

## POSUDEK DIPLOMOVÉ PRÁCE

Název práce : **Identifikace materiálových parametrů pryžových segmentů tramvajových kol se zohledněním viskoelasticity**

Autor práce : **Bc. Jan Heczko**

Autor posudku : **Ing. Petr Matušek, CSc., E. Krásnohorské 245, Frýdek - Místek**

Posuzovaná diplomová práce má 46 stran, 25 obrázků, 2 tabulky. Po formální stránce je vhodně členěná tak že obrázky jsou zařazeny do textu. Rozčlenění diplomové práce do 6 kapitol odpovídá jejímu zadání tj.

1. Provést rešerši matematických modelů popisujících chování pryže se zaměřením na viskoelasticitu.
2. Vyšetřit mechanické charakteristiky dodané pryže pomocí zkoušek tahem, tlakem a smykem.
3. Provést numerické simulace zkoušek.
4. V prostředí MATLAB vytvořit skripty umožňující automatickou identifikaci optimální kombinace parametrů vybraného matematického modelu popisujícího chování pryže.

V úvodní kapitole diplomant vymezuje cíl své práce – v návaznosti na předchozí práce v oblasti identifikace materiálových parametrů mechanických charakteristik pryžových segmentů pro tramvajová kola v rámci hyperelastických modelů implementovat viskoelastický přístup v oblasti časově proměnného mednického zatěžování a vliv mikromechanického porušení. Zdůrazňuje přímou souvislost tohoto chování pryže s jejími fyzikálně-chemickými charakteristikami (molekulární stavbou, charakteristickou tvorbou sítí molekulárních vazeb u vulkanizovaných pryží což je případ aplikace u tramvajových kol). Pro modelování mechanického chování pryží jsou dnes k dispozici softwarové prostředky které umožňují aplikovat současně existující modely se snahou dosáhnout při materiálové identifikaci co největší shody s experimentem.

V kapitole 2 diplomant sumarizuje vývoj a současný stav řešené problematiky. Logicky vychází z fyzikálně chemických a mechanických aspektů chování pryže. Všímá si souvislostí zesíťované struktury vulkanizované pryže s její tuhostí, schopností disipovat deformační energii a měnit své mechanické chování při časově proměnném zatěžování.

Dále diplomant popsal v návaznosti na strukturu materiálu pryže charakteristiky mechanického chování pryže. Krátce se zabýval modely hyperelastického chování pryže, které je charakteristické pro pomalé, statické zatěžování. Definoval jednotlivé matematické modely (neohookeovský, Mooney – Rivlinův, Ogdenův atd.) a uvedl jejich uplatnění pro způsoby zatěžování kde dosahují dostatečnou míru shody modelu s experimentem.

Charakterizoval rovněž vliv časově proměnného namáhání na deformační chování pryže – viskoelasticitu. Zmínil se o modelech lineární viskoelasticity které pro svou jednoduchost v oblasti odvozených veličin a jejich jasného fyzikálního významu poskytují velmi často dobrou shodu s experimentem, zejména v oblasti relativně malých deformací nad limitem hyperelasticity.

Pro předmětnou aplikaci modelu chování pryže pro tramvajová kola je nutno uvažovat viskoelasticitu s nelineárním přístupem (víceintegrální modely Schapery, Bergstrom – Boyce). V prostředí MSC.Marc je implementován model Govindjee – Simo.

Diplomant rovněž charakterizoval přístupy k mikroskopickému porušení pryže, na čase nezávislé. Jasně vysvětlil tento pojem ve vztahu ke změně deformační charakteristiky (např. Mullinsův efekt) Stručně ale dostatečně výstižně byla popsána problematika identifikace parametrů matematických modelů pryže. Byly opsány především nelineární modely aplikovatelné na vulkanizovanou pryž v oblasti velkých deformací. Diplomant popsal dva přístupy k procesu identifikace.

