

MECHANICAL CHARACTERISTICS OF RUBBER SEGMENT – SHEAR TEST

MECHANICKÉ CHARAKTERISTIKY PRYŽOVÉHO SEGMENTU – ZKOUŠKA SMYKEM

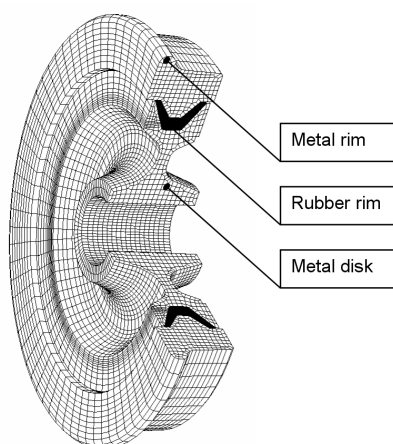
Radek Kottner,¹ Robert Zemčík², Vladislav Laš³

Abstract: Modern wheels of rail vehicles have a rim separated from the disk by rubber cushioning. The rubber cushioning consists of rubber segments. In the previous work, the material constants of the rubber segments were fitted. To fit these constants, the five term generalized Mooney-Rivlin model of hyperelastic material also known as the James-Green-Simpson model was used. The simple tension tests data and the compression tests data were input into the routines in system MSC.Marc. In the presented work, the simple shear tests of the rubber samples were done. The applicability of the identified material constants for the numerical simulation of the simple shear test was carried out. The reason for it is compression and shear loading of the rubber segments in the wheels. The tests and their numerical simulations were verified using the digital image correlation performed on photographs of tested samples.

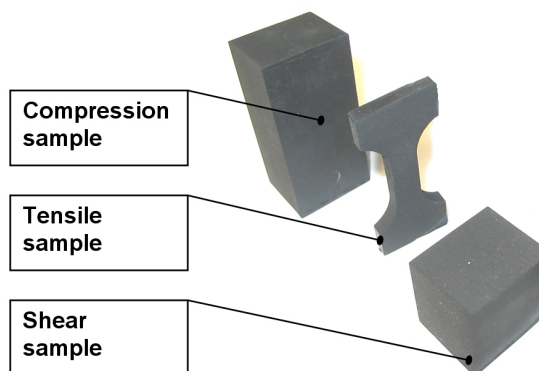
Keywords: hyperelastic material, James-Green-Simpson model, shear test, digital image correlation

1. Úvod

V současné době jsou kladeny stále větší požadavky na ekologii dopravy. Z tohoto důvodu se ukazuje železniční doprava výhodnější. Jedním z ukazatelů ekologie je nízká hluknost a proto



Obr. 1. Odpružené kolo



Obr. 2. Testovací vzorky

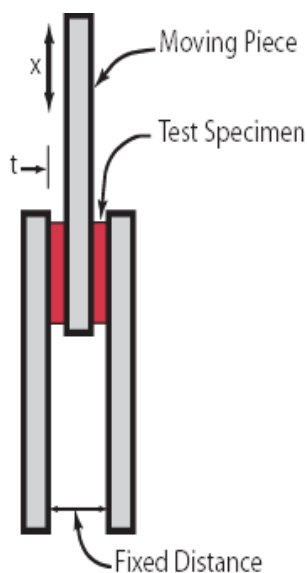
¹ Ing. Radek Kottner, ZČU v Plzni, FAV, Katedra mechaniky, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, tel.: +420 377632373, e-mail: radek.kottner@kme.zcu.cz

² Ing. Robert Zemčík, Ph.D., ZČU v Plzni, FAV, Katedra mechaniky, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, tel.: +420 377632336, e-mail: zemcik@kme.zcu.cz

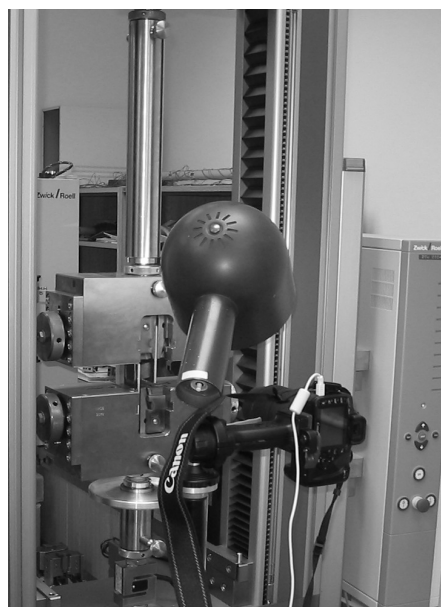
³ Doc. Ing. Vladislav Laš, CSc., ZČU v Plzni, FAV, Katedra mechaniky, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, tel.: +420 377632326, e-mail: las@kme.zcu.cz

se věnuje této problematice značná pozornost. Zdroje hluku železniční dopravy lze rozdělit na tři oblasti. Jedná se o hluk trakce, valení kola po kolejnici a aerodynamický hluk [4]. Pokud se zaměříme na tramvajovou a příměstskou dopravu, kde se nedosahuje vysokých rychlostí, je možno aerodynamický hluk vynechat, neboť ten se výrazně projevuje při rychlostech nad 200 km/hod. Výše hluku traktu je dána typem motoru, dynamickým naladěním celé konstrukce a účinností akustické izolace.

