

Experimentální Analýza Napětí 2007

OVĚŘOVÁNÍ PEVNOSTNÍCH VLASTNOSTÍ PRYŽÍ ODPRUŽENÉHO KOLA

Bohuslav Řeha¹, Miroslav Novosad²

Abstract: S rozvojem tramvajové dopravy se rozšiřuje využití pryží odpružených kol. Příspěvek se týká ověřování pevnostních vlastností těchto kol. Při verifikaci výpočtu byla provedena řada měření napětí tenzometrickou metodou při různých režimech zatížení simulujících provozní podmínky. Experimentální měření byla významným přínosem z hlediska poznání chování pružných kol, protože pro výpočty se obtížně stanovují okrajové podmínky ve vztahu k vlastnostem pryžových elementů.

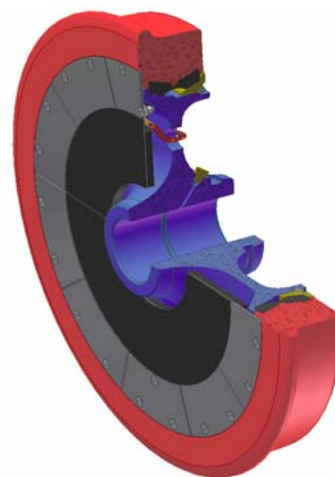
Keywords: pryží odpružené kolo, obruč, kotouč, pryžové bloky, provozní namáhání, stav zatěžování, únavové namáhání, 3D analýza, tenzometrická měření.

1. Úvod

Požadavky na ochranu životního prostředí se stále více prosazují i v oblastech dopravy. V městech, kde tramvajové tratě vedou hustě osídlenými oblastmi jsou používána pružná tramvajová kola. Konstrukce pružných kol se vyznačuje tím, že mezi obručí a kotoučem kola se nacházejí pryžové špalíky, a v provozu se tato kola projevují tím, že mají nízké hodnoty hluku a vibrací. Díky tomu jsou u těchto kol i nižší hodnoty opotřebení jízdní plochy obruče což výrazně prodlužuje životnost kola.

2. Vývoj pružných tramvajových kol

Vývoj pryží odpružených kol v BONATRANS a.s. se datuje rokem 1997 kdy bylo navrženo a vyrobeno kolo pro tramvaje typu T3 vyrobené v ČKD. S prvními pryží odpruženými koly konstrukce BONATRANS začaly jezdit tramvaje T3 provozované v Ostravě, potom nové tramvaje typu Astra a další vozidla. Kola s pryžovými špalíky tak postupně nahrazují na starších tramvajích původní kola typu ČKD-Tatra. Pryží odpružená kola Bonatrans jsou určena pro aplikace na všech typech standardních i nízkopodlažních tramvajích, na vozech příměstské kolejové dopravy a vozech metra.



Obr. 1: Průřez tramvajovým kolem s pryžovými špalíky.

¹ Ing. Bohuslav Řeha, BONATRANS GROUP, a.s., Revoluční 1234, 735 94 Bohumín, tel.: +420 597083378, e-mail: breha@bonatrans.cz

² Ing. Miroslav Novosad CSc, BONATRANS GROUP, a.s., Revoluční 1234, 735 94 Bohumín, tel.: +420 597083098, e-mail: mnovosad@bonatrans.cz

Mezi výrobce, se kterými jsme společně připravovali konstrukce pryží odpružených kol pro tramvaje, patří např. Alstom, Inekon-Astra, ČKD Dopravní systémy a Škoda Dopravní technika. Pryží odpružená kola BONATRANS jsou provozována v Itálii, České republice, na Slovensku, v Polsku, Maďarsku, Bosně a Hercegovině. V současnosti je připravován provoz v dalších evropských i mimoevropských městech.

3. Provozní podmínky

Kolo přenáší zatížení z vozidla na kolej a zajišťuje přenos vodících, hnacích a brzdných sil. Schopnost kola dlouhodobě splňovat požadavky na ně kladené se ověřuje výpočtem a případně zkouškami, kdy je simulováno provozní zatížení. Rozhodujícím zatížením kola je svislá síla daná hmotností vozidla od které se odvozují hodnoty ostatních zatěžujících sil. V souladu s železničními normami [1] se ověřují tři případy zatěžování kola, a to svislou silou, svislou a vodící silou při průjezdu obloukem a při průjezdu výhybkou.



