

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 700

ISSN 1213-4198

thesis
?
IS

Ing. et Ing. Petr Navrátil

**Šířeni trhliny v železničním kole
za provozních podmínek**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Ing. et Ing. Petr Navrátil

**ŠÍŘENÍ TRHLINY V ŽELEZNIČNÍM KOLE ZA PROVOZNÍCH
PODMÍNEK**

**CRACK PROPAGATION IN RAILWAY WHEEL UNDER OPERATING
CONDITIONS**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Inženýrská mechanika
Školitel: prof. Ing. Přemysl Janíček, DrSc.
Školitel specialista: Ing. Petr Skalka, Ph.D.
Oponenti: doc. Ing. Vladimír Fuis, Ph.D.
prof. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.
Datum obhajoby: 19. 12. 2012

KLÍČOVÁ SLOVA

lomová mechanika, železniční kolo, neproporcionální zatěžování, metoda konečných prvků

KEY WORDS

Fracture Mechanics, Railway Wheel, Non-proportional loading, Finite Element Method

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Areálová knihovna Fakulty strojního inženýrství

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

Technická 2896/2

616 69 Brno

© Petr Navrátil, 2013

ISBN 978-80-214-4729-5

ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD	5
1.1 Problémová situace	5
1.2 Formulace problému	5
1.3 Cíle práce	6
2 STUDIE DANÉ PROBLEMATIKY	7
2.1 Richardovo kritérium pro 2D	8
2.2 Kritérium maximálního tangenciálního napětí	8
2.3 Koncepce hustoty deformační energie (S-kritérium)	9
2.4 Porovnání kritérií pro predikci úhlu šíření trhliny	11
2.5 Šíření únavové trhliny podle Pookovy metodiky	11
2.6 Plankovo kritérium pro šíření únavové trhliny	13
2.7 Rychlost šíření únavové trhliny	14
3 VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ	15
3.1 Model materiálu	15
3.2 Model geometrie	15
3.3 Model vazeb a zatížení	17
4 ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY V ŽELEZNIČNÍM KOLE	18
4.1 Dráhy trhlín	19
4.2 Závislost K_{eq} na délce trhliny	20
4.3 Rychlost šíření únavové trhliny	21
4.4 Posouzení možného koplanárního růstu únavové trhliny podle Planka	25
5 ZÁVĚR	27
6 LITERATURA	29
CURRICULUM VITAE	31

1 ÚVOD

1.1 PROBLÉMOVÁ SITUACE

Při provozování vlakových souprav dochází k řadě různých problémů. Mezi problémy dnešní doby patří porušování železničních kol, kterým se zabývá tato práce.

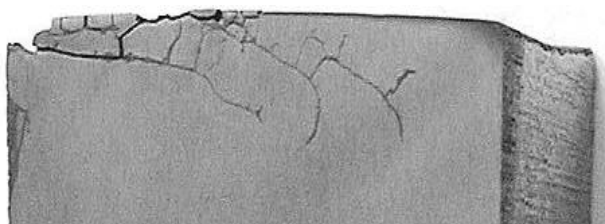
Při provozu železničního kola může nastat takové jeho poškození, kdy je nutné vyměnit celé kolo. Z tohoto pohledu je důležité se problematikou poškozování kola zabývat. Proto se také v železniční dopravě začalo používat kolo obručové, kde obruč je oddělena od zbytku kola, a v případě jejího porušení je možnost výměny za podstatně nižších nákladů. Nevýhodou je však samotná realizace spoje obruče s diskem kola, čímž v kole vzniká napjatost způsobená přesahem, která se negativně projevuje na životnosti obruče. Pokud vozidlo intenzivně brzdí – za použití špalíkových brzd, může dojít k uvolnění obruče vlivem teplotního pole. Kvůli tomu jsou obručová kola z důvodu větší bezpečnosti vytlačována koly celistvými, avšak na hnacích vozidlech a některých vagoněch jsou stále používána.

Trhliny vzniklé v obruči nebo věnci železničního kola mohou mít rozsáhlé následky a mohou způsobit ztráty na životech a škody na majetku. Z tohoto důvodu je důležité věnovat problematice šíření trhlin v železničních kolech náležitou pozornost.

1.2 FORMULACE PROBLÉMU

Při dlouhodobém provozu dochází v železničním kole ke vzniku (iniciaci) a šíření trhlin. Jedná se o trhliny, které způsobují vydrolování jízdního profilu, tzv. „spalling“, a o trhliny, které se šíří do kola a mohou zapříčinit jeho rozsáhlejší poškození. Uvažovaná trhlina v železničním kole se může v zásadě chovat dvojím způsobem:

- 1) V podvrchových oblastech poblíž obvodu kola směřují trhliny jak k jeho obvodu, tak i radiálním směrem do středu kola, přičemž hlavním rysem je jejich větvení. To lze vidět na Obr. 1.



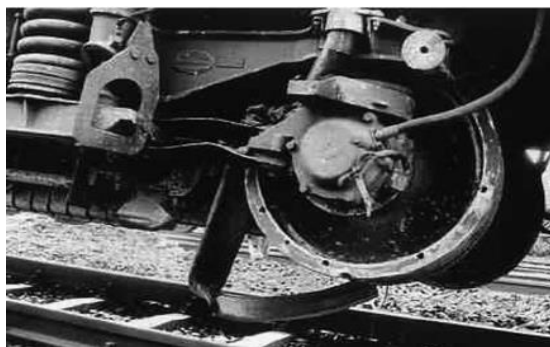
a) větvení trhlín – jízdní profil



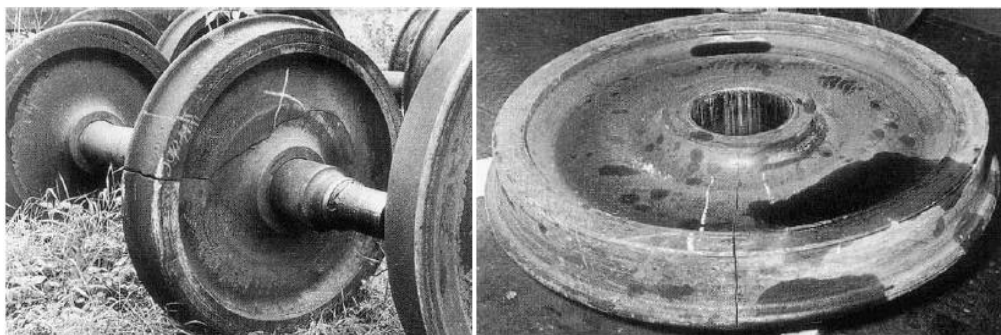
b) vydrolování profilu kola

Obr. 1 Poškození jízdního profilu

- 2) V oblastech vzdálenějších od obvodu kola mívají trhliny přibližně radiální směr a jejich šíření je nestabilní. K nestabilnímu šíření trhliny dochází již ve věnci/obruči železničního kola – Obr. 2.



a) poškozená obruč s následkem vykolejení – Richard et al. [25]



b) Porušené železniční kolo – Zerbst et al. [35]

Obr. 2 Případy poškození kola

1.3 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je analýza chování již vzniklé primární trhliny v železničním kole se zaměřením na směr jejího šíření za různých provozních podmínek. Uvažována je trhlina s různou délkou a sklonem při neproporcionálním zatěžování. Další část práce se zabývá trhlinou délky 2 mm pod sklonem 20° , kde je simulováno její šíření, rychlost jejího šíření a vliv pohybu lomových ploch vůči sobě. V poslední části práce je řešena trhlina, která je ovlivněna teplotním polem při intenzivním brzdění. V tezi jsou však prezentovány nejpodstatnější výsledky z celé práce, které se vztahují právě k šíření únavové trhliny.

2 STUDIE DANÉ PROBLEMATIKY

U problematiky porušování železničních kol existuje mnoho otázek k zodpovězení. Tato práce se zabývá řešením železničního kola s primární trhlinou, která je situována v jeho věnci, tj. část kola ve styku s kolejnicí. Chování trhliny je pozorováno za různých provozních podmínek, jako je volné valení a brzdění. Jedním z problémů, které se řeší na dvojkolí, je spojení železničního kola a hřídele dvojkolí. V dnešní době se používají duté hřídele, na které jsou nalisována kola s velkým přesahem. V tomto případě většinou nedochází k porušování železničního kola, ale hřídele v místě jeho styku s vnitřní hranou náboje. Touto problematikou se zabývají například Ognjanovic [18] a Zerbst [35].

Dalším velkým problémem je samotný kontakt železničního kola s kolejnicí. Řešením kontaktu se na ÚMTMB FSI VUT Brno zabýval Jandora [11], za Univerzitu Pardubice Kaloč [12] a v zahraničí jsou to například Guagliano [9], [10], Taraf [30] a další. S tímto problémem úzce souvisí problematika vydrolování jízdního profilu železničního kola vlivem kontaktní nebo teplotní únavy materiálu, Bernasconi [2], Donzella [4], Ekberg [5] a další.

Jelikož se kolo, ve kterém je trhlina, odvaluje po kolejnici, mění se také poloha kontaktního zatížení kolo-kolejnice vůči trhlince. Jedná se tedy o neproporcionální zatěžování ve smíšeném módu, kvůli kterému se v závislosti na poloze kontaktu mění i chování trhliny.

Řešením trhliny v samotném „mixed-modu“ se zabývá celá řada autorů. Lze například uvést práce Plank [21], Wasiluk [33] a další. Méně autorů následně řeší „mixed-mod“ pro neproporcionální zatěžování, což je stěžejní téma této práce. Tímto se zabývají např. Khan [13] a Pook [22]. Stanovení cesty šíření trhliny v „mixed-modu“ řeší např. Murakami [15], Quian [23] a další.

Problematikou trhlín v železničních aplikacích, ať se jedná o železniční kolo nebo kolejnici, již řeší menší množství autorů. K nim patří např. Bogdański [3], nejvíce jsou zastoupeny práce Ekberg et al. [5].

Pook dokonce ve své knize uvádí [22], že metodika pro řešení neproporcionálního zatížení v „mixed-modu“ existuje, ale není v praxi ověřena. Dobrou shodu výsledků pro neproporcionální zatěžování uvádí Bogdański [3], který řeší trhlinu v „mixed-modu“ pro případ kolejnice. Dalším autorem řešícím trhliny v železničním kole je Kuna et al. [14], který se zaměřuje ve své práci na šíření eliptických únavových trhlín, nebo Wallentin et al [32], který řeší podobný případ jako Kuna. Trhlinu v obruči kola řeší Richard et al. v práci [24], kde se zabývá příčinou železničního neštěstí německého vysokorychlostního vlaku ICE Wilhelm-Conrad Röntgen v roce 1998.

Avšak žádná z prací nepopisuje vliv provozních podmínek na trhlinu ve věnci, popř. obruči kola, na což je zaměřena tato práce. Část této problematiky byla již na ÚMTMB řešena, viz Navrátil [16].

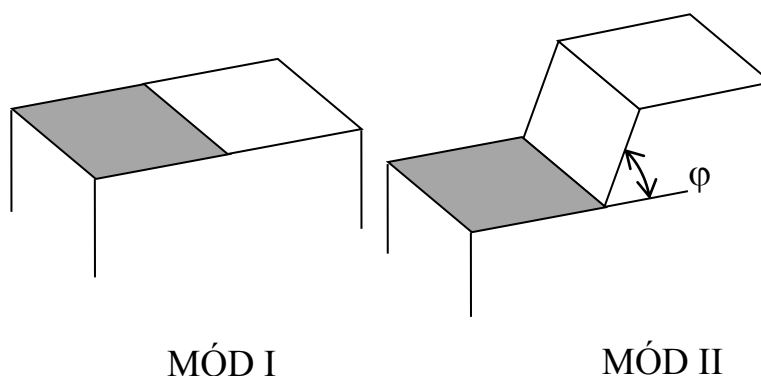
V předkládané práci byl použit přístup lineární elastické lomové mechaniky, koncepce součinitele intenzity napětí [1], [7], [8], který byl vypočten pomocí nepřímé metody, tj. metodou posunutí mezi-uzlů kvadratického prvku. Aby bylo možno posoudit směr šíření trhliny pro proporcionální zatěžování v smíšeném módu, je nutné použít některé z kritérií, kterých existuje více druhů, např. MTS [6], Sihovo (S-kritérium) [28], [31], Richardovo [25], [26] a další.

