



Národní konference s mezinárodní účastí INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

PRÁCE NA SIMULAČNÍM MODELU POLYURETANOVÉ PĚNY

David Církľ, Jan Šklíba¹

Abstract: This paper presents development of polyuretan foam simulating model. The combination of pneumatic cylinders filled by ideal gass with polytropic change of state was used. This model respects also simplified ear flow thru polyuretan foam structure.

Klíčová slova: polyuretanová pěna, molitan, sedadlo řidiče, vibroizolace

1 Úvod

Při výrobě sedadel (nejen v dopravních prostředcích) jsou takřka výhradně používány polyuretanové pěny – molitany. Řidič je v jedoucím automobilu vystaven působení vibrací vzniklých zejména přejezdem nerovností vozovky. Tělo se s tímto vlivem víceméně podvědomě vyrovnává zvýšenou svalovou prací a tím dochází k únavě. Z hlediska hygieny práce je třeba řidiče před účinky vibrací chránit. V užitkových automobilech, kromě odpružení podvozku, tuto funkci plní i odpružené sedadlo.

Přenášené vibrace tlumí pružina (např. pneumatická) a materiál sedáku a opěraku – molitan. V článku je popsán vývoj modelu mechanických vlastností polyuretanové pěny.

2 Experimentální zázemí

Hlavním zdrojem informací pro posuzování vlastností tohoto materiálu je experimentální měření. To je prováděno v hydrodynamické zkušebně (HDL Doubí při TUL v Liberci). Zkušební stav je zachycen ve schématické podobě na obr. 1. Použitý snímač síly je tenzometrický s rozsahem do 1500N. Hydraulický válec je typu AHS 25-250 (jmenovitá síla 25kN, max. celkový zdvih 250mm), pracovní tlak 28MPa. Vzorek materiálu je vložen mezi dvě rovnoběžné ocelové desky.

Zkušební vzorky pocházejí z podniku Gumotex Břeclav, který se zaměřuje na produkci sedáků a opěráků z polyuretanových pěn. Vzorky (viz obr. 2a)) mají tvar kvádrů o rozměrech (100x100x50)mm a jsou vyrobeny z materiálu TDI s hustotou 55kg/m³ se strukturou otevřených pórů.

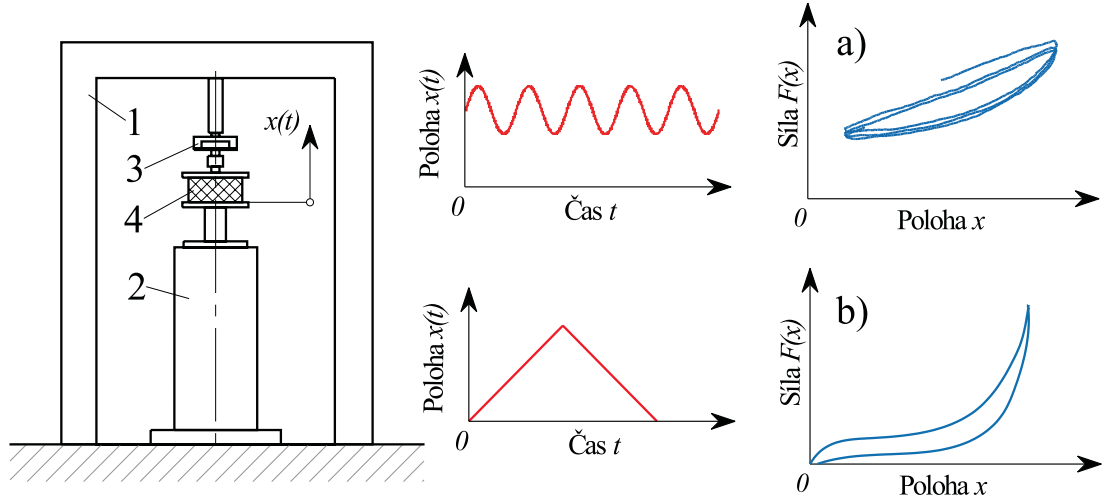
3 Mechanické vlastnosti polyuretanové pěny

Vzorek je zatěžován prostým tlakem. Polohové buzení hydraulického válce je buď harmonické ve tvaru (1), kde A_0 je střední hodnota kmitu, A – amplituda kmitu, ω –

