

# URČENIE MODULU PRUŽNOSTI OSOBNÝCH PLÁŠŤOV PNEUMATÍK

Michal PASTOREK<sup>A</sup>, Jan KRMELA<sup>B</sup>, Karol KOVÁČ<sup>A</sup>

<sup>A</sup>Fakulta priemyselných technológií, Trenčianska univerzita A. Dubčeka, I. Krasku 491/30, 020 10 Púchov, SK, e mail: M.Pastorek@azet.sk

<sup>B</sup>Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, Studentská 95, 532 10 Pardubice, CZ, e-mail: jan2.krmela@post.cz jan.krmela@upce.cz

## Abstrakt

Príspevok je zameraný na experimentálne určenie modulu pružnosti v ťahu dvoch rôzne starých osobných plášťov pneumatík. Vzorky sa získali narezaním v horizontálnom a vertikálnom smere z bočníc plášťov 17 a 4 ročných pneumatík. Modul v ťahu bol určený pomocou dynamicko-mechanickej analýzy (DMA). Na meranie bolo použité zariadenie Pyris Diamond od firmy Perkin Elmer. Experimentálne výsledky boli vyhodnotené a následne porovnané. Z výsledkov na prvý pohľad vidno výrazný rozdiel medzi hodnotami vzoriek v horizontálnom smere medzi dvoma použitými pneumatikami a aj v priebehu závislosti modulu od teploty.

## Úvod

V súčasnosti sú pneumatiky jedným z najdôležitejších výrobkov na trhu z pohľadu bezpečnosti vo vzťahu automobil - vozovka. Preto je dôležité poznať ako ovplyvní ich mechanické vlastnosti a správanie automobilu na ceste degradácia spôsobená niekoľko ročným pravidelným používaním plášťov. Poznanie miery tejto degradácie a s ňou spojeného správanie je veľmi dôležité pri určení bezpečnosti používaných plášťov pneumatík.

Skúmané boli dve rôzne staré, ale rozmerovo stojné pneumatiky značky Matador o rozmere 165 R13, pričom vek prvej bol 17 rokov a druhej 4 roky. Práca je zameraná na experimentálne určenie modulu pružnosti v ťahu pre tieto dva rôzne staré osobné plašte pneumatík.

Hodnoty elastického modulu pružnosti označovaného ako  $E'$  boli namerané pomocou dynamicko mechanickej analýzy (DMA). Určené boli aj hodnoty stratového modulu  $E''$  a stratového uhla  $\tan \delta$ . Následne boli porovnané výsledky pre obidva plašte pneumatík.

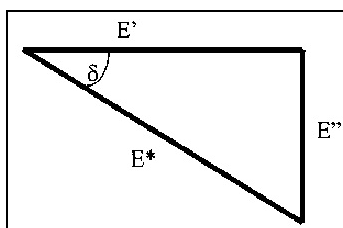
## Popis dynamicko mechanickej analýzy

Analýza DMA je jedna z najcitlivejších techník, ktorá je schopná charakterizovať a interpretovať mechanické chovanie materiálu obecné. Podstata metódy DMA je založená na sledovaní viskózne-elastickej odozvy materiálu podrobeného malému oscilačnému napätiu. Metóda rozdeľuje viskózne-elastickú odozvu materiálu na dve zložky modulu pružnosti v ťahu ( $E^*$ ):