2.1 RICHARDOVO KRITÉRIUM PRO 2D

V této práci je použito k predikci šíření trhliny poměrně nové kritérium, které navrhl Richard [25], [27] se svým kolektivem. Jeho výhodou je jednoduchost realizace v prostředí APDL, které používá výpočtový software ANSYS.

Pro případ rovinného šíření je predikovaný úhel – Obr. 3, dle Richardova kritéria dán vztahem:

$$\varphi = \mp \left[155,5^\circ \cdot \frac{|K_{II}|}{K_I + |K_{II}|} - 83,4^\circ \cdot \left(\frac{|K_{II}|}{K_I + |K_{II}|} \right)^2 \right] \quad (2.1)$$



Obr. 3 Predikovaný úhel šíření v závislosti na módu zatížení

Železniční kolo je řešeno jako 2D úloha v podmínce rovinné deformace, tudíž je součinitel intenzity napětí K_{III} roven nule. V práci je používáno Richardovo kritérium pro výpočet predikovaného úhlu šíření únavové trhliny v módu II, viz rovnice (2.1).

Richard ve své práci také uvádí vztah pro výpočet ekvivalentního součinitele intenzity napětí

$$K_{eq,I,II} = \frac{K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{K_I^2 + 4 \cdot (1,155 \cdot K_{II})^2} \quad (2.2)$$

který lze použít v Parisově vztahu pro stanovení rychlosti šíření únavové trhliny nebo pro posouzení stability trhliny podle kritéria

$$K_{eq} \leq K_{IC} (K_{Id}) \quad (2.3)$$

kde hodnoty K_{IC} , popř. K_{Id} jsou materiálovými charakteristikami.

2.2 KRITÉRIUM MAXIMÁLNÍHO TANGENCIÁLNÍHO NAPĚTÍ [6]

Toto kritérium je označováno častěji jako MTS kritérium. Je používáno stále velmi často, protože jeho formulace je jednoduchá. Trhлина se podle MTS kritéria bude šířit v radiálním směru $\Theta = \Omega_s$, ve kterém je hodnota odpovídající složky tangenciálního napětí $\sigma_{\Theta\Theta}$ maximální, tzn. musí splňovat nutnou a postačující podmínku

$$\left(\frac{\partial \sigma_{\Theta\Theta}}{\partial \Theta} \right) = 0; \quad \left(\frac{\partial^2 \sigma_{\Theta\Theta}}{\partial \Theta^2} \right) < 0; \quad \text{pro } \Theta = \Omega_s. \quad (2.4)$$

Pomocí Williamsova rozvoje lze vyjádřit tangenciální složky napětí $\sigma_{\Theta\Theta}$ v závislosti na módu I a II:

$$\sigma_{\Theta\Theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{3}{4} \cos \frac{\Theta}{2} + \frac{1}{4} \cos \frac{3\Theta}{2} \right] - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{3}{4} \sin \frac{\Theta}{2} + \frac{3}{4} \sin \frac{3\Theta}{2} \right] \quad (2.5)$$

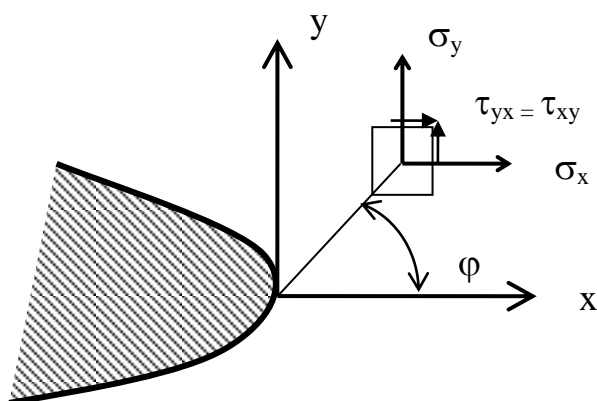
Nutná podmínka pro existenci maxima $\sigma_{\Theta\Theta}$:

$$\left(\frac{\partial \sigma_{\Theta\Theta}}{\partial \Theta} \right) = K_I \sin \Omega_s - K_{II} (3 \cos \Omega_s - 1) = 0; \quad \text{pro } \Theta = \Omega_s \quad (2.6)$$

Predikovaný úhel směru šíření trhliny je potom:

$$\varphi = \Omega_s = \arccos \left(\frac{3K_{II}^2 + K_I \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \right) \quad (2.7)$$

2.3 KONCEPCE HUSTOTY DEFORMAČNÍ ENERGIE (S-KRITÉRIUM) [28], [31], [29]



Obr. 4 Souřadný systém na čele trhliny

Sih navrhl kritérium k určení směru šíření trhliny ve smíšeném módu v závislosti na konceptu hustoty deformační energie. Pro dvojrozměrné těleso je přetvárná energie akumulovaná v elementu $dV = dx dy$ pro jednotkovou tloušťku definována takto – Obr. 4, rovnice 2.8:

$$dU = \left[\frac{1}{2G} \left(\frac{\kappa+1}{8} (\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2) - \frac{3-\kappa}{4} \sigma_{xx} \sigma_{yy} + \sigma_{xy}^2 \right) \right] dV, \quad (2.8)$$

kde $\kappa = 3 - 4\nu$ odpovídá stavu rovinné deformace a $\kappa = (3 - \nu) / (1 - \nu)$ odpovídá stavu rovinné napjatosti.

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\varphi}{2} \cdot \left(1 - \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \sin \frac{3\varphi}{2}\right) - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \left(2 + \cos \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \frac{3\varphi}{2}\right) \\
\sigma_{yy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\varphi}{2} \cdot \left(1 + \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \sin \frac{3\varphi}{2}\right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \frac{3\varphi}{2} \\
\sigma_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\varphi}{2} \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \frac{3\varphi}{2} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\varphi}{2} \cdot \left(1 - \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \sin \frac{3\varphi}{2}\right)
\end{aligned} \tag{2.9}$$

Dosazením vztahů popisujících pole napětí na čele trhliny pro smíšený mód I/II (2.9) do rovnice (2.8) a jejími úpravami dostaneme objemovou hustotu deformační energie (měrnou elastickou energii napjatosti) akumulovanou v objemu elementárního prvku

$$W = \frac{dU}{dV} = \frac{1}{r} (a_{11}K_I^2 + 2a_{12}K_IK_{II} + a_{22}K_{II}^2) \tag{2.10}$$

kde jsou jednotlivé koeficienty:

$$\begin{aligned}
a_{11} &= \frac{1}{16G\pi} [(\kappa - \cos \varphi)(1 + \cos \varphi)] \\
a_{12} &= \frac{1}{16G\pi} \sin \varphi [2 \cos \varphi - (\kappa - 1)] \\
a_{22} &= \frac{1}{16G\pi} [(\kappa + 1)(1 - \cos \varphi) + (1 + \cos \varphi)(3 \cos \varphi - 1)]
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Rovnice (2.10) ukazuje, že objemová hustota deformační energie má $1/r$ singularitu blízko čela trhliny a tento případ lze tedy počítat pomocí součinitele hustoty deformační energie:

$$S = a_{11}K_I^2 + 2a_{12}K_IK_{II} + a_{22}K_{II}^2 \tag{2.12}$$

Sih, dále založil svoje úvahy na následujících dvou hypotézách:

- trhlina se šíří ve směru maximální hustoty celkové potenciální energie neboli ve směru minimální hustoty deformační energie – tedy ve směru určeném podmínkami

$$\frac{\partial S}{\partial \varphi} = 0 \quad \frac{\partial^2 S}{\partial \varphi^2} > 0 \quad \text{pro } \varphi = \varphi_0 \tag{2.13}$$

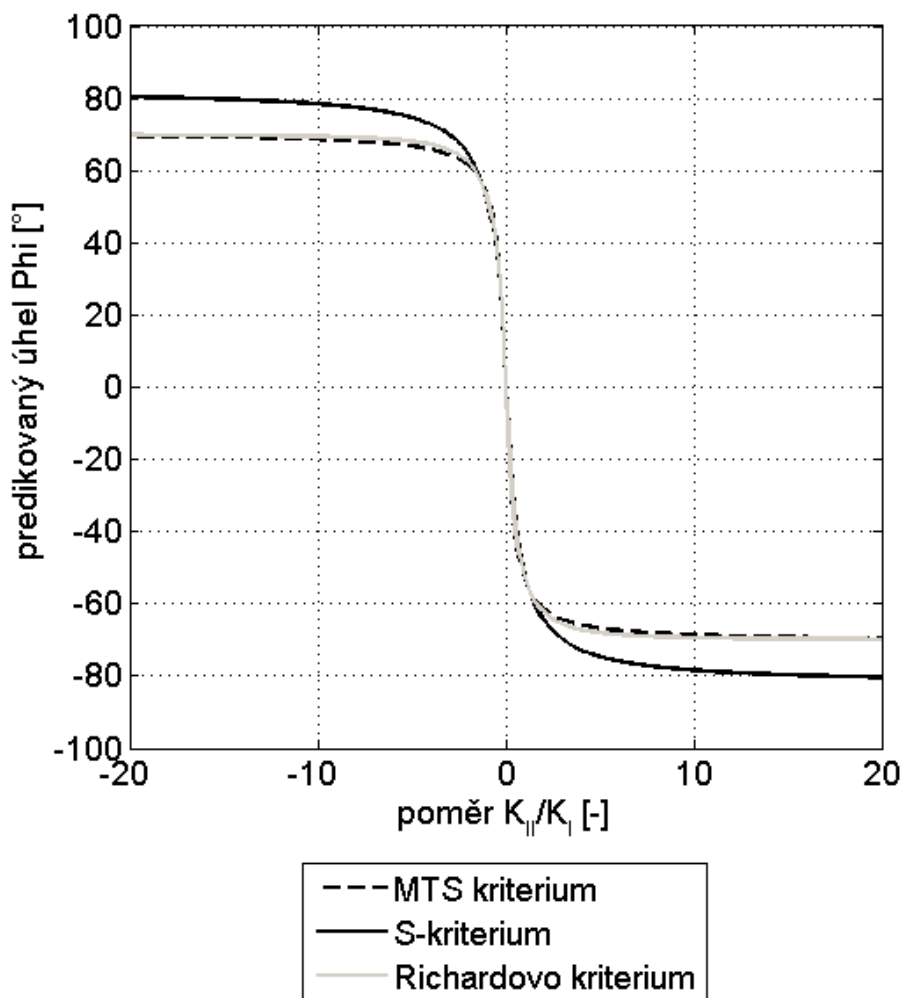
- pro okamžik nestabilního růstu je rozhodující kritická hodnota součinitele hustoty deformační energie S_c [J/m²]; ta charakterizuje odpor materiálu proti růstu trhliny:

$$S_{c,\min} = \text{konst.} = S(K_I, K_{II}) \quad \text{pro } \varphi = \varphi_0 \tag{2.14}$$

Toto kritérium tedy nevyžaduje žádný další předpoklad o směru, v němž se bude trhlina šířit. Tím jsou odstraněny problémy, které nastávaly u složitějších případů zatížení trhliny.

2.4 POROVNÁNÍ KRITÉRIÍ PRO PREDIKCI ÚHLU ŠÍŘENÍ TRHLINY

Richardovo kritérium je porovnáno s MTS kritériem a Sihovým kritériem (S-kritérium) pro predikci směru šíření trhliny – Obr. 5.

