x$$

Diferencováním základní rovnice (8) a dosazením za  $dx$  obdržíme

$$dR_v = cdx = cxdt$$

a následně

$$\frac{dR_v}{dx} = cx \frac{dt}{dx}$$

Z této rovnice určíme vztah pro dobu  $t_2$

$$t_2 = \frac{1}{c} \int_{x_3}^{x_4} \frac{R'_x}{x} dx$$

Doba periody relaxačního kmitání potom je

$$T = t_1 + t_2$$

Jako příklad posuďme periodický děj relaxačního kmitání při zadané nelineární charakteristice  $R = f(v)$ , viz **obr. 6**. V intervalu mezi body 2, 3 necht' je charakteristika popsána rovnicí

$$R = 3R_m \left( 1 - \frac{v}{v_m} + \frac{v^3}{3v_m^3} \right) = 3R_m \left( 1 - \frac{v_0 - \dot{x}}{v_m} + \frac{v_0 - \dot{x}^3}{3v_m^3} \right),$$

kde  $R_m$  a  $v_m$  jsou souřadnice vrcholu 4. Necht' rychlost částice bez skluzu je  $v_0 = 0.5 v_m$ ,  $v_3 = 1.732 v_m = 3.468 v_0$  a  $R_3 = R_2 = 3 R_m$ .

Zřejmě  $v_4 = v_m = 2 v_0$  a  $R_4 = R_5 = R_m$ . Integrační meze ve výrazu pro  $t_2$  jsou

$$\dot{x}_3 = \frac{dx_3}{dt} = v_0 - v_3 = -2,486v_0$$

$$\dot{x}_4 = \frac{dx_4}{dt} = v_0 - v_4 = -v_0$$

Derivace funkce  $R$  podle rychlosti  $dx/dt$  je

$$R'_x = \frac{3R_m}{v_m} \left( \frac{3}{4} + \frac{\dot{x}}{v_m} - \frac{\dot{x}^2}{v_m^2} \right)$$

Pro čas  $t_2$  potom platí vztah

$$t_2 = \frac{3R_m}{cv_m} \int_{-2,486v_0}^{-v_0} \left( \frac{3}{4} + \frac{\dot{x}}{v_m} - \frac{\dot{x}^2}{v_m^2} \right) \frac{d\dot{x}}{\dot{x}} = \frac{1,023R_m}{cv_0}$$

Doba první etapy je

$$t_1 = \frac{3R_m - R_m}{cv_0} = \frac{2R_m}{cv_0},$$

takže doba periody relaxačního kmitu činí

$$T = t_1 + t_2 = \frac{3,02R_m}{cv_0}$$

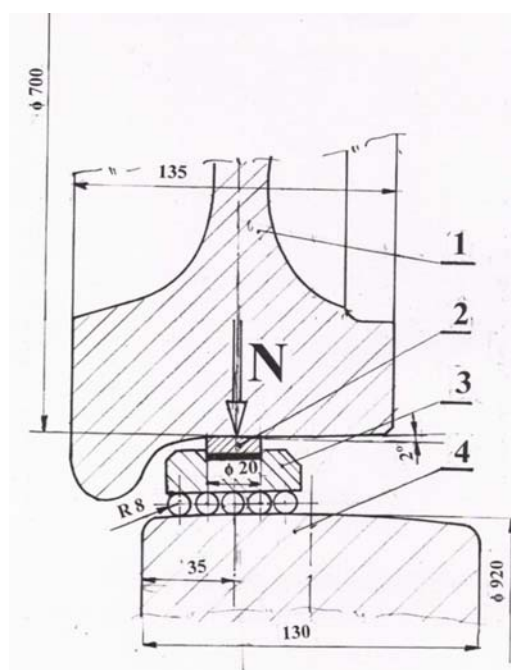
Z výsledku je patrné, že při známé funkci  $R = f(v)$  a např. při změření času  $T$ , můžeme stanovit konstantu  $c$  pružné vazby.

## 6. Závěr - příprava experimentu

Výsledky teoretických úvah, které byly uvedeny v předcházejících kapitolách, poskytují pouze základní orientaci o dynamických dějích v oblasti kontaktu. Autoři článku došli k názoru, že nezbytně musí následovat experimentální výzkum, jehož smyslem je potvrdit nebo revidovat přijaté teoretické představy, případně upřesnit popis studovaného problému.

