

COMPUTATION OF DEFORMATION CYLINDRICAL AIR SPRING SLEEVE

Robert Urban, Bohdana Marvalová*

Summary: *In this paper we present the model of composite material with rubber matrix reinforced with two families of treads. The mechanical properties of finite element model are determined from experimental tests for the given material. The material model verification is realized by confrontation of experimental data and results obtained by using finite element method. The model is applied in a computation of deformation cylindrical air spring sleeve by finite element method using the software ANSYS. Results of the computation are compared with experimental values measured on testing parts.*

Úvod

Plášť válcové pneumatické pružiny je čtyřvrstvý kompozitní materiál s pryžovou maticí vyztuženou dvěma skupinami nití. Vyztužující nitě jsou spředeny z nekonečných syntetických vláken zpevněných mírným ochranným zákrutem. Tyto nitě jsou rovnoměrně uspořádány ve dvou vnitřních vrstvách, které jsou vzájemně pootočené o úhel 76° a jsou symetricky rozloženy k ose pneumatické pružiny.

Neuvažujeme-li viskoelastické chování vláken, pak s ohledem na uspořádání vyztužujících nití a pryžovou maticí, lze materiál pláště považovat za anizotropní hyperelastický materiál. Modely anizotropních hyperelastických materiálů [1], [2] a [3], které byly použity pro modelování v biomechanických úlohách, vychází z podobných předpokladů. Modely jsou definovány pomocí funkce deformační energie, která je vyjádřena jako součet částí odpovídající izotropní a anizotropní deformaci. Implementace těchto modelů do metody konečných prvků v prostředí programu ANSYS se s ohledem na anizotropní část deformační energie ukázala jako velmi obtížná, proto byla hledána jiná možnost vytvoření výpočtového modelu válcové pneumatické pružiny.

Při sestavování modelu byla snaha využít prvků a materiálových modelů implementovaných v softwaru ANSYS [4]. Model pláště byl tedy sestaven pomocí dvou různých prvků, z nichž jeden představuje objem a materiál pláště a druhý vyztužující nitě. Model materiálu pláště nebyl tvořen jako model anizotropního kontinua, ale jako struktura obsahující model jednotlivých vyztužujících nití. Podobný model materiálu byl použit Reese [5] při tvorbě „virtuálního“ testovacího modelu.

* Ing. Robert Urban, Ph.D., doc. Ing. Bohdana Marvalová, CSc.

Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti, Technická Univerzita v Liberci, Komenského 2, 460 01 Liberec
e-mail: robert.urban@vslib.cz, bohda.marvalova@vslib.cz

Model pryže

Pryžová matrice je modelována pomocí osmiuzlových šestistěnných prvků. Pro popis materiálu byl zvolen Mooney-Rivlinův model izotropního hyperelastického materiálu s pěti parametry, definovaný výrazem

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{02}(I_2 - 3)^2. \quad (1)$$

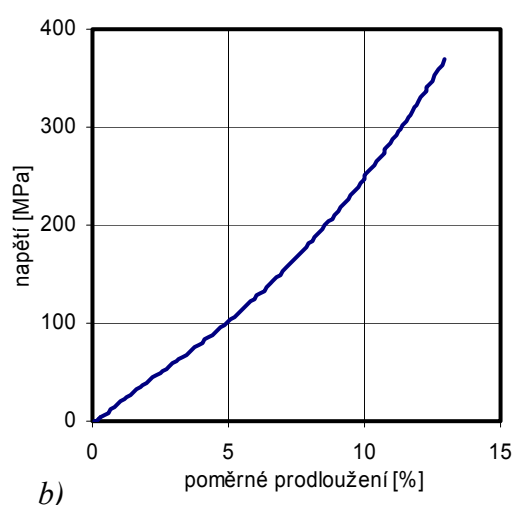
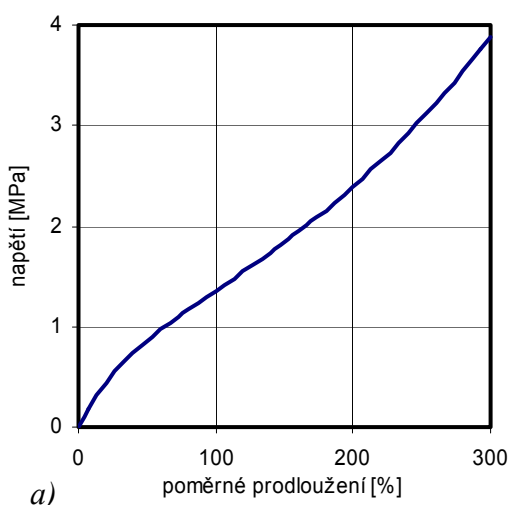
Jelikož nebylo možné získat parametry pro materiál samotné pryže se shodným složením a vulkanizované za stejných podmínek jako plášť pružiny pro materiálové ani vzorky samotné pryže pro provedení vhodných testů, byly pro výpočet použity parametry pro vulkanizovanou pryž převzaté z [6]. Parametry jsou uvedeny v tab. 1. Pro tyto parametry je na obr. 1a) znázorněna závislost napětí (F/S) na poměrném prodloužení ($(l-l_0)/l_0$) získaná simulací tahové zkoušky metodou konečných prvků.