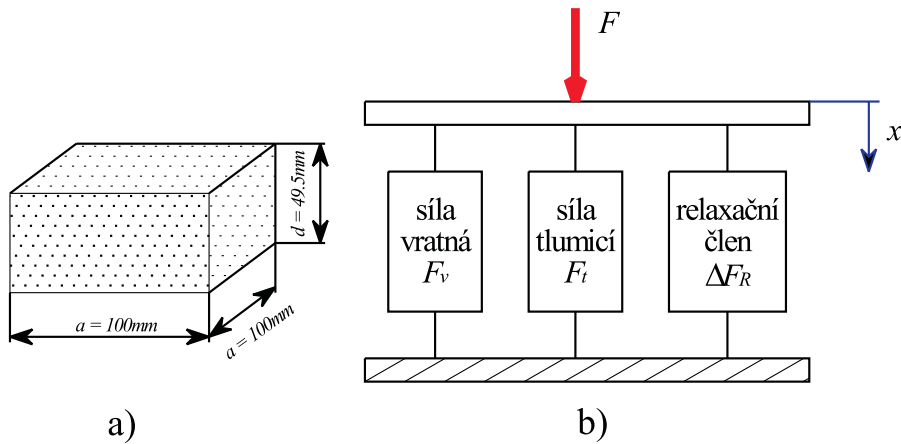
¹ Ing. David Církľ, katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti, Technická univerzita v Liberci, Komenského 2, Liberec 460 17, david.cirkli@vslib.cz

Prof. RNDr. Jan Šklíba, CSc., katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti, Technická univerzita v Liberci, Komenského 2, Liberec 460 17, jan.skliba@vslib.cz

úhlová frekvence kmitu a f – frekvence kmitu, nebo trojúhelníkové (viz (2)), kde T je perioda kmitu a v rychlost náběhu. Z průběhu typické silové odezvy, kde obr. 1a) představuje odezvu na harmonické buzení a obr. 1b) odezvu na trojúhelníkové buzení (stlačeno na 20% výšky vzorku), vyplývá, že celková síla F (viz (3)) má následující komponenty: sílu vratnou F_v , sílu tlumící F_t a sílu relaxační ΔF_R . Schematicky lze tedy PU pěnu nahradit modelem uvedeným na obr. 2b). Přičemž snahou je stanovit tyto tři dílčí funkce.



obr. 1 Schéma zkušebního stavu, 1-rám, 2-hydraulický válec, 3-snímač síly, 4-zkušební vzorek



obr. 2 a) Vzorek polyuretanového materiálu, b) Náhradní schéma PU pěny

$$x(t) = A_0 + A \sin(\omega t) \quad , \quad \omega = 2\pi f \quad (1)$$

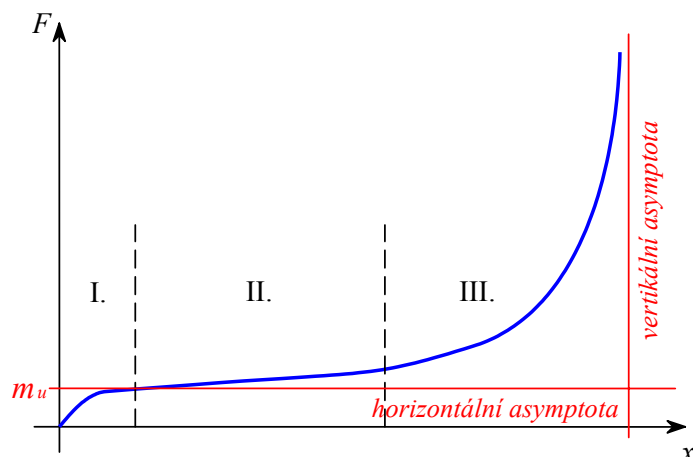
$$x(t) = \begin{cases} vt & \text{pro } t \in \langle 0; T/4 \rangle \\ A - v(t - T/4) & \text{pro } t \in \langle T/4; T/2 \rangle \\ 0 & \text{pro } t > T/2 \end{cases} \quad (2)$$

$$F(x, \dot{x}, t) = F_v(x, \dot{x}) + F_t(x, \dot{x}) + \Delta F_R(x, t) \quad (3)$$

4 Vratná síla

Předpokládaný průběh vratné síly při zatěžování polohovým signálem s konstantní rychlostí má tvar, jak je uvedeno na obr. 3. Jsou zde tři charakteristické

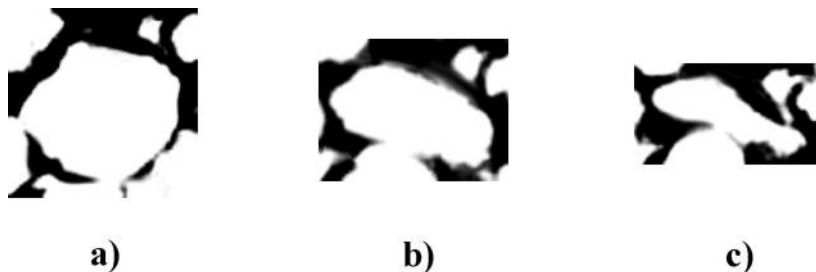
fáze. Část I. má konkávní průběh s předpokládanou horizontální asymptotou. Navazuje téměř lineární úsek II. a poté fáze III. s konvexním průběhem a vertikální asymptotou.