Hluk od valení kola po kolejnici je v tramvajové dopravě nejvýraznější. Snižuje se konstrukčními úpravami, jako je například zakrytí podvozku krytem nebo přidáním absorberů hluku ke kolům - např. Galene systém od firmy Lucchini Sidermeccanica. Další možností je použití kroužků tlumících hluk na kole. Tuto techniku využívá např. firma Gutehoffnungshütte Radsaf GmbH. Některé firmy používají pro snížení hlučnosti při valení kola po kolejnici pryžové segmenty, které jsou umístěny po obvodu mezi kotoučem kola a obručí (viz obr. 1) [7, 8]. Zde se vyskytuje hlavní problém s mechanickými vlastnostmi pryže. Jedná se o nelineární a hyperelastický materiál, jehož mechanické vlastnosti se mění nejen s teplotou, ale také s dobou provozu. Pokud má být návrh této konstrukce kvalifikovaný, je



Obr. 3. Schéma zkoušky dle laboratoří Axel [5, 6]



Obr. 4. Stroj Zwick/Roell Z050

nutno znát mechanické vlastnosti pryžového segmentu, na základě kterých je možno vytvořit výpočtový model pro numerickou simulaci chování systému kotouč – segment – obruč.

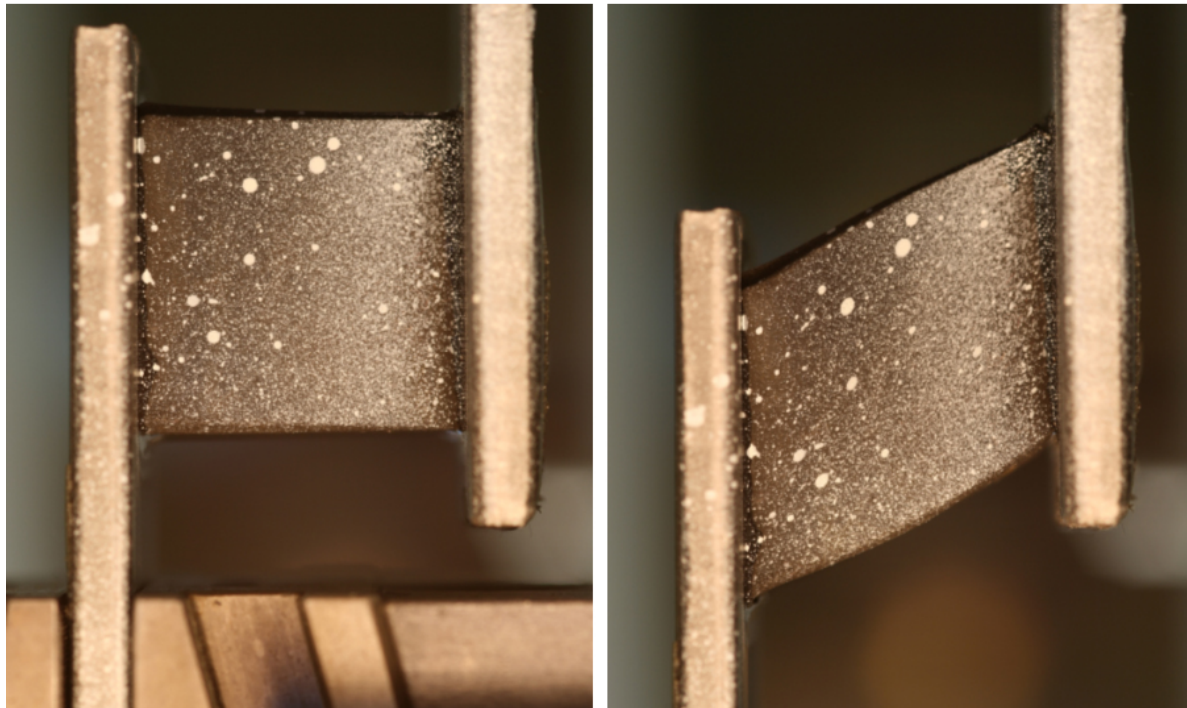
Pro popsání mechanických vlastností pryžového segmentu byl vybrán pětiparametrický Mooney – Rivlinův model (také známý jako James-Green-Simpsonův model) pro nestlačitelné materiály