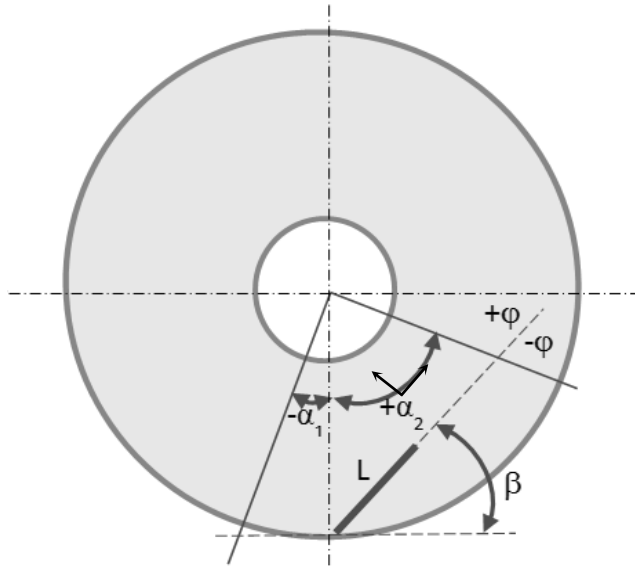


Obr. 5 Porovnání jednotlivých kritérií

Z porovnání kritérií lze vidět, že Richardovo kritérium a MTS kritérium jsou téměř identické, naproti tomu Sihovo kritérium predikuje větší úhel, avšak trend všech křivek je stejný. Důvod, proč se kritéria liší, vyplývá z jejich podstaty. MTS a Richardovo kritérium jsou odvozeny z napětí na čele trhliny, naproti tomu Sihovo kritérium vychází z toho, že se trhlina šíří ve směru maximální hustoty celkové potenciální energie.

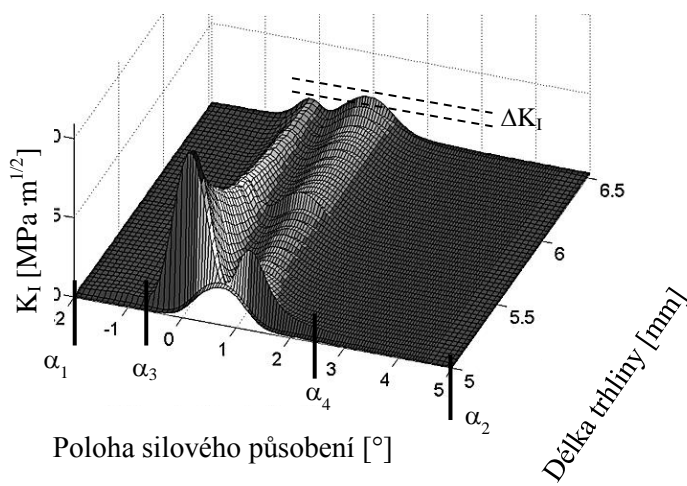
2.5 ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY PODLE POOKOVY METODIKY

Jelikož Pookova metodika ze své podstaty selhává při řešení určování směru šíření únavové trhliny ve smíšeném módu, bylo nutné toto kritérium upravit tak, aby jeho nedostatky byly odstraněny. Na Obr. 6 je schematicky znázorněno železniční kolo, kde α_1 a α_2 udává interval zátěžného kroku, ve kterém je aplikováno silové zatížení, které ekvivalentně nahrazuje kontakt kolo-kolejnice.

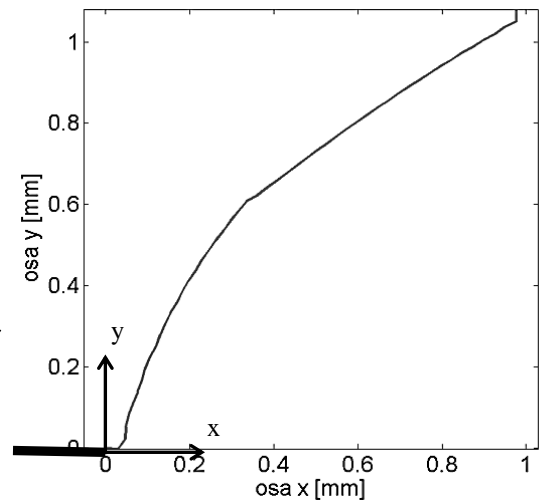


Obr. 6 Schéma geometrie kola a zátěžného kroku

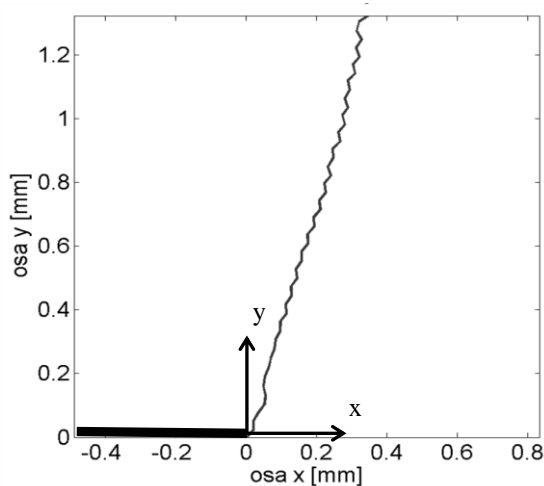
Problémy se simulací růstu trhliny se týkaly například takového případu, kdy se mění poloha maxima v modu I – Obr. 7a, kde pro poslední zátěžný krok je vidět, že oba vrcholy mají téměř shodné maximum. Pokud nastane takový případ, že maximum změní výrazně svojí polohu, může dojít k významné změně hodnoty K_{II} a pak se predikce dráhy trhliny stane nestabilní, viz Obr. 7b, popř. řešení začne oscilovat, viz Obr. 7c.



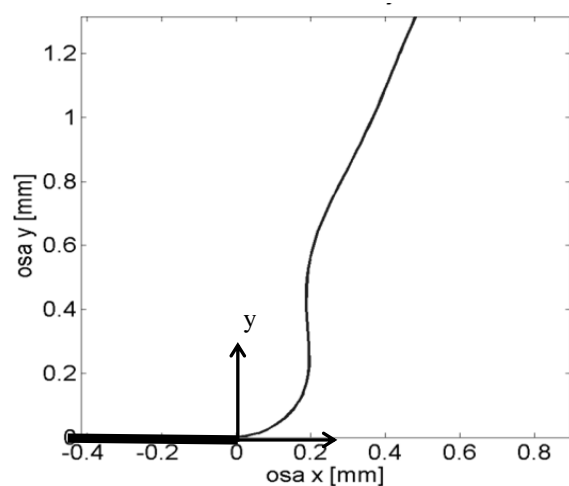
a) plocha vymežující hodnoty K_I



b) odpovídající dráha trhliny



c) Oscilace dráhy trhliny – Pook



d) Dráha trhliny – Modifikované Pookovo kritérium

Obr. 7 Příčina selhání Pookova kritéria

Predikce růstu únavové trhliny vychází z upravené metodiky, kterou ve své knize uvádí Pook [22]. Tato metodika byla dále upravena a její modifikace spočívá v tom, že pro faktor intenzity napětí K_I najdeme maximální hodnotu, ale pro součinitel intenzity napětí pro druhý mód uvažujeme hodnotu K_{II} jako

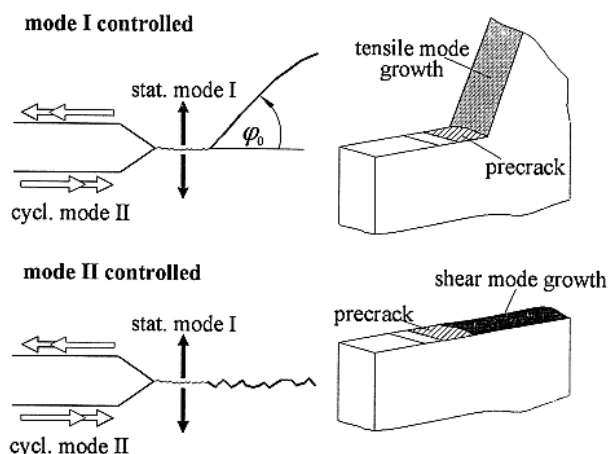
$$\overline{K_{II}} = \frac{1}{\alpha_4 - \alpha_3} \cdot \int_{\alpha_3}^{\alpha_4} K_{II}(x) dx. \quad (2.15)$$

Hodnoty α_3 a α_4 vymezují oblast, kde je K_I nenulové – rovnice 2.15. Takto získané hodnoty z jednoho kroku – Obr. 6 použijeme do libovolného kritéria, které se používá k predikci směru šíření trhliny – kap. 2.1 až kap. 2.3.

Při použití takto upraveného kritéria dostaneme pak odlišné výsledky dráhy trhliny. Dráha je stabilní a drží stejný trend, jako při použití Pookova přístupu, viz Obr. 7d.

2.6 PLANKOVO KRITÉRIUM PRO ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY

Při neproporcionálním zatěžování, tj. zatěžování, které v čase mění svoji polohu, mohou podle Planka [21] nastat dva stavy šíření únavové trhliny, a to šíření řízené módem I anebo módem II. Pokud se trhlina šíří v módu I, je šíření únavové trhliny stabilní a predikce směru šíření se provádí běžným způsobem, např. za použití Richardova kritéria. Pokud je trhlina řízena módem II, šíří se v původním směru, tj. nemění svůj směr do té doby, dokud nejsou porušeny podmínky 2.16 a 2.17. Rozdíl mezi šířením trhliny, která je řízena módem I, a mezi trhlinou řízenou módem II, je vidět na Obr. 8.



Obr. 8 Různé případy stabilního šíření trhliny při neproporcionálním zatížení [21]

Plank ve své práci uvádí, že musí být splněny následující dvě podmínky proto, aby se trhlina mohla šířit koplanárně, tj. v módu II:

1) Amplituda K_{IIeff} musí být větší než materiálem daná prahová hodnota ΔK_{IIth} ,

$$\Delta K_{IIeff} > \Delta K_{IIth}, \quad (2.16)$$

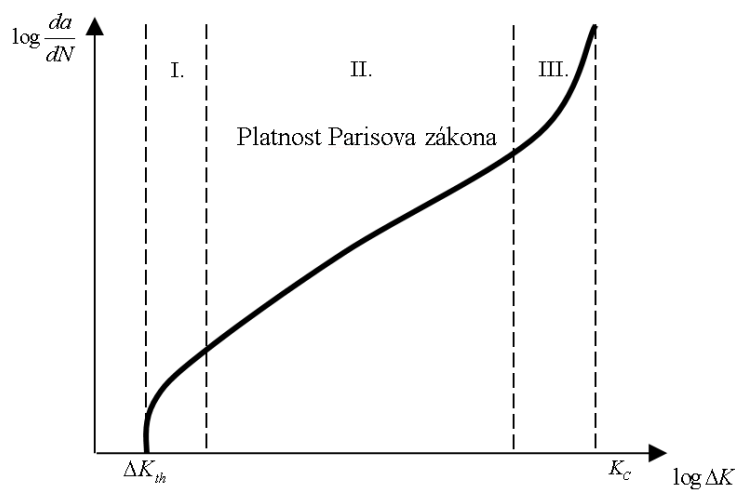
2) kde amplituda ΔK_{II} na počáteční trhlince musí být větší než $\Delta K_I^*(\Delta\varphi)$ na nekonečně malém přírůstku původní trhliny $|\Delta K_{II}| > \Delta K_I^*(\Delta\varphi)$.

$$|\Delta K_{II}| > \Delta K_I^*(\Delta\varphi) \quad (2.17)$$

Jelikož je K_{IIth} materiálovou charakteristikou, která je obtížně měřitelná, je práce omezena pouze na posouzení z hlediska druhé podmínky.

2.7 RYCHLOST ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY

Šíření únavové trhliny lze dobře popsat pomocí Parisova zákona, tj. pomocí závislosti přírůstku délky trhliny za určitý počet cyklů da/dN a na rozkmitu součinitele intenzity napětí ΔK – Obr. 9, kde je znázorněna křivka ve tvaru otočeného písmene S, rozdělená na tři odlišné oblasti. V oblasti označené II. je tato křivka lineární a v oblasti I. a III. dochází k odklonu od lineárního chování.