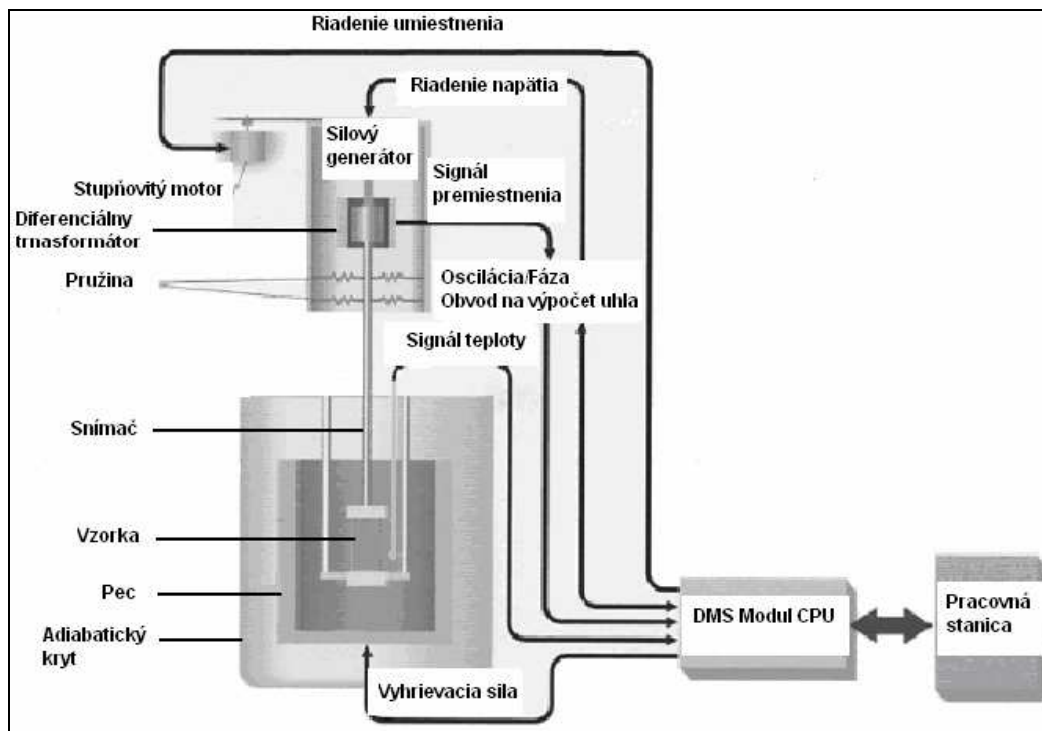
1. na reálnu časť, ktorá reprezentuje elastický modul ( $E'$ )
2. na imaginárnu časť, ktorá predstavuje útlmovú alebo viskóznou zložku ( $E''$ ).

Celkový komplexný modul je  $E^* = E' + iE''$  (obr. 1).

Toto separovanie meraní na dve zložky popisuje dva nezávislé procesy vo vnútri materiálu: elasticitu (vratná zložka) a viskozitu (stratová, disipačná energia). To je základný princíp DMA, ktorý ju charakterizuje od ostatných metód testovania mechanických vlastností látok [2].



**Obr. 1:** Vzťah medzi elastickým modulom, stratovým modulom a komplexným modulom [1]



**Obr. 2:** Schematické zobrazenie zariadenia DMA

Deformácia vzorky je spôsobená dvoma protichodnými momentmi rovnakej veľkosti, ktoré pôsobia na protiľahlé konce vzorky upnutej do svoriek (obr. 2).

Na matematické popísanie DMA sa využíva klasická diferenciálna rovnica pre vynútené kmity, ktorá je riešená pri určitých zjednodušených podmienok vyplývajúcich z konštrukcie prístroja a geometrie systému.

$$2J \left( \frac{d^2 \phi}{dt^2} \right) + D \frac{d\phi}{dt} + k^2 \phi = M(t) \quad (1)$$

kde  $J$  je moment zotrvačnosti ramena,  $\phi$  je uhol deformácie,  $D$  je koeficient útlmu,  $k^2$  je konštanta pružnosti,  $M(t)$  je moment.

Ide o vzťah medzi modulom elasticity  $E$  a rezonančnou frekvenciou  $f$ , pre vzorku pravouhlého prierezu  $b \cdot h$  a dĺžky  $d$ :

$$E = \frac{4\pi^2 f^2 J - k}{2h(d/2 - l_v)^2} \left( \frac{d}{b} \right)^3 \quad (2)$$

kde  $k$  je konštanta torznej pružiny a  $l_v$  je vzdialenosť konca vzorky od ramena. Z tohto vzťahu je jasná lineárna závislosť medzi modulom  $E$  a frekvenciou  $f$ . Preto sa často uvádzajú rezonančné spektrá ako závislosť frekvencie na teplote.

Na určenie priebehu modulu a stratového uhla  $\tan \delta$  je možné aplikovať dve rôzne metódy. Prvá metóda je priame určenie modulu z amplitúdy kladnej a zápornej polovlny sily a deformácie. Druhá metóda je založená na spracovaní pomocou Fourierovej transformácie a výsledkom je priebeh modulu a stratového uhla v závislosti na teplote alebo čase pre každú harmonickú zložku [2].

### Zložky modulu pružnosti

**Elastický modul ( $E'$ ):** charakterizuje elastické vlastnosti materiálu. Pokiaľ je materiál dokonale elastický môžeme považovať tento modul za komplexný modul pružnosti.

**Stratový modul ( $E''$ ):** charakterizuje viskózne vlastnosti materiálu a nazývame ho tiež viskóznym alebo imaginárnym modulom. Môže byť tiež vysvetľovaný ako energia prevedená na teplo v priebehu deformácie.

