

VÝZKUMNÁ ZPRÁVA Z- 1365/05



**ÚSTAV TERMOMECHANIKY
AKADEMIE VĚD ČR**

**VLASTNOSTI TERMO-VISKO-
ELASTICKÉHO MATERIÁLU 42-809
PRO VÝROBU VIBROTLUMÍCÍCH
PRVKŮ – 1. ČÁST**

ING. JAROSLAV SVOBODA

ING. LUDĚK PEŠEK, CSC.

ING. VLADISLAV FRÖHLICH

ING. FRANTIŠEK VANĚK, CSC.

PETR KLÁŠTERKA

JAN CIBULKA

 ÚSTAV TERMOMECHANIKY Akademie věd České republiky		Druh zprávy dílčí	Číslo zprávy Z 1365 / 05
Název: <p style="text-align: center;">Vlastnosti termo-visko-elastického materiálu 42-809 pro výrobu vibrotlumících prvků -1. část</p>			
Autor: <p style="text-align: center;">Ing. Jaroslav Svoboda, Ing. Luděk Pešek, CSc., Ing. Vladislav Fröhlich, Ing. František Vaněk, CSc., Petr Klášterka, Jan Cibulka</p>			
DT: 026.56		Deskriptor: statická a dynamická charakteristika, trvalá deformace, hysterezní smyčka	
Počet stran textu: 12	Počet obrázků: 12	Počet fotografií: 0	
Počet a druh příloh: 0			
Souhrn: <p>Zpráva uvádí první výsledky prací provedených v rámci studia vlastností pryžových segmentů pro tlumení vibrací odpružených složených kol kolejových vozidel. Kromě experimentálně stanovených závislostí síly a deformace při statickém a dynamickém zatížení byla sledována změna tuhosti, teploty a ztrátového úhlu na počtu odkmitaných cyklů, nárůst trvalé deformace s počtem odkmitaných cyklů, pokles síly (a tím i napětí) při řízené deformaci pryžového elementu a řada dalších mechanických vlastností sledované pryže.</p>			
Vazba na předchozí zprávy autora nebo na zprávy vydané v rámci téhož úkolu: Pešek,L. – Půst, L. – Vaněk, F.: Contribution to identification of Thermo-mechanic interaction at vibrating rubber-like materials, In: <i>IFAC Symposium on System Identification /13/: preprints</i> . Rotterdam, Omnipress 2003, pp. 479-484.			
Číslo a název úkolu: grantový projekt č. 101/05/2669 Dynamika a spolehlivost vibrotlumících prvků z termo-visko-elastických materiálů			
Vedoucí pracovník úkolu: Ing. Luděk Pešek, CSc.		Vydáno dne: 12. 9. 2005	
Vedoucí oddělení: Ing. Petr Hora, CSc.		Pořadové číslo výtisku:	
Ředitel ústavu: RNDr. Zbyněk Jaňour DrSc.		Knihovní záznamy:	

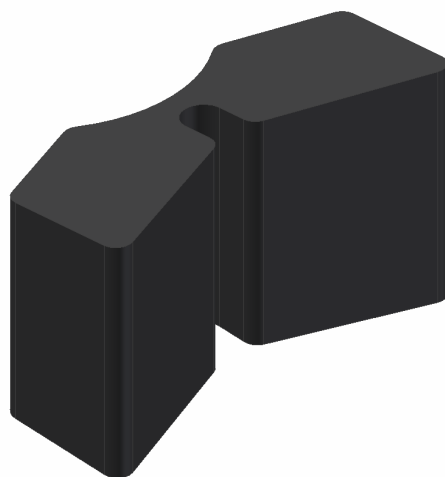
Obsah

1. Úvod	4
2. Experimentální program	4
2.1 Měření statické charakteristiky	4
2.2 Měření dynamické charakteristiky	4
2.3 Sledování poklesu zatěžovací síly u pryžového elementu v závislosti na čase	5
2.4 Sledování změny deformace pryžového elementu zatěžovaného konstantní silou	5
2.5 Sledování závislosti trvalé deformace na počtu odkmitaných cyklů	5
3. Výsledky zkoušek	5
4. Závěr	12
5. Literatura	12

1. Úvod

V rámci řešení grantu č.101/05/2669 jsme se zaměřili na studium vlastností pryžových segmentů, používaných pro tlumení hluku a vibrací u odpružených, složených kol kolejových vozidel. Segmenty jsou vyrobeny z pryže na bázi IR (syntetický izoprénový elastomer) a BR (butadienový elastomer), dodávané pod názvem 42 – 809. Jejich tvar byl navržen výrobcem těchto kol fy. Bonatrans, a.s. Bohumín a je zřejmý z obr.1. Výrobcem pryžových segmentů je fy. Rubena, a.s., Hradec Králové. Segmenty jsou montovány mezi věnec a disk kol a jsou namáhány na tlak a smyk, který vzniká přenosem krouticího momentu.