Obr. 9 Závislost da/dN na ΔK

Pro oblast II. je tato závislost dána mocninným vztahem – Parisovým zákonem, Paris [19]:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^n \quad (2.18)$$

Pro stanovení rychlosti šíření únavové trhliny je dále použit jednodušší vztah, který respektuje pouze prahovou hodnotu amplitudy součinitele intenzity napětí ΔK_{th} a je definován jako:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K_{eq} - \Delta K_{th})^n \quad (2.19)$$

kde materiálové konstanty $C = 1.6475 \cdot 10^{-11}$, $n = 3$ jsou převzaty z práce Zerbsta [35]. K určení počtu cyklů, které je třeba vykonat proto, aby se trhlina šířila o určitý přírůstek, je třeba dále řešit rovnici

$$\int dN = \int \frac{da}{C \cdot (\Delta K_{eq} - \Delta K_{th})^n} \quad (2.20)$$

kteřá je v této práci řešena numerickou integrací pomocí lichoběžníkové metody.

3 VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ

3.1 MODEL MATERIÁLU

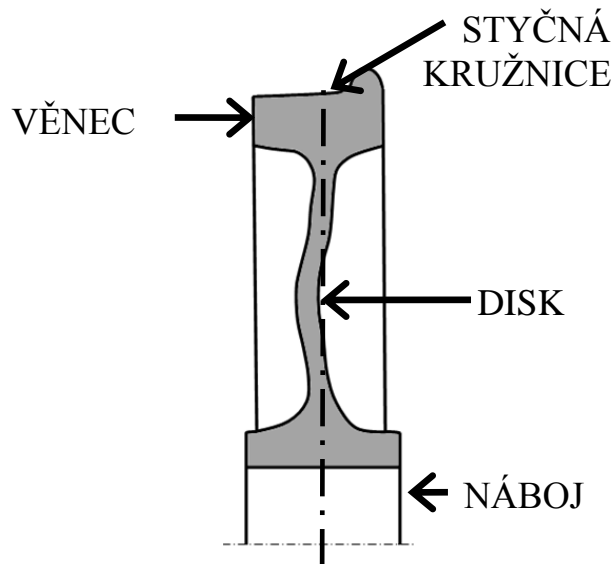
Model materiálu je uvažován jako homogenní, izotropní a lineárně-elastický. Použité materiálové charakteristiky pro ocel jsou dány Youngovým modulem pružnosti $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa, Poissonovým číslem $\mu = 0,3$ a lomovou houževnatostí, která odpovídá oceli R7T $K_{IC} = 80$ MPa·m^{1/2} při 20 °C. V práci je brána v úvahu dynamická lomová houževnatost, která je podle Pelliniho přibližně $0,6 \cdot K_{IC} = 48$ MPa·m^{1/2} [20], [31]. Prahová hodnota součinitele intenzity napětí je dána jako $\Delta K_{th} = 8,2$ MPa·m^{1/2}, viz Richard et al. [25].

Železniční kolo se porušuje mechanismem únavového porušení, doprovázeného křehkým dolomem¹, kde se předpokládá malá plastická oblast na čele trhliny, proto lze použít koncepci lineární elastické lomové mechaniky – Richard et al. [25].

3.2 MODEL GEOMETRIE

Železniční kolo (monoblok) se skládá z několika hlavních částí. Jsou to věnec, disk a náboj. Část kola, která je ve styku s kolejnicí, je označena jako věnec. Kolo je nalisováno nábojem na hřídel. Mezi nábojem a věncem je disk kola, který je zvlněný – viz Obr. 10.

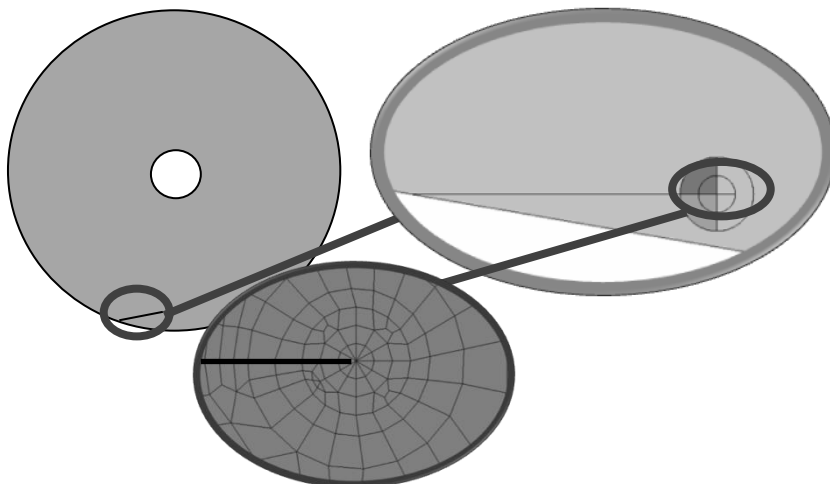
¹ doc. Schmidová – ústní sdělení



Obr. 10 Celistvé železniční kolo – ilustrativní popis

Předmětem řešení je věnec a obruč vagonového železničního kola o průměru styčné kružnice 920 mm. Jelikož je tato část kola „široká“ a řešení je realizováno v místě styku kola a kolejnice, tj. v místě styčné kružnice, lze s výhodou použít rovinný model železničního kola v podmínkách rovinné deformace.

Při použití tohoto modelu je v rovině kolmé k rovině styčné kružnice nulové přetvoření. V této rovině vzniká nenulové normálové napětí kolmé na rovinu, kterou tvoří styčná kružnice, což jsou typické rysy rovinné deformace. Takové napětí vzniká i u železničního kola s reálnou geometrií. Tato úroveň modelu geometrie kola dokáže věrohodně vystihnout skutečnost i při realizovaném zjednodušení do 2D. Použitý zjednodušený rovinný model geometrie a jeho diskretizaci lze vidět na Obr. 11.

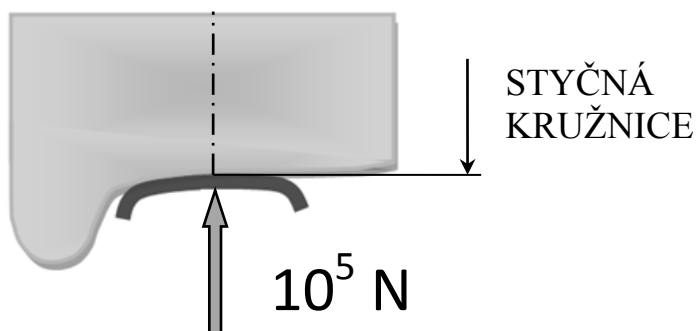


Obr. 11 Geometrie a diskretizace kola

Geometrie železničního kola byla tvořena jako plně parametrický model v prostředí APDL programového systému ANSYS. Jelikož je model parametrický, mění se i síť parametricky a to tak, aby zachovávala svou přibližnou hustotu v místě trhliny nezávisle na jejím rozměru a topologii. Pro realizaci výpočtů byl použit kvadratický rovinný prvek.

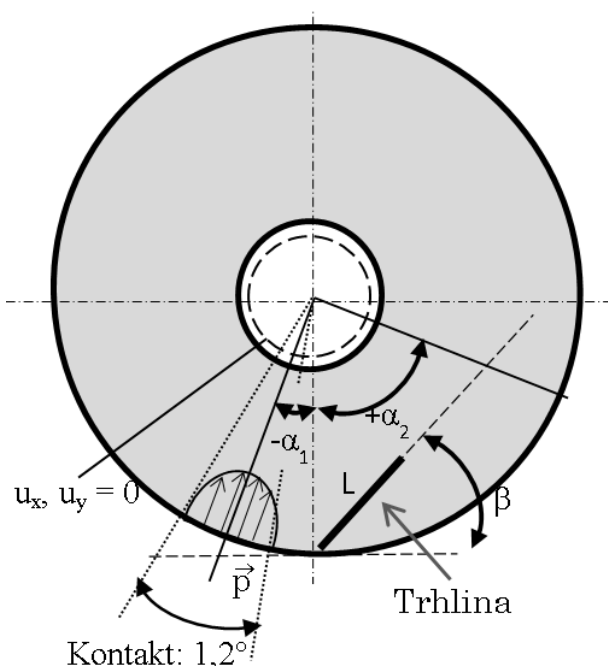
3.3 MODEL VAZEB A ZATÍŽENÍ

Zatížení železničního kola odpovídá konstantní rychlosti 100km/h, které je realizováno prostřednictvím objemových sil a zatížení od nápravy, odpovídajícímu 10 tunám – Obr. 12.



Obr. 12 Věnc železničního kola (příčný průřez) – zatížení

Zatížení od nápravy je realizováno pomocí stykových výslednic na styčnou kružnici jízdního profilu železničního kola [10], [11], [34] a to v kruhové výšce přibližně $1,2^\circ$ (Obr. 13). Kolo je dále uloženo na hřídel, což je zde realizováno odebráním všech stupňů volnosti v místě jeho uložení (Obr. 13).

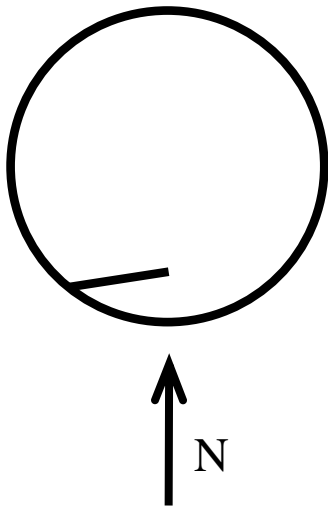


Obr. 13 Schéma vazeb a zatížení

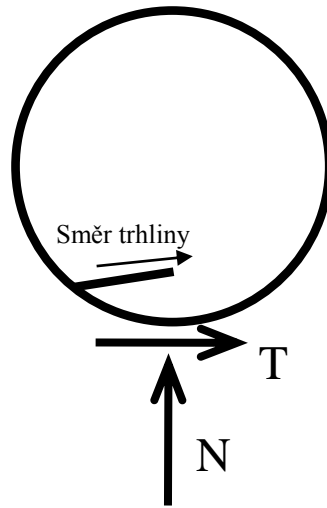
Vliv uložení (přesah) nemá na oblast věnce významný vliv. Tato problematika byla podrobně řešena v práci [17], která se zabývá trhlinou vzniklou v náboji železničního kola a jejím chováním v provozu.

Na lomových plochách trhliny je definován kontakt, aby nedocházelo při řešení k tomu, že lomové plochy projdou samy sebou. Dále definovaný kontakt slouží k posouzení vlivu pohybu lomových ploch vůči sobě.

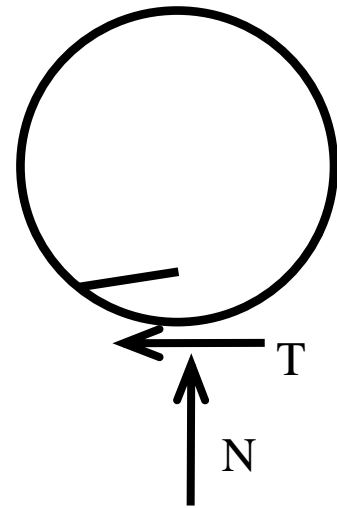
Existence a orientace uvedených silových výslednic závisí na provozních podmínkách kolejového vozidla. Výpočtovým modelováním byly řešeny tyto varianty – viz Obr. 14.



a) Volné valení



b) T ve směru trhliny



c) T proti směru trhliny

a) Otáčení kola konstantní rychlostí
<ul style="list-style-type: none"> •smykovou sílu je možno zanedbat •kontakt přenáší pouze normálové síly

b) Otáčení kola odpovídá úplnému smyku v kontaktu
<ul style="list-style-type: none"> •tečná síla je ve směru trhliny •kontakt přenáší normálové i tečné síly

c) Otáčení kola odpovídá úplnému smyku v kontaktu
<ul style="list-style-type: none"> •tečná síla je proti směru trhliny •kontakt přenáší normálové i tečné síly

Obr. 14 Řešené varianty

Tečná složka představuje limitní stav mezi volným valením a prokluzem. Nedá se tedy v závislosti na směru tečné složky hovořit o brzdění nebo rozjezdu, jde pouze o brzdění s různou orientací trhliny vůči tečné složce.