**Stratový uhol  $\tan \delta$ :** je uhol medzi elastickým a stratovým modulom a definujeme ho ako  $\tan \delta = E'' / E'$ . Pokiaľ je  $\tan \delta$  všeobecne vyšší, prevláda v materiáli neelastická (viskózna) zložka modulu, naopak čím je  $\tan \delta$  menší. Tým je materiál viac elastický. U čisto elastických materiálov je amplitúda napätia a deformácie vo fáze (teda nedochádza k žiadnemu posunu a uhol  $\delta = 0$ ), komplexný modul  $E^* = E'$ . U čisto viskózných materiálov (ako sú napríklad kvapaliny) je fázový uhol  $\delta = 90^\circ$  a komplexný modul  $E^*$  je potom rovný stratovému modulom  $E''$ .

### Prechodové teploty a ich identifikácia

**Teplota skelného prechodu ( $T_g$ ):** je teplota pri ktorej sa proces predlžovania chemickej väzby mení na molekulový pohyb veľkého rozsahu. Materiál prechádza zo sklovitého stavu do stavu kaučukovitého. Teplota skelného prechodu pomáha pri predpovedaní mechanických vlastností materiálu pri rôznych teplotách.

**Teplota topenia materiálu ( $T_m$ ):** je to teplota pri ktorej sú tepelné vibrácie dostatočne silné aby rozbili väzby v kryštalickej mriežke. Polymér musí mať semikryštalickú štruktúru aby mohol mať teplotu topenia materiálu.

#### Identifikácia prechodových teplôt

Po meraní konkrétnej vzorky pomocou DMA dostávame tri hlavné teplotné závislosti a to teplotnú závislosť elastického modulu ( $E'$ ), stratového modulu ( $E''$ ) a stratového uhla  $\tan \delta$ . Pri meraní viskoelastických polymérov môžeme pozorovať pri všetkých troch teplotných závislostiach výrazné zmeny. Pri tejto zmene prechádza materiál teplotou skelného prechodu, problém je ale z ktorej krivky je ho najlepšie vyhodnotiť, pretože zo všetkých troch kriviek dostaneme tri rôzne teploty. U elastického modulu ( $E'$ ) definuje odklon krivky od základnej línie teplotu, pri ktorej začína materiál strácať svoju pevnosť, čiže materiál už ďalej nie je schopný vydržať zaťaženie, bez toho aby sa neprejavila jeho deformácia. Maximum vrcholu stratového modulu ( $E''$ ) predstavuje teplotu, pri ktorej materiál podstupuje maximálnu zmenu v pohyblivosti polymérnych reťazcov. Toto najviac korešponduje s chemickou definíciou teploty skelného prechodu. Vrchol stratového uhla  $\tan \delta$  charakterizuje tlmiace vlastnosti materiálu a má okrem toho aj historický význam, pretože bol prvým meraným parametrom u metódy DMA. Z tohto dôvodu sa v odbornej literatúre najčastejšie vyskytuje vyhodnotenie  $T_g$  z maxima priebehu  $\tan \delta$  [3]. Preto je pri určovaní  $T_g$  z výsledkov DMA vždy dôležité uviesť postup, akým sa jeho hodnota stanovila. Amorfné polyméry majú vrchol stratového uhla výraznejší v porovnaní s polykryštalickými polymérmi, pretože ich štruktúra vykazuje menšiu usporiadanosť [4].

Meraním na DMA sa dajú u niektorých polymérnych materiálov zaznamenať okrem skelného prechodu aj ďalšie, menej výrazné tzv. sekundárne prechody. Tie sa označujú písmenami gréckej abecedy  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  a  $\delta$  smerom od vyšších teplôt k nižším. Podstatou týchto prechodov môžu byť interakcie a pohyby v štruktúre polyméru (napr. rotácia kryštalických častí nasledovaná posunom pozdĺž osy reťazca, torzné krútenie kryštalických častí štruktúry, pohyby lomov a pod.). Sekundárne prechody sa nemôžu pri vyhodnotení podceňovať, pretože môžu byť spojené s nahromadením tepla, vibráciami štruktúry polymérov a hlavne tiež so zmenou elektrických vlastností. Fyzikálna podstata sekundárnych prechodov sa môže medzi rozličnými materiálmi líšiť [5].

