

Stárnutí pryžových vrstev dopravních pásů

RNDr. Helena Valentová, Ph.D.¹, doc. RNDr. Jan Nedbal, CSc.¹, RNDr. Milan Neubert²

¹Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta, Katedra makromolekulární fyziky, helena.valentova@mff.cuni.cz

²VVV MOST spol. s r.o., Most, neubert@vvvmost.cz

Přijato: 5. 8. 2010, recenzováno: 8. 11. a 10. 11. 2010

Abstrakt

Cílem práce je posoudit možnost použití dynamické mechanické spektroskopie pro určení životnosti krycích pryžových vrstev dopravních pásů. Dopravní pásy mění během provozu své fyzikální vlastnosti, zejména působením vzdušného kyslíku, ultrafialového záření a změnami vnější teploty. Mění se hlavně síťová hustota, teplota skelného přechodu, rovnovážný modul v kaučukovité oblasti a stupeň protažení krycí vrstvy při přetržení. Mechanická měření složek komplexního Youngova modulu probíhala v teplotním rozsahu od teplot odpovídajících skelnému stavu pryžových krycích vrstev až hluboko do kaučukovité oblasti. Měření se uskutečnila jak na nových pásech, dodaných výrobcem, skladovaných v různých podmínkách, tak i na provozně využívaných vzorcích dopravních pásů. Nové vzorky byly navíc měřeny i po stárnutí za zvýšené teploty v laboratorních podmínkách. Výsledky měření byly navzájem porovnány. Ukázalo se, že metoda bude, po vytvoření široké databáze mechanických vlastností dopravních pásů používaných v pásové dopravě, vhodnou pro sledování jejich opotřebení a tím i životnosti.

Conveyor belt rubber layers aging

The objective of the paper is to assess possible use of the dynamic mechanical spectroscopy for determination and prediction of life time of conveyor belt rubber layers. During long-lasting operation, conveyor belt rubber layers undergo changes of their physical properties, especially changes of network (crosslink) density, glass transition temperature, equilibrium modulus, and elongation-to-break. These changes, called aging, originate in air oxygen activity, UV radiation, and temperature fluctuations. Mechanical measurements of real and imaginary part of complex Young's modulus proceeded in the temperature region from temperatures corresponding to the glassy state of belts (low temperatures) up to the rubbery region (high temperatures). To characterize the air aging of rubbers, we have collected samples of belts having been used for different periods of time as well as samples of new belts. Aging of new belt samples in an oven was studied for different times and temperatures. The results of measurements were compared with each other. It was shown that the used method will be, after having built a broad data basis of mechanical properties of conveyor belts used in the belt industry, useful tool for monitoring their life time.

Alterungsprozess von Gummischichten der Gurtbandförderer

Das Ziel der Arbeit ist, die Möglichkeit der Nutzung von mechanischer Spektroskopie für Bestimmung der Lebensdauer von Gummischichten der Förderbänder zu beurteilen. Die Förderbänder ändern während des Betriebes ihre physikalischen Eigenschaften, besonders infolge der Wirkung des Luftsauerstoffes, der UV-Strahlung und durch Änderungen der Außentemperatur. Es ändern sich besonders der Vernetzungsgrad, Glasübergangstemperatur, das Gleichgewichtsmodul im plastischen Bereich und der Reckungsgrad der Deckschicht bei der Zerreißen. Die mechanischen Messungen der Bestandteile des komplexen Young-Modules erfolgten im Temperaturbereich ab den dem glasigen Zustand der Gummideckschichten entsprechenden Temperaturen bis tief in plastischen Bereich. Die Messungen wurden sowohl auf neuen Förderbändern, die vom Hersteller geliefert und unter verschiedenen Bedingungen gelagert wurden, als auch auf betrieblich genutzten Förderbandproben aufgeführt. Die neuen Förderbandproben wurden darüber hinaus auch nach der Alterung unter erhöhte Temperatur in Laborbedingungen gemessen. Die Messungsergebnisse wurden gegenseitig verglichen. Es zeigte sich, dass die Methode, nachdem eine breite Datenbank der mechanischen Eigenschaften von Förderbändern, die im Bandbetrieb genutzt werden, geschaffen wird, für die Verfolgung deren Verschleißes und damit auch der Lebensdauer geeignet wird.