- a) Jednodušší ale často používaná procedura která vychází z dat mechanických zkoušek různých zátěžných módů (tah, tlak, smyk, popř. víceosý tah) Naměřená data se přepočtou na napětí/deformace (v homogenní oblasti) a s jejich pomocí se ladí parametry vybraného modelu zvoleným optimalizačním algoritmem na minimální odchylku naměřených dat od parametrů modelů (metodou nejmenších čtverců).
- b) Složitější procedura vycházející ze simulace odezvy zátěže pryžového dílu s pomocí MKP.

Vedle jednoduchých algoritmů se používají i složitější tzv. globální optimalizační algoritmy (např. genetické nebo algoritmus simulovaného žíhání). Některé z těchto algoritmů už jsou součástí softwarových balíků (např. MatLab).

Dále se diplomant zabýval popisem jednotlivých aspektů matematických modelů v oblasti konstitutivních vztahů mechaniky kontinua. Pro kinematiku pohybu jednotlivých elementů pryže se používají materiálové (Lagrangeovy) souřadnice. Pomocí těchto souřadnic definoval nástroje pro popis deformačního chování pryže – pole posuvů, deformační gradient, tenzory přetvoření, poměrné protažení  $\lambda$ , invarianty deformace I.

V kapitole 3 se diplomant zabýval konstitutivními vztahy v matematických modelech deformačního chování pryže. Charakterizoval materiálové modely vulkanizované pryže jako modulární, složené z hyperelastického modelu ustálené odezvy, viskoelastického modelu časově závislé zátěže a mikromechanického modelu porušení molekulárních vazeb v pryži vedoucí ke změně deformačních charakteristik (primárně k deformačnímu změkčení). Pokud jde o hyperelastické modely, byl v diplomantově práci použit pětiparametrický Mooney-Rivlinův model. V oblasti časově proměnného namáhání (viskoelastické chování) byl použit model kde vliv relaxačního procesu v pryži (integrální jádro modelu charakterizující relaxaci) na hustotu deformační energie  $W$  je charakterizován pomocí Pronyho řady.

Vliv mikroporušení na hustotu deformační energie je při mechanickém zatěžování pryže definován modely charakterizujícími porušení vazeb v pryži v závislosti na zatížení a časově určených parametrech relaxace. V této práci byla použita metoda aditivního rozkladu implementovaná ve výpočtovém systému MSC.Marc.

Pokud jde o řešení stavové úlohy odezvy pryžového dílu na časově proměnné zatížení, diplomant popsal historii svého přístupu od klasického postupu založeného na hodnocení homogenních polí napětí/deformací s přechodem k uvažování nehomogenit deformací zjištěných v průběhu experimentů na mechanických zkouškách pryže a implementací MKP metody pro simulaci procesu zatěžování. Klasická metoda přepočtu sil a posunutí na napětí/deformace nepřinášela při optimalizačním procesu identifikace parametrů modelu dostatečnou shodu výpočtu s experimentem. MKP přístup byl použit v identifikačním procesu u zkoušek tahem a tlakem, výsledky zkoušky smykem byl použity jako verifikace již identifikovaných parametrů modelu.

V kapitole 4 diplomant nejdříve popsal obecný přístup k získání experimentálních dat pro řešení úlohy identifikace parametrů modelu deformačního chování pryže při časově proměnném namáhání. Diplomant popsal problémy které experimentátor musí vyřešit před



započetím zkoušek (typ zkušební zátěže, velikost deformací, rychlost zatěžování). Pro konkrétní sadu experimentů použil pryžové segmenty od výrobce tramvajových kol. Časové schéma zatížení kombinující hysterézni a relaxační odezvu zvolil z literatury. Vznik trvalých deformací zkušebních těles komplikoval vlastní průběh experimentu (vybočování profilu zkušebních těles při odlehčení tahových zkoušek).