4 ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY V ŽELEZNIČNÍM KOLE

Předkládaná práce se zabývá jednou typickou geometrickou konfigurací trhliny v železničním kole. Je sledována dráha jejího růstu a rychlost šíření pro případ celistvého kola – monoblok.

Trhlina roste z počáteční délky 2 mm s přírůstkem 0,03 mm za 1 krok – Obr. 6 a Obr. 13, kde 1 krok označuje polohu kontaktu vzhledem k ústí trhliny v intervalu α_1 a α_2 – viz Obr. 13. Šíření únavové trhliny v železničním kole je řešeno pomocí Pookovy metodiky, viz kapitola 2.5.

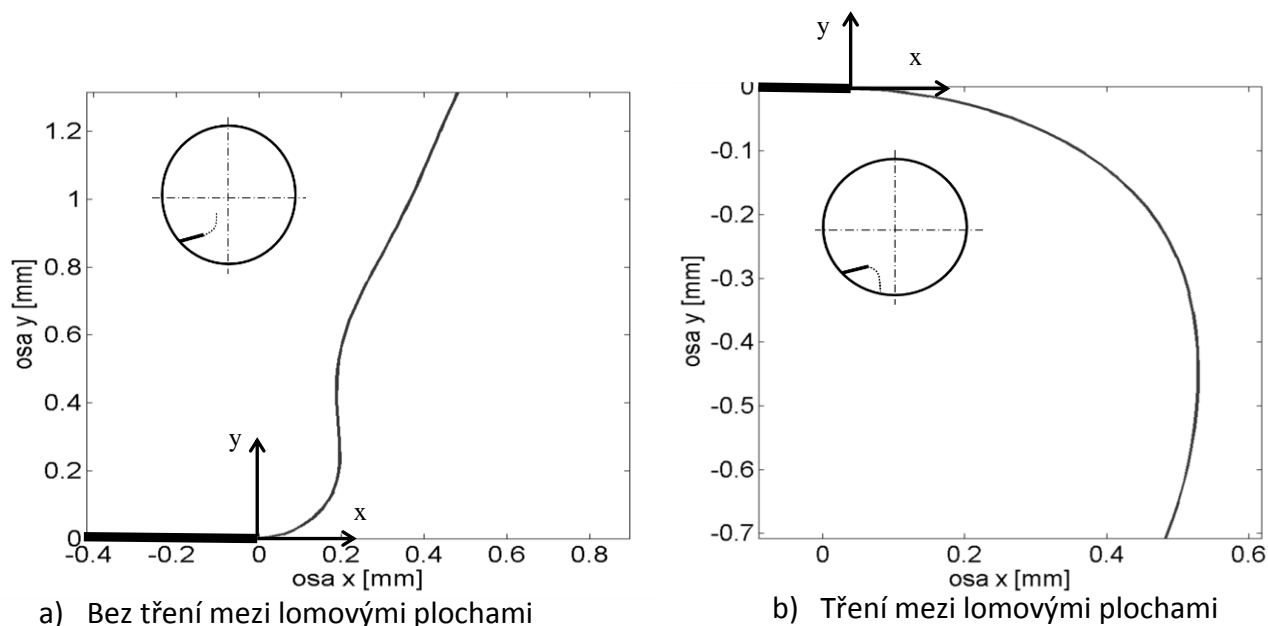
V simulaci jsou uváženy dva různé stavy mezi lomovými plochami trhliny:

- Bez tření
- Se třením $f=0,1$

Jak lze vidět z dále prezentovaných výsledků – kap. 4.1, pohyb lomových ploch vůči sobě má významný vliv na chování trhliny.

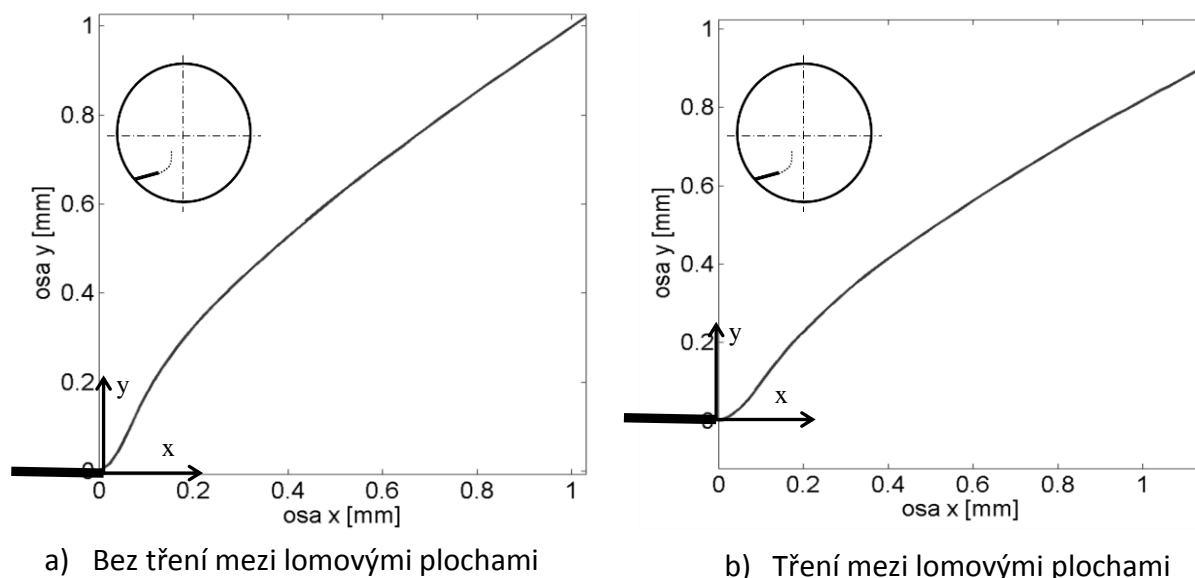
4.1 DRÁHY TRHLIN

Na dále uvedených obrázcích jsou prezentovány dráhy trhlin pro různé provozní stavy monoblokového kola a pro oba případy tření mezi lomovými plochami primární trhliny.



Obr. 15 Dráhy trhlin – volné valení

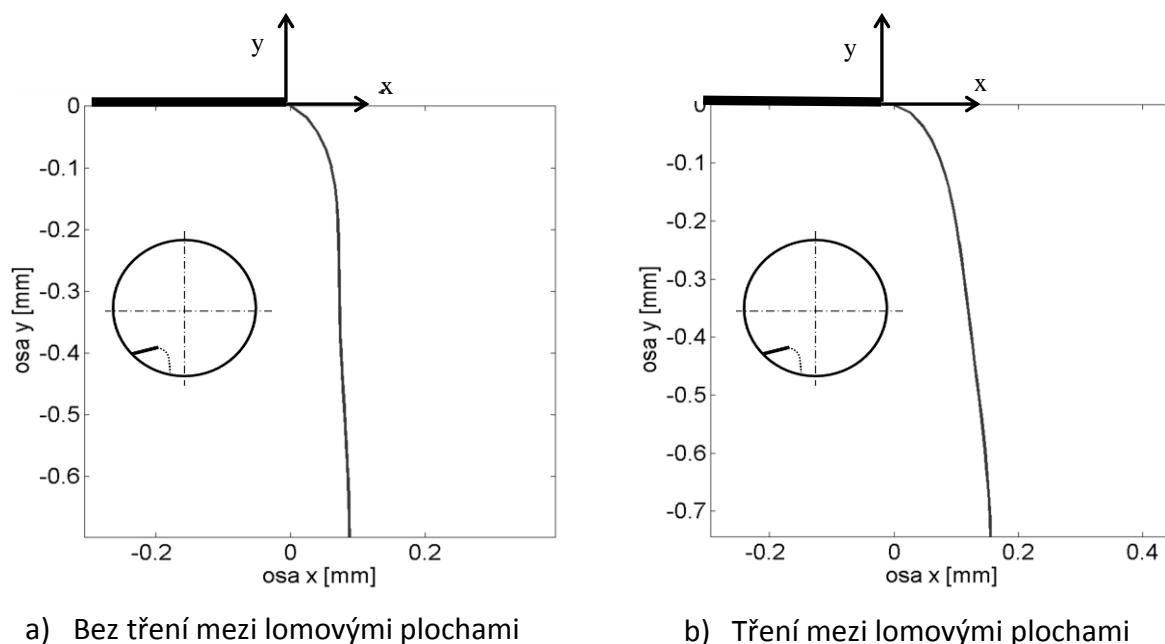
Na Obr. 15 jsou prezentovány dráhy trhlin pro případ volného valení. Znázorněný souřadný systém je umístěn na čele původní trhliny 2 mm dlouhé pod sklonem 20° , viz Obr. 6. Pro případ, kdy není uvažováno tření mezi lomovými plochami trhliny, se trhlina šíří směrem ke středu kola. Naproti tomu v případě, kdy je mezi lomovými plochami uvažován odpor (tření), se trhlina stáčí směrem ven – k jízdniému profilu. V další sérii obrázků je prezentován případ, kdy tečná složka T působí ve směru trhliny – Obr. 16.



Obr. 16 Dráhy trhlin – T ve směru trhliny

Na první pohled je zřejmé, že na dráhy trhlin na Obr. 16 nemá pohyb lomových ploch vůči sobě podstatný význam. Obě prezentované dráhy mají stejný trend s tím rozdílem, že v případě

uvažovaného tření není směr šíření do středu kola tak intenzivní. Stejný vliv na dráhy trhlin má pohyb lomových ploch vůči sobě i v dalším případě zatěžování, tj. kdy tečná složka T působí proti směru trhliny – Obr. 17.

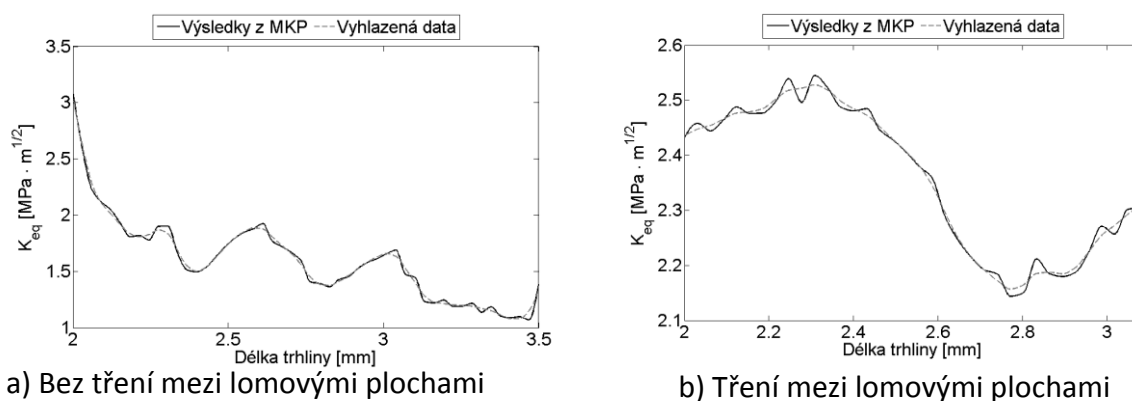


Obr. 17 Dráhy trhlin – T proti směru trhliny

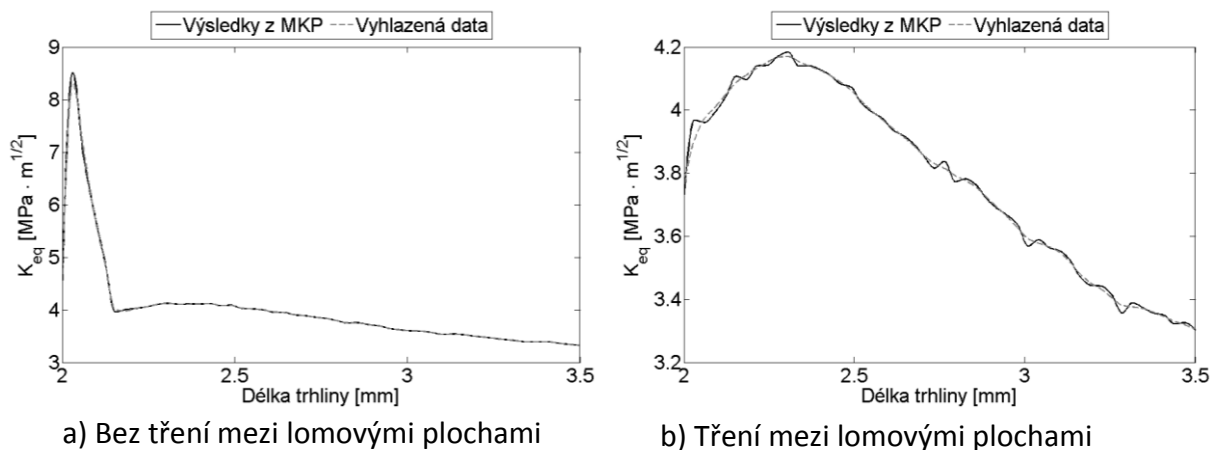
Pro oba případy, tj. se třením a bez tření mezi lomovými plochami trhlina, se trhlina šíří směrem k jízdnímu profilu železničního kola. V případě, kde je uvažován odpor vůči vzájemnému pohybu lomových ploch, je odklon dráhy trhliny méně intenzivní. Stejně jako v předchozím případě, kdy tečná složka T působila opačně, je i zde vliv tření mezi lomovými plochami málo významný.