Na katedře KPSDM bylo proto projektováno a realizováno laboratorní zkušební zařízení (typu modelu Van Der Pola), implantované do stendu, který byl vyvinut ve VÚKV Praha. Výzkum, vývoj a zkušebnictví kolejových vozidel (viz výzkumná zpráva 01-C 064).

Hlavním cílem bylo modelovat v oblasti kontaktu kola a kolejnice kmitavé pohyby samobuzeného typu, blížící se relaxačnímu kmitání a studovat tento děj z tribologického hlediska, vzhledem k jeho vlivu na změny povrchů v kontaktní oblasti [18].

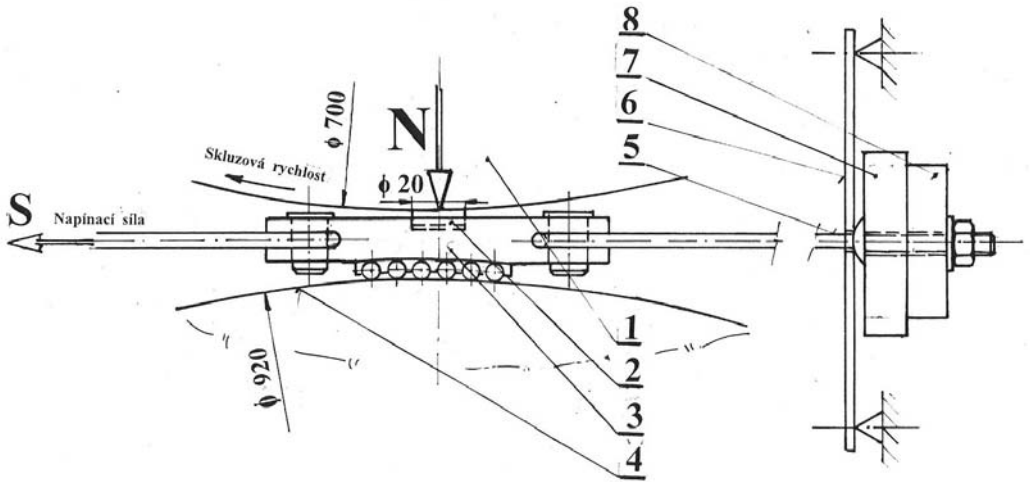


**Obr. 8** Příčný řez zkušebním zařízením (tečně odpružený suport 3 vzorku 2, prokluzujícím a zatěžujícím kolem 1).

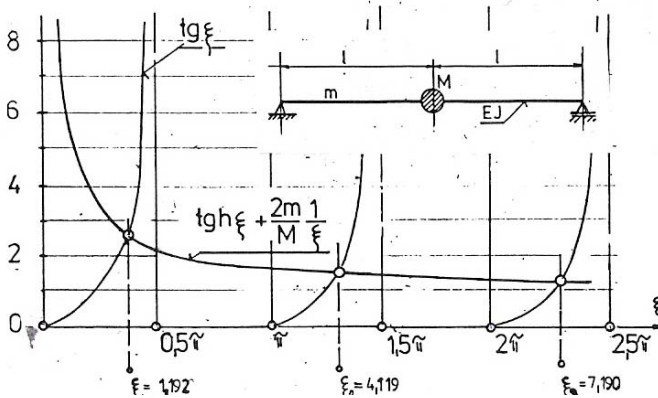
**Fig. 8** Cross section of a testing device (tangentially sprung slide 3 of specimen 2, slipping and loading wheel 1).

Princip zařízení je patrný z **obr. 8**. Kolo 1 průměru  $\Phi = 700\text{mm}$  je silou  $N$ , odpovídající reálné kolové síle, přitlačováno na vzorek 2, jehož materiál má zvolené chemické složení a definované mechanické vlastnosti. Vzorek 2 je nesen suportem 3 minimalizované hmotnosti, který se ve spodní části opírá přes kuličkové lože 4 o zabrzděné kolo 4.