V kapitole 5 „Identifikace“ popisuje diplomant její postup řešením cílové funkce parametrů modulárního modelu chování pryže při časově proměnném mechanickém namáhání. Parametr  $C_{10}$  Mooney – Rivlinova vztahu optimalizoval jednorozměrnou cestou na základě limitního přechodu k malým deformacím. Další parametry cílové funkce byly optimalizovány s použitím genetického a gradientního algoritmu.

Dle diplomanta dosažené výsledky identifikace modelu ukazují, vedle nesporně správně zvoleného modulárního modelu s dobrou shodou s experimentem v hlavních aspektech deformačního chování pryže, na nedostatky zvoleného modelu v oblasti viskoelastického chování pryže (nízký stupeň shody v oblasti malých hodnot relaxující síly).

V závěrečné kapitole 6 diplomant shrnuje výsledky své diplomové práce. Byl úspěšně aplikován model mechanického chování pryže s časově proměnných zatížením a s uvážením mikroporušení molekulárních vazeb vulkanizované pryže používané pro výrobu tramvajových kol. Autor poukázal na experimentální problémy při získávání dat pro proces identifikace modelu s mechanickými zkouškami definovaného zátěžného módu (tah, tlak, smyk). Jejich dopad na nehomogenitu deformace zkušebních vzorků pryže diplomant řešil aplikací MKP metody při simulaci odezvy zátěžného procesu na deformační chování pryže. Použil několik optimalizačních algoritmů se zpřesňující mírou optimalizace. Vedle zjevně dosažené shody experimentu s modelem v oblasti hyperelastického chování a úspěšnou implementaci modelu mikroporušení poukázal diplomant i na objektivně existující nedostatky použitého modulárního modelu – nedostatečná univerzálnost (shody experiment/model nebylo dosaženo v celém oboru měřených deformací, vliv na uvedenou shodu má rostoucí podíl trvalých deformací).

### **Připomínky a dotazy.**

- a) Vzhledem k dřívější zkušenosti s ne zcela izotropním chováním pryžových segmentů pro tramvajová kola při jejich mechanickém zatěžování bylo vhodné uvést orientaci odběru zkušebních těles pro jednotlivé módy zatěžování včetně obrázku tvaru pryžového segmentu (např. ve 3D – zobrazení).
- b) Může diplomant uvést možný mechanismus který vede k atypickému chování nové (dosud neprovozované) pryže při tahovém zatěžování při zkušební teplotě  $+100^{\circ}\text{C}$  ?
- c) Může diplomant uvést model (resp. odhadnout jeho charakteristiky) který by postihl viskoelastické chování pryže v měřeném oboru deformací resp. zohlednil vliv rostoucího podílu trvalých deformací při časově proměnném zatížení ?

### **Závěr.**

Dle názoru oponenta se diplomant úspěšně vypořádal se zadáním své diplomové práce. Hodnotím kladně přechod od klasické metody identifikace parametrů modulárního modelu (přepočet naměřených veličin síla/posunutí na napětí/deformace) k MKP pojetí simulace průběhu odezvy mechanické zátěže zkušebních těles k optimalizačnímu procesu identifikace parametrů modulárně pojatého modelu (hyperelastická rovnovážné odezvy, viskoelastická časově proměnného zatížení a model mikroporušení). Souhlasím s jeho názorem že v prvním přiblížení tento model ukázal životaschopnost ve shodě modelu s experimentem. Zároveň diplomant ukázal na slabiny zvoleného modelu (v oblasti

viskoelastického chování v oboru menších měřených deformací, v oblasti vlivu trvalých deformací) a ukázal tak na nutnost hledání nového, obecnějšího modelu mechanického chování pryže pro tramvajová kola který tyto aspekty zachytí.

**Diplomovou práci hodnotím známkou**

**„výborně“**

Ve Frýdku – Místku, 17.6.2012

Ing. Petr Matušek, CSc.

