

MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY ELASTOMERŮ PRO VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ PNEUMATIK

Jozefína DRDÁKOVÁ¹, Monika STRUHARŇANSKÁ¹, Jan KRMEĽA²

¹Katedra numerických metód a výpočtového modelovania, Fakulta priemyselných technológií v Púchove, Trenčianska Univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne, Slovenská republika

²Katedra dopravních prostriedkú a diagnostiky, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, Česká republika

1. Úvod

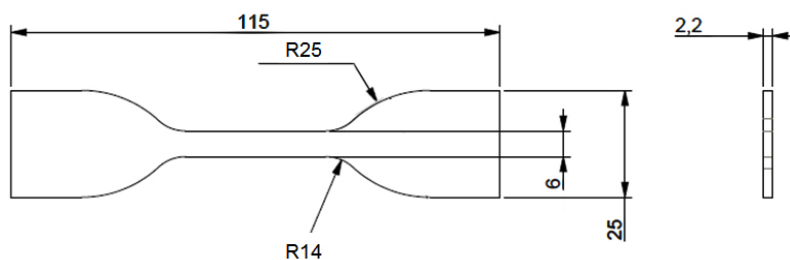
Výpočtové modelování pláštů pneumatik pomocí metody konečných prvků (MKP) je nejčastější metodou nejen pro výzkum a vývoj pláštů, ale také pro ověření zatěžujících a napětově-deformačních stavů, které se v pláštích pneumatik mohou v provozování vyskytnout. Výsledky mohou sloužit i pro správné přiřazení pneumatik ke konkrétnímu automobilu. Pro MKP výpočty je třeba dobře stanovit materiálové charakteristiky jednotlivých komponentů, které tvoří daný technický objekt, v tomto případě se jedná o složitý kompozitní prvek – plášť pneumatiky. V článku jsme se zaměřili na nánosové směsi ocelokordových nárazníků, které se používají pro pláště osobních automobilů. Na tyto nánosové směsi je třeba brát vysoký důraz, protože systém ocelový výztužné kordy – elastomerová matrice výrazně ovlivňuje celkové deformační chování pláště pneumatiky při odvalování a určuje tuhostní parametry pláště. Zároveň tento systém musí být natolik kompaktní, aby nedošlo při provozování v ocelokordových náraznicích k separaci jednotlivých vrstev, protože to může ovlivnit kompaktnost pláště jako celku.

Tato směs bývá nejčastěji tvořena přírodním kaučukem s různými plnivými a adhezivními činidly. Přírodní kaučuk je volen s ohledem dosažení dobrých adhezních

schopností nánosové elastomerové směsi k výztužným kordům, zejména ocelovým. Nanášení elastomerové směsi jak na ocelové, tak textilní výztuže má několik účelů. Jednotlivé kordy musí být od sebe dostatečně izolovány, aby nedocházelo k jejich vzájemnému tření. Dalším účelem je snížení vývinu tepla při odvalování pláště a zajištění požadované životnosti pláště. Pro popis elastomerů ve výpočtech pláště se nejčastěji používá Mooney-Rivlinův (dále M-R) model chování materiálu. Při provozování pneumatik je předpoklad, že v oblasti koruny pláště dochází k deformaci odpovídající poměrnému prodloužení 10-15%. S ohledem na charakter deformace se nejčastěji používá dvouparametrový M-R model, který zcela obecně postačuje pro popis chování elastomerů v pláštích pneumatik. Pro stanovení M-R parametrů je třeba provést celou řadu zkoušek. Výrobci pláště pneumatik informace o materiálových parametrech všeobecně neposkytují v rámci zachování svého „know-how“ technologie výroby a složení vstupních surovin, zejména gumárenských směsí.

2. Experiment a výsledky

Mezi důležité zkoušky pro stanovení M-R parametrů patří statické zkoušky v tahu, ohybu, tlaku a smyku. V případě zkoušky v tahu se jedná o zkoušky v jednoosé a víceosé napjatosti. Pro prvotní stanovení M-R parametrů postačuje jako základní zkouška v tahu v jednoosé napjatosti. Tato zkouška probíhá na zkušebních vzorcích tvaru oboustranných lopatek podle normy ISO 37 [1]. Na základě dlouhodobých zkušeností a předchozí výzkumné činnosti doporučujeme pro zkoušky nánosových směsí používat zkušební těleso typu A1, viz obr. 1. Tloušťka zkušebních vzorků činila 2,2 mm a byla dána technologií výroby vzorek na etážovém hydraulickém vulkanizačním lisu, vulkanizace probíhala při teplotě 150°C po dobu 35 minut. Zkouška v tahu na vyrobených zkušebních vzorcích je předepsána podle normy STN 62 1452 [2] (norma je určena pro zkoušení gumárenských směsí a vulkanizátů).