Model vyztužujících nití

Pro popis vyztužujících nití byly použity dvouuzlové prvky přenášející pouze osově síly. Software ANSYS nedovoluje přiřadit těmto prvkům jiný model než lineární. Modul pružnosti v tahu vyztužujících nití byl určen tahovou zkouškou provedenou na vzorku vyjmutém z pláště pneumatické pružiny. Vzorek byl orientován tak, že jeho podélná osa byla totožná se směrem jedné skupiny vyztužujících nití. Též bylo předpokládáno, že vliv pryže je pro tento směr zatěžování zanedbatelný. Hodnota modulu pružnosti v tahu je uvedena v tab. 1. Závislost napětí na poměrném prodloužení testovaného vzorku je na obr. 1b).

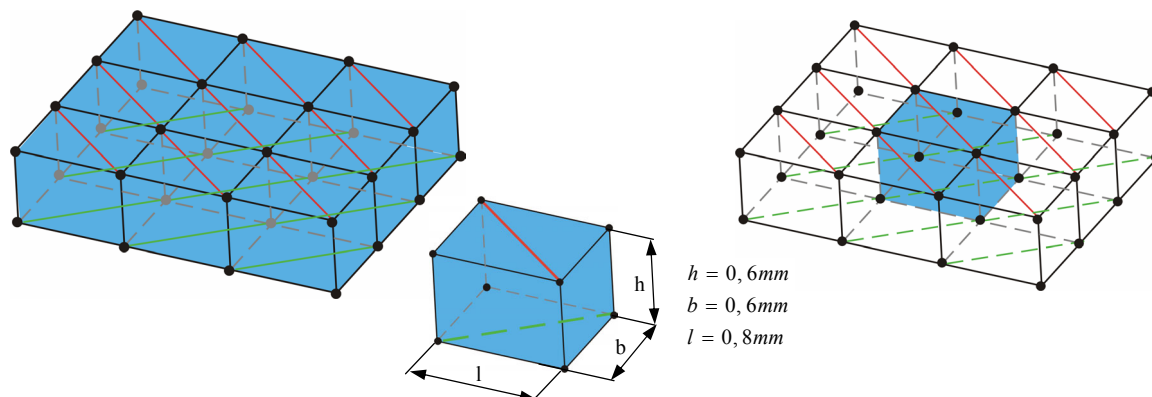
Tab. 1: Materiálové parametry modelů pryžové matrice a vyztužujících nití

Pryžová matrice	Vyztužující nitě
Mooney-Rivlinův model $C_{10} = 0,2375 \text{ MPa}$ $C_{20} = 7,41 \text{ kPa}$ $C_{01} = 0,2426 \text{ MPa}$ $C_{02} = 0,0464 \text{ kPa}$ $C_{11} = -0,567 \text{ kPa}$	Lineární model $E = 2486 \text{ MPa}$ $\nu = 0,35$



Obr. 1: Závislosti napětí na poměrném prodloužení
a) pryžová matrice b) vyztužující nitě

Při tvorbě modelu jsou na prvky kladeny další požadavky vyplývající z rozložení vyztužujících nití. Rozměry prvků jsou závislé na rozteči nití a na vzdálenosti jednotlivých vrstev, ve kterých jsou nitě umístěny. Prvky je nutné orientovat tak, aby se jedna stěnová úhlopříčka shodovala s osou vyztužující nitě. Pak uzly na koncích této úhlopříčky musí být společné pro prvek modelující pryž a prvek modelující vyztužující nitě. Tyto uzly totiž v modelu zajišťují přenos sil mezi pryží a vyztužujícími nitěmi, které jsou v reálných materiálech přenášeny pomocí smykových napětí mezi vyztuží a matricí. Takovou kombinací prvků vznikne model schopný popsat chování materiálu pláště pneumatické pružiny. Struktura modelu je ukázána na obr. 2.