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3, \quad (1)$$

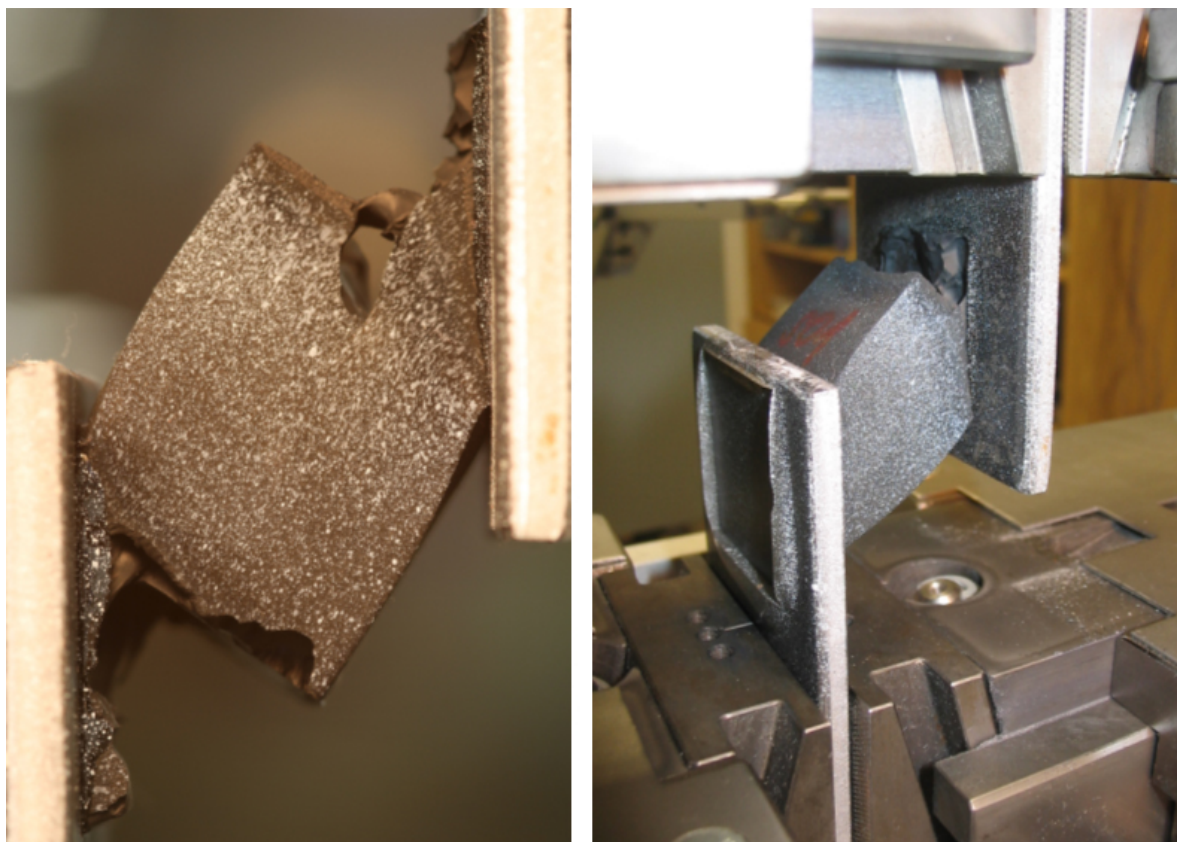
kde I_1, I_2 jsou první a druhý invariant Cauchyho tenzoru poměrných prodloužení, $C_{10}, C_{01}, C_{11}, C_{20}, C_{30}$ jsou materiálové konstanty (dále jen JGS konstanty), které lze získat pomocí experimentů [6, 9, 10].

Předešlé práce [2, 3] se zabývaly identifikací JGS konstant pomocí dat získaných ze zkoušky tahem a tlakem (tahové a tlakové vzorky jsou zobrazeny na obr. 2). Pryžové segmenty jsou ale v provozu zatěžovány především tlakem a smykem. Proto bylo cílem této

práce zjistit, jak jsou vhodné identifikované JGS konstanty pro numerické simulace zkoušky smykem.



Obr. 5. Zkouška smykem při $s = 0$ mm; $s = 15$ mm



Obr. 6. Porušení pryže při odtrhávání od upínacích plechů

2. Experiment

Experimentálnímu testování hyperelastických materiálů se věnují práce [1, 5, 6, 8, 10]. Na obr. 3 je znázorněné schéma pro zkoušku smykem dle laboratoří Axel [6]. Toto uspořádání eliminuje ohýbání částí, na které jsou nalepeny zkušební vzorky (dále jen „upínací plechy“). V této práci však bylo použito uspořádání patrné z obr. 5, neboť bylo pomocí níže uvedené optické metody zjištěno, že s použitou tloušťkou upínacích plechů k zřetelnému ohybu nedochází.

Zkoušky byly prováděny na stroji Zwick/Roell Z050 (viz obr. 4). Měření bylo prováděno při teplotě +20°C, posunutí resp. deformace byly snímány pomocí pohonu stroje a pomocí níže uvedené optické metody. Smykové vzorky měly tvar kvádrů a byly na upínací plechy přilepeny funkčními plochami segmentu. Pro lepení bylo použito lepidlo Loctite 480. Měřeno bylo pět vzorků označených jako S01 až S05. Vzorek S01 byl zatěžován rychlostí $v = 1$ mm/min až do odtržení od upínacích plechů (tj. do posunutí upínacího plechu $s = 19$ mm). Při odtržení od upínacích plechů byla porušena pryž (viz obr. 6). Vzorek S02 až S05 byl pak dle zjištěných dosažitelných deformací a s přihlédnutím k provozním podmínkám segmentu zatěžován rychlostí $v = 10$ mm/min do posunutí $s = 15$ mm. Toto zatížení bylo na každém vzorku provedeno čtyřikrát (po čtvrtém zatížení se již charakteristiky téměř nemění). Vzorky S01 a S02 byly v průběhu testů foceny po 10 sekundách. Bylo zjištěno, že mezi hodnotami posunutí z pohonu stroje a z optické metody je zanedbatelný rozdíl. Experimentální charakteristiky vzorků S02, S03 a S05 jsou zobrazeny na obr. 12. Rozdíly mezi tuhostmi všech změřených vzorků byly zanedbatelné.