Klíčová slova: dopravní pásy, stárnutí pryže.

Keywords: conveyor belts, rubber aging.

1 Úvod

Při povrchové těžbě hnědého uhlí se pro jeho přepravu používají téměř výhradně pásové dopravníky. Hlavním důvodem pro jejich využití se na jedné straně jeví poměrně snadná možnost připojení dopravníků k těžebním strojům, kdy je k páteřní, stacionární dálkové pásové dopravě vytěžený materiál přiváděn relativně krátkými, podle okamžité potřeby snadno přemístitelnými dopravníky. Na druhé straně se při tomto způsobu přepravy příznivě uplatňuje značná přepravní kapacita pásové dopravy, spojená s kontinuálními možnostmi přepravy, za relativně příznivých ekonomických podmínek.

Z hlediska fyzikálního principu představuje problematika pásové dopravy relativně jednoduchý problém. Je totiž založena na existenci tření mezi hnacími bubny dopravníku a dopravním pásem (DP), na kterém se vytěžený materiál přepravuje. Z praktického hlediska však problematika pásové dopravy představuje složitý technologicko-ekonomický a konstrukčně náročný celek, ve kterém musí být jednotlivé části systému navzájem provázány tak, aby tvořily jednotný funkční celek. Jednou z důležitých součástí dopravníků jsou pryžové krycí vrstvy DP. Ty jsou vyrobeny z pryžových vulkanizovaných směsí, které jsou navíc vyztuženy buď ocelolanovými kordy nebo vhodnými textilními vložkami, aby se dosáhlo požado-

vaných mechanických parametrů DP. Fyzikální vlastnosti pryžových směsí se navzájem liší podle způsobu jejich použití (hořlavost, teplota přepravovaného materiálu, resp. teplota okolí atd.). Pryžové vrstvy používané pro DP se připravují vulkanizací kaučukových směsí. Jejich optimální složení je dáno provozními požadavky. Kaučuková směs musí vedle základní složky – většinou směsí přírodního a syntetického kaučuku – obsahovat vulkanizační činidlo (nejčastěji síru), urychlovač a aktivátor vulkanizace, ochranné látky proti stárnutí (antioxidanty), plniva a změkčovadla [4]. Co však mají všechny typy DP společné, je jejich tendence k stárnutí, ke kterému dochází během jejich dlouhodobého používání. Stárnutím pryžových vrstev DP rozumíme změny jejich fyzikálních vlastností, zejména změny síťové hustoty, změny teploty skelného přechodu (viz dále), změny rovnovážného modulu v kaučukovité oblasti a změny stupně protažení kaučuku při přetržení. Tyto změny jsou způsobeny působením vzdušného kyslíku, ultrafialovým zářením a změnami teploty, ke kterým dochází během provozu DP. Působením uvedených vnějších vlivů se během stárnutí zvyšuje síťová hustota, teplota skelného přechodu a hodnota rovnovážného modulu, zatímco velikost protažení při přetržení klesá.

Studium změn fyzikálních vlastností během stárnutí DP jsme prováděli se záměrem odhadnout (předpovědět) z velikosti a dynamiky těchto změn celkovou životnost provozovaných DP. Soustředili jsme se zejména na sledování změn probíhajících během provozu DP působením vzdušného kyslíku a změnami okolní teploty. Chování vzorků DP odebraných z provozu jsme porovnávali se změnami fyzikálních vlastností pryžových vrstev stárnoucích různou dobu při zvýšených teplotách do 100 °C v laboratorních podmínkách (peci).

Jak již bylo řečeno, jednou z nejdůležitějších fyzikálních veličin je teplota zesklenní T_g pryžové krycí vrstvy DP, protože zatímco nad teplotou T_g je polymer v kaučukovitém stavu, tedy pružný a ohebný, při teplotách nižších než T_g se stává tvrdý, neohebný a křehký. Při teplotě zesklenní se mění řada fyzikálních vlastností, zejména hodnota koeficientu objemové roztažnosti použitého polymeru nebo jeho tepelná kapacita či hodnota rovnovážného mechanického modulu [1, 2]. Při teplotách nižších, než je teplota zesklenní, se polymer chová jako křehká tuhá látka s vysokou hodnotou modulu E (řádově 10^9 Pa). Při zvyšování teploty nad T_g se polymer dostává do přechodové oblasti, v níž modul výrazně klesá, materiál se stává elastickým a při dalším zvyšování teploty se hodnota