4.2 ZÁVISLOST K_{eq} NA DÉLCE TRHLINY

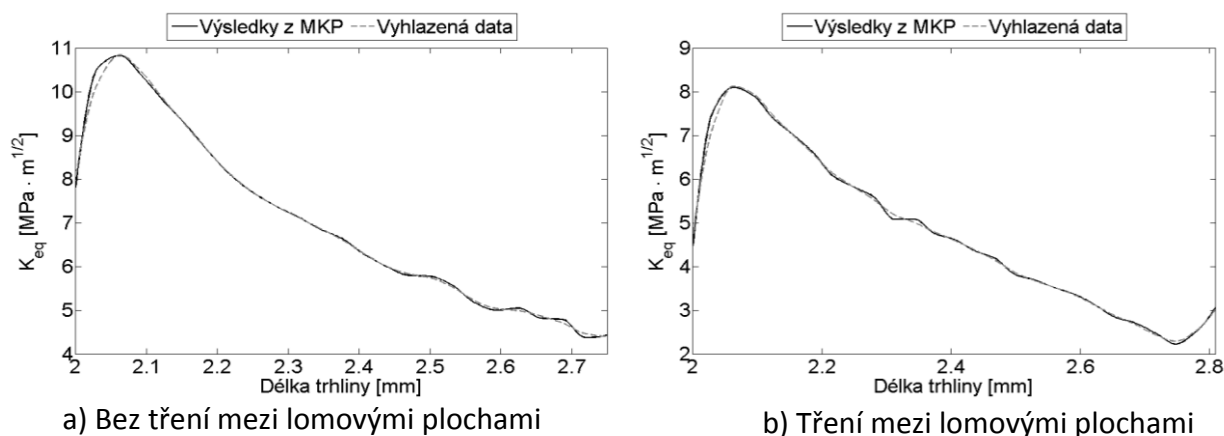
Pro určení rychlosti šíření únavové trhliny je nutné znát závislost ekvivalentního součinitele intenzity napětí na délce trhliny. Součinitel intenzity napětí K_{eq} se stanoví z průměrné hodnoty součinitele intenzity napětí $\overline{K_{II}}$ – rovnice 2.15 a z maximální hodnoty součinitele intenzity napětí K_I . Oba součinitelé se poté dosadí do rovnice 2.2. Získaná závislost slouží jako vstup do modifikovaného Parisova zákona – rovnice 2.19. Získané průběhy součinitele intenzity napětí K_{eq} na délce trhliny byly následně filtrovány.



Obr. 18 K_{eq} na délce trhliny – volné valení



Obr. 19 K_{eq} na délce trhliny – T ve směru trhliny

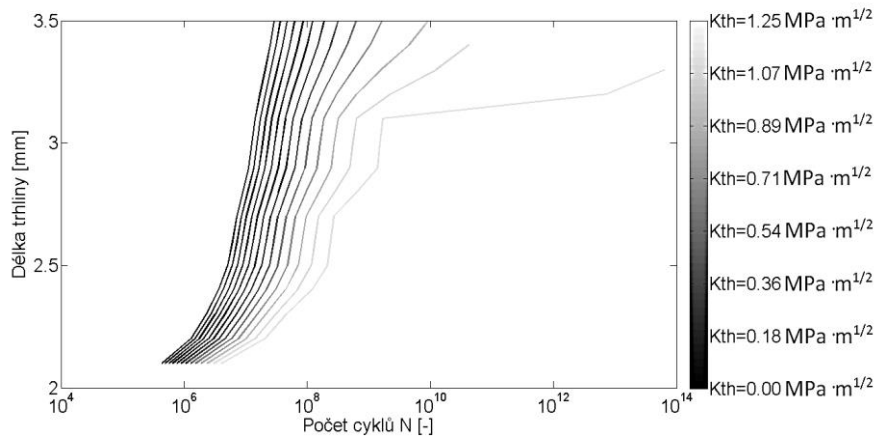


Obr. 20 K_{eq} na délce trhliny – T proti směru trhliny

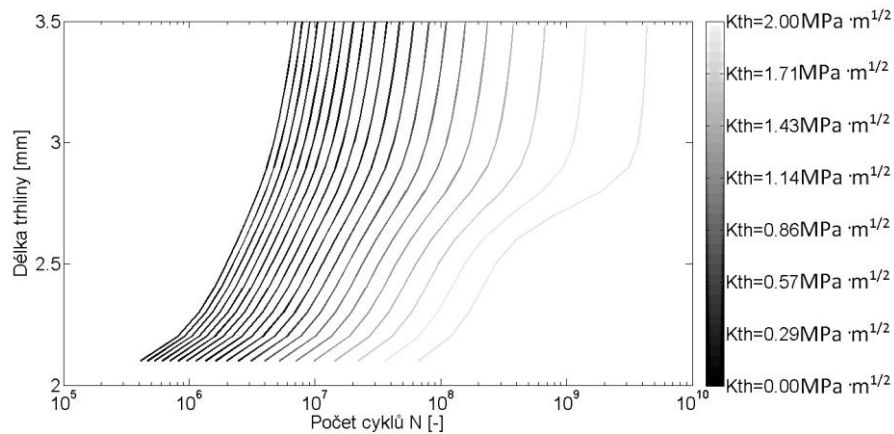
Jelikož ekvivalentní součinitel intenzity napětí K_{eq} obsahuje průměrnou hodnotu $\overline{K_{II}}$ a maximální hodnotu K_I , mohou některé závislosti oscilovat, viz Obr. 18. Pokud je při řešení uvažováno provozní zatížení s tečnou složkou, lze z grafů uvedených na Obr. 19 a Obr. 20 vidět, že její přítomnost může uvedené závislosti - K_{eq} na délce trhliny - stabilizovat.

4.3 RYCHLOST ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY

V této kapitole jsou prezentovány výsledky rychlosti šíření únavové trhliny pro různou prahovou hodnotu součinitele intenzity napětí K_{th} . Uvedené závislosti na Obr. 21 až Obr. 23 vznikly implementací výsledků z předchozí kapitoly (tj. závislostmi uvedenými na Obr. 18 až Obr. 20) do modifikovaného Parisova zákona, tj. řešením rovnice 2.19. Rychlost šíření únavové trhliny je řešena v závislosti na sérii prahových hodnot součinitele intenzity napětí, kde lze získat představu, jak tato hodnota může ovlivnit rychlost šíření. Předkládané závislosti jsou tedy studii charakteru šíření trhliny, nikoliv přesnou hodnotou počtu cyklů do porušení.



a) Bez tření mezi lomovými plochami

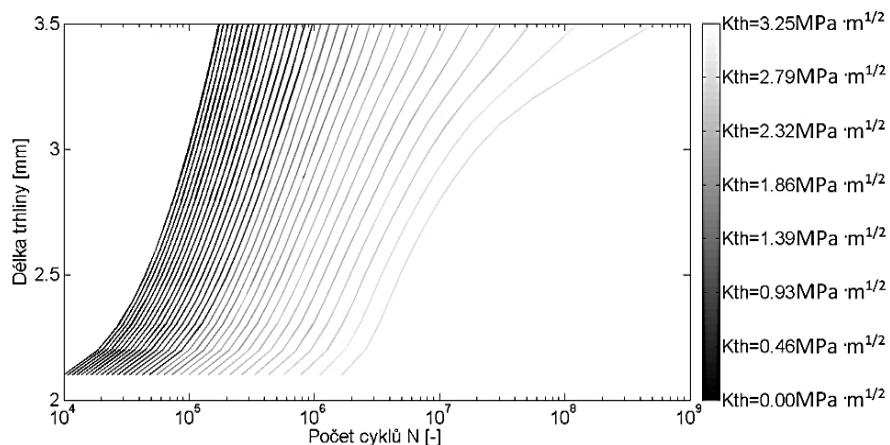


b) Tření mezi lomovými plochami

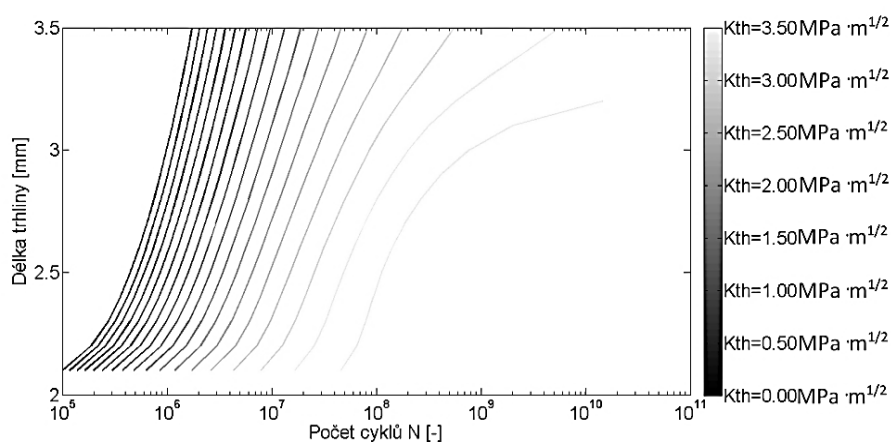
Obr. 21 Závislost délky trhliny na počtu cyklů – volné valení

V případě volného valení železničního kola – Obr. 21, kde je přítomný defekt typu trhliny, má významný vliv na chování trhliny možnost pohybu lomových ploch vůči sobě. Tato skutečnost zde byla simulována pomocí smykového tření. V ideálním případě, kdy není tření mezi stykovými plochami uvažováno, se bude růst trhliny s různou intenzitou zpomalovat a dokonce se může zastavit v určité hloubce pod povrchem – Obr. 21a. Naproti tomu, pokud je uvažováno tření mezi lomovými plochami trhliny, může nastat takový případ, že její růst bude zrychlovat a dojde k vydrolení materiálu Obr. 15a.

Na dalším obrázku – Obr. 22, jsou zobrazeny závislosti pro případ tečné složky působící ve směru trhliny.