obr. 3 Průběh vratné síly při stlačování molitanového vzorku

4.1 Fáze I. – borcení struktury materiálové matrice

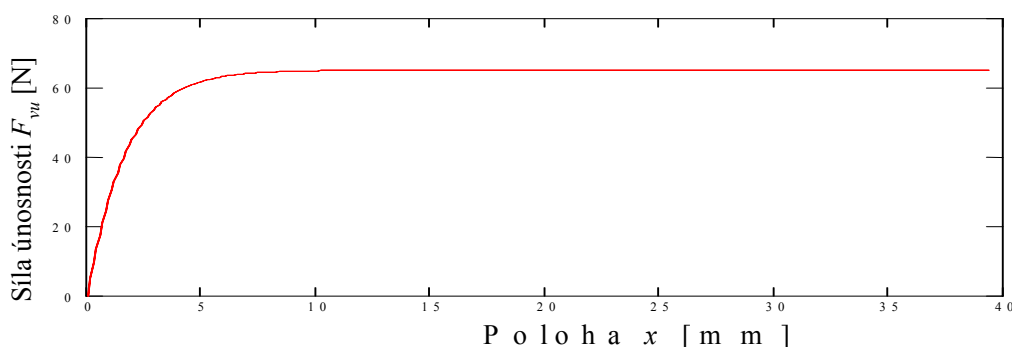
Jak již bylo řečeno v [1], póry polyuretanového materiálu vytvářejí typickou strukturu. Ta je do jisté míry schopna odolávat tlakovému zatížení díky své vzpěrné pevnosti. Nedeformovaný tvar buňky je na obr. 4a), částečně deformovaný na obr. 4b); obr. 4c) odpovídá stavu, kdy jsou buňky natolik deformované, že byla překročena mez únosnosti struktury m_u (horizontální asymptota v obr. 3) a vzpěrná pevnost buněk přestává mít významný vliv na velikost vratné síly. Deformace lze považovat za elastické.



obr. 4 Postupná deformace zatížené buňky (zvětšeno)

Tato fáze je aproximována funkcí (4) na obr. 5. F_{vu} je přírůstek síly vlivem vzpěrné pevnosti struktury, m_u je mez únosnosti a k_u je koeficient únosnosti struktury.

$$F_{vu}(x) = m_u (1 - e^{-k_u x}) \quad (4)$$



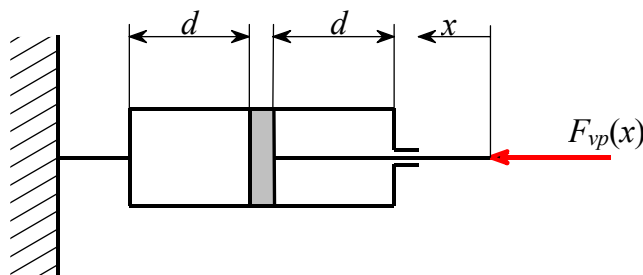
obr. 5 Průběh síly únosnosti struktury F_{vu} v závislosti na deformaci x pro $m_u = 65 \text{ N}$ a $k_u = 600 \text{ m}^{-1}$

4.2 Fáze II. a III. – přechování základního materiálu

Po zborcení buněk základního materiálu dochází k dosedání jejich stěn a dále již ke kompresi materiálové matrice. Charakteristika této části je velice podobná průběhu síly při stlačování ideálního plynu.

4.3 Analogie stlačovaného plynu

Pro případ stlačování pneumatického válce (viz obr. 6) je síla F_{vp} dána vztahem (5)



obr. 6 Stlačování pneumatického válce

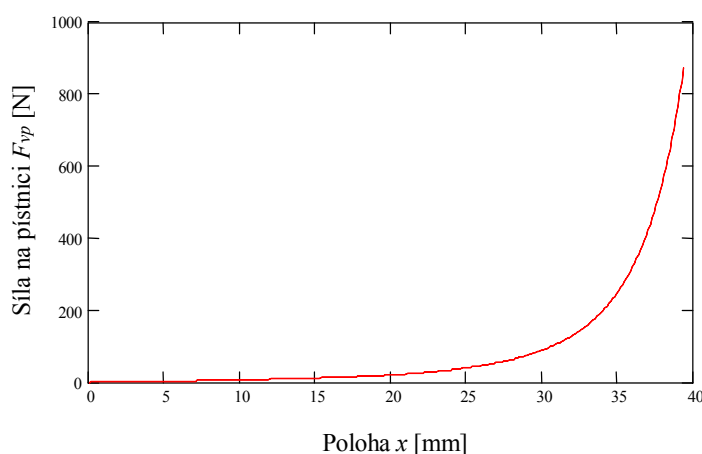
$$F_{vp}(x) = \left[\left(\frac{1}{1 + \frac{x}{d}} \right)^n - \left(\frac{1}{1 - \frac{x}{d}} \right)^n \right] S_p p_0, \quad (5)$$

kde S_p je činná plocha pístu, n polytropický exponent, p_0 tlak plynu v nezatíženém válci a d odpovídá výšce válce. Typický průběh síly $F_{vp}(x)$ je na obr. 7.