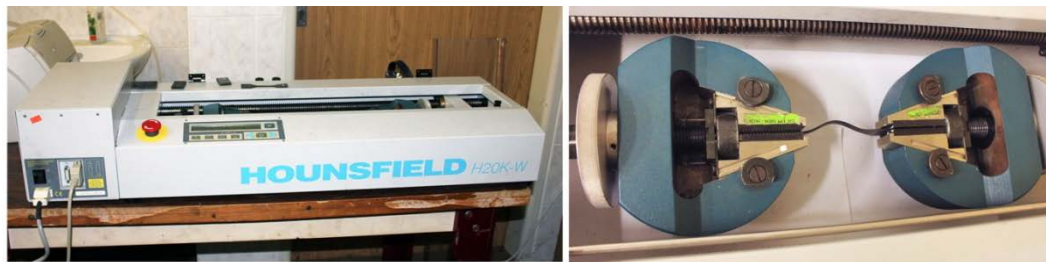


Obr. 1 Zkušební vzorek pro zkoušky v tahu podle normy ISO 37

Fig. 1 A test sample for tensile test according to ISO 37

Zkouška v tahu v jednoosém silovém působení zatěžující síly až do porušení zkušební vzorky byla realizovaná na univerzálním statickém zkušebním zařízení Hounsfield H20K-W, které je uvedené na obr. 2 s detailem upnutí zkušebních vzorek do čelistí zkušebního zařízení. Zkušební zařízení má omezující parametry pro zkoušky v tahu a to maximální zatěžující síla činí 20 kN a maximální prodloužení je cca. 320 mm.

Pro zkoušky nánosových směsí je zkušební zařízení z hlediska zatěžující síly plně vyhovující. Počáteční vzdálenost mezi čelistmi byla stanovena na 80 mm, rychlost zatěžování byla volena 50mm/min. Tahová křivka elastomerů má specifický průběh esovitého tvaru s poměrně výrazným inflexním bodem [3].



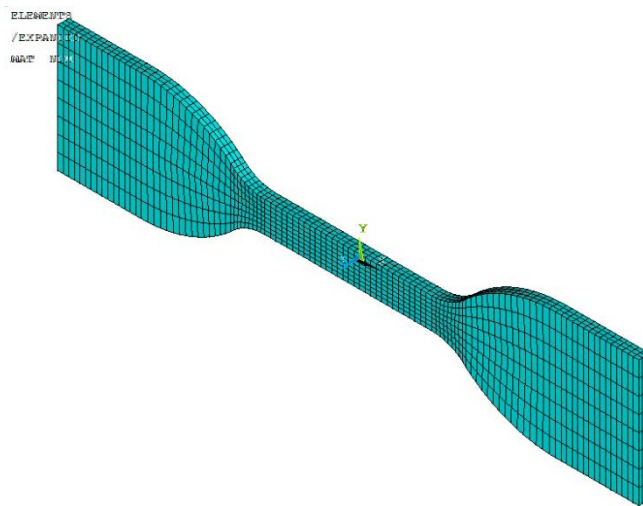
Obr. 2 Statické zkušební zařízení pro zkoušky v tahu s detailem upnutí zkušební vzorky
Fig. 2 Static test device for tensile tests with detail of a clamped sample

Pro přesnější stanovení M-R parametrů je také třeba provést další zkoušky. Ve většině případů postačuje zkoušky v tahu v jednoosé napjatosti doplnit zkouškami v tahu ve dvouosé napjatosti a zkouškami ve smyku. S ohledem na skutečnost, že na uvedeném zkušebním zařízení není možnost realizovat zkoušky v tahu ve dvouosé napjatosti, musí se mít na zřeteli, že výsledné M-R parametry stanovené pouze zkouškou v tahu v jednoosé napjatosti mohou mít za určitých okolností značnou nepřesnost.