Z **obr. 9** je patrné, že suport, nesoucí vzorek 4, je oboustranně upoután ocelovými lankami 5, vázanými k symetricky uspořádaným pružinovým listům 6. Takto je vytvořen předpjatý pružný systém s minimalizovanou hmotností a definovanou tečnou tuhostí. Dynamické ladění systému je umožněno přídatnými závažími 7, 8 (vodící závaží), která jsou situována na střed pružinových listů 6. Vytváří tak izolovanou hmotu, ovlivňující při kmitavém pohybu čárové spektrum pružinového listu (kontinuum) tak, aby základní frekvence čárového spektra byla výrazně oddělena od frekvencí ostatních.



**Obr. 9** Pohled na tečné odpružení suportu 3 pomocí lana 5 a pružinového listu 7.  
**Fig. 9** View of a tangential spring mounting of a slide 3 by means of a rope 5 and a spring plate 7.



**Obr. 10** Řešení frekvenční rovnice pružinového listu 1 s osamělou hmotou M (viz položky 6,7 na **obr. 9**).  
**Fig. 10** Solution of a frequency equation of a spring plate 1 with a concentrated matter M (see items 6,7 on **Fig. 9**).

Konkrétní informace je následující: Model navrženého pružinového listu s osamělou hmotou M je uveden na **obr. 10**, kde je zároveň uvedeno řešení příslušné frekvenční rovnice. Při zvolených rozměrech soustavy byla vypočtena první vlastní frekvence pružinového listu  $\omega_1 = 2108 \text{ s}^{-1}$  a další frekvence čárového spektra činí  $\omega_2 = 25\,204 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega_3 = 76\,773 \text{ s}^{-1}$ . Základní frekvence je výrazně menší, takže kmitavý pohyb vzorku se suportem může vykazovat charakter jednodemálního kmitání.



Experimentálně bude nakonec zjištěn vliv pružnosti lan. Kmitavý obvod bude zřejmě vykazovat frekvenci, která se zesponu blíží hodnotě  $\omega_1$ .

Buzení systému se uskuteční otáčením kola 1 (viz **obr. 8**) při zvolené hodnotě kolové síly N. Frekvence otáčení  $f = \omega / 2\pi$  odpovídá skluzové rychlosti. Např. skluzu 3% a rychlosti jízdy 120 km/hod. odpovídá frekvence otáčení kola 1 hodnotě  $f = 0.82\text{Hz}$ . Rozborem záznamů kmitavého děje suportu 3 (viz **obr. 8**) bude analýzou časového průběhu zrychlení usuzováno na charakter dynamického zatěžovacího děje a současně budou studovány změny kontaktního povrchu a event. strukturní změny, vyvolané tepelným účinkem tangenciálních sil. Zároveň je očekávána možnost studia výskytu a šíření poruch ve tvaru trhlin, které se vyskytují v provozu a nezřídka vedou k poruchám typu vydrolenin.

Lektoroval: Doc.Ing. Ivo Hlavatý, PhD.

Předloženo: 31.03.2005

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“.*

#### Literatura

1. MAGEL, E. *Optimizing Wheel / Rail Profiles*. Railway Track and Structures, July (1999).
2. ANDERSCH, L. *Entwicklung eines FE - Modells mittels einer speziellen Substrukturtechnik zur Ermittlung von Vorgängen im Rad-Schiene- Kontakt*. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin Institut für Luft - und Raumfahrt, Sept. (2000).
3. SINGER, I.L. - POLLOCK, H.M. *Fundamentals of Friction: Macroscopic and Microscopic Processes*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht / Boston / London (1991), p.3.
4. KUHLMANN, R. - WILSDORF, H. *Demystifying Flash Temperatures, 2. First - Order Approximation for Plastic Contact Spots*. Materials Science and Engineering 93 (1987), pp.119-133.
5. QUINN, T.F.J. - WINER, W.O. *An Experimental Study of "Hot Spots" Occurring During the Oxidation Wear of Tool Steel on Sapphire*. Journal of Tribology Vol.109, April (1987), pp.315-328.
6. KNOTHE, K. - LIEBELT, S. *Determination of Temperature for Sliding Contact with Application for Wheel - Rail Systems*. Wear 189 (1995), pp.91-99.