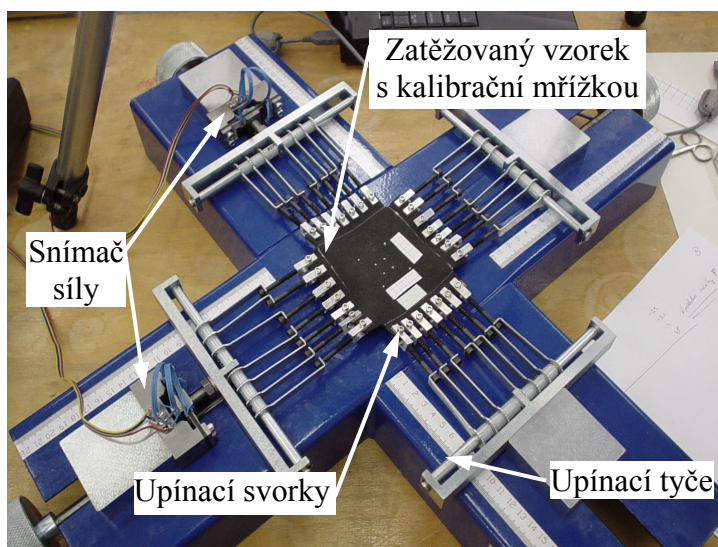
Obr. 2: Model struktury pláště pneumatické pružiny

Experimentální stanovení materiálových parametrů

Zatěžováním řady vzorků materiálu pláště válcové pneumatické pružiny prostým tahem byly získány jak hodnoty materiálových vlastností vyztužujících nití, nezbytné pro sestavení modelu použitého v numerické simulaci, tak i výsledky, které bylo možno porovnat s hodnotami získanými z numerické simulace materiálových zkoušek. Pohled na měření vzorku jednoosým tahem je na obr. 3. Na vzorku materiálu pláště pneumatické pružiny byl též proveden soubor testů vzorků při dvouosém zatěžování, viz obr. 4.



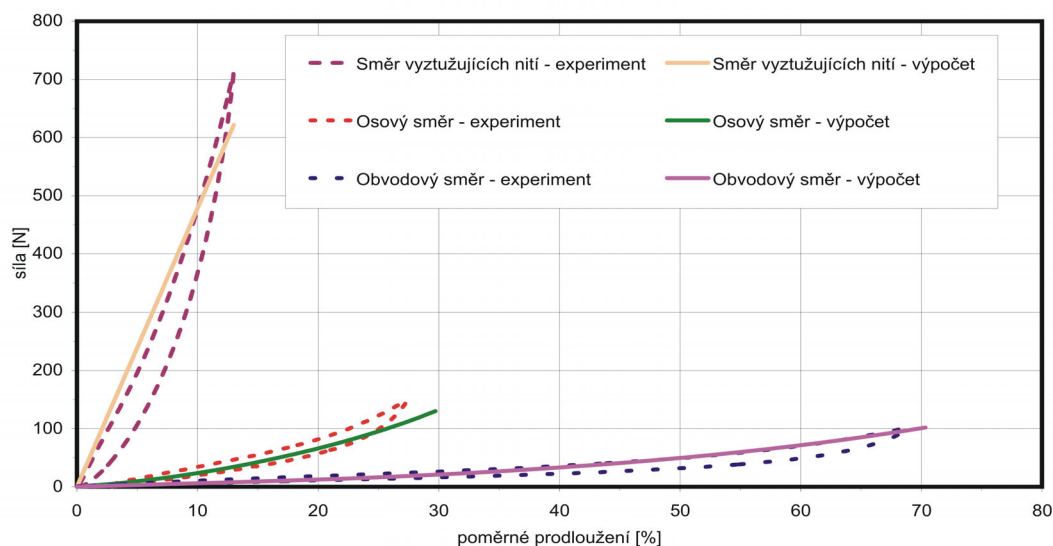
Obr. 3: Pohled na měření vzorku jednoosým tahem