### Experiment a diskusia

Vzorky boli vyrezané z bočníc plášťov 17 a 4 ročných pneumatík Matador stejného rozmeru 165 R13 a to v horizontálnom a vertikálnom smere. Vzorky boli obdĺžnikového tvaru s výškou 40 mm, šírkou 9 mm a hrúbkou 3 mm (obr. 3).



**Obr. 3:** Názorná ukážka smerov rezu a tvaru vzoriek (vpravo)



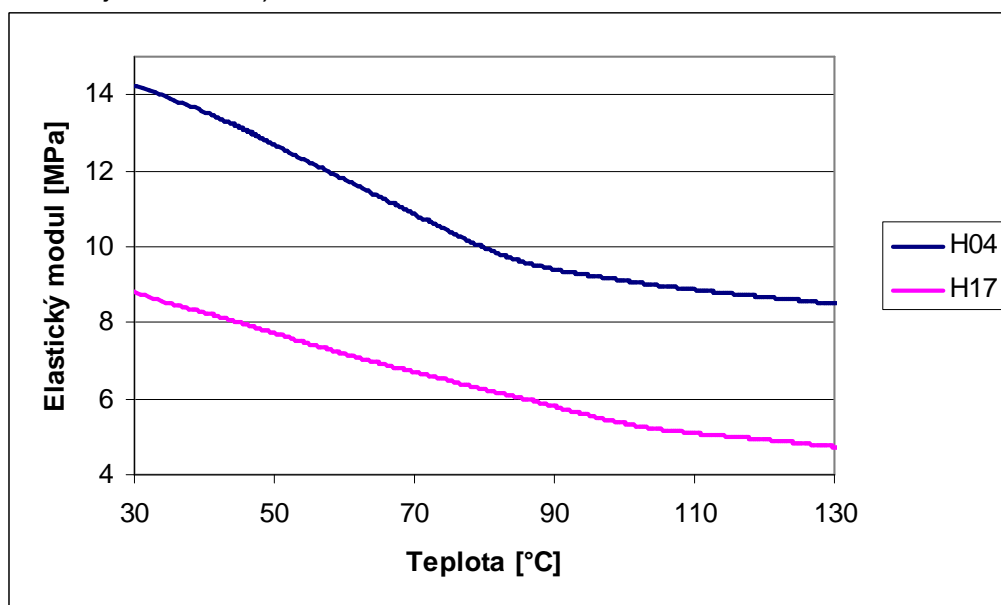
**Obr. 4:** Dynamický mechanický analyzátor (DMA) [6]

Na meranie bol použitý prístroj na dynamicko-mechanickú analýzu Pyris Diamond od firmy Perkin Elmer (obr. 4), ktorý je dostupný na Fakulte priemyselných technológií v Púchove. Najčastejšie sa v ňom používa hlava pre ťahové namáhanie vzorky. Je tiež k dispozícii meracia hlava, ktorá využíva trojbodový ohyb. Prístroj meria v teplotnom rozsahu od -150 až do 450 °C a pri dynamickom režime merania je možné aplikovať až 10 rôznych frekvencií naraz.

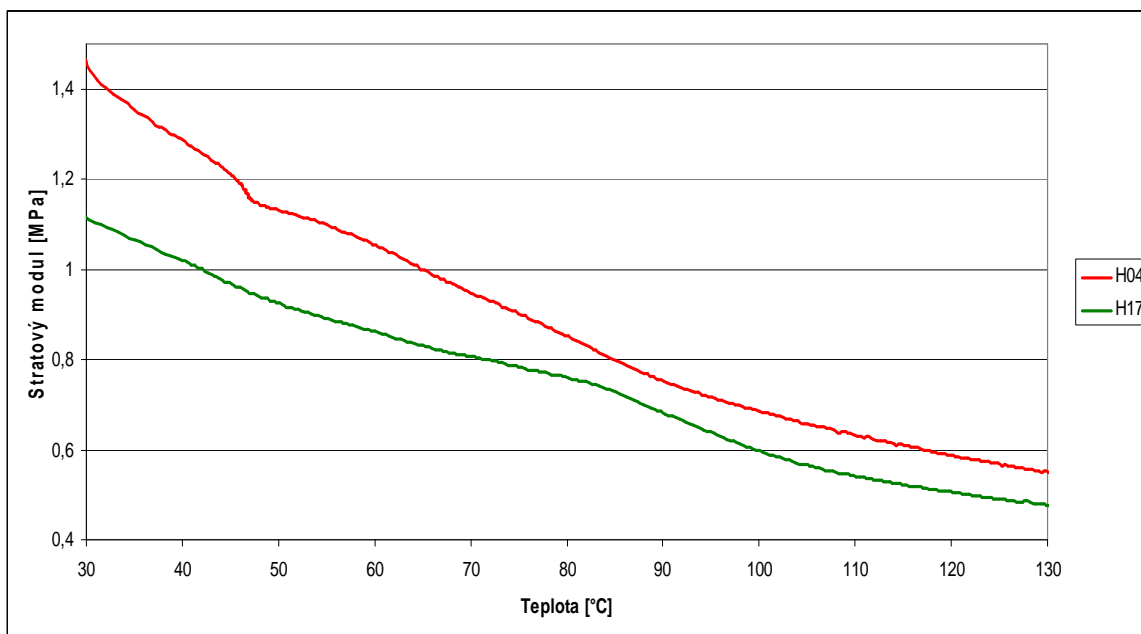
Meranie výrezov z plášťov prebiehalo v teplotnom rozsahu 30 až 130 °C pri frekvencii 1 Hz.