Všechny experimenty byly prováděny na polovinách těchto segmentů po jejich rozřezu ve středu spojovacího můstku.



Obr.1 Tvar pryžového segmentu

2. Experimentální program

2.1 Měření statické charakteristiky

Pro zatěžování byl zvolen 40 kN servoválec fy. IST, řízený elektronikou LABTRONIC 8800. Zatěžování poloviny segmentu probíhalo při řízené deformaci do stlačení 7 mm. Prvé tři smyčky byly sejmuty při rychlosti zatížení 30 mm/min., po nich následovala jedna, při rychlosti 10 mm/min.. Udaje síly a deformace byly uloženy a vykresleny programem MS – Excel.

2.2 Měření dynamické charakteristiky

Zatěžování se provádělo na stejném zkušebním zařízení jako v předešlém případě. Před zkouškou byla změřena tloušťka pryžového elementu $h_0 = 26,35$ mm. Zkouška probíhala při řízené síle harmonickým zatížením o parametrech $F_m = -5$ kN, $F_a = \pm 3$ kN a frekvenci $f = 2$ Hz. Kritériem pro ukončení zkoušky bylo dosažení trvalé deformace 10 % z počáteční tloušťky h_0 . Tato trvalá deformace se postupně kontrolovala po odkmitání 5000; 15000; 35000 a 75000 cyklů. V průběhu zkoušky byly ukládány hodnoty síly, deformace a teploty. Při vyhodnocení jsme se zaměřili na sledování změny tuhosti pryže na počtu odkmitaných cyklů a na nárůst teploty, která se měřila čidlem, umístěným do

bočního otvoru ve středu zkoušeného elementu. Sledována byla rovněž změna tvaru hysteresíh smyček v průběhu zkoušky.

2.3 Sledování poklesu zatěžovací síly u pryžového elementu v závislosti na čase

Jednalo se o statické zatěžování pryžového elementu s řízenou deformací. Pryž byla postupně stlačována na hodnoty $0,5 \div 5$ mm, po její relaxaci byla zkouška zopakována stlačováním v rozsahu $0,5 \div 13$ mm. Na každém stupni byla udržována ve stlačeném stavu po dobu 20 minut. V průběhu této doby byly ukládány hodnoty síly. Po počátečním prudkém poklesu síly (viz obr.9) se dosáhlo mezního stavu (síla $F_{mez.}$), kdy se již síla neměnila. Hodnoty těchto mezních stavů v závislosti na deformaci pryže jsou uvedeny v tab.2 a na obr. 10.

2.4 Sledování změny deformace pryžového elementu zatěžovaného konstantní silou

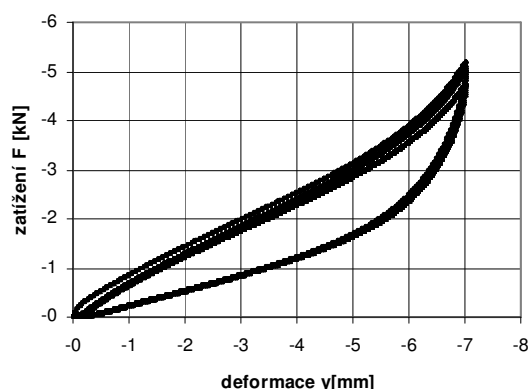
Jednalo se o reciproční zkoušku ke zkoušce popsané v kap. 2.3. V daném případě byl pryžový element zatěžován řízenou silou, která byla udržována po dobu 20 minut konstantní. Snímána byla deformace elementu na počátku zatěžování a po uvedeném časovém intervalu. Výsledky jsou uvedeny v tab.3 a na obr. 11.