Obr. 4: Vzorek upnutý do měřicího přípravku

Simulace zkoušky jednoosým tahem

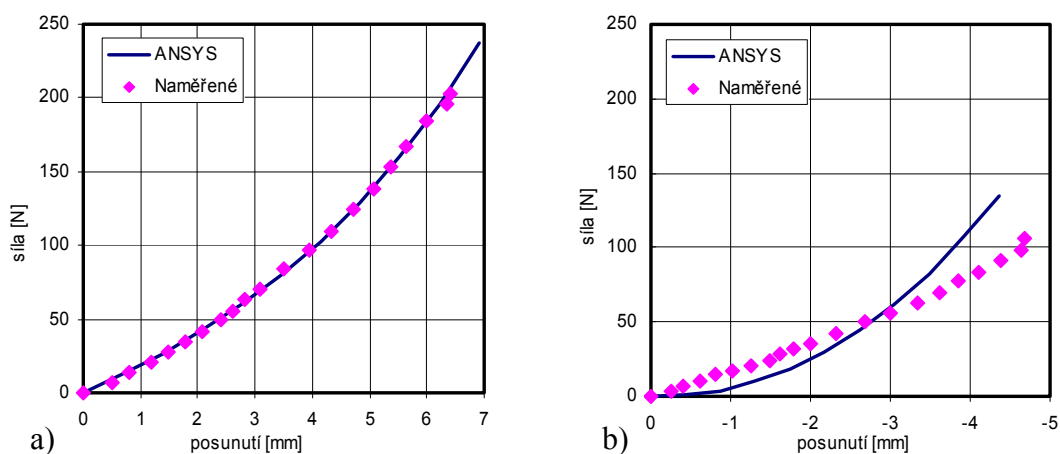
První ověření modelu bylo provedeno simulací tahových zkoušek provedených na vzorcích materiálu pláště. Vzorky byly orientovány ve směru vyztužujících nití a ve směru obvodovém a osovém vůči plášti pneumatické pružiny. Porovnání naměřených a vypočtených závislostí sil na poměrných prodlouženích jsou pro všechny tři směry na obr. 5. Parametry modelů tahových zkoušek odpovídají zatěžovací části křivky.



Obr. 5: Porovnání naměřených a vypočtených závislostí sil na poměrných prodlouženích pro vzorky s různou orientací vůči plášti pneumatické pružiny

Simulace dvouosého zatěžování rovinného vzorku

K ověření funkčnosti výpočtového modelu metodou konečných prvků byla též modelována zkouška vzorku při dvouosém zatěžování. Na obr. 6 jsou srovnány naměřené a vypočtené hodnoty posuvů vybraných bodů na vzorku. Rozdíly v naměřených a vypočtených hodnotách posuvů v osovém směru a zároveň dobrou shodu posuvů v obvodovém směru lze částečně vysvětlit postupem zatěžování vzorku při experimentu. Pro dosažení poměru zatížení 1:2 (osové:obvodové) je posuv čelistí v obvodovém směru stále zvětšován, zatímco posuv čelistí v osovém směru je nutné neustále adjustovat (zvětšovat i zmenšovat) tak, aby byl zachován požadovaný poměr zatěžujících sil.



Obr. 4: Naměřené a vypočtené závislosti pro poměr sil 1:2
a) v obvodovém směru b) v osovém směru

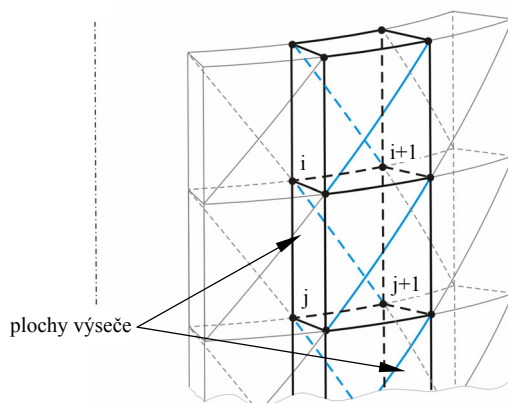
Výpočet válcové pneumatiké pružiny

Pneumatiká válcová pružina je zatížena vnitřním tlakem a silou působící na čelo pružiny, která v obecném případě může působit i mimo osu pružiny. To má za následek vzájemné naklonění čel (jejich roviny nezůstanou rovnoběžné), což je v určitých mezích přijatelné. I v případě, kdy čela zůstanou rovnoběžná, může být pružina zamontována tak, že obě čela jsou vzájemně vyosená. Zde je uvažován pouze případ vzájemné souososti a rovnoběžnosti čel během zatěžování a je tedy modelována pouze výseč pneumatiké válcové pružiny. Model válcové pneumatiké pružiny zahrnuje plášť zhotovený z výše popsaného materiálu, obě čela a objímky. Při velkých stlačeních dochází k navalování pláště na horní čelo, které je k tomu konstrukčně uzpůsobenou vhodnou tvarovanou dosedací plochou. Tato tvarovaná plocha má vliv na zatěžovací charakteristiku válcové pneumatiké pružiny a proto jsou modelovány výseče obou čel a objímek. Na povrchu čel i objímek, kde může dojít k doteku s pláštěm pneumatiké pružiny, jsou umístěny páry kontaktních prvků.

Materiálem obou čel i objímek je konstrukční ocel. Deformace čel i objímek jsou oproti deformacím pláště zanedbatelné a proto byly pouze modelovány části čel v blízkosti možného kontaktu s pláštěm. K určení osově reakce je tedy třeba k hodnotám získaným z modelu přičíst ještě sílu od tlaku působící na plochu nemodelovaných částí čel.