7. TANVIR, M.A. *Temperature Rise due to Slip between Wheel and Rail - an Analytical Solution for Hertzian Contact*. Wear 61 (1980), pp.295-308.
8. BAUMANN, G. - FECHT, H.J. - LIEBELT, S. *Formation of white-etching layers on rail treads*. Wear 191 (1996), p. 133-140.
9. SCHMIDOVÁ, E. *Kolejnicové oceli s bainitickou strukturou*. Habilitační práce, Fakulta priemyslových technológií, Púchov, 2004.
10. KALKER, J.J. - CANNON, D.F. - ORRINGER, O. *Rail Quality and Maintenance for Modern Railway Operation*. Kluwer Academic Publishers, Netherlads, 1993, p.454.
11. KALOUSEK, J. - KLEIN, R. *Investigation into the Causes of rail Corrugations*. American Railway Engineering Association Proceedings, Vol.77, 1976, s.75-79.
12. KOUT, J. - KALOČ, R.: *Porušování jízdní plochy železničních kol*. Scientific Papers of the university of Pardubice Series B, The Jan Perner Transport Fakulty, 6 (2000), str.39 - 51.
13. KALOČ, R.: *Ověřování vlastností železničních kol*. Hutnické aktuality 6, 1981, ročník 22, Informetal Dobrá u Frýdku-Místku, pracoviště Praha.
14. BENEŠ, L. -KALOČ, R. - GUZMÁN, B.: *Možný vznik tečných relaxačních kmitů v povrchové vrstvě železničního kola*. TechMat 04, Perspektivní technologie a materiály pro technické aplikace, Česká Třebová, str. 22 - 29.
15. BEČKA, J.: *Tribologie*. Vydavatelství ČVUT Praha, 1997.
16. BREPTA, R.: *Vlny napětí a rázové jevy v lineárně elastických a viskoelastických prostředích*. Lenam s.r.o. 1997, ISBN 80-7083-228-2.
17. BIEZENO - GRAMMEL.: *Technische Dynamik*. Band 2, Springer - Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1971.
18. KALOČ, R. a kol.: *Možný vznik tečných relaxačních kmitů v povrchové vrstvě jízdní plochy železničního kola, návrh zkušebního zařízení*. KPSDM. MSM 255 10002, 2004.

## Resumé

### VALIVÝ KONTAKT JAKO DYNAMICKÝ TRIBOLOGICKÝ PROBLÉM

Rudolf KALOČ, Libor BENEŠ, Jan KOUT

V předloženém článku jsou v úvodu shrnuty a znovu zhodnoceny výsledky dosavadního výzkumu (kap. 1a 2), který se zabýval vlivem nehomogenity materiálu - viz již dříve publikované bílé nalepané vrstvy, ozn. jako White Etching Layers, tzv. WEL - na iniciaci poruch, vycházejících z (pod)povrchových vrstev. Těžiště nových úvah je uvedeno v kap.4 a 5, kde je upozorněno na možnost vzniku relaxačního samobuzeného kmitání v povrchových vrstvách. Autoři se opírají o rozbor dynamiky spojitého prostředí (kap.4), ze kterého vyplývá reálná možnost vzniku relaxačního kmitání v kontaktu kolo/kolejnice. Možný vznik takového druhu kmitání závisí na průběhu součinitele tření ve vztahu k rychlosti jízdy, a ve zvláštním případě (kdy uvedená závislost vykazuje stoupající tendenci), mohou vzniknout stabilní cykly kmitání s nespojitým průběhem výchylek, tedy s rázovým charakterem, pro který je charakteristická přetržitost v průběhu rychlosti kmitání. Zcela věrohodná prognóza tohoto nepříznivého jevu je stěžejně uspokojivě řešitelná teoreticky. Proto autoři v závěru prezentují nové zkušební zařízení, kterým mají být predikované jevy ověřeny. Zároveň bude na vložených vzorcích sledován vliv kmitání na stav povrchu. Z předložené práce je zřejmé, že jevy, hodnotící možné iniciace a lokální degradace kontaktních oblastí, jsou úzce svázány s jevy tribologickými, které jsou chápány jako procesy dynamické.

## Summary

### Rolling Contact as a Dynamical Tribological Problem

Rudolf KALOČ, Libor BENEŠ, Jan KOUT

In the introduction part (chapter 1 and 2), the presented paper summarises and evaluates research results obtained up to now. These analyses were aimed at nonhomogeneities of material and their influence on initiation of defects, generated in sub/surface layers. As the centre of the paper, the new ideas are given in the chapter 4 and 5, dealing with a possibility for generation of self-excited relaxation oscillation in the surface layers of rail and railway wheel. Authors apply the analysis of the dynamics of a continuous body (chapter 4), that can predict a real possibility of relaxation oscillation in the surface layers of rail and railway wheel.