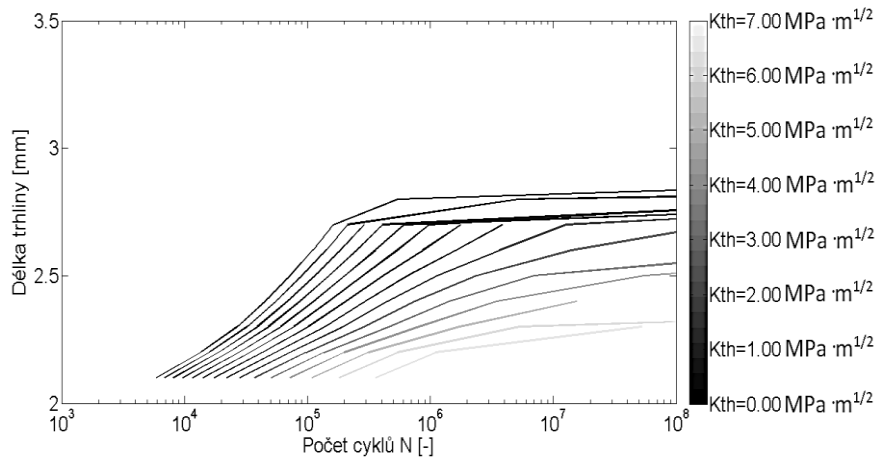
a) Bez tření mezi lomovými plochami



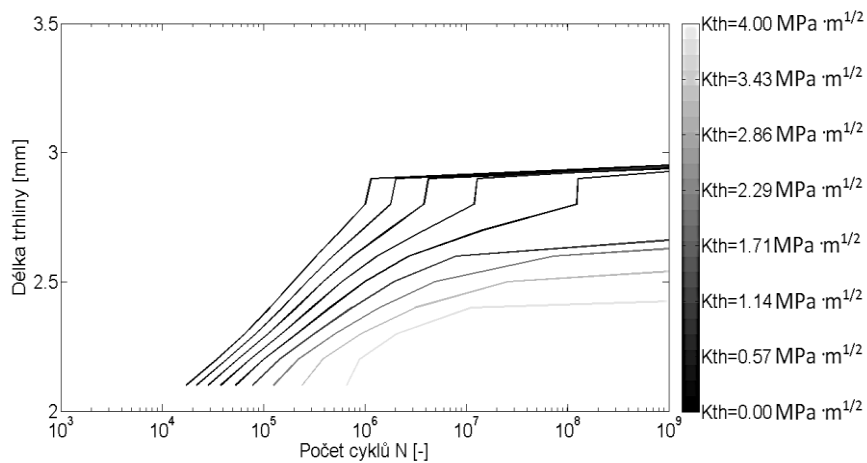
b) Tření mezi lomovými plochami

Obr. 22 Závislost délky trhliny na počtu cyklů – T ve směru trhliny

Při působení tečné složky kontaktního zatížení nemá významný vliv na rychlost šíření trhliny možnost pohybu lomových ploch vůči sobě. Z Obr. 22 je vidět velmi podobný trend křivek a je zřejmé, že rychlost šíření trhliny se bude s její délkou zpomalovat. Na posledním obrázku v této kapitole – Obr. 23, je ukázán vliv tečné složky působící proti směru trhliny na její šíření.



a) Bez tření mezi lomovými plochami



b) Tření mezi lomovými plochami

Obr. 23 Závislost délky trhliny na počtu cyklů – T proti směru trhliny

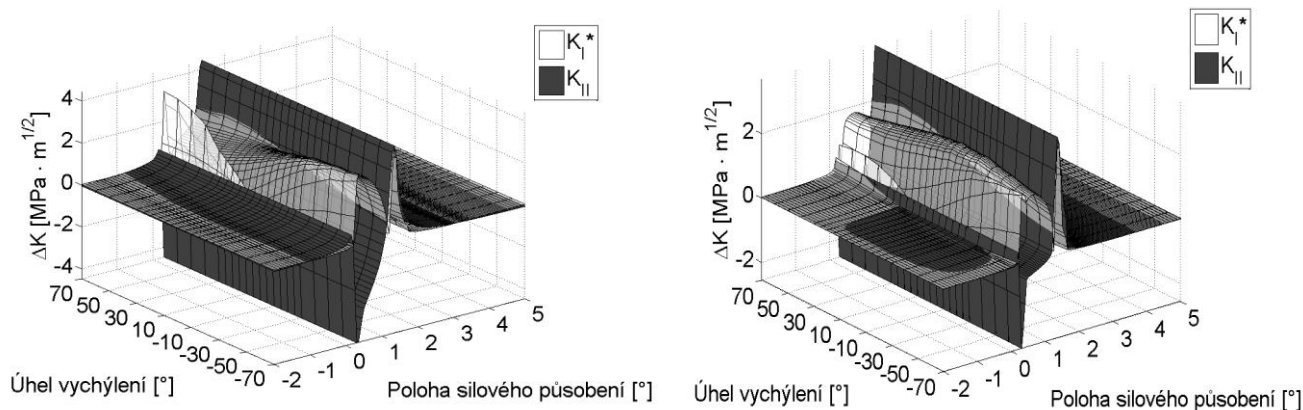
Omezení pohybu lomových ploch výrazně zpomaluje rychlost trhliny. Pro oba uvažované případy chování lomových ploch je však chování trhliny podobné. S rostoucí délkou trhliny rychlost šíření významně klesá, i když se pro tento případ trhlina stáčí k obvodu kola. Lze to vysvětlit tím, že tečná složka více trhlinu uzavírá, jelikož její uzavírání působí v intervalu α_2 – Obr. 13, který je delší, a na uzavírání trhliny může mít větší vliv.

4.4 POSOUZENÍ MOŽNÉHO KOPLANÁRNÍHO RŮSTU ÚNAVOVÉ TRHLINY PODLE PLANKA

V této kapitole je zaměřena pozornost na možnost koplanárního šíření trhliny. V kapitole 2.6 je stručně popsáno Plankovo kritérium a zmíněny dvě podmínky (rce 2.16 a 2.17), které jsou nutné pro to, aby se mohlo koplanární šíření realizovat. Koplanární šíření je takové šíření, kdy trhlina pokračuje přímo v započatém směru do té doby, než se podmínky koplanárního šíření poruší.

První podmínka (2.16) je podmínkou materiálovou. Tato podmínka není v práci uvažována, protože potřebná materiálová charakteristika je nestandardní a její měření je nákladné. Naproti tomu druhá podmínka (2.17) říká, že rozkmit součinitele intenzity napětí $|\Delta K_{II}|$ na čele původní trhliny musí být větší než rozkmit součinitele intenzity napětí $\Delta K_I^*(\Delta\varphi)$ pro malý přírůstek trhliny. A právě na tuto podmínku (2.17) je tato studie zaměřena. Přírůstek trhliny byl vyšetřován v rozsahu platnosti Richardova kritéria, tj. přibližně $\pm 70^\circ$, což reprezentuje $\Delta\varphi$.

Aby byla podmínka 2.17 splněna, musí amplituda K_{II} (šedá plocha) ve všech grafech této kapitoly, musí být větší než amplituda K_I^* (bílá plocha).



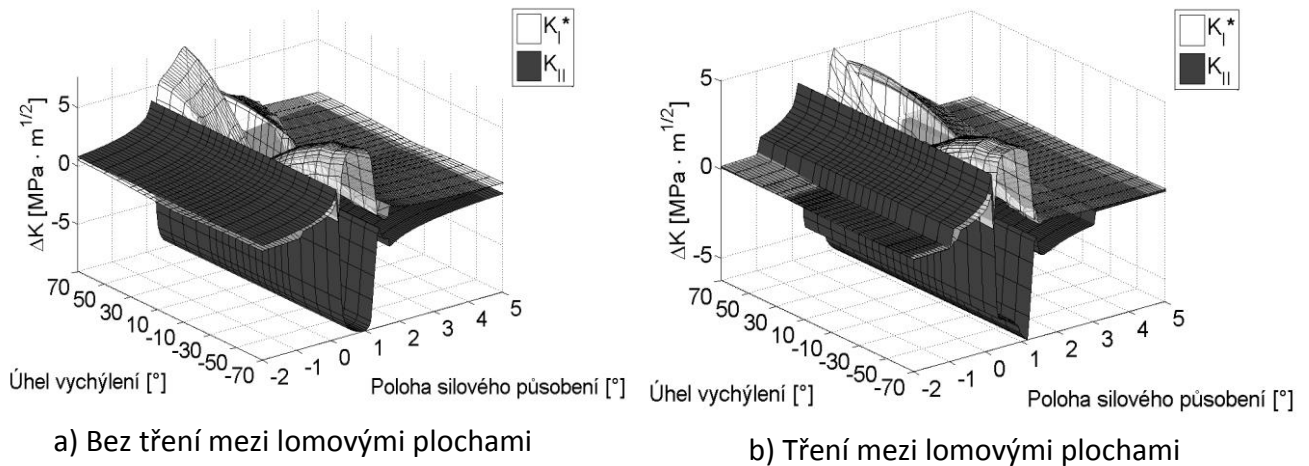
a) Bez tření mezi lomovými plochami

b) Tření mezi lomovými plochami

Obr. 24 Součinitele intenzity napětí v závislosti na poloze silového působení – volné valení (monoblok)

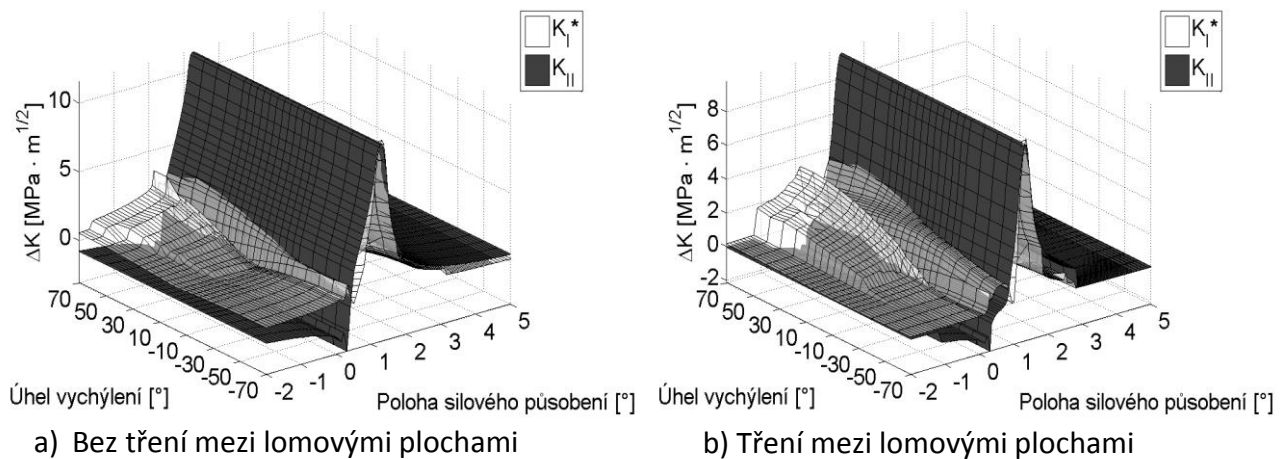
Z prostorových grafů uvedených na Obr. 24 vyplývá, že bude splněna podmínka (2.9) pro oba dva případy pohybu lomových ploch vůči sobě, tj. amplituda K_{II} (šedá plocha) je větší než amplituda K_I^* (bílá plocha) v plném rozsahu, takže koplanární růst trhliny je zde možný.

Podíváme-li se ale na grafy na Obr. 25, zjistíme tu samou skutečnost. V obou případech je amplituda K_{II} (šedá plocha) větší než amplituda K_I^* (bílá plocha), tudíž je splněna podmínka $|\Delta K_{II}| > \Delta K_I(\Delta\varphi)$ (tj. podmínka 2.17) a může nastat koplanární šíření trhliny.



Obr. 25 Součinitele intenzity napětí v závislosti na poloze silového působení – T ve směru trhliny (monoblok)

Grafy prezentované na Obr. 26 oproti ostatním zde uvedeným případům ukazují, že pro vyšetřovaný interval polohy silového působení nebude vždy amplituda K_{II} (šedá plocha) větší než amplituda K_I^* (bílá plocha).



Obr. 26 Součinitele intenzity napětí v závislosti na poloze silového působení – T proti směru trhliny (monoblok)

To znamená, že podmínka 2.17 není splněna a koplanární růst trhliny v tomto případě nemusí být realizován.

Z této kapitoly je zřejmé, že pokud je simulováno šíření únavové trhliny při neproporcionálním zatěžování, může nastat její koplanární šíření, které může ovlivnit předpokládanou dráhu trhliny.