2.1 Optická metoda měření deformací

Měření deformací na povrchu vzorku bylo provedeno optickou metodou založenou na korelaci digitálního obrazu (Digital Image Correlation). Na povrch vzorku byl nanesen náhodný vysoce kontrastní vzor a ten byl nasnímán v rozlišení cca. 50 pixelů/mm v nezdeformované konfiguraci bez zatížení a ve zdeformované konfiguraci po zatížení. Části (tzv. fasety) nezdeformovaného obrazu A (složky jasu, 50×50 pixelů) byly lokalizovány ve zdeformované konfiguraci jako B pomocí minimalizace chyby funkce Δ , kde

$$\Delta = \sum_{x,y} \left\{ \left(A(x,y) - B(x + \Delta x, y + \Delta y) \right)^2 \right\}, \quad (2)$$

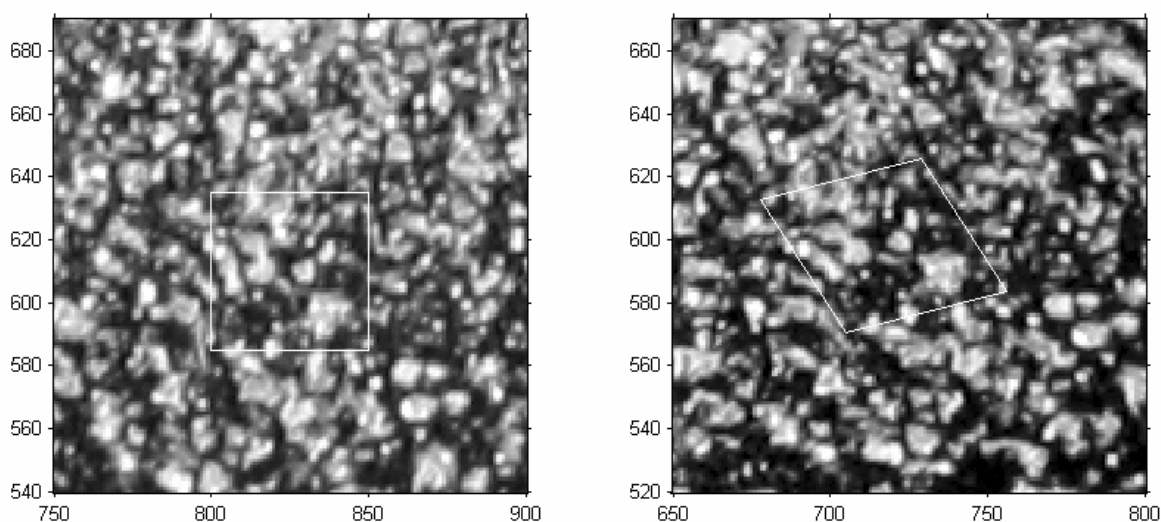
x a y jsou souřadnice bodů fasety v původní konfiguraci a

$$\Delta x = f(u, v, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \alpha, \beta), \quad \Delta y = f(u, v, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \alpha, \beta), \quad (3)$$

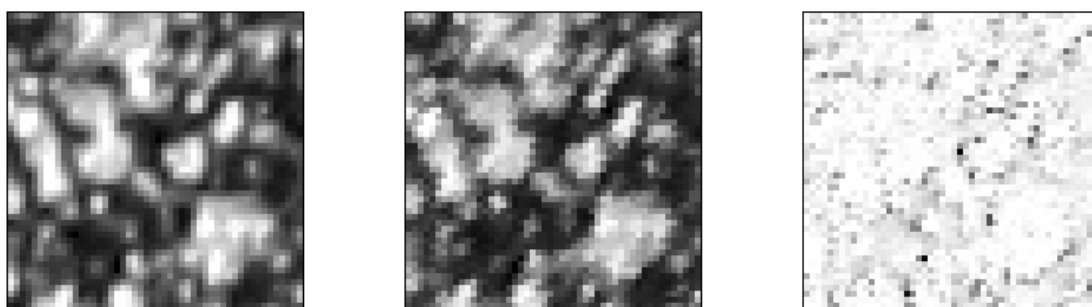
jejich posunutí ve zdeformované konfiguraci, jež jsou obecně funkcí posunutí fasety u a v , hlavních deformací ε_1 a ε_2 (v rovině obrazu), úhlu natočení os hlavních deformací α a úhlu pootočení fasety β . Všechny parametry byly v rámci jedné fasety uvažovány jako konstanty.

Na obr. 7 je naznačena původní a lokalizovaná zdeformovaná faseta. Hodnoty jasu A a B dané fasety a čtverce jejich rozdílu jsou na obr. 8.

K vyhodnocení bylo použito digitálního fotoaparátu Canon EOS 400D (10Mpx) s objektivem Sigma 105/2.8 EX DG MACRO.