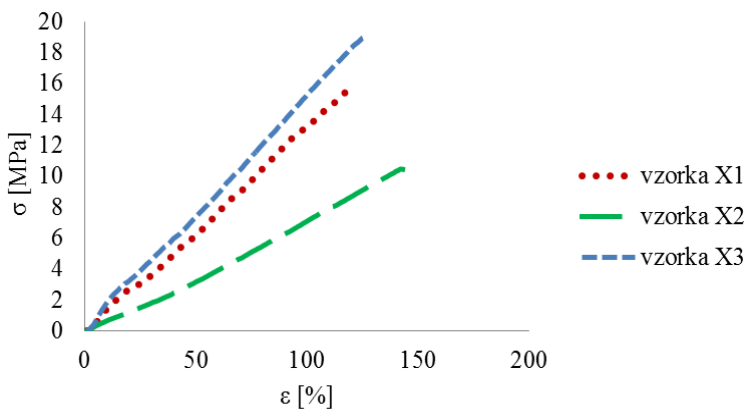
Pro ověření M-R parametrů se postupuje tzv. inverzní úlohou, kdy experimentálně získané parametry jsou zahrnuty do vytvořeného výpočtového modelu zkušební vzorku zatíženého tahem, a výpočtem je zjišťováno, zda výsledky z výpočtu korespondují s experimentálně stanovenými údaji. Lze tedy porovnat zatěžující charakteristiky a na základě porovnání navrhnout úpravu M-R parametrů tak, aby výsledky byly v dobré shodě. Je to jeden ze způsobů, jak upřesnit M-R parametry získané pouze ze zkoušky v tahu v jednoosé napjatosti.

Výpočtový model zkušební vzorku s využitím programového systému MKP ANSYS je uveden na obr. 3. Diskretizace byla vhodně volena s ohledem na rychlou konvergenci výpočtů a přesnost dosažených výsledků.

Ze statických zkoušek v tahu byla získána závislost tahové síly na prodloužení a z ní byla stanovena závislost napětí v tahu od poměrného prodloužení. Na obr. 4 jsou porovnány jednotlivé nánosové směsi pod označením X1, X2 a X3. Více výstupů z experimentů je uvedených v pracích [4-9].



Obr. 3 MKP výpočtový model zkušební vzorku
Fig. 3 FEM computational model of a test sample



Obr. 4 Závislost napětí od poměrného prodloužení pro vybrané nánosové směsi
Fig. 4 Stress-strain dependencies of selected elastomeric mixtures

Z M-R dvouparametrové rovnice (1) lze odvodit vztahy pro výpočet materiálových konstant C_{10} a C_{01} .

M-R dvouparametrová rovnice je definována:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = 2C_{01}(\alpha - \alpha^{-2}) + 2C_{10}(1 - \alpha^{-3}) \quad (1)$$

kde:

- σ napětí v tahu [MPa],
- F zatěžující síla v tahu [N],

A_0 průřez zkušebního vzorku [mm²],
 α poměrná délka [-],
 C_{10}, C_{01} M-R parametry [MPa].

Jednoduchou úpravou rovnice (1) ji lze linearizovat do tvaru:

$$\frac{\sigma_i}{2 \left(1 - \frac{1}{\lambda_i^3} \right)} = C_{01} \lambda + C_{10} \quad (2)$$

kde:

λ_i poměrná deformace jednotlivých hodnot λ [-],
 σ_i napětí v tahu [MPa].

Z rovnice pro přímku:

$$y = ax + b \quad (3)$$

vyplývá:

$$y = \frac{\sigma_i}{2 \left(1 - \frac{1}{\lambda_i^3} \right)} \quad (4)$$

$$x = \lambda \quad (5)$$

$$\lambda = \varepsilon + 1 \quad (6)$$

Dalším vstupním údajem, který je třeba do výpočtu zadat ve vstupních materiálových parametrech, je parametr nestlačitelnosti d , který lze získat na základě rovnice:

$$D = \frac{C_{10} \cdot (5\nu - 2) + C_{01} \cdot (11\nu - 5)}{2(1 - 2\nu)} \quad (7)$$