Plášť je k čelům upevněn sevřením mezi plochou čela a plochou objímky. Tento spoj vyvolává pouze místní koncentraci napětí. Předpokládá se, že málo ovlivňuje osovou reakční sílu v pružině, proto je modelován zjednodušeně. Model byl doplněn o obvyklé okrajové podmínky pro cyklicky symetrické úlohy a společným uzlům prvků, které popisují vyztužující nitě a pryž ležící na plochách „řezu“ modelované výseče (viz. obr. 7) je nutné přidat doplňující okrajové podmínky. Pro posuvy těchto uzlů pak platí

$$\Delta Z_i = \Delta Z_{i+1}, \Delta Z_j = \Delta Z_{j+1}, \Delta R_i = \Delta R_{i+1}, \Delta R_j = \Delta R_{j+1}. \quad (2)$$

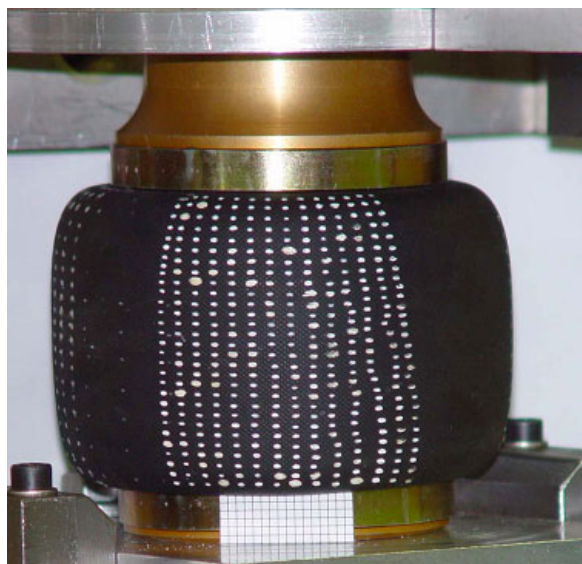


Obr. 7: Část modelu pláště

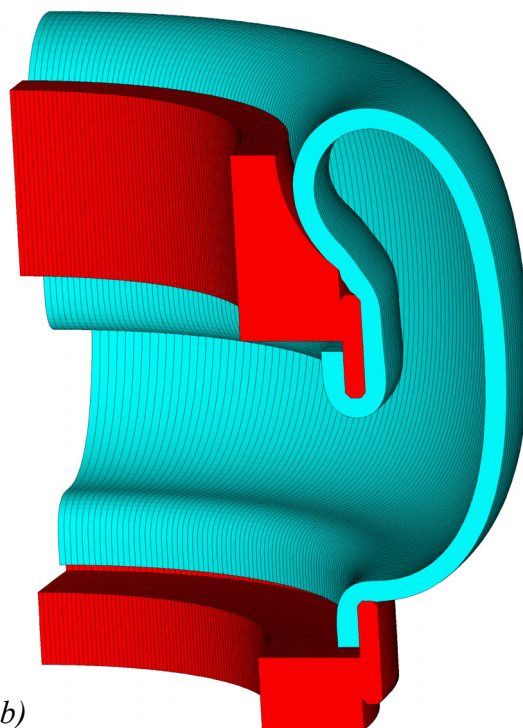
Pro různé tlaky jsou zjištěny zatěžovací charakteristiky, tedy závislosti osově síly na stlačení pneumatiké pružiny. Skutečné zatěžování pružiny se děje za stálého objemu, pokud tlak v pružině nebyl uměle zvýšen (napuštěním) nebo snížen. Při modelových výpočtech je prvotní tlak v pružině ponechán konstantní. Model je tedy zatížen nejdříve přetlakem a poté je předepsán posuv horního čela.

Z výsledků se odečítají reakční síly a poloha horního čela, které určují charakteristiku pneumatiké pružiny, porovnatelnou se změřenou závislostí. Výsledky získané z výpočtu metodou konečných prvků a naměřené závislosti jsou porovnány v dalším textu.

Na obr. 8b) je ukázka čtvrtinové výseče modelu válcové pneumatické pružiny v zatíženém stavu. Deformace modelu odpovídá zatížení tlakem 0,3 MPa a posuvu horního čela (stlačení) 100 mm. Na obr. 8a) je snímek zachycující pneumatickou pružinu v průběhu měření.