Vztah pro celkovou vratnou sílu F_v je dán součtem

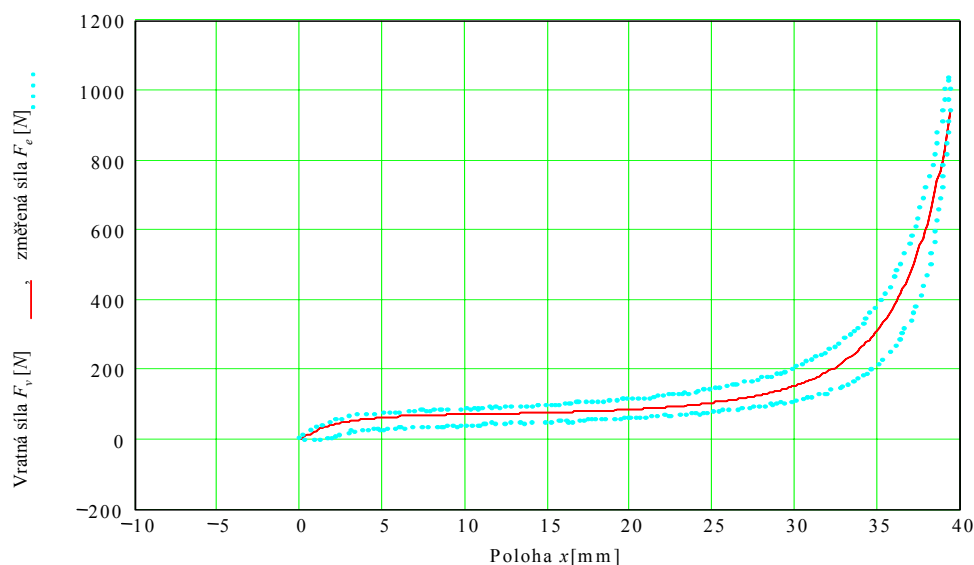
$$F_v = F_{vu} + F_{vp} \quad (6)$$

a má nyní pět parametrů (m_u , k_u , n , d , S_p , p_0). Parametry d a S_p lze získat měřením. V případě vzorku se čtvercovou základnou (viz obr. 2a)) je známa délka a (tím i plocha $S = a^2$) a výška kvádra d . Ostatní parametry je nutno volit.



obr. 7 Průběh působící síly při stlačování pneumatického válce

Pro $a = 100$ mm, $d = 49.5$ mm, $n = 3.48$ (jedná se o smyšlený plyn), $p_0 = 350$ Pa, $m_u = 65$ N, $k_u = 600$ m⁻¹ dostaneme na obr. 8 červenou křivku, která je porovnávána se skutečně naměřenou silou. Při experimentu byl vzorek zatěžován trojúhelníkovým skokem (2) s konstantní rychlostí $v = 50$ mm/s a amplitudou $A = 38$ mm.



obr. 8 Proložení vypočtené vratné síly F_v naměřenými hodnotami

5 Tlumičí síla

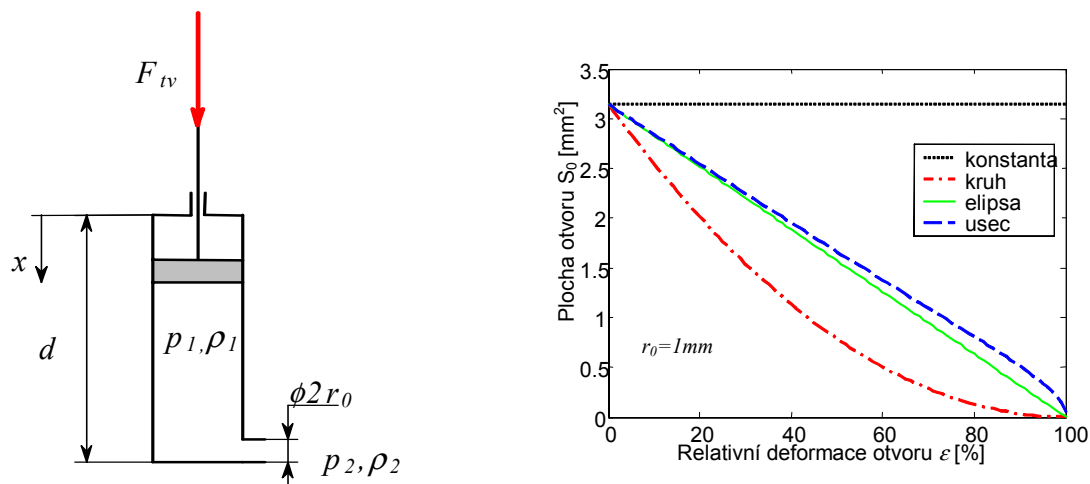
5.1 Tlumení materiálové matrice

Průběh této složky tlumičích sil je předpokládán ve tvaru (7). Pro tento materiál je charakteristické, že tlumení je velmi závislé na poloze x a málo na rychlosti $\dot{x}$. Proto je vždy $\alpha > \beta$. Všechny parametry jsou voleny.