Obr. 7. Povrch vzorku s naznačenou fasetou - vlevo před zatížením a vpravo po zatížení



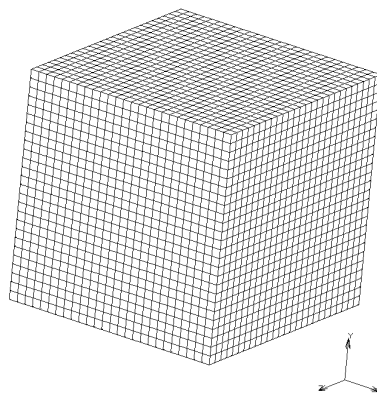
Obr. 8. Vlevo hodnoty jasu A původní fasety, uprostřed hodnoty B transformované fasety, vpravo chyba transformace $(A-B)^2$

3. Numerická simulace

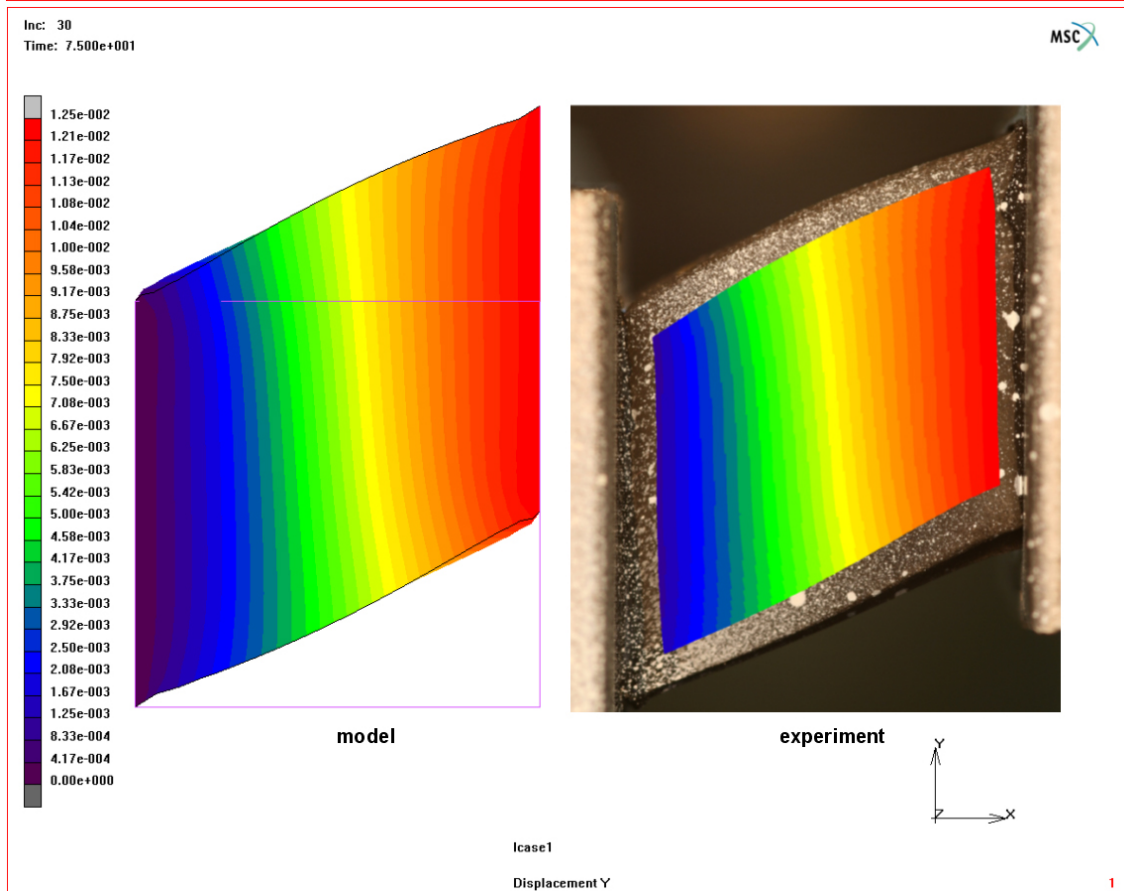
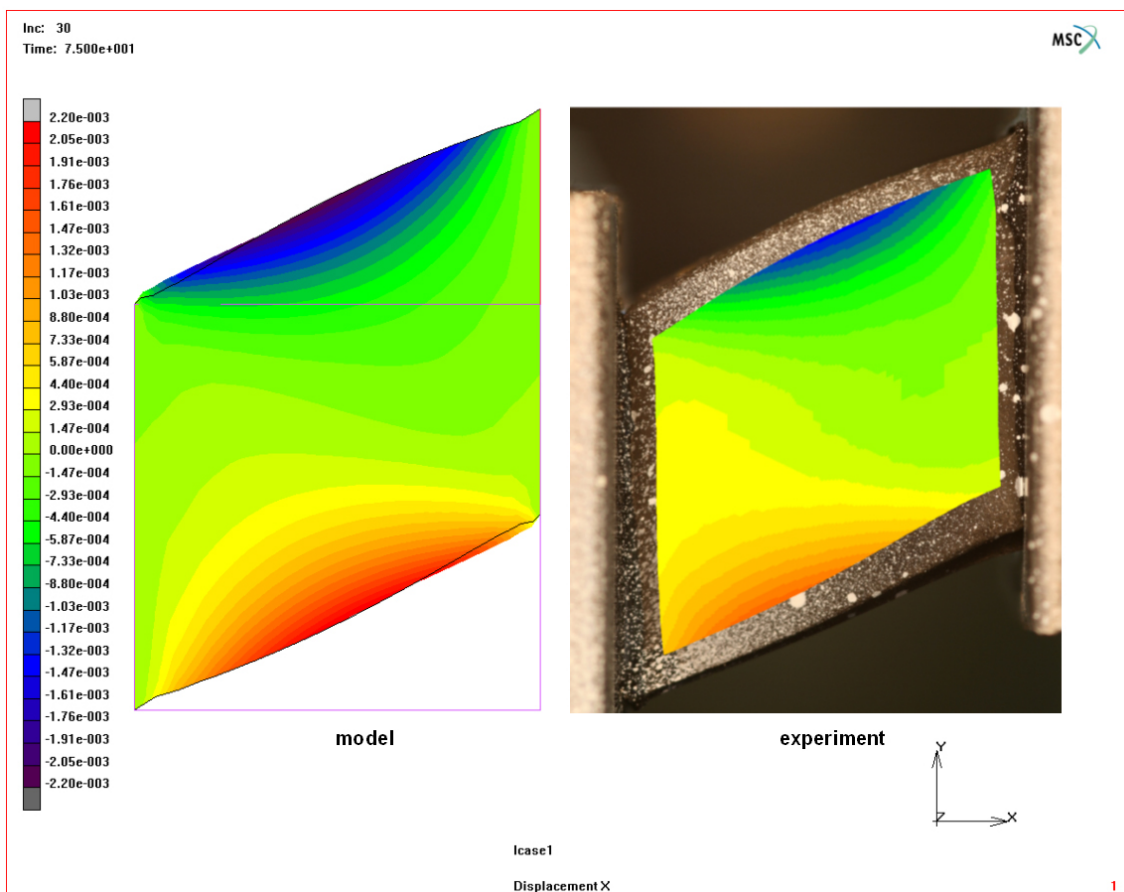
V systému MSC.Marc byl vytvořen výpočtový model smykového vzorku (viz obr. 9), pomocí kterého byly numericky simulovány zkoušky. V simulaci byly použity identifikované JGS konstanty z předešlé práce [2]. Hodnoty těchto konstant jsou uvedeny v tab. 1. Charakteristika numerické simulace (viz obr. 12) má velmi podobnou tuhost jako čtvrté zatěžovací charakteristiky experimentů (jedná se zejména o oblast vyšších deformací), což je vyhovující. Porovnání posunutí a deformací na povrchu vzorku je zobrazeno na obr. 10, 11.