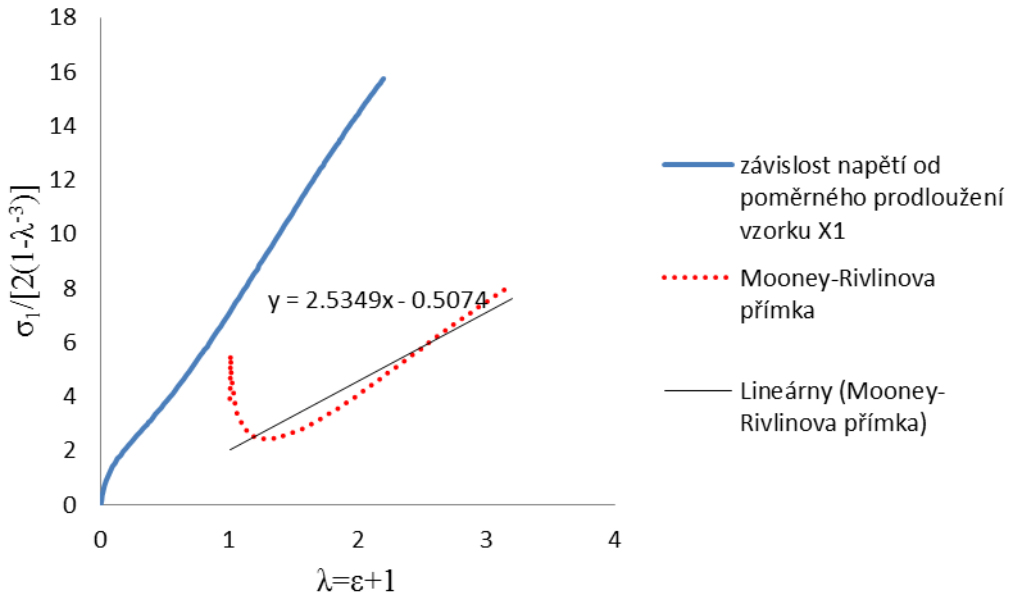
$$d = \frac{1}{D} \quad (8)$$

kde:

ν Poissonův poměr [-].

Je všeobecně známo, že pro rychlou konvergenci výpočtů se pro výpočet parametru nestlačitelnosti používá Poissonův poměr blízký k hodnotě 0,5, např. 0,49 nebo 0,4995 [10, 11].

Z odvozených vztahů M-R rovnice získáme závislost, ze které dostaneme pomocí lineární regrese M-R parametry C_{10} a C_{01} . Pro vzorek X1 jsou názorně ukázány M-R parametry (obr. 5), které byly stanovené v programu Microsoft Excel. Na obr. 6 je uvedená materiálová charakteristika získaná z M-R parametrů stanovených programem ANSYS. Výsledné M-R parametry získané oběma programy jsou ve shodě.



Obr. 5 Stanovení M-R parametrů podle odvozené M-R rovnice

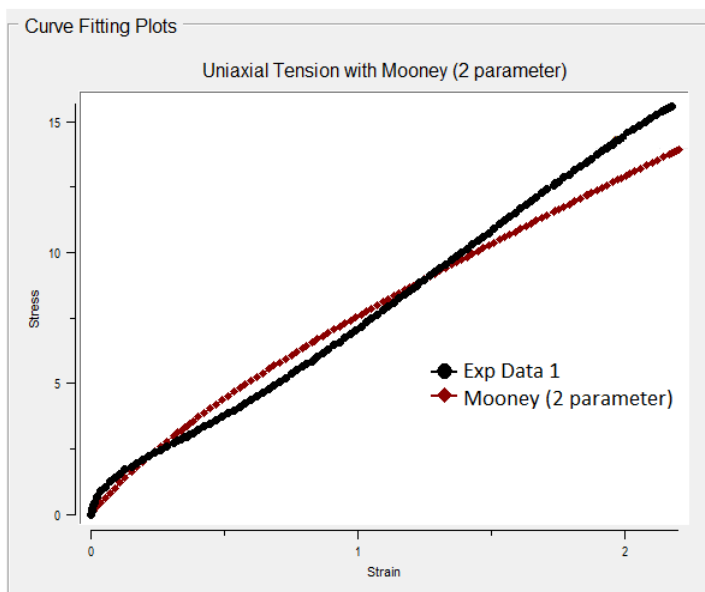
Fig. 5 Determination of M-R parameters according to the derived M-R equation

Tab. 1 uvádí hodnoty obdržené z programu Microsoft Excel. M-R parametry uvedené na obr. 5 pro zkušební vzorek s označením X1 činí 2,5349 a -0,5074, M-R parametry získané z programu ANSYS jsou 2,3805 a -0,4390.