Obr. 2: Působení zatěžujících sil v případě tramvajového kola

Pro ověření provozní bezpečnosti byla provedena vedle výpočtu kola v programu COSMOS/M řada experimentálních měření, a to jak na celém kole, tak i na samotné obruči a kotouči kola. Samostatnou kapitolu představuje zkoušení vlastních pryžových segmentů. Hodnoty napětí v obruči vyvolané zatěžujícími silami ovlivňuje totiž také materiálová charakteristika použitých pryžových segmentů. Tuhost použité gumy se projevuje na deformacích kola, které souvisí s naměřeným napětím.

4. Měření na kole

Byla provedena řada tenzometrických měření na složeném kole. Pomocí pravoúhlých tenzometrických růžic byla měřena napětí v nejvíce namáhaných místech a byly kontrolovány velikosti deformací pro různé hodnoty zatížení kola.

Na obruč byly nalepeny dvě tenzometrické růžice O1, O2. Na přítlačný kroužek byla nalepena jedna růžice PK a na kotouč šest růžic K1, K2, K3, K4, K5 a K6. Na jednotlivé části kola bylo tedy před jeho slisováním nalepeno celkem devět pravoúhlých tenzometrických růžic s měřicí mřížkou většinou délky 3 mm, pouze v místech O1 a PK musely být použity menší růžice s mřížkou délky 0,6 mm. Jednotlivé růžice byly připojeny ke svorkovnicím umístěným na vnějších částech příslušných dílů kola. Vzhledem k prostorovým dispozicím v oblasti nosu obruče, byl v místě tenzometru O1 použit gumový segment s výřezy, aby nedošlo k jeho mechanickému



Obr.3: Uspořádání zkoušky při radiálním a kombinovaném zatížení kola

poškození. Přívodní kabely byly v jednotlivých případech vyvedeny ven vrtaným otvorem na jízdní plochu nebo na vnější čelo obruče.

Při zatěžování na zatěžovací stolič byla data snímána měřicí sestavou složenou z měřících ústředěn HBM SPIDER8-30. Po nalisování obruče na náboj bylo kolo nasazeno na upínací trn na měřicím stole. Zatěžování bylo prováděno pomocí ručních hydraulických lisů (viz obr.3). Měření bylo prováděno při natočení kola 0°, 90° a 180° ve vodorovném směru v místě zatížení vůči rovině měřících tenzometrů. V průběhu zkoušky byla měřena pomocí hodinek na čtyřech místech posunutí (deformace) kola. Zatěžování kola v radiálním a axiálním směru bylo prováděno těmito zátěžovými stavy:

- I ... zatížení v radiálním směru (odpovídá UIC)
- II ... zatížení v axiálním směru 1
- III ... zatížení v axiálním směru 2
- IV ... zatížení v axiálním směru 1 při radiálním zatížení 84,5 kN (odpovídá stavu II dle UIC)
- V ... zatížení v axiálním směru 2 při radiálním zatížení 84,5 kN (odpovídá stavu III dle UIC)

Na začátku každého bloku měření bylo provedeno nulování měřících tenzometrů tzn., že vypočtená napětí jsou vyvolaná působícím zatížením a hodnoty nezahrnují vliv předchozího zatížení kola. Velikosti zatěžujících sil v radiálním směru R, axiálním směru z vnější strany kola A1 a z vnitřní strany kola A2 byly postupně kombinovány takto:

Zatěžující síla Velikost síly [kN]