JGS konstanty [Pa]	
C_{10}	2 600 000
C_{01}	-100 000
C_{11}	50 000
C_{20}	70 000
C_{30}	-2 500

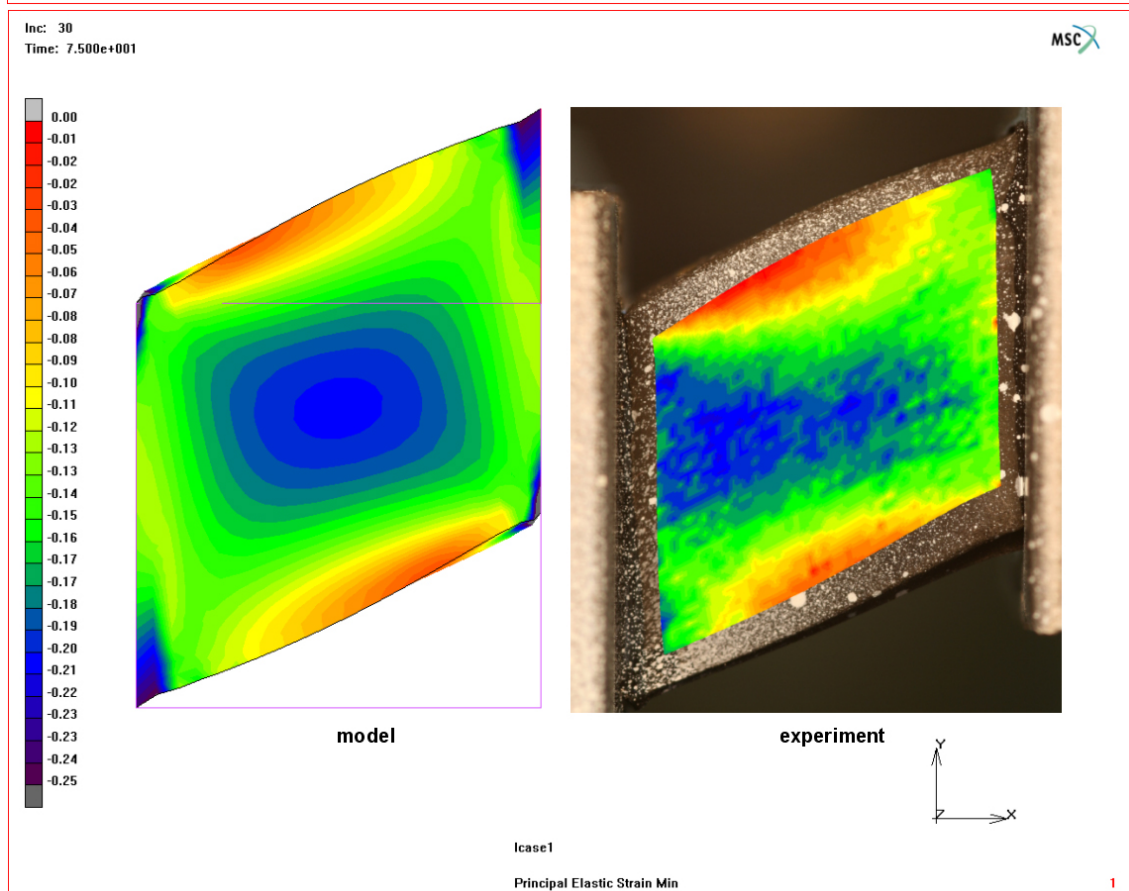
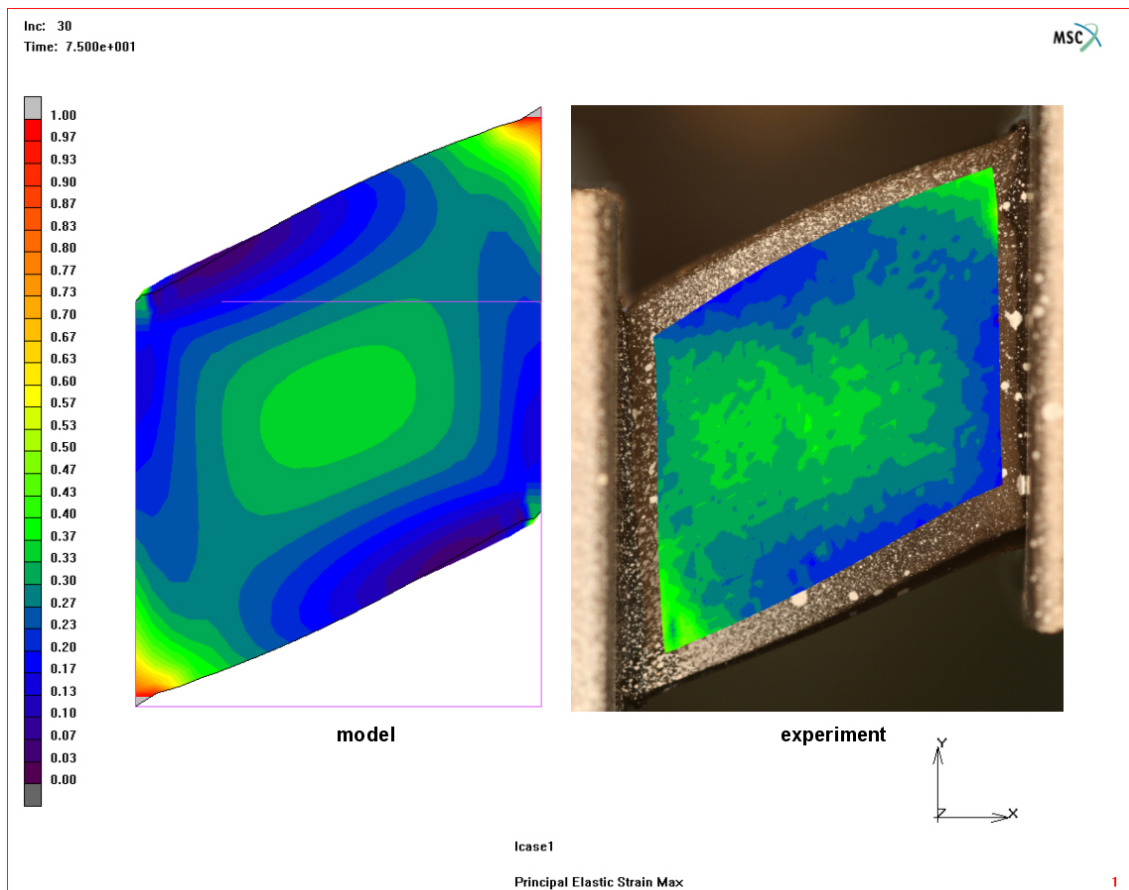
Tab. 1. Identifikované materiálové konstanty