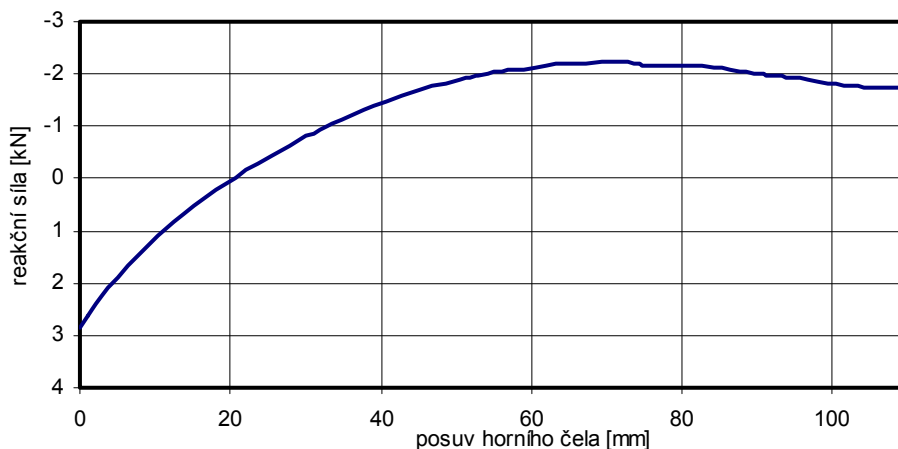
a)



b)

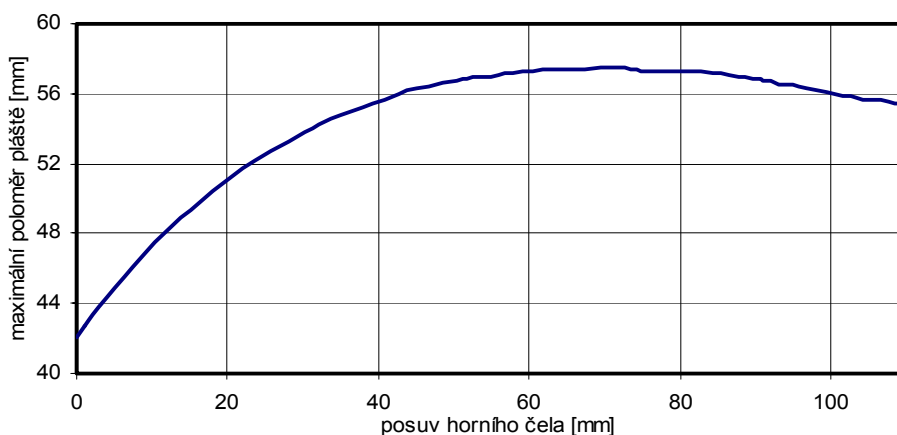
Obr. 8: a) pneumatická pružina v průběhu měření
b) Částečný model válcové pneumatické pružiny v zatíženém stavu

Na obr. 9 je vypočítaná závislost reakční síly na posuvu horního čela při vnitřním tlaku 0,3 MPa. Je důležité poznamenat, že kladné hodnoty na začátku křivky jsou způsobeny předepsaným zatížením, které je realizováno nejdříve vnitřním tlakem za současného zamezení posuvů obou čel ve směru osy pružiny a poté posuvem horního čela. Dle výsledků [7] má trubka s úhlem vyztužujících nití 38° při nafukování vnitřním tlakem tendenci výrazně se zkracovat. Jelikož zkrácení je zabráněno, vznikají v plášti značné tahové síly. Při měření však nebylo zamezeno posuvům obou čel, takže došlo k odsednutí horního čela od upevňovací desky.



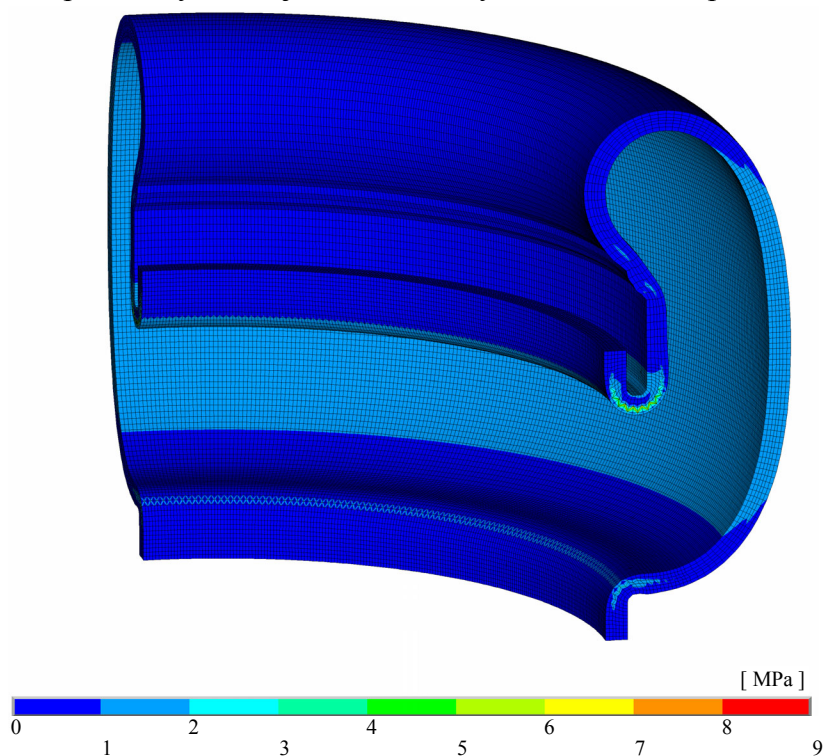
Obr. 9: Vypočítaná závislost reakční síly na posuvu horního čela při tlaku 0,3 MPa