Tab. 1: Přehled měřených vzorků

Vzorek	Typ	Kostra	Krycí vrstva	Pozn.
1	P 630/3	polyamide	AA	
2	P 315/2	polyamide	B AA	
3	EP 500/3	polyester	Z AA	
4	EP 500/3	polyester	Z AA	
5	EP 400/3	polyester	Z AA	
6a	EP 400/3	polyester	AA	stárnutí na slunci
6b	EP 400/3	polyester	AA	
7	neznámý			stárnutí v provozu
8	EP 400/3	polyester	GT	stárnutí v provozu

Tab. 2: Značení typů krycích vrstev s ohledem na jejich použití

Krycí vrstva	Vhodné pro dopravu materiálu
A	abrazivního s velkou kusovitostí
AA	velmi abrazivního, zrnitého a sypkého
B	mírně abrazivního s malou kusovitostí
Z	sypkého, mírně abrazivního
GT	olejového a mastného, doporučené pro teploty -20 °C až 120 °C

modulu ustálí na hodnotě odpovídající kaučukovitému plátu ($E \approx 10^6$ Pa) [3]. Se shora uvedeného je zřejmé, že rozsah teplot, ve kterých mohou DP pracovat, je určen právě teplotou zesklenní, neboť v oblasti nízkých teplot je jejich použitelnost omezena zvýšenou tuhostí DP způsobenou přechodem krycí vrstvy do skelného stavu.

Z termodynamického hlediska je skelný stav fázovým přechodem druhého druhu a je tudíž stavem nerovnovážným. Mechanické, termodynamické i další fyzikální vlastnosti se totiž mění i po zesklenní polymeru, tj. při teplotách nižších než je teplota zesklenní T_g , avšak daleko pomaleji.

Primárně je oblast skelného přechodu určena chemickou strukturou polymerního řetězce a u polymerních sítí síťovou hustotou. Zvýšení síťové hustoty způsobuje zvýšení hodnoty T_g .

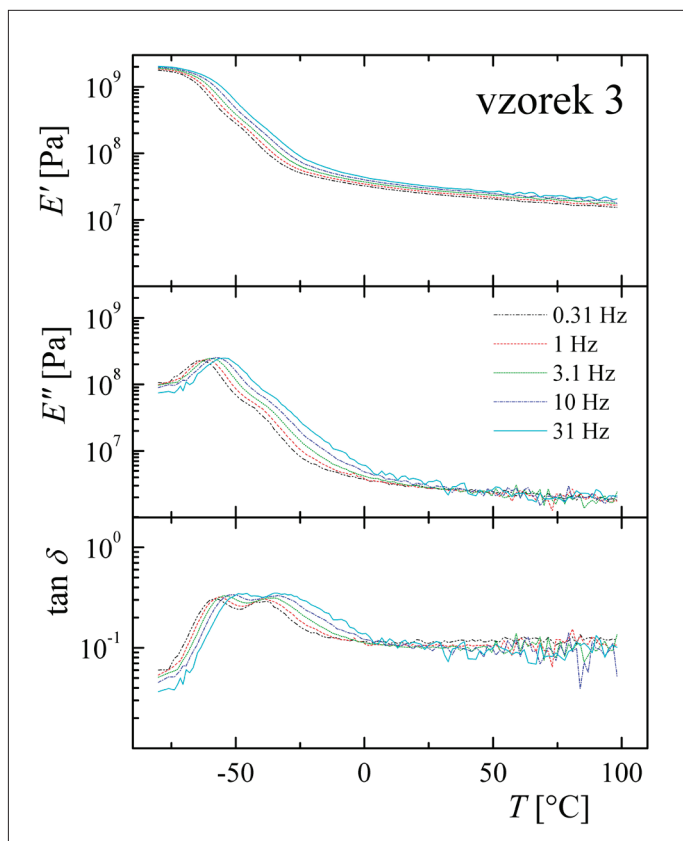
Teplotu zesklenní T_g měřených DP jsme určovali z mechanických dynamických měření měřením teplotní závislosti složek komplexního Youngova modulu jako teplotu, při níž ztrátová tangenta měřená při 1 Hz dosahuje maxima [5]. Použití této metody je výhodné, protože výsledky těchto dynamických měření nám umožňují stanovit i další veličiny, jako je hodnota modulu ve skelném stavu, šířka přechodové oblasti, resp. hodnota modulu v oblasti kaučukovitého plátů.