2.5 Sledování závislosti trvalé deformace na počtu odkmitaných cyklů

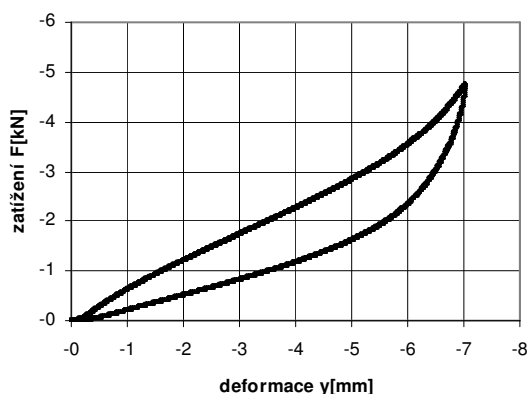
Při zkouškách v kap. 2.1 byla získána závislost trvalé deformace na počtu zatěžovacích cyklů pro parametry zatížení $F_m = -5$ kN, $F_a = \pm 3$ kN. V daném případě bylo zjišťováno, jak se tato závislost změní, zvýší-li se statická složka zatížení na hodnotu $F_m = -8$ kN, při stejné dynamické složce $F_a = \pm 3$ kN. Výsledky jsou zřejmé z obr.12.

3. Výsledky zkoušek

Na obr.2 a 3 jsou vykresleny snímané hysterezní smyčky pryžového elementu při jeho statickém zatěžování rychlostmi uvedenými v kap.2.1.



Obr.2 Hysterezní smyčky pro rychlost zatěžování $3 \cdot 30$ mm/min a $1 \cdot 10$ mm/min

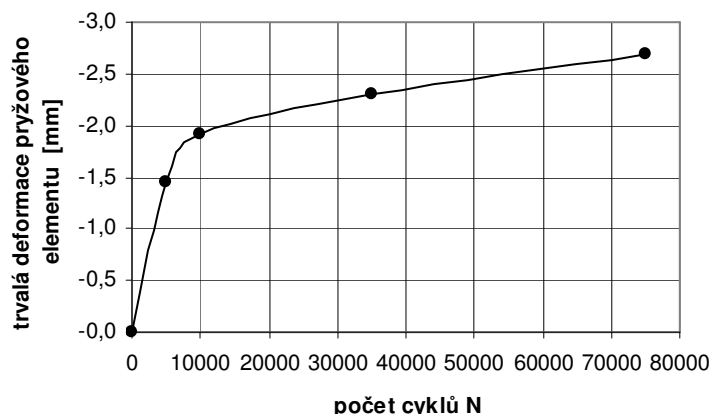


Obr.3 Hysterezní smyčka pro rychlost 10 mm/min

Z obr.2 je zřejmý mírný posun smyček v počáteční fázi zatěžování, způsobený tím, že se pryž po odlehčení nevrátí zpět do původních rozměrů a zůstává mírně zdeformována. Při stlačení o 7 mm se tato trvalá deformace pohybovala kolem hodnoty $0,1 \div 0,2$ mm. Na

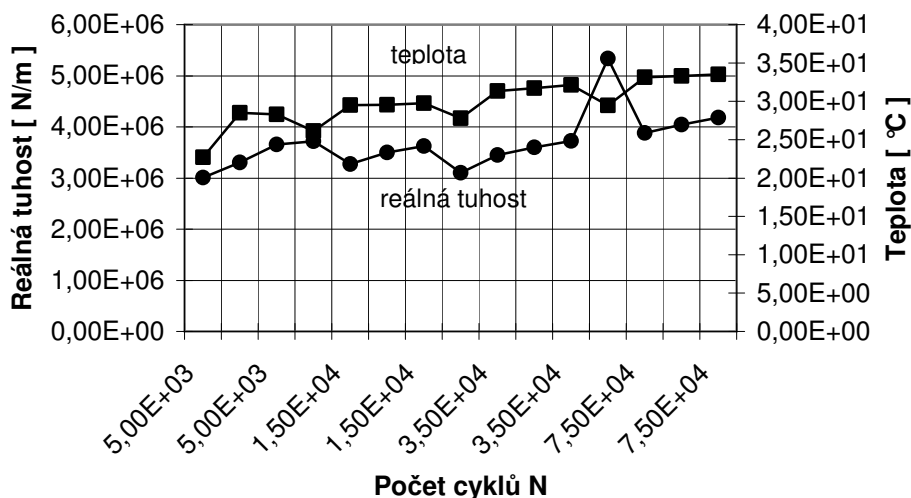
obr.2 jsou vykresleny všechny 4 snímané křivky, na dalším obr.3 pak pouze smyčka sejmutá při rychlosti zatěžování 10 mm/min.

Dynamická charakteristika pryžového elementu byla sledována v závislosti na počtu odkmitaných cyklů. Zkouška probíhala při řízené síle harmonickým zatížením o parametrech síly $F_m = -5$ kN, $F_a = \pm 3$ kN a frekvenci $f = 2$ Hz. Jak bylo uvedeno v kap.2.2, kritériem pro ukončení zkoušky bylo dosažení 10% trvalé deformace pryžového elementu (hodnota $0,1 h_0$). Tato trvalá deformace byla měřena po odkmitání 5000, 15000 a 35000 cyklů. Předepsané 10% hodnoty se dosáhlo po 75000 cyklech. Na obr.4 je vykreslen nárůst této trvalé deformace s počtem cyklů.