Na obr. 10 je vypočítaná závislost maximálního poloměru pláště na posuvu horního čela. Závislost je velice podobná závislosti reakční síly, což potvrzuje předpoklad, že reakční síla závisí na maximálním průměru pružiny.



Obr. 10: Závislost maximálního poloměru pláště na posuvu horního čela

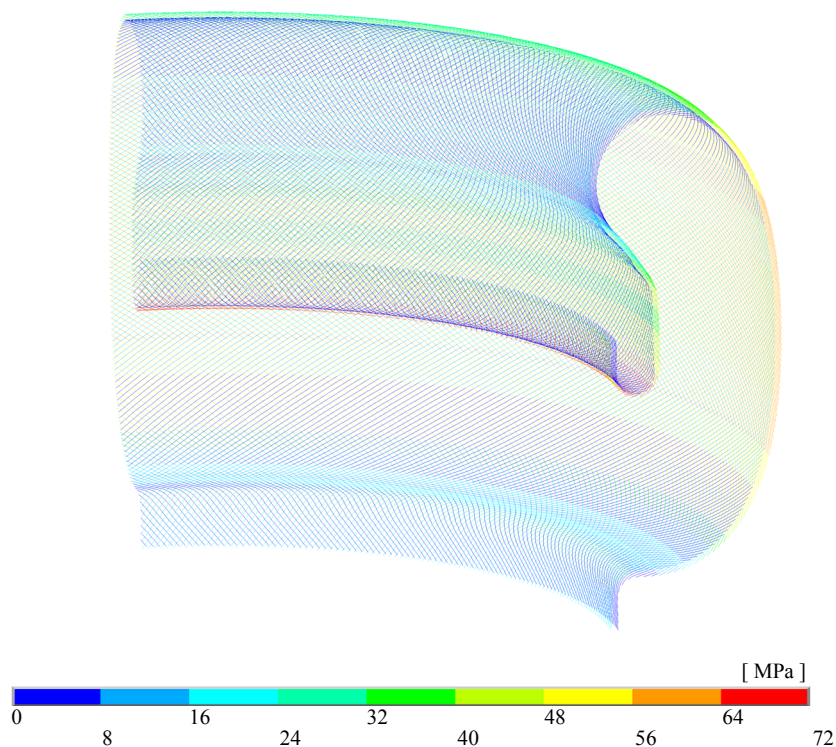
Na obr. 11 je znázorněno rozložení Cauchyho (skutečného) napětí v pryžových elementech vypočteného podle podmínky HMM. V modelu pláště válcové pneumatické pružiny byl tlak 0,3 MPa a posuv horního čela činil 100 mm. Maximální hodnoty napětí stanoveného podle podmínky HMM jsou v místě ohybu okolo horní upevňovací obruby.



Obr. 11: Napětí stanovené podle podmínky HMM v deformovaném plášti při tlaku 0,3 MPa a posuvu horního čela 100 mm