$$F_{tt} = b_a |x|^\alpha |\dot{x}|^\beta \text{sign}(\dot{x}) \quad (7)$$

5.2 Tlumení způsobené vyfukováním a nasáváním vzduchu

Pro stanovení této složky tlumičí síly byl zvolen zjednodušený model na obr. 9a). Pneumatický válec má ve spodní části výfukový otvor o poloměru r_0 souhrnně reprezentující kanálky PU pěny.



obr. 9 a) Výpočtový model pro vyfukování a nasávání vzduchu, b) Změna plochy výtokového otvoru s deformací

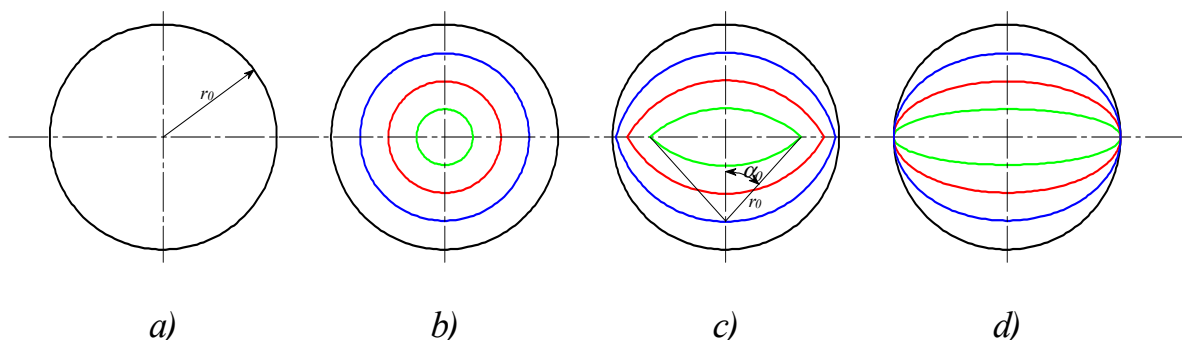
Pro výpočet tlaku p_1 uvnitř nádoby byla použita diferenciální rovnice (8) odvozená v [3] řešená metodou Runge-Kutta.

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{n}{d-x} \left(-\frac{RT q(p_1)}{S} + p_1 x \right) \quad (8)$$

Síla F_{tv} je pak dána vztahem

$$F_{tv} = (p_1 - p_{10})S, \quad (9)$$

kde p_1 je okamžitý tlak vzduchu ve válci, p_{10} je tlak ve válci na počátku děje (tzn. atmosférický tlak) a S je plocha pístu.



obr. 10 Způsoby deformace výtokového otvoru

U stlačovaného PU materiálu dochází k deformaci buněk (obr. 4), což ovlivňuje plochu průřezu průtočných kanálků. Vliv tohoto efektu lze postihnout několika způsoby:

- 1) Změnu plochy výtokového otvoru S_0 lze zanedbat (obr. 10a))

$$S_0 = \pi r_0^2 = \text{konst.} \quad (10)$$

- 2) Poloměr výtokového otvoru se mění lineárně s deformací (obr. 10b))

Poměrná deformace materiálu ε je

$$\varepsilon = \frac{d-x}{x}. \quad (11)$$

- 3) Otvor zaujímá tvar spojených kruhových výsečí se společnou těživou (obr. 10c))

- 4) Otvor se deformuje podle tvaru elipsy s proměnnou vedlejší poloosou (obr. 10d))

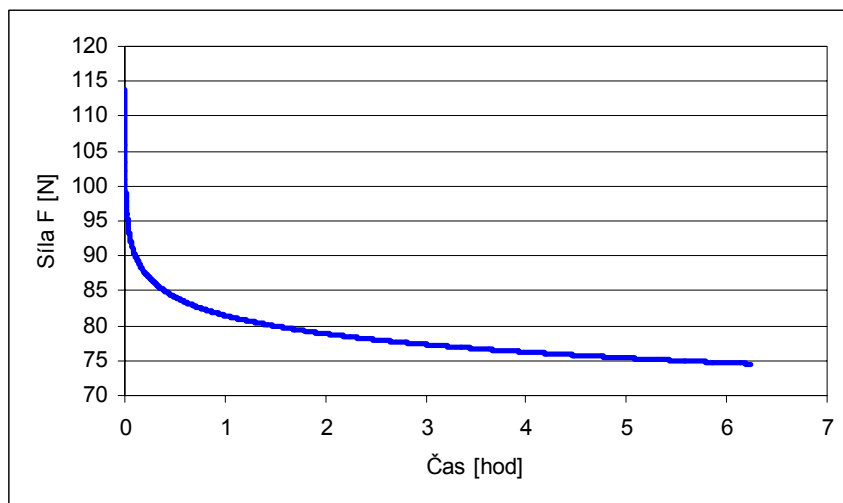
Na obr. 9b) je porovnání průběhu plochy výtokového otvoru v závislosti na relativní deformaci ε .