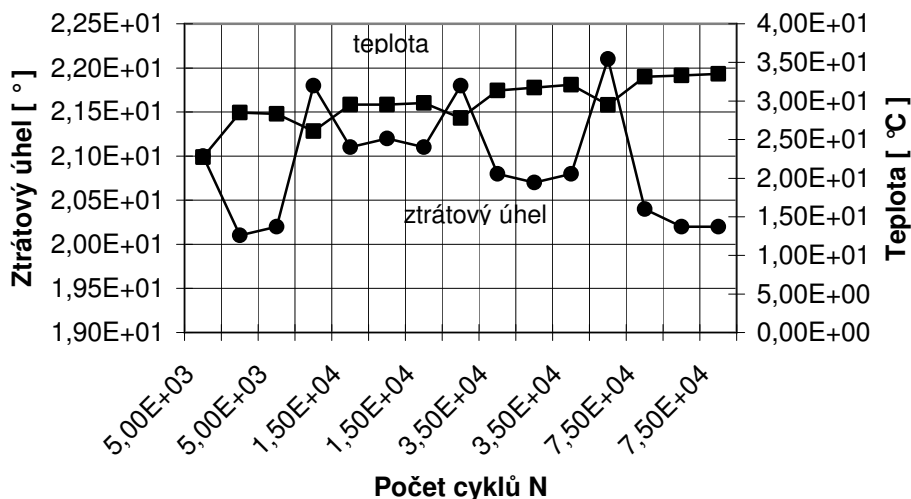


Obr.4 Nárůst trvalé deformace pryžového elementu s počtem odkmitaných cyklů (počáteční tloušťka $h_0 = 26,35$ mm)

V průběhu zkoušky byly pomocí digitální měřicí aparatury SPIDER 8 hodnoty síly, deformace pryže a její teplota ukládány do paměti počítače a sice vždy na začátku a konci uvedených čtyř intervalů a několik záznamů bylo sejmuto rovněž v jejich průběhu. Uložené hodnoty byly zpracovány programem MS-EXCEL. V tab.1 jsou uvedeny reálné a imaginární hodnoty tuhosti a ztrátové úhly vypočítané ze středních hodnot sil a deformací získaných ze záznamů provedených ve sledovaných časových intervalech. Na obr.5 a 6 byly vyneseny hodnoty reálné tuhosti, teploty a ztrátového úhlu v závislosti na počtu odkmitaných cyklů.



Obr.5 Změna reálné tuhosti a teploty pryžového elementu v průběhu zkoušky



Obr.6 Změna ztrátového úhlu a teploty pryžového elementu v průběhu zkoušky

Tab.1 Hodnoty reálných a imaginárních tuhostí a ztrátového úhlu, které byly vypočítány z naměřených experimentálních hodnot

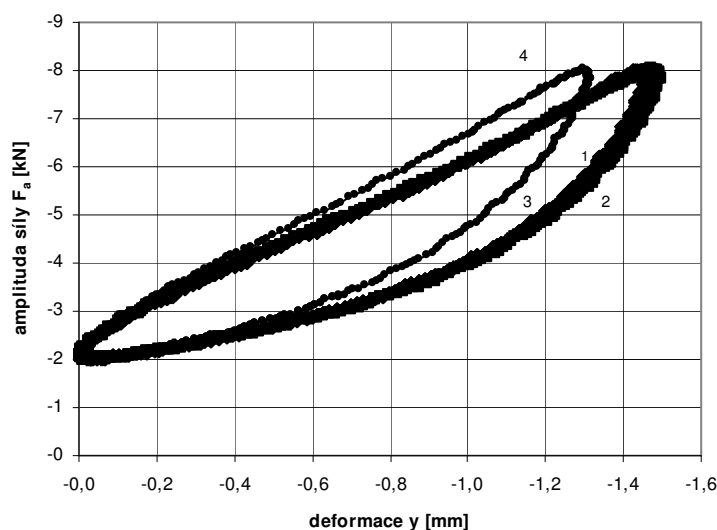
Počet cyklů	Budicí frekvence [Hz]	Statická složka síly F_m [kN]	Amplituda síly $\pm F_a$ [kN]	Průměr. teplota [°C]	Reálná tuhost [N/m]	Imaginár. tuhost [N/m]	Ztrátový úhel [°]
5000	2	-5000	2997	22,7	3,01E+06	1,15E+06	21
5000	2	-5000	2997	28,5	3,31E+06	1,21E+06	20,1
5000	2	-5000	2997	28,3	3,66E+06	1,34E+06	20,2
15000	2	-5010	3010	26,1	3,72E+06	1,49E+06	21,8
15000	2	-5000	2997	29,5	3,27E+06	1,26E+06	21,1
15000	2	-5000	2997	29,5	3,50E+06	1,36E+06	21,2
15000	2	-5000	2999	29,7	3,62E+06	1,40E+06	21,1
35000	2	-5002	2998	27,8	3,11E+06	1,24E+06	21,8
35000	2	-5001	2998	31,4	3,45E+06	1,31E+06	20,8
35000	2	-5000	2998	31,7	3,60E+06	1,36E+06	20,7
35000	2	-5000	2998	32,1	3,72E+06	1,41E+06	20,8
75000	2	-5000	2999	29,5	5,34E+06	2,16E+06	22,1
75000	2	-5000	2997	33,1	3,88E+06	1,44E+06	20,4
75000	2	-5000	2998	33,3	4,05E+06	1,48E+06	20,2
75000	2	-5000	2998	33,5	4,18E+06	1,53E+06	20,2