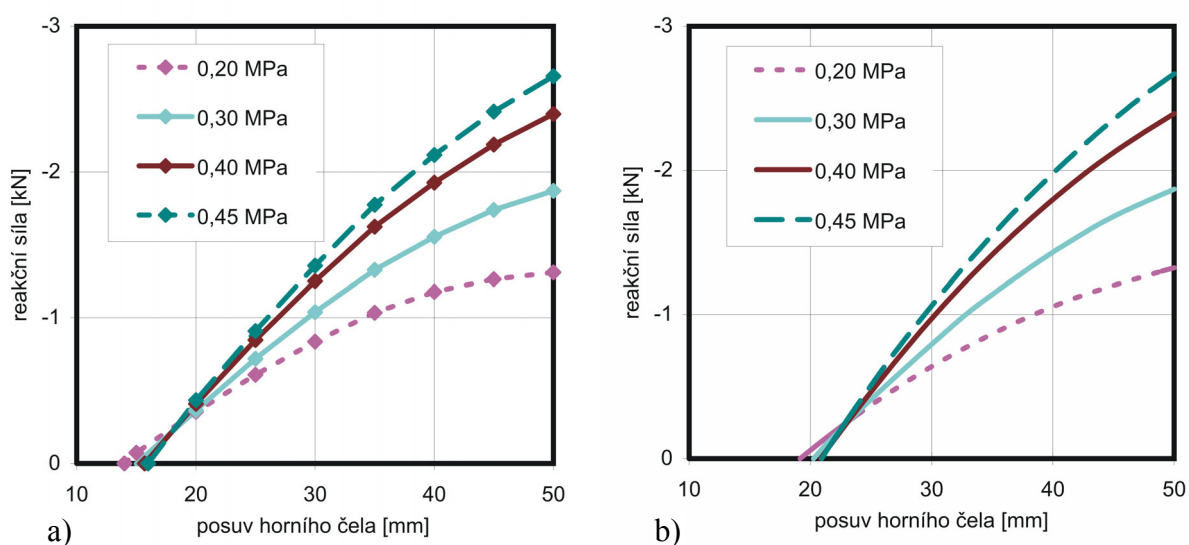
Z obrázku je též patrná velikost jednotlivých prvků (hrany jsou znázorněny tenkou černou linkou). Tloušťka pláště byla přitom rozdělena do šesti prvků. V místech ohybu přes upevňovací obruby byly použity prvky s polovičním rozměrem v podélném směru pláště.

Na obr. 12 je znázorněno rozložení napětí ve vyztužujících nitích ve směru jejich os. Z barevné stupnice na obr. 12 je vidět, že napětí ve vyztužujících nitích není v žádném místě tlakové. Hodnoty napětí v prvcích vyztužujících nitích dosahují výrazně vyšších hodnot než napětí v prvcích pryže.



Obr. 12: Napětí ve vyztužujících nitích

Na obr. 13 jsou znázorněny naměřené závislosti reakční síly na posuvu horního čela [8] pro různé tlaky a závislosti získané výpočtem metodou konečných prvků.



Obr. 13: Naměřené a vypočtené závislosti reakční síly na posuvu horního čela pro různé tlak v pneumtické pružině a) naměřené b) vypočtené

Závěr

Deformace pružiny a reakční síla vypočtená metodou konečných prvků a veličiny naměřené při provedených experimentech jsou srovnatelné. Dobrá shoda výsledků potvrzuje, že způsob modelování materiálu pružiny spolu s použitým softwarem dobře popisují chování pružiny při daném typu zatížení. Z výsledků lze též říci, že MKP model pneumatické pružiny je vhodný rovněž pro zjištění vlivu tvaru dosedací plochy čela pružiny na její zatěžovací charakteristiky, viz obr. 9. Z výsledků je též vidět, že v místě, ve kterém se plášť s čelem dotýká nejdříve, není tvar čela optimální, jelikož dochází k lámání pláště přes jeho ostrou hranu.

Poděkování

Práce byla realizována v rámci Výzkumného záměru MŠMT 242100001 Interakce vibroizolačního systému s okolním prostředím.

Literatura

- [1] Holzapfel, G.A.: Biomechanical of Soft Tissue, Biomech preprint series, No. 7, Graz, 2000
- [2] Weiss, J. A., Maker, B. N., Govindjee, S.: Finite element implementation of incompressible, transversely isotropic hyperelasticity, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 135, pp. 107–128, 1996
- [3] Bonet, J., Burton, A.J.: A simple orthotropic, transversely isotropic hyperelastic constitutive equation for large strain computations, Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol. 162, pp. 151-164, 1998
- [4] ANSYS Release 8.0 Documentation, Ansys Incorporated, 2003
- [5] Reese, S.: Large deformation FE modeling of the orthotropic elastoplastic material behaviour in pneumatic membranes, ECCOMAS, Barcelona, 2000
- [6] Aboudi, J., Arnold, S.M.: Micromechanical Modeling Of The Finite Deformation Of Thermoelastic Multiphase Composites, Technical Memorandum, NASA TM-107531
- [7] Holzapfel, G.A., Gasser, T.C.: A viscoelastic model for fiber-reinforced composites at finite strains: Continuum basis, computational aspects and applications, Biomech preprint series, No. 2, Graz, 2000
- [8] Marvalová, B., Urban, R.: Identification of orthotropic hyperelastic material properties of cord-rubber cylindrical air-spring, Formulations and constitutive laws for very large strains, Praha, 2001