Tab. 1 Materiálové parametry nánosových směsí pro ocelokordové nárazníky

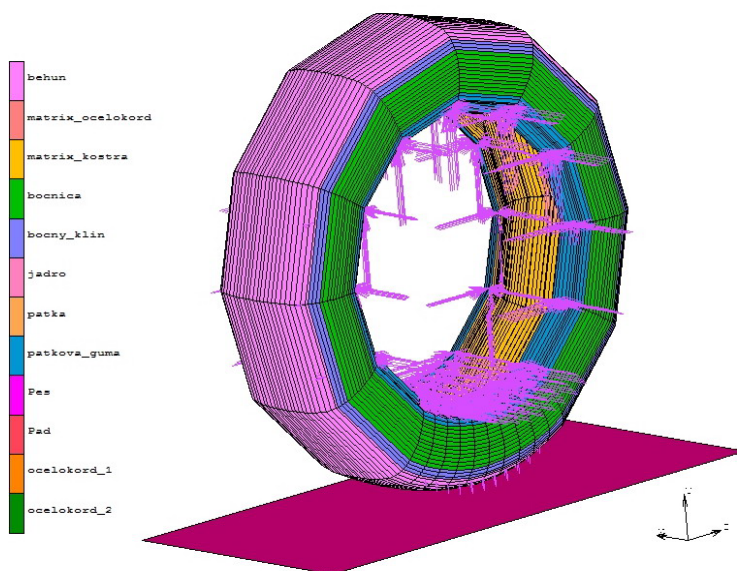
Fig. 1 Material properties of elastomer mixtures for steel-cord belts

Materiálové parametry nánosových směsí									
zk. Vzorek	F [N]	Δl [mm]	σ [MPa]	ϵ [%]	E [MPa]	C_{10} [MPa]	C_{01} [MPa]	μ [-]	d [MPa]
X1	218,0	177,7	15,7	222,1	7,1	2,5349	0,5074	0,499	0,0033
X2	134,0	219,3	10,4	274,1	3,8	1,7642	1,5065	0,499	0,0031
X3	246,0	191,2	19,1	238,9	8,0	2,3539	0,8909	0,499	0,0048



Obr. 6 Materiálová charakteristika z výpočtového programu ANSYS
Fig. 6 Material characteristic calculated by the program ANSYS

M-R parametry pro jednotlivé nánosové směsi ocelokordových nárazníků budou zadávány do výpočtového modelu radiálního pláště pneumatiky obr. 7.



Obr. 7 Prostorový výpočtový model pláště pneumatiky [6]
Fig. 7 Computational model of a tire casing [6]

Pro výpočtové modelování pláští pneumatik třeba znát i ostatní materiálové parametry jednotlivých elastomerových a výztužných částí pláště. Jedná se o M-R parametry běhounu, nánosové vrstvy, kostry pláště, vnitřní gumy, bočnice, jádra, patkové gumy, bočního klínu, dále o moduly pružnosti a Poissonovy poměry patního lana, ocelových a textilních kordů. Experimentální stanovení a upřesňování těchto materiálových parametrů neustále probíhá v rámci řešení disertačních prací autorek tohoto článku.

Stanovené M-R materiálové parametry budou zadávány nejen do výpočtových modelů pláště, ale i samotného ocelokordového nárazníku a bude sledována odezva napětově-deformačních stavů na změnu těchto materiálových parametrů.

V případě výpočtového modelování pláště pneumatiky budou výsledky verifikovány experimenty na statickém zkušebním zařízení statickém adhezoru. Statický adhezor umožňuje získat nejen údaje o radiální deformační charakteristice pro různé hodnoty tlaku v pneumatice, ale i otisky kontaktní plochy mezi pláštěm a podložkou definující nerovnost. Otisky prováděny za pomoci tlakocitlivých fólií je možné dále zpracovávat a získat údaje o velikosti styčné plochy a rozložení kontaktních tlaků.