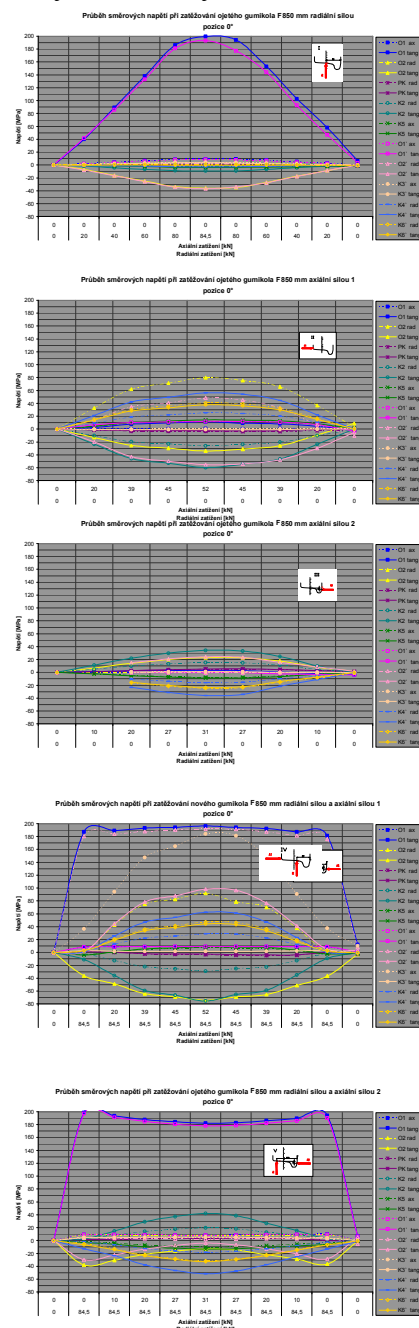
R	20 / 40 / 60 / 80 / 84,5
A1	20 / 39 / 45 / 52
A2	10 / 20 / 27 / 31

Hodnocení a výpočty byly provedeny podle [1] pro pravoúhlou tenzometrickou růžici. Pro malou oblast povrchu na obrázku 5 platí, že pro instalovanou pravoúhlou růžici je hlavní napětí σ_p pootočeno vůči ose X o úhel θ .

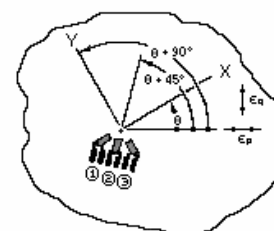
Hlavní napětí $\sigma_{P,Q}$ se v tomto případě stanoví z naměřených hodnot deformace v jednotlivých směrech ε_1 , ε_2 a ε_3 , podle následujícího vztahu:

$$\sigma_{P,Q} = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1 - \nu} \pm \frac{\sqrt{2}}{1 + \nu} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \right], \quad (1)$$

kde E je modul pružnosti a μ Poissonovo číslo.



Obr.4: Porovnání průběhu směrých napětí při různých zátěžových stavech.



Obr.5: schéma pravoúhlé tenzometrické růžice.

Směr hlavních napětí, úhel θ , se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right) \quad (2)$$

Předchozí výpočty stanoví pouze algebraické minimum a maximum napětí. Pro jednoznačné určení úhlu výše popsané růžice je vhodný následující postup. Úhel θ stanovuje pootočení hlavních os k síti růžice. Pro experimentální praxi je ale vhodnější používat opačný úhel $\Phi_{P,Q}$ vyjadřující pootočení sítě růžice vůči hlavním osám:

$$\phi_{P,Q} = -\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right) \quad (3)$$

Fyzický směr kladného úhlu je vždy proti směru otáčení hodinových ručiček, jestliže je úhel záporný pak ve směru hodinových ručiček. Protože $\tan 2\phi \equiv \tan 2(\phi + 90^\circ)$, vypočítaný úhel může odpovídat jak úhlu θ , tak $\Phi_{P,Q}$. Pro pravoúhlou růžici je proto při aplikaci výpočtu dodržet následující jednoduchá pravidla:

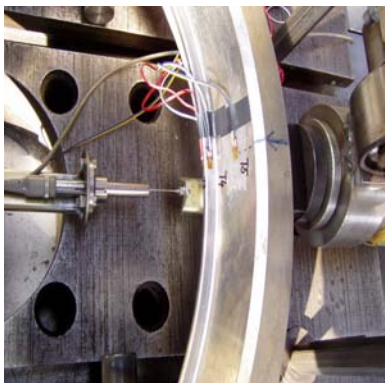
- (a) pro $\varepsilon_1 > \varepsilon_3$, je $\phi_{P,Q} = \phi_P$.
- (b) pro $\varepsilon_1 < \varepsilon_3$, je $\phi_{P,Q} = \phi_Q$.
- (c) pro $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$ a $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$, je $\phi_{P,Q} = \phi_P = -45^\circ$.
- (d) pro $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$ a $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$, je $\phi_{P,Q} = \phi_P = +45^\circ$.
- (e) pro $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$, platí že $\phi_{P,Q}$ je neurčitý.