Z obr.5 je zřejmé, že při cyklování pryžového elementu dochází k jeho ohřátí a rovněž k nárůstu jeho tuhosti. Oba průběhy probíhají téměř paralelně. Svoji roli zde však

bude hrát rovněž velikost zatížení a dále frekvence kmitání. Lze očekávat, že při zvyšování zatížení a frekvence se bude zvyšovat teplota více než o pouhých 10°C, jak tomu bylo v případě sledovaného experimentu.

Na obr. 6 je uveden průběh ztrátového úhlu, který s počtem odkmitaných cyklů a tedy i s nárůstem teploty klesá. Špičky na obrázku jsou způsobeny krátkými přestávkami v kmitání, kdy se měřila velikost trvalé deformace kmitaného elementu.

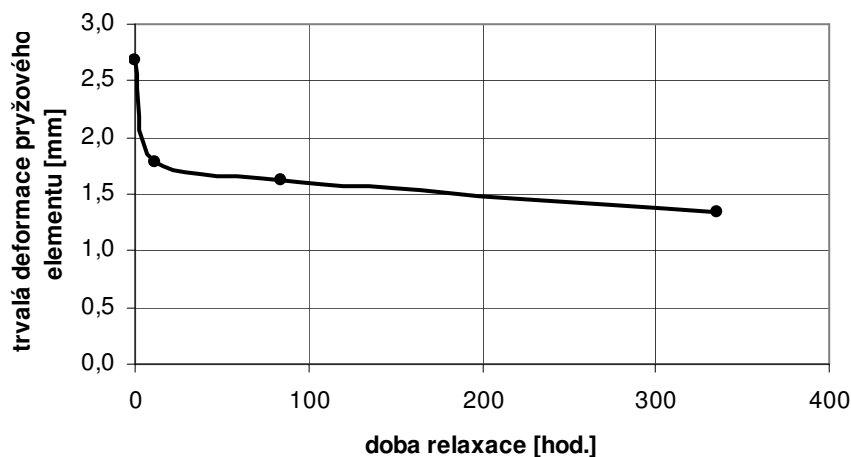
Na obr.7 jsou vykresleny hysterezní smyčky sejmuté po předepnutí pryžového elementu silou $F_m = -5$ kN a jeho cyklování při amplitudě síly $F_a = \pm 3$ kN a frekvenci $f = 2$ Hz. Smyčky č.1,2 a 3 jsou prakticky shodné. Odpovídají počtu odkmitaných cyklů 5000, 15000 a 35000. Smyčka č.4 odpovídá 75000 odkmitaných cyklů. Je užší a strmější, což svědčí o zvyšování tuhosti elementu s počtem cyklů.



Obr.7 Dynamická charakteristika pryžového elementu zatěžovaného silou $F_m = -5$ kN a $F_a = \pm 3$ kN, při frekvenci $f = 2$ Hz