3. Závěr

Ocelokordový nárazník je v plášti pneumatiky nejdůležitějším a nejvíce složitým prvkem. Proto je důležité tomuto prvku věnovat zvýšenou pozornost. Jsou na něj kladeny vysoké požadavky ať už z hlediska kvality vstupních surovin na jeho výrobu, tak na správnost technologického procesu výroby.

Zatěžující stavy, ke kterým v ocelokordovém nárazníku v plášti pneumatiky při provozování dochází, je možné řešit s využitím MKP výpočtového modelování. Experimenty tak více ustupují do pozadí a stávají se jen podpůrným prostředkem pro verifikační účely a získání materiálových charakteristik jednotlivých složek, z kterých ocelokordový nárazník sestává.

Ve výpočtech ocelokordového nárazníku a pláště je třeba správně definovat materiálové charakteristiky nánosových směsí stanovené z experimentálních údajů. Pro zohlednění nánosových směsí doporučujeme aplikovat Mooney-Rivlinův dvouparametrový materiálový model, pokud možno s pozitivními parametry. Tyto parametry doporučujeme stanovit z experimentálních dat odpovídajících poměrnému přetvoření do 15%. Z experimentálně stanovených materiálových charakteristik nánosových směsí lze usuzovat celkové chování ocelokordového nárazníku.

Výzkum v oblasti nánosových směsí bude pokračovat z pohledu vlivu stárnutí na M-R parametry. Cílem je predikovat stárnutí nánosových směsí na celkové deformační chování ocelokordových nárazníků. Dosažené výsledky je možné aplikovat na celé spektrum elastomerových částí v plášti pneumatiky.

Poděkování

Výsledky uvedené v článku byly zpracovány během vědecko-výzkumného studijního pobytu autorky Drdákové na Dopravní fakultě Jana Pernera na Univerzitě Pardubice. Tento stipendijní pobyt uskutečněný v roce 2013 byl podpořen a financován agenturou SAIA, n. o., Slovenská republika.

Předloženo: 31.5.2013

Literatura

1. ISO 37. *Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of tensile stress-strain properties.* (anglicky)
2. STN 62 1452. *Skúšanie gummy.* Stanovenie trvalej deformácie v ťahu. (slovensky)
3. DRDÁKOVÁ J., STRUHARŇANSKÁ M., KRMELA J.: Vybrané fyzikálno-mechanické vlastnosti špecifických kompozitných materiálov s elastomérmí. In *Semdok 2013, 18th International of PhD. students' seminar Slovak Republic.* SR: 2013, s. 104-107, ISBN 978-80-554-0629-9. (slovensky)
4. KRMELA J.: *Systémový přístup k výpočtovému modelování pneumatik I.* ČR: 2008, 102 s., ISBN 978-80-7399-365-8.
5. DRDÁKOVÁ J., STRUHARŇANSKÁ M, KRMELA J.: Selected physical–mechanical properties of specific composite materials with elastomer. In *ARSA 2012 – The 1st Virtual International Conference on Advanced Research in Scientific Areas (ARSA–2012).* SR: 2012, s. 1785-1788, ISBN 978-80-554-0606-0. (anglicky)
6. KRMELA J., DRDÁKOVÁ, J., KOVÁČ I., VIDO P., PASTOREK M., STRUHARŇANSKÁ, M.: Determination of Mooney–Rivlin Parameters of Rubber Used for Rubberizing of Steel cords as an Input for FEA Models of Tire. *Hutnícke listy.* ČR: 2012, 65, (7), s. 104-106. ISSN 0018-8069. (anglicky)
7. KRMELA J., TOMANOVÁ V., DRDÁKOVÁ J., VIDO P.: Vázba kord-elastomer v pneumatikách z pohledu charakteru kordu a mikroskopického pozorování. In: *Sborník přednášek z konference TechMat '10.* ČR: 2010, s. 83-86. ISBN 978-80-7395-324-9. (slovensky)
8. DRDÁKOVÁ J., KRMELA J., KRMELOVÁ V.: Microlocation of the system elastomer – steel cord in the tire after degradation process. In: *Sborník přednášek z konference TechMat '11.* ČR: 2011, s. 130-135. ISBN 978-80-7395-431-4. (anglicky)
9. VIDO P., DRDÁKOVÁ J., STRUHARŇANSKÁ M., KRMELA J.: Vybrané experimentálne skúšky kompozitov s elastomérovou maticou pre overenie výpočtových modelov pneumatík. In: *Sborník přednášek z konference TechMat '12.* ČR: 2012, s. 90-96. ISBN 978-80-7395-537-3. (slovensky)
10. DRDÁKOVÁ J., KRMELA J.: Mikrolokality degradovaných ocelokordových nárazníků v pláštích radiálních pneumatík. In: *Preveda - interaktívna konferencia mladých vedcov 2012 : zborník abstraktov.* SR: 2012, s. 75, ISBN 978-80-970712-3-3. [cit. 2012.04.09] <<http://www.preveda.sk/conference/article/id=518/>>. (slovensky)
11. VIDO P., KRMELA J.: Experimentálne hodnotenie systému oceľový kord – elastomér pre potreby výpočtového modelovania. In: *Preveda - interaktívna konferencia mladých vedcov : zborník abstraktov.* SR: 2012, ISBN 978-80-970712-3-3. [cit. 2012.04.09]. <<http://www.preveda.sk/conference/article/id=516/>>. (slovensky)