6 Relaxační vlastnosti PU pěny

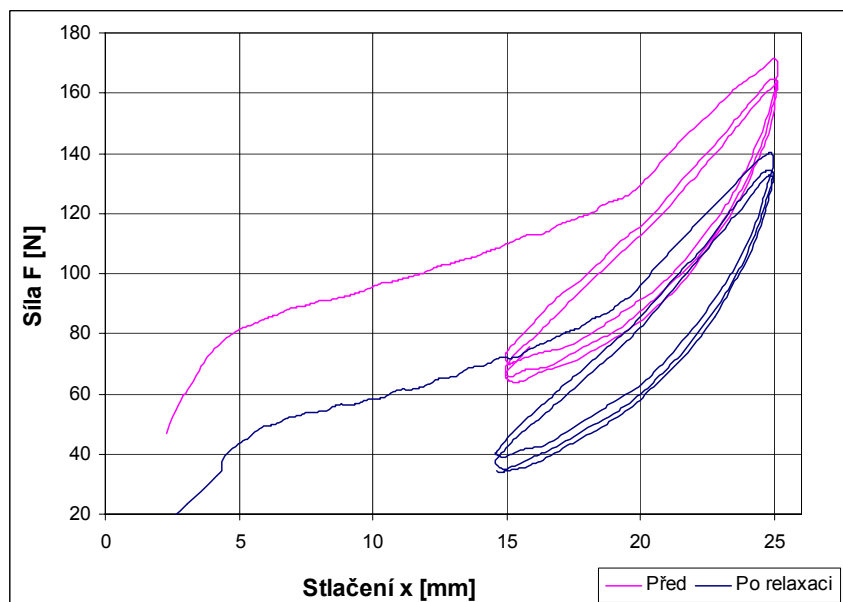
Relaxace základního materiálu patří mezi významné faktory ovlivňující chování polyuretanu. Relaxační zkoušky byly prováděny po dobu 6 hod a 15 min při skokovém stlačení obdélníkovým signálem s amplitudou $A \in (15, 20, 25, 30, 35, 37, 40)$ mm v čase 0. Na obr. 11 je průběh silové odezvy při skokovém stlačení o $A = 25$ mm. Nejvýrazněji se relaxace projevuje v prvních vteřinách zatížení. Asi po 1 hodině se začíná stabilizovat a směřuje k předpokládané limitě. V čase 0 je měřená síla $F = 113.3$ N a po relaxaci $F = 77.5$ N. Po 6.25 h se síla zmenšila asi o 31.5%.

Na obr. 12 je porovnání dvou průběhů silové odezvy na harmonické zatížení dle (1) s parametry: $f=3\text{Hz}$, $A=5\text{mm}$, $A_0=20\text{mm}$ i s náběhem z nulové polohy. Modře značený signál byl měřen před relaxací a fialová křivka odpovídá měřené síle po relaxaci (6.25 h). Je vidět, že relaxace za statického zatížení nemá vliv na charakter odezvy, pouze se celá křivka posune o hodnotu ΔF_R dolů. ΔF_R je úbytek síly vlivem relaxace. V případě

dlouhodobého dynamického zatěžování dochází k mírnému ohřevu základního materiálu. To se projeví v poklesu tlumicí síly. Hysterezní smyčka je poté štíhlejší.



obr. 11 Závislost síly na času při relaxaci; $A=25\text{mm}$



obr. 12 Porovnání dvou průběhů síly při harmonickém zatěžování ($f=3\text{Hz}$, $A=5\text{mm}$, $A_0=20\text{mm}$) před relaxací a potom (6h15min) – staticky zatěžováno

Možných přístupů, jak postihnout relaxační složku silové odezvy je jistě několik. Jedním z nich, je zařazení relaxačního členu v podobě pneumatického válce s únikem tekutiny do okolí. Fyzikální model tedy bude stejný jako v kap. 5.2 (obr. 9a)), kde se jednalo o vyfukování vzduchu póry polyuretanu. V tomto případě však válec bude naplněn fiktivní tekutinou s takovými fyzikálními konstantami, které zajistí požadované chování srovnatelné s experimentem. Označení veličin tohoto modelu je stejné jako ve zmíněné kapitole, ovšem s přidaným indexem f jako fiktivní.