## Výsledky

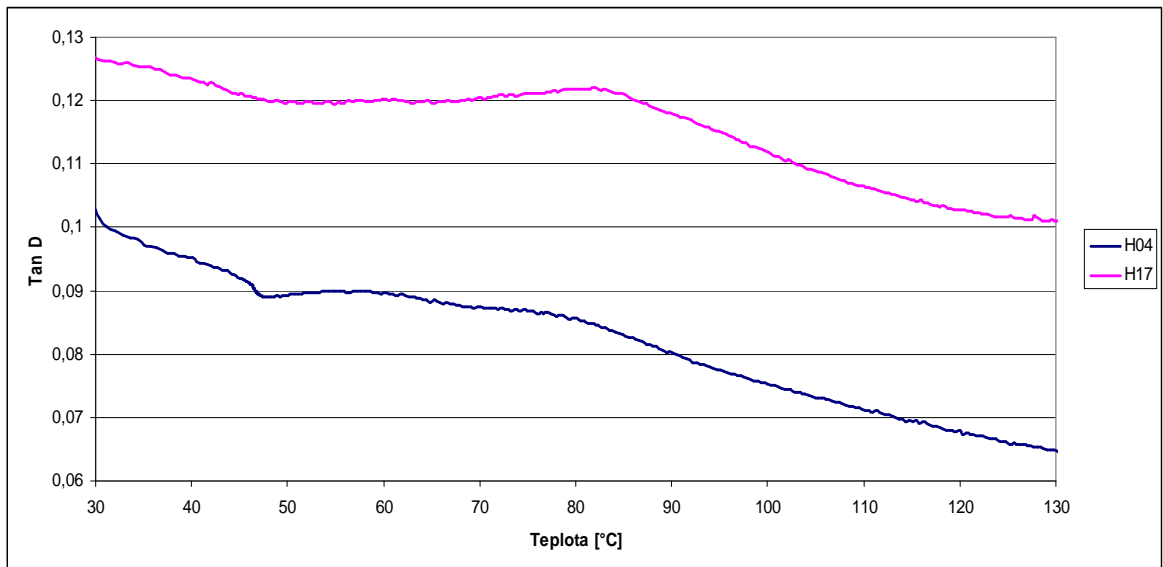
Výsledky prezentujú grafy obr. 5 až obr. 8 pre horizontálne vzorky (vzorka H04 je 4 ročná a H17 je 17 ročná).