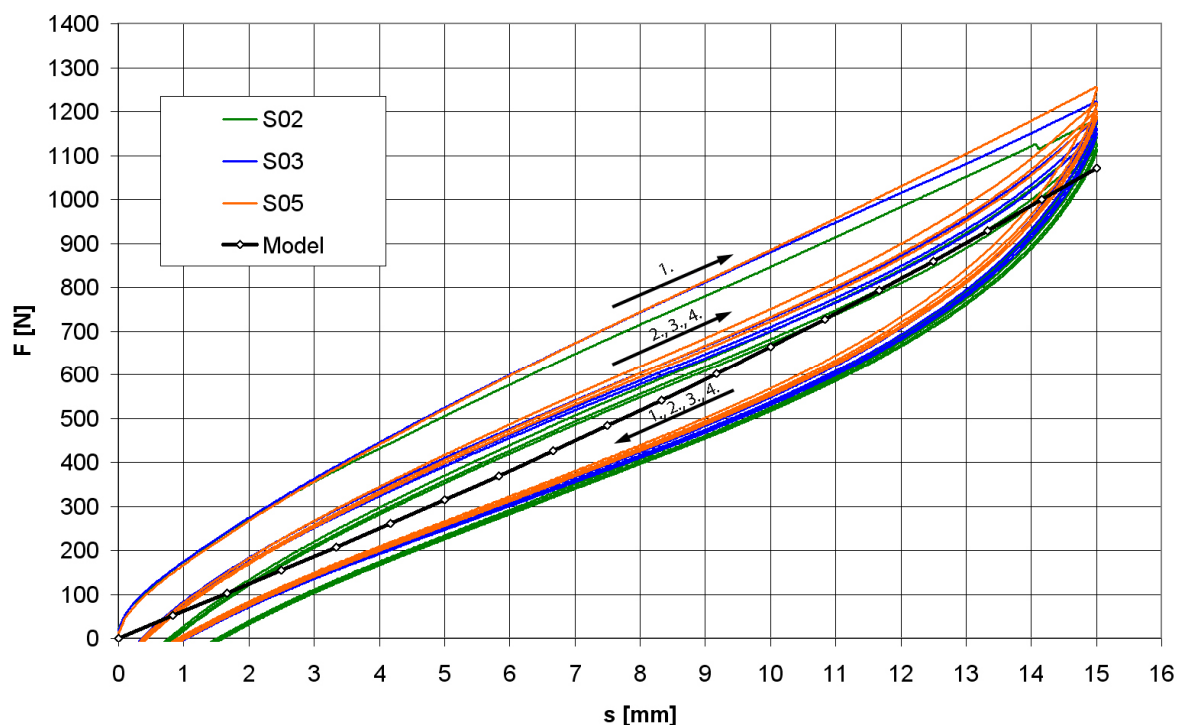
Obr. 9. Výpočtový model vzorku S



Obr. 10. Posunutí u_x a u_y



Obr. 11. Hlavní deformace ε_1 a ε_2



Obr. 12. Porovnání smykových charakteristik

4. Závěr

V předložené práci byla věnována pozornost pryžovému segmentu používanému v pryži odpružených kolech kolejových vozidel. Předmětem zájmu bylo porovnání zkoušky smykem s její numerickou simulací, přičemž v numerické simulaci byly použity materiálové konstanty identifikované v předešlých pracích pomocí zkoušek tahem a tlakem.

Porovnáním změřených charakteristik a charakteristiky numerické simulace bylo zjištěno, že identifikované konstanty James-Green-Simpsonova modelu jsou vyhovující. Tyto konstanty jsou tedy využitelné pro vytvoření výpočtového modelu systému kotouč – segment – obruč, pomocí kterého bude možné vyšetřovat chování systému při teplotě $+20^{\circ}\text{C}$.

Mechanické vlastnosti pryže se mění s teplotou. Proto bude v budoucích pracích věnována pozornost změně mechanických vlastností zkoumaného segmentu v závislosti na teplotě a identifikaci materiálových konstant, které by toto změny respektovaly.

Poděkování: Tento příspěvek vznikl za podpory projektu MŠMT 1M0519 – Výzkumné centrum kolejových vozidel a výzkumného záměru MŠMT MSM 4977751303.

Literatura

- [1] Kim, W. D.; Kim, W. S.; Woo, C. S.; Lee, H. J.: *Some consideration on mechanical testing methods of rubbery materials using nonlinear finite element analysis*. Polymer International, 2004.
- [2] Kottner, R.; Laš, V.: *Numerická simulace chování pryžových segmentů odpružených kol*. Nová železniční technika, 2007.
- [3] Kottner, R.; Zemčík, R.; Laš, V.: *Material characteristic of rubber cushioning – refinement of material constants*. 5th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics – 5th YSESM, Púchov, Slovakia, 2006.
- [4] Masár, R.: *Železniční doprava a hluk*. Nová železniční technika, 2006.
- [5] Miller, K.: *Experimental Loading Conditions Used to Implement Hyperelastic and Plastic Material Models*. Axel Products, 2000.
- [6] Miller, K.: *Testing Elastomers for Hyperelastic Material Models in Finite Element Analysis*. Rubber Technology International, 1999.
- [7] Pešek, L., Půst, L.: *Vibro-acoustic problem of tram wheel with inner dissipation layer*. Institute of Thermomechanics, Academy of Sciences of Czech Republic, 2003.
- [8] Svoboda, J.; Pešek, L.; Frohlich, V.: *Vlastnosti termo-visko-elastických materiálů při statickém a dynamickém zatěžování*. 22nd conference with international participation – Computational Mechanics, Hrad Nečtiny, Czech Republic, 2006.
- [9] Urban, R.: *Modelování konstrukčních prvků z pryže vyztužené nitěmi*. Disertační práce, Technická univerzita v Liberci, 2004.
- [10] Uthuppan, J.: *Hyper Elastic Material Testing*, Axel Products publication. COSMOS Designstar User Group Meeting, 2003.