2 Měření materiálů

V předkládané práci jsou shrnuty výsledky měření vlastností celkem osmi vzorků dopravních pásů (viz tabulka č. 1) s různými typy textilní kostry a krycích vrstev (značení krycích vrstev je uvedeno v tabulce č. 2). Šest z nich byly nové pásy, které neprošly dosud žádným namáháním. Jeden z těchto pásů (vzorek 6) byl skladován delší dobu na slunci a byly prováděny testy jak části vystavené slunci (6a), tak části pásu, která byla před sluncem během skladování chráněna (6b). Vzorky č. 7 a 8 byly odebrány z DP, které byly provozně využívány. Studované vzorky dopravních pásů byly měřeny ve stavu, v jakém byly dodány, tj. nové nebo po předchozím stárnutí v provozu. U vzorků, které neprošly provozním zatížením, bylo provedeno jejich laboratorní stárnutí za zvýšené teploty. Materiál byl vystaven po dobu 20 dnů teplotě 80 °C. Výrobce dopravních pásů byl MATADOR Púchov.

3 Metody měření - dynamická mechanická analýza

Studium vzorků DP bylo zaměřeno na určení jejich mechanických vlastností a parametrů z výsledků měření dynamického mechanického chování.



Obr. 1: Teplotní závislost reálné E' a ztrátové E'' složky Youngova modulu a ztrátové tangenty pro vzorek 3

K měření teplotní závislosti komplexního Youngova modulu

$$E^* = E' + iE''$$

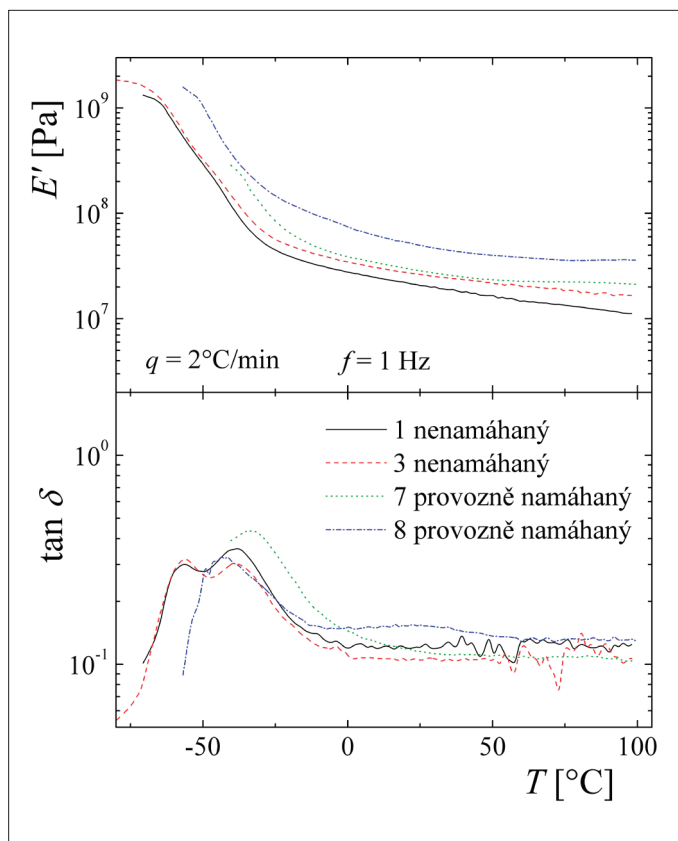
byl použit dynamický mechanický analyzátor Tritec 2000, který umožňuje měření složek komplexního Youngova modulu při několika frekvencích během jednoho teplotního cyklu. Vzorky byly měřeny během ohřevu s konstantní rychlostí změny teploty $2^\circ\text{C}/\text{min}$ v intervalu teplot od -80°C do 100°C , při frekvencích 0,31 Hz, 1 Hz, 3,1 Hz, 10 Hz a 31 Hz. Měření vzorek byl deformován v ohybu, deformace vzorku v průběhu měření nepřesáhla 1 %. Dynamická mechanická měření byla prováděna na krycích vrstvách (vnější i vnitřní) a na celém pásu, tedy na vzorku zahrnujícím obě krycí vrstvy i kostru. Ze složek komplexního modulu byla vypočtena ztrátová tangenta

$$\tan \delta = E'' / E'$$

která charakterizuje ztráty ve vzorku a dosahuje maxima v oblasti skelného přechodu.