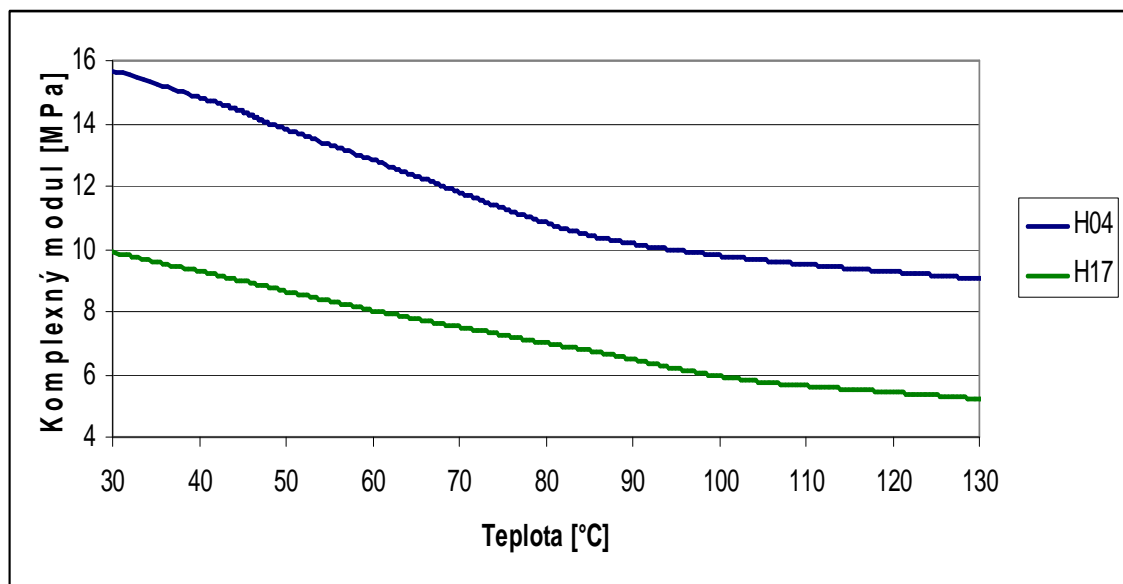
**Obr. 5:** Závislosť elastického modulu  $E'$  od teploty



**Obr. 6:** Závislosť stratového modulu  $E''$  od teploty



**Obr. 7:** Závislosť tan  $\delta$  od teploty



**Obr. 8:** Závislosť komplexného modulu  $E^*$  od teploty

Zo zobrazených grafov vyplýva, že v horizontálnom smere má 4 ročná pneumatika výrazne vyššie hodnoty elastického a stratového modulu ako 17 ročná pneumatika. Hodnoty tan  $\delta$  sú vyššie u 17 ročnej pneumatiky, z čoho vyplýva, že je podstatne menej elastická ako 4 ročná pneumatika.

V grafoch tan  $\delta$  je u 4 aj 17 ročných plášťov pneumatík pri 47 °C vidno výrazný skok, čo môže znamenať, že pri tejto teplote dochádza k štrukturálnym zmenám a pri tejto teplote môže dochádzať k sekundárnemu skelnému prechodu.

Podobné výsledky boli získané aj u vzoriek vo vertikálnom smere.

## Záver

Pomocou metódy DMA bol stanovený elastický modul pružnosti v ťahu  $E'$ , stratový modul pružnosti  $E''$ , stratový uhol  $\tan \delta$  a komplexný modul pružnosti pre vzorky vyrezané v horizontálnom smere bočnice rôzne starých plášťov pneumatík.

Z výsledkov vyplýva, že bočnica 4 ročného plášťa pneumatiky má výrazne vyššie hodnoty modulov pružnosti v horizontálnom smere v porovnaní so 17 ročným plášťom pneumatiky.

17 ročná pneumatika je na základe hodnôt  $\tan \delta$  podstatne menej elastická ako 4 ročná. Elastomerové časti bočnice 17 ročného plášťa pneumatiky sú výrazne zdegradované, čo vidno z hodnôt modulov pružnosti v ťahu pre vzorky rezané v horizontálnom smere.

Z hodnôt  $\tan \delta$  je vidno, že pri teplote 47 °C dochádza pravdepodobne k sekundárnemu skelnému prechodu.

## LITERATÚRA

- [1] K.P. Menard; "Dynamic Mechanical Analysis: A Practical Introduction to Techniques and Applications", CRC Press, Boca Raton (1999)
- [2] <http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/prednaska1.pdf>. [online]. [cit. 2012-20-10]
- [3] J. Foreman, S.R. Sauerbrunn, C.L. Marcozzi, Exploring the Sensitivity of Thermal Analysis Techniques to the Glass Transition. TA Instruments: Applications Library Search [online]. 2006 [cit. 2012-20-10]. Dostupný na: [http://tainstruments.com/main.aspx?n=2&id=181&main\\_id=348&siteid=11](http://tainstruments.com/main.aspx?n=2&id=181&main_id=348&siteid=11)
- [4] V.S. Ramachandran, et al., Handbook of thermal analysis of construction materials. Norwich, New York, U.S.A.: William Andrew Publishing, c2002. 680 s.
- [5] E. Laredo, N. Suarez, A. Bello, L. Marquez, The Glass Transition in Linear Low Density Polyethylene Determined by Thermally Stimulated Depolarization Currents, Journal of Polymer Science: Part B Polymer Physics, Vol. 34, s. 641-648 (1996)
- [6] <http://issp.ac.cn/UploadFile/20066510335420.bmp>. [online]. [cit. 2012-20-10]