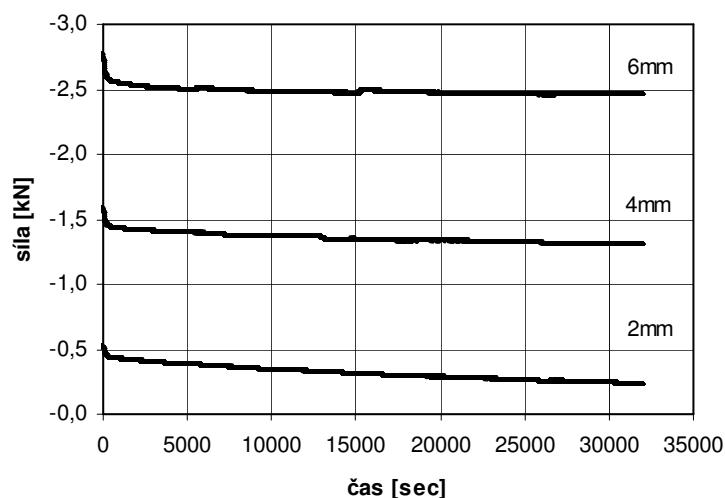
Z porovnání statických charakteristik na obr.2 a 3 a dynamické charakteristiky na obr.7 je zřejmé, že stejně velké síle při dynamickém kmitání odpovídá mnohem menší amplituda deformace než v případě statického zatěžování. Způsobuje to jednak statické předepnutí elementu, které zvyšuje jeho tuhost, frekvence kmitání (se zvyšující se frekvencí bude amplituda deformace klesat) a rovněž teplota elementu, která bude závislá na frekvenci kmitání.

Na obr.8 je uveden postup relaxace pryžového elementu. Jak bylo uvedeno v kap. 2.2, byly dynamické zkoušky ukončeny po docílení 10% trvalé deformace. Této deformace bylo při aplikovaných parametrech dosaženo po odkmitání 75000 cyklů. Hodnota trvalé deformace činila 2,69 mm (počáteční tloušťka pryžového elementu byla $h_0 = 26,35$ mm). Ze závislosti uvedené na obr.8 vyplývá, že po odlehčení pryže došlo v průběhu několika málo hodin k rychlé relaxaci trvalé deformace z hodnoty 2,69 mm na cca 1,75 mm. Další postup relaxace byl však již pomalý, řádově ve stovkách hodin. Z obrázku je vidět, že pokles trvalé deformace z hodnoty 1,75 mm na 1,35 mm již trval kolem 330 hodin.



Obr.8 Postup relaxace pryžového elementu po ukončení dynamických zkoušek

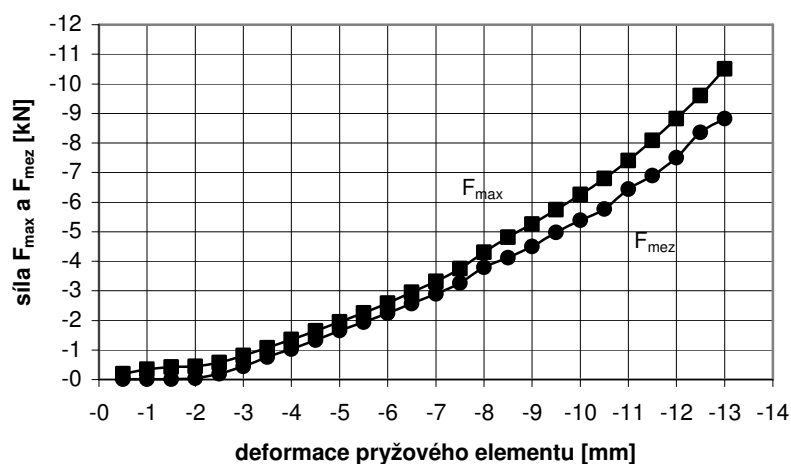
Výsledky zkoušky sledující stanovit velikost poklesu zatěžovací síly (a tím i napětí) v pryžovém elementu v závislosti na čase, jsou shrnuty v tab.2. Zkouška probíhala při řízené deformaci. Vzorek byl postupně stlačován v rozsahu 0,5 ÷ 13 mm. Na každém stupni byla tato deformace udržována konstantní po dobu 20 minut. V průběhu této doby byl sledován pokles síly z hodnoty $F_{max.}$ na $F_{mez.}$, při níž se pokles zastavil. Na obr.9 je průběh tohoto poklesu zobrazen pro deformace elementu 2; 4 a 6mm.



Obr.9 Pokles síly F v závislosti na čase při stlačení elementu o 2; 4 a 6mm

Z obr.9 je zřejmé, že při deformaci pryžového elementu dosáhne hodnota síly F svého maxima, které během řádově několika vteřin prudce klesá, načež následuje pozvolný pokles do hodnoty $F_{mez.}$, kdy se již dále nemění. Aplikovanou dobu 20 minut lze zhruba pokládat za dostačující.