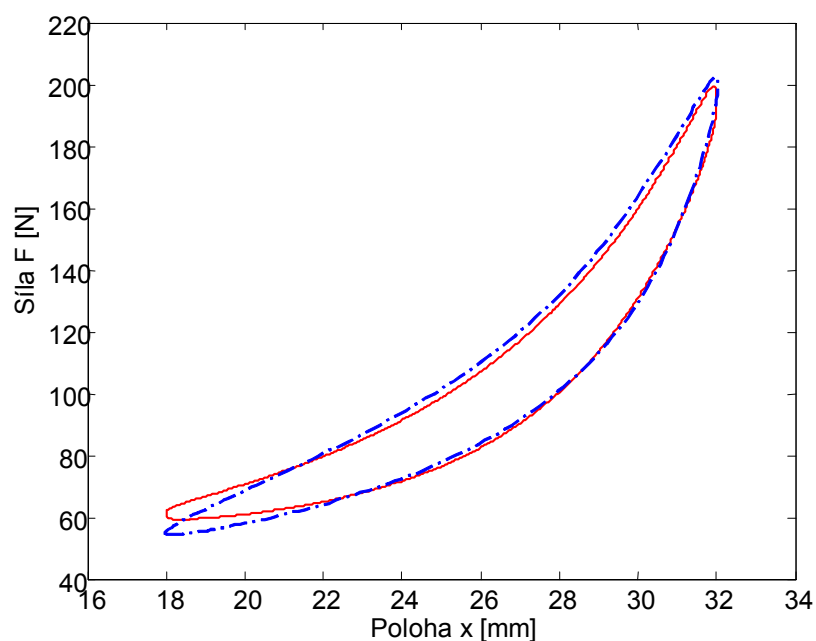
7 Porovnání naměřených a simulovaných výsledků

V konečné podobě je model vzorku polyuretanového materiálu zobrazen na obr. 15. V porovnávacích výpočtech byl prozatím vynechán člen respektující sílu F_{tv} způsobenou vyfukováním vzduchu z polyuretanové matrice. O významu této složky by měl rozhodnout experiment provedený ve vakuové komoře. S experimentálně

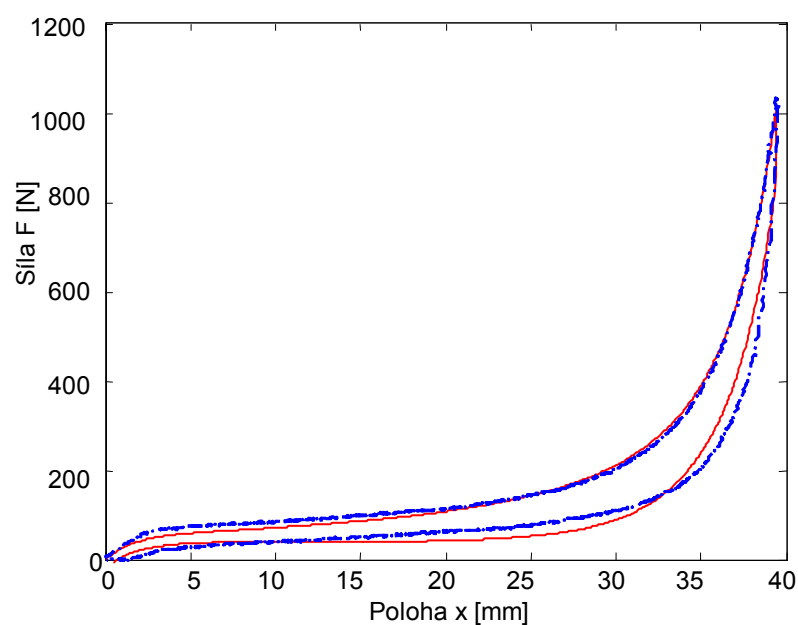
získanými hodnotami byl model porovnán pro dva způsoby zatěžování. Model má nyní celkem 19 vstupních parametrů.

Porovnávací signály byly tyto:

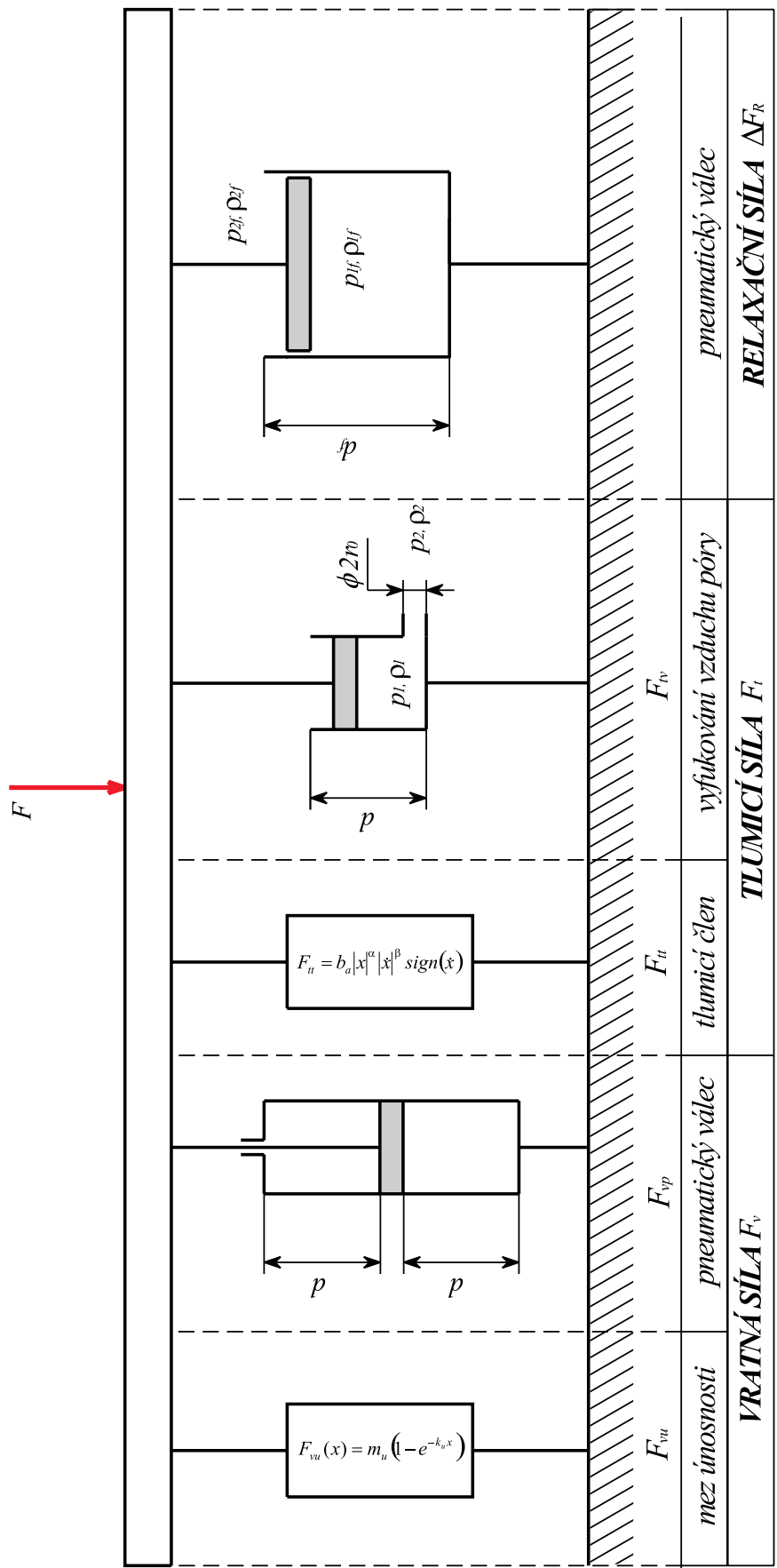
- 1) harmonické buzení dle funkce (1) s parametry $f=0.1\text{Hz}$, $A=7\text{mm}$, $A_0=25\text{mm}$ - obr. 13
- 2) buzení trojúhelníkovým skokem dle (2) s parametry $v=0.05\text{m/s}$, $A=39.4\text{mm}$ - obr. 14



obr. 13 Silová odezva na harmonický průběh polohy dle (1); $A_0=25\text{mm}$, $A=7\text{mm}$, $f=0.1\text{Hz}$; (modře čerchované – měřeno, plná červená čára – simulace)



obr. 14 Silová odezva na trojúhelníkový skok polohy s amplitudou $A=39.4\text{mm}$ a rychlostí $v=50\text{mm/s}$ (modře čerchované – měřeno, plná červená čára – simulace)



obr. 15 Výsledný model vzorku PU pěny

8 Závěr

V článku bylo popsáno sestavení modelu polyuretanového materiálu na základě experimentálně získaných výsledků. Respektuje základní vlastnosti pozorovatelné na popsaném laboratorním vzorku. Tj. tuhost, tlumení a relaxaci. Zohledněno bylo i proudění vzduchu póry materiálu. Cílem bylo ověřit, jestli takto sestavený model je schopen kvalitativně shodné odezvy v porovnání s naměřenými daty. To přineslo uspokojivé výsledky. Pro budící signál ve tvaru (1) a (2) jsou uvedeny v kap. 7. Nevýhodou modelu v této fázi vývoje je, že při změně budící funkce je nutné přestavit některé parametry modelu, zejména v předpisu přídatné tlumicí funkce (7). Předmětem další práce bude jejich sjednocování. Podrobnější informace o tomto výzkumu jsou uvedeny v [1] a [2].

9 Literatura

- [1] Círk, D.: Identifikace tlumících vlastností polyuretanové pěny, dílčí zpráva VS 9708, TU Liberec, Liberec 2000
- [2] Círk, D.: Mechanické vlastnosti polyuretanové pěny, dílčí výzkumná správa 1453 – 04, TU Liberec, Liberec 2001
- [3] Gerc, E., V.: Dinamika pněvmatičeskich systém mašin, Mašinostroenie, Moskva 1985

Výzkumné práce byly provedeny s podporou grantu MŠMT VS 9708 Řízené vibroizolační systémy a výzkumného záměru MŠMT 242100003 Interakce vibroizolačního systému s okolním prostředím.