Rozdíly průběhu napětí v jednotlivých místech při různých zátěžných stavech kola s pryžovými bloky jsou patrné z příkladu uvedeného na obr.4. Vzhledem k odlišnému umístění zatěžujících axiálních sil při zkoušce a při výpočtu bylo možné přímé srovnání pouze hodnot napětí a deformace při zátěžném stavu I a III dle UIC. Toto neplatí pro zátěžný stav II, jehož experimentální realizace je s ohledem na působení axiálních a radiálních sil technicky složitá. V kritickém místě s nejvyššími hodnotami napětí tj. v oblasti nosu obruče byly při experimentu naměřeny hodnoty o cca 30% nižší než bylo stanoveno výpočtem.

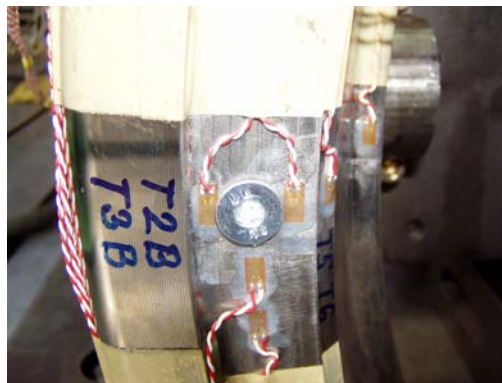
5. Měření na dílech kola.

Kromě zkoušek a měření napětí a deformací na smontovaném kole byla provedena měření radiálních a axiálních deformací na samostatné obruči včetně ověření únavových vlastností obruče při míjivém dynamickém zatížení. Protože měření napětí v místech přechodů a případných otvorů je velmi obtížné, byl nejdříve proveden výpočet. Výpočtem bylo zjištěno rozložení napětí a stanoveny hodnoty špičkových napětí.

Hodnoty napětí byly snímány pomocí jednoosých tenzometrů s měřicí mřížkou délky 6 mm. Samotná obruč byla zabudována do zkušební sestavy a zatěžována v radiálním a axiálním směru. Příklad porovnání naměřených a vypočtených hodnot napětí je uveden v tabulce 2.



Obr.6: Radiální zatěžování obruče.



Obr.7: Umístění tenzometrů na obruči při axiálním zatěžování.

Lokalizace dle čísla tenzometrů	Výsledky měření [MPa]	Výpočet s modelem díry se závitem [MPa]	Výpočet s modelem díry se závitem a šroubem [MPa]
T2	79	80	81
T3	56	54	55
T4	74	79	79
T5	55	56	56
T6	58	59	59
Závitová díra	-	208	198

Tab.1. Příklad porovnání výsledků měření a výpočtu napětí v obruči při působící axiální síle 67,5 kN.

6. Závěr

Při experimentálním ověřování gumou odpružených kol byla v BONATRANS a.s. poprvé v široké míře využita tenzometrická metoda měření napětí. Na jedné straně se objevily problémy experimentální simulace se zatížením kola zejména při kombinovaném zatěžování stavem II podle UIC, na straně druhé experiment napomohl k upřesnění okrajových podmínek výpočtu z hlediska tuhosti použitých gumových bloků.

Provedené zkoušky poskytly přehled o velikosti napětí a deformací pružného kola při předpokládaných hodnotách zatížení. Bylo prokázáno, že při předpokládaných hodnotách zatížení odvozených od hmotnosti vozidla nedojde v gumou odpruženém kole ke vzniku nepřipustně velké deformace nebo napětí.

Únavová zkouška obruče prokázala, že při ověřované hodnotě zatížení 240 MPa nedojde ani po 10 miliónech zkušebních cyklů k porušení kola. Přitom při experimentálním ověřování i při výpočtu zatěžování složeného kola byly v kritickém místě – nosu obruče zjišťovány sotva poloviční hodnoty napětí.

Literatura

- [1] *UIC CODE 510-5: „Technical approval of solid wheels“*, 1.st edition, February 2003.
- [2] *TN-515, Strain Gage Rosettes*, MEASUREMENT GROUP VISHAY, 1990.
- [3] Řeha B., Pavčo.P.: *Porovnání experimentálního měření a výpočtu napětí při zatěžování gumikola č.v. 455.8.626.810.00-11.08*, BTS, 2006.