Na obr.10 jsou zobrazeny pro aplikované deformace pryže průběhy maximálních a mezních hodnot odpovídajících sil, přičemž F_{max} jsou opět síly bezprostředně po zatížení a síly F_{mez} po 20 minutách zatížení elementu konstantní deformací. Z obrázku je zřejmé, že do 8 mm je průběh obou sil zhruba paralelní. Teprve při větších deformacích se rozdíl těchto sil začíná zvětšovat. Pokud při dané deformaci dosáhne síla uvedené hodnoty F_{mez} , neměla by již (případně napětí) v pryžovém elementu dále klesat, dokud pryž neodlehčíme.



Obr.10 Hodnoty maximální a mezní síly při zatěžování pryžového elementu konstantní deformací

V tab.2 jsou tyto hodnoty uvedeny pro deformace v celém sledovaném rozsahu. V posledním sloupci této tabulky je rozdíl uvedených dvou hodnot sil.

Tab.2 Hodnoty maximálních a mezních sil při stlačování pryžového elementu

Deformace pryž. elementu [mm]	Síla $F_{max.}$ [kN]	Síla $F_{mez.}$ [kN]	$F_{max.} - F_{mez}$ [kN]
-0,5	-0,200	-0,010	-0,190
-1	-0,350	-0,015	-0,335
-1,5	-0,428	-0,012	-0,416
-2	-0,518	-0,046	-0,472
-2,5	-0,570	-0,199	-0,371
-3	-0,810	-0,447	-0,363
-3,5	-1,070	-0,755	-0,315
-4	-1,589	-1,033	-0,556
-4,5	-1,647	-1,335	-0,312
-5	-1,947	-1,654	-0,293
-5,5	-2,258	-1,944	-0,314
-6	-2,770	-2,242	-0,528
-6,5	-2,950	-2,572	-0,378
-7	-3,318	-2,891	-0,421
-7,5	-3,750	-3,266	-0,484
-8	-4,300	-3,792	-0,508
-8,5	-4,810	-4,118	-0,692
-9	-5,260	-4,503	-0,757
-9,5	-5,750	-4,977	-0,773
-10	-6,250	-5,389	-0,861
-10,5	-6,800	-5,768	-1,032
-11	-7,400	-6,436	-0,964
-11,5	-8,090	-6,894	-1,196
-12	-8,821	-7,500	-1,321
-12,5	-9,600	-8,355	-1,245
-13	-10,500	-8,825	-1,675

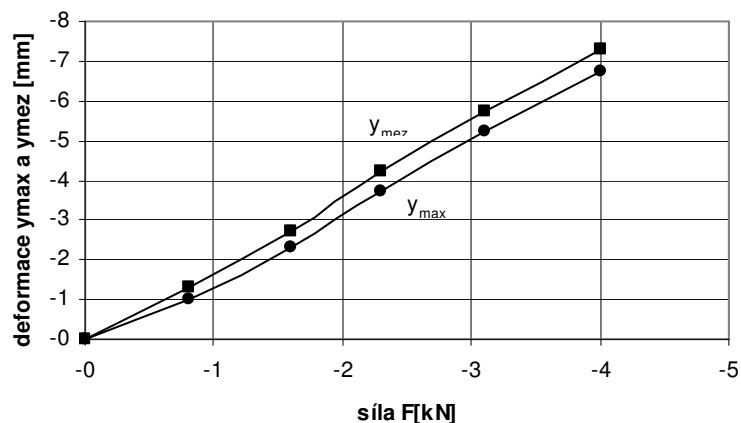
Zkouška popsaná v kap. 2.4 probíhala při řízené síle. Jednalo se o statickou zkoušku, při níž byla stupňovitě zvyšována síla F zatěžující pryžový element v rozsahu $0,8 \div 4$ kN. Při každém stupni zatížení se snímala po dobu 20 minut změna deformace. Výsledky této zkoušky jsou uvedeny v tab. 3.

V druhém sloupci tabulky jsou hodnoty y_{max} , které byly naměřeny bezprostředně po dosažení nastavené síly F , ve třetím sloupci jsou hodnoty y_{mez} , odpovídající konci 20 minutového časového intervalu. V posledním sloupci jsou rozdíly těchto hodnot. Z tab.3 vyplývá, že při konstantní síle narůstá deformace pryže s časem v řádu několika desetin milimetru. Čím je zatěžovací síla větší, tím větší je tento nárůst.