Resumé

MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY ELASTOMERŮ PRO VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ PNEUMATIK

Jozefína DRDÁKOVÁ, Monika STRUHARŇANSKÁ, Jan KRMELA

Článek se zabývá stanovením materiálových parametrů elastomerů z materiálových charakteristik získaných ze statických experimentů. V případě zkoušky v tahu se jedná o zkoušky v jednoosé a víceosé napjatosti. Ze statických zkoušek v tahu byla získána závislost tahové síly na prodloužení a z ní byla stanovena závislost napětí v tahu od poměrného prodloužení. Pro prvotní stanovení M-R parametrů postačuje jako základní zkouška v tahu v jednoosé napjatosti. Tyto parametry jsou vstupními materiálovými parametry do výpočtových MKP modelů pneumatik pro osobní a nákladní automobily. Pro elastomerové části pláště pneumatiky se ve výpočtech nejčastěji používá Mooney-Rivlinův model chování materiálu. V článku jsou uvedeny experimentálně stanovené materiálové charakteristiky a odpovídající vypočítané Mooney-Rivlinovy parametry pro vybrané elastomery, pozornost je věnována nánosovým směsím pro ocelokordy pláštů. Pro zohlednění nánosových směsí doporučujeme aplikovat Mooney-Rivlinův dvouparametrový materiálový model, pokud možno s pozitivními parametry. Tyto parametry doporučujeme stanovit z experimentálních dat odpovídajících poměrnému přetvoření do 15%. Z experimentálně stanovených materiálových charakteristik nánosových směsí lze usuzovat celkové chování ocelokordového nárazníku.

Summary

MATERIAL CHARACTERISTICS OF ELASTOMERS FOR COMPUTATIONAL MODELING OF TIRES

Jozefína DRDÁKOVÁ, Monika STRUHARŇANSKÁ, Jan KRMELA

The article deals with the determination of material parameters of elastomers from material characteristic obtained by static experiments. These parameters are the input material parameters for computational FEM models of tires for passenger cars and trucks. The elastomeric parts of the tire-casing are commonly modeled by using the Mooney-Rivlin material model. The material characteristics obtained by experiments and the correspondent Mooney-Rivlin parameters of selected elastomers are described in the article. Attention is especially paid to alluvial mixtures for steel cord belts of tires.

Zusammenfassung

MATERIALEIGENSCHAFTEN VON ELASTOMEREN FÜR RECHNERGESTÜTZTE MODELLIERUNG VON REIFEN

Jozefína DRDÁKOVÁ, Monika STRUHARŇANSKÁ, Jan KRMELA

Dieses Papier befasst sich mit der Bestimmung der Kennwerte der Elastomer-Material Eigenschaften von statischen Experimenten erhalten. Diese Parameter sind Vormaterial Parameter Rechenmodelle von Reifen für Pkw und Lkw FEM. Für elastomere Abschnitt des Reifens am häufigsten in den Berechnungen Mooney-Rivlins Materialmodell Verhalten verwendet. Der Beitrag stellt die experimentell bestimmten Materialeigenschaften und die entsprechenden berechneten Mooney-Rivlin Parameter für ausgewählte Elastomere wird die Aufmerksamkeit auf Mischungen, fusioniert mit Stahlseilen gegeben.