The possible rise of such a kind of oscillation depends on a course of a friction coefficient with regard to a running velocity. For a special case, when this dependence is characterised with an increasing tendency, the stable cycles of oscillation can rise with noncontinuous courses of deviations, and thereby with impact character and broken up path of a velocity vibration. The wholly credible prognose of the unfavourable phenomenon is hardly resolved theoretically in a satisfactory way. That is why the authors in the final part of the article present a new experimental device for verification of the predicted phenomenon. At the same time, the applied specimens will be analysed from the view of the influence of the oscillation on their surface state.

The considerable heat-affected of subsurface materials layers, rise of quenched microstructures with high hardness level, rise and propagation of heat and fatigue cracks as well as the origin of contact fatigue and falling of the material out from the railway wheel tread, these are the compelling effects occurring in the railway operation conditions in a case of railway vehicles with disk brakes. However, we can state that the block brakes "eliminate" the martensitic microstructure on the railway wheel tread - as we proved by means of the simplified experimental process. A better understanding of the mechanisms behind the formation of martensite around a surface defects and causes of rail and railway wheel tread failure is really of great importance. It is believed that a better knowledge in these matters will bring potential for improvements in the whole area of railway operation.

The observed local plastic deformation induced on the rail surface brings about the compressive residual stresses in longitudinal and transverse directions. The compressive residual stresses increase with the loading on the surface. The maximum of this residual stress was situated on the sample surface. The formation of nano-structured martensite and carbide on the rail and wheel surface causes the extremely high microhardness values and the strong corrosion resistance of the so called White Etching Layers.

Although the mechanism of conditions resulting in microstructure changes in a rail and railway wheel material is not hitherto explicated in satisfactory way, we can not discount an idea that the rising fatigue cracks following the circumferential direction of the wheel surface, can change their orientation into radial direction. From the fracture mechanics point of view, the catastrophic brittle fracture of a rail and wheel can occur when reaching the critical size of these radial cracks. There is therefore necessary to study the effect on principle and to clarify the causes of its origin in order to achieve the higher safety of railway operation.

The presented work has proved that the processes connected with initiation and local degradation of contact areas are closely in accordance with the tribological phenomena, understood as the dynamical processes.

## **Zusammenfassung**

### **Rollkontakt als dynamisches tribologisches Problem**

Rudolf KALOČ, Libor BENEŠ, Jan KOUT

In der Einleitung zum vorliegenden Aufsatz (Kap. 1, 2) werden die Ergebnisse der bisherigen Forschung bezüglich des Einflusses der mangelnden Materialhomogenität auf die Auflösung der Störungen in den Schichten unter der Materialoberfläche zusammengefasst und gewürdigt. Die Kapitel 4 und 5 bringen schwerpunktmäßig neue Forschungsergebnisse mit dem Hinweis auf die mögliche Entstehung der selbsttätig aufgelösten Oberflächenschichtenschwingungen. Die Verfasser stützen auf die Analyse der Dynamik (kap. 4) der Schwingungsentstehungen im Rad-Gleis-Kontakt. Die Schwingungen hängen von der Beziehung zwischen der Reibung und der Fahrgeschwindigkeit ab, im Sonderfall zeigt diese Abhängigkeit eine steigende Tendenz und es können dabei sogar beständige Schwingungszyklen mit unterbrochenem Ausschlagablauf und einer Diskontinuität in der Schwingungsgeschwindigkeit beobachtet werden. Diese ungünstige Erscheinung ist theoretisch nicht zufrieden stellend zu erklären. Daher präsentieren die Verfasser im Schlusskapitel eine neue Testeinrichtung zur Überprüfung der beobachteten Phänomene. An den beiliegenden Proben könnte der Einfluss der Schwingungen an den Oberflächenzustand verfolgt werden. Aus der vorliegenden Arbeit ist ersichtlich, dass die Phänomene der Entstehung und lokaler Degradation der Berührungsflächen auf das Engste mit tribologischen Effekten verbundenen sind, die man durchaus als dynamisch bezeichnen kann.