Tab.3 Hodnoty maximálních a mezních deformací při zatěžování pryžového elementu konstantní silou F

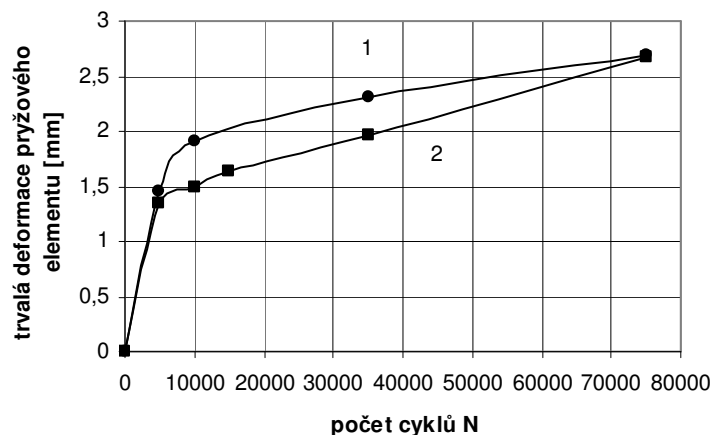
Síla F [kN]	Deformace y_{max} [mm]	Deformace y_{mez} [mm]	$y_{mez} - y_{max}$ [mm]
-0,8	-1	-1,31	-0,31
-1,6	-2,31	-2,73	-0,42
-2,3	-3,73	-4,21	-0,48
-3,1	-5,21	-5,74	-0,53
-4	-6,74	-7,3	-0,56

Na obr.11 jsou zobrazeny závislosti maximálních a mezních deformací na hodnotě síly zatěžující pryžový element. Oba průběhy jsou téměř paralelní, což nasvědčuje tomu, že je přírůstek deformace ve sledovaném silovém rozsahu prakticky stejný.



Obr.11 Hodnoty maximální a mezní deformace při zatěžování pryžového elementu konstantní silou

V kap. 2.5 jsme se zmínili o sledování závislosti trvalé deformace na počtu odkmitaných cyklů pro parametry zatížení $F_m = -8$ kN a $F_a = \pm 3$ kN, abychom mohli porovnat získanou závislost s průběhem na obr. 4, který byl získán pro velikost statické složky $F_m = -5$ kN. Cílem bylo zjistit, jak významně ovlivňuje úroveň tohoto statického předpětí velikost trvalé deformace. Porovnání obou případů je provedeno na obr.12.



Obr.12 Nárůst trvalé deformace s počtem odkmitaných cyklů
(1.... $F_m = -5$ kN; 2.... $F_m = -8$ kN)

Z obrázku je patrné, že ve střední části průběhu leží křivka 2 pod křivkou 1, což znamená, že vyšší úroveň statického předpětí vede při stejné dynamicky působící složce F_a k nižším hodnotám trvalé deformace. Jediné vysvětlení této na pohled nelogické skutečnosti je možné najít v tom, že vyšší statické předpětí způsobí větší stlačení pryže, čímž se zvýší její tuhost, takže stejně velká dynamická složka F_a kmitá při nižších amplitudách. Jestliže o hodnotě trvalé deformace rozhoduje úroveň dynamicky působící složky zatížení, mohli bychom po odlehčení pryžového elementu získat o trochu nižší hodnoty trvalé deformace.

4. Závěr

Zpráva shrnuje některé poznatky, které byly získány při experimentálním studiu vlastností termo – visko – elastického materiálu 42 – 809 používaného pro výrobu vibrotlumících prvků. Všechny experimenty byly prováděny na elementech vzniklých půlením segmentů používaných firmou Bonatrans pro tlumení vibrací u monoblokových kol tramvají. Docílené výsledky byly získány při statických a dynamických zkouškách, prováděných při jednoosém zatěžování se statickým předpětím. Tento výzkum slouží k získání materiálových charakteristik pryžových segmentů a jejich závislosti na úrovni a počtu zatěžovacích cyklů. Většina uvedených experimentů spojených se staticky působícím zatížením byla prováděna při normální teplotě kolem 23°C. U dynamicky zatěžovaných elementů přistupuje jako další parametr teplota, která ovlivňuje vlastnosti materiálu v průběhu zkoušky a významně ovlivňuje její výsledek. Proto se v další etapě budeme zabývat vlastnostmi tohoto materiálu při různých teplotách.

Poděkování

Práce byla podpořena Grantovou agenturou ČR grantovým projektem č. 101/05/2669 a výzkumným záměrem Ústavu termomechaniky AV ČR č. AV0Z 20760514.

7. Literatura

- [1] Dostál A., Fajkoš R. : Technické podmínky TPD 514.0 "Pryžové segmenty pro pryží odpružená tramvajová kola". Schváleno 30.4.2004.
- [2] Bergström J. S. : „Large strain time-dependent behavior of elastomeric materials“. Massachusetts institute of technology, June 1999.