5 ZÁVĚR

Práce se zabývá případem trhliny dlouhé 2 mm skloněné pod mělkým úhlem 20° . Tato geometrie trhliny je typická v železničních kolech, jak uvádí mnoho autorů, např. Bogdański [3] a Zerbst [35]. Je tedy simulováno šíření této trhliny pro různé provozní podmínky celistvého kola. Pro všechny zde zmíněné provozní podmínky bylo uvažováno různé chování lomových ploch, které bylo simulováno pomocí smykového tření:

- a) Bez tření
- b) Se třením $f=0,1$

Dále byla řešena rychlost šíření únavové trhliny závislá na prahové hodnotě součinitele intenzity napětí K_{th} a také byla posouzena možnost jejího koplanárního růstu. Z provedených analýz v kapitole 4 lze udělat tyto závěry:

Pro případ volného valení

- Bez uvažování tření mezi lomovými plochami
 - Trhlina se šíří radiálním směrem
 - S rostoucí délkou trhliny její rychlost klesá → možné zastavení
 - Možný koplanární růst trhliny
- S uvažováním tření mezi lomovými plochami
 - Trhlina se šíří směrem k obvodu kola
 - S rostoucí délkou trhliny její rychlost roste → vydrolení materiálu
 - Možný koplanární růst trhliny

Pro případ tečné složky ve směru trhliny

- Bez uvažování tření mezi lomovými plochami
 - Trhlina se šíří radiálním směrem
 - S rostoucí délkou trhliny její rychlost klesá → možné zastavení
 - Možný koplanární růst trhliny
- S uvažováním tření mezi lomovými plochami
 - Trhlina se šíří radiálním směrem
 - S rostoucí délkou trhliny její rychlost klesá → možné zastavení
 - Možný koplanární růst trhliny

Pro případ tečné složky proti směru trhliny

- Bez uvažování tření mezi lomovými plochami
 - Trhlina se šíří k obvodu kola
 - S rostoucí délkou trhliny její rychlost klesá → vydrolení materiálu
 - Není pravděpodobný koplanární růst trhliny
- S uvažováním tření mezi lomovými plochami
 - Trhlina se šíří radiálním směrem
 - S rostoucí délkou trhliny její rychlost klesá → vydrolení materiálu
 - Není pravděpodobný koplanární růst trhliny

Z uvedených výsledků lze usoudit, že nejvíce nepříznivý je provozní stav, kdy tečná složka působí ve směru trhliny. To proto, že se trhlina stáčí ke středu kola a je možné koplanární šíření. To samé platí pro případ volného valení, kdy je uvažován volný pohyb lomových ploch vůči sobě. Ostatní případy trhlin, které se stáčíjí k obvodu kola, jsou méně nebezpečné, protože způsobí vydrolení materiálu, ale ne rozlomení kola.

6 LITERATURA

1. **Anderson, T. L.** *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. London : CRC Press, 2000. ISBN-10: 0849342600.
2. **Bernasconi, A., a další.** Multiaxial fatigue of a railway wheel steel under non-proportional loading. *International Journal of Fatigue*. 2006, 28, stránky 663–672.
3. **Bogdański, S. a Brown, M.W.** Modelling the three-dimensional behaviour of shallow rolling contact fatigue cracks in rails. *Wear*. 2002, 253, stránky 17–25.
4. **Donzella, G., a další.** Progressive damage assessment in the near-surface layer of railway wheel–rail couple under cyclic contact. *Wear*. 2010, v tisku, str. 9.
5. **Ekberg, A. a Kabo, E.** Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading—an overview. *Wear*. 2005, 258, stránky 1288–1300.
6. **Erdogan, F. a Sih, G. C.** On the Crack Extension in Plates under Plane Loading. *Journal of Basic Engineering*. 1963, Sv. 85.
7. **Gdoutos, E. E.** *Fracture Mechanics - An Introduction*. Dordrecht : Springer, 2005. ISBN 1-4020-3153-X.
8. **Gross, D. a Thomas, S.** *Fracture Mechanics with introduction to Micromechanics*. Berlin : Springer Berlin, 2006. str. 315. ISSN 0941-5122.
9. **Guagliano, M. a Pau, M.** Analysis of internal cracks in railway wheels under experimentally determined pressure distributions. *Tribology International*. 2007, 40, stránky 1147–1160.
10. **Guagliano, M., Sangirardi, M. a Vergani, L.** Experimental analysis of surface cracks in rails under rolling contact loading. *Wear*. 2008, 265, stránky 1380–1386.
11. **Jandora, R.** Modelling of railway vehicle movement considering non-ideal geometry of wheels and rails. *Applied and Computational Mechanics*. 1, 2007, Sv. 2, stránky 489–498.
12. **Kaloč, R., Beneš, L. a Kout, J.** Valivý kontakt jako dynamický problém. *Scientific Papers of University Pardubice*. 2004.
13. **Khan, S.M.A. a Khraisheh, M.K.** Analysis of mixed mode crack initiation angles under various loading conditions. *Engineering Fracture Mechanics*. 2000, 67, stránky 397–419.
14. **Kuna, M., a další.** Fracture mechanics based design of a railway wheel made of austempered ductile iron. *Engineering Fracture Mechanics*. 2005, 72, stránky 241–253.
15. **Murakami, Y., a další.** Fatigue crack path and threshold in Mode II and Mode III loadings. *Engineering Fracture Mechanics*. 2008, 75, stránky 306–318.
16. **Navrátil, P.** *Analýza šíření trhlin v železničním kole za provozních podmínek - Diplomová práce*. Brno : VUT FSI UMTMB, 2009. str. 113. Diplomová práce.
17. **Navrátil, P., a další.** Influence of stress waves to cracked railroad wheel. *Experimental Stress Analysis*. 2011, Sv. 1, stránky 259–265.
18. **Ognjanovic, M., a další.** Research of rail traction shafts and axles fractures towards impact of service conditions and fatigue damage accumulation. *Engineering Failure Analysis*. 2010, stránky 1560–1571.
19. **Paris, P.C., Gomez, M.P. a Anderson, W.E.** A rational analytic theory of fatigue. *The Trend in Engineering*. 1961, stránky 9–14.
20. **Pellini, W.** Guidelines for Fracture-Safe and Fatigue-Reliable Design of Steel Structures. Abington : Welding Institute, 1983.
21. **Plank, R. a Kuhn, G.** Fatigue crack propagation under non-proportional mixed mode loading. *Engineering Fracture Mechanics*. 1999, 62, stránky 203–229.
22. **Pook, L.P.** *Crack Paths*. London : WIT Press, 2002. str. 168. ISBN: 978-1-85312-927-8.

23. **Qian, J. a Fatemi, A.** Mixed mode fatigue crack growth: A literature survey. *Engineering Fracture Mechanics*. 1996, stránky 969-990.
24. **Richard, H.A., a další.** Fracture in a rubber-sprung railway wheel. *Engineering Fracture Analysis*. 2005, Sv. 12, stránky 986-999.
25. **Richard, H.A., a další.** Development of fatigue crack growth in real structures. *Engineering Fracture Mechanics*. 2008, 75, stránky 331-340.
26. **Sander, M. a Richard, H.A.** Lifetime predictions for real loading situations—concepts and experimental results of fatigue crack growth. *International Journal of Fatigue*. 2003, 25, stránky 999–1005.
27. **Schölmann, M., a další.** A new criterion for the prediction of crack development in multiaxially loaded structures. *International Journal of Fracture*. 2002, 117, stránky 129–141.
28. **Sih, G. C.** Methods of analysis and solutions of crack problems. *Mechanics of Fracture*. 1973, Sv. 1.
29. **Sun, C.T. a Jin, Z.-H.** *Fracture Mechanics*. místo neznámé : Elsevier AP, 2012. str. 308. ISBN 978-0-12-385001-0.
30. **Taraf, M., a další.** Numerical analysis for predicting the rolling contact fatigue crack initiation in a railway wheel steel. *TribologyInternational*. 2009, 43, stránky 585–593.
31. **Vlk, M. a Florian, Z.** *Mezní stavy a spolehlivost*. Brno : VUT Brno, 2007.
32. **Wallentin, M., Bjarneheda, H.L. a Lundén, R.** Cracks around railway wheel flats exposed to rolling contact loads and residual stresses. *Wear*. 2005, 258, stránky 1319-1329.
33. **Wasiluk, B. a Hoshide, T.** The fracture process in elastic-plastic materials under biaxial cyclic loading. *international Journal of Fatigue*. 2003, 25, stránky 221-229.
34. **Wen, Z., a další.** Three-dimensional elastic–plastic stress analysis of wheel–rail rolling contact. *Wear*. 2011, 271, stránky 426-436.
35. **Zerbst, U., Madler, K. a Hintze, H.** Fracture mechanics in railway applications—an overview. *Engineering Fracture Mechanics*. 2005, stránky 163-194.

CURRICULUM VITAE

OSOBNÍ INFORMACE

Jméno a příjmení: Petr Navrátil
Datum a místo narození: 28. 5. 1985, Praha
Bydliště: Slezská 593, 537 05, Chrudim 2
Národnost: česká
Telefon: 605 10 98 23
E-mail: Petr.Nvr@seznam.cz
Stav: svobodný

VZDĚLÁNÍ

2009 – 2012 VUT Brno, FSI, Ústav Mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky (doktorské studium)
2010 – 2012 VUT Brno, FAST, Ústav pozemního stavitelství – pozemní stavby (navazující magisterské studium)
2007 – 2009 VUT Brno, FSI, Ústav Mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky – obor Inženýrská mechanika (navazující magisterské studium)
2004 – 2007 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství (obecný bakalář)
2000 – 2004 Střední průmyslová škola strojnická, Chrudim

PŘEDCHOZÍ PRAXE

2/2013 – současnost *FEA engineer v Honeywell s.r.o, Brno*
5/2012 – 1/2013 *Student engineer v Honeywell s.r.o., Brno*
2 – 5/2012 *Výpočtář v Sobriety s.r.o, Kuřim*
10 – 11/2011 *Výpočtář ve firmě RIE s.r.o, Brno*
09/2010 *Studie a analýza mikointendace u firmy APERTEC s.r.o., Brno*
07 – 09/2008 *Výpočtář u firmy AV Engineering a.s., Chrudim*
08 – 09/2007 *Konstruktér u firmy Tramontáž, Chrudim*
07/2006 *Strojní zámečník u firmy Engel Gematex, Sezemice*

ABSTRAKT:

Předkládaná disertační práce vznikla pod vedením školitele Prof. Ing. Přemysla Janíčka, DrSc. a pod dohledem školitele specialisty Ing. Petra Skalky, Ph.D.

Práce se zabývá vlivem různých provozních podmínek na chování již přítomného defektu – trhliny ve věnci/obruči železničního kola. Motivací ke vzniku této práce byla spolupráce s Univerzitou Pardubice, Dopravní fakultou Jana Pernera.

První částí předkládané dizertační práce je rešerše, ve které je popsán stav současného poznání, které se týká problematiky kontaktního zatížení, kritérií k predikci šíření únavové trhliny, problematiky neproporcionálního zatěžování v „mixed-modu“ a v poslední řadě teplotního pole při brzdění.

Další část práce se zabývá již vlastním řešením problému a prezentací výsledků, kde je studováno chování trhliny pod vlivem různých provozních podmínek. V závěru práce jsou výsledky shrnuty a diskutovány v širším kontextu.

ABSTRACT:

This doctoral thesis was written under supervision of my supervisor Prof. Ing. Přemysl Janíček, DrSc. and under supervision of my specialist supervisor Ing. Petr Skalka, Ph.D.

The thesis deals with the influence of various operating conditions on crack behaviour in a wheel rim and/or tire. The dissertation topic was motivated by cooperation with Pardubice University, Faculty of Jan Perner.

The first part of the thesis presents a literature search, which provides a current state-of-art in the field of contact loading, crack propagation behaviour under mixed-mode and thermal field generated during braking.

The next part of thesis deals with the solution of the given problem and the obtained results are presented. The crack behaviour under different operating conditions is observed.

Last part of thesis summarizes the obtained results which are discussed in a broader context.