4 Výsledky měření mechanických vlastností

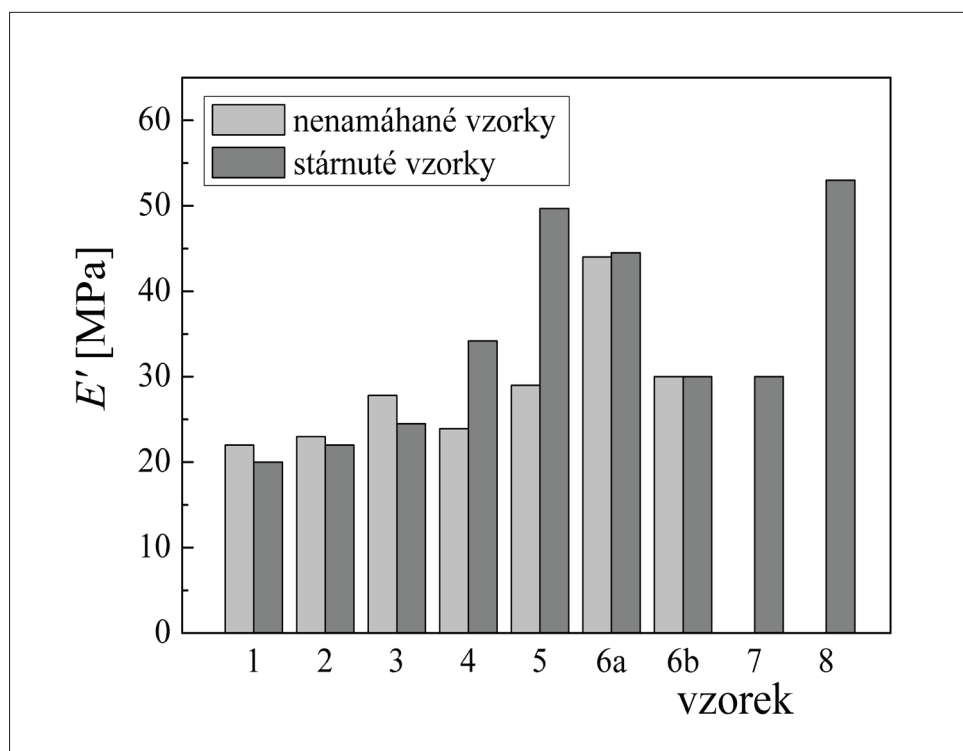
Příklad mechanických měření je uveden na obrázku č. 1, kde jsou znázorněny teplotní závislosti reálné a imaginární části Youngova modulu a teplotní závislost ztrátové tangenty pro nový, dosud provozně nenamáhaný vzorek č. 3. Z obrázku je vidět, že pryžová krycí vrstva tohoto vzorku má heterogenní charakter se dvěma oddělenými teplotami skelného přechodu $\approx -60^\circ\text{C}$ a $\approx -30^\circ\text{C}$, odpovídající složení použité směsi [5]. Heterogenní charakter přechodu zároveň způsobuje jeho roz-



Obr. 2: Srovnání teplotní závislosti reálné E' složky Youngova modulu a ztrátové tangenty pro vzorek nenamáhaných a provozně namáhaných dopravních pásů

šíření. Šířka přechodu je u tohoto vzorku cca 60°C . Z obrázku je dále zřejmý dynamický charakter skelného přechodu, který se projevuje změnou teploty maxima ztrátové tangenty se změnou budící frekvence. Změna budící frekvence o dva řády z 0,31 Hz na 31 Hz způsobí posun polohy maxima ztrátové tangenty o 12°C k vyšším teplotám. Z uvedených závislostí můžeme dále určit rozsah použitelnosti daného DP. Jak je vidět z obrázku č. 1, je tento pás použitelný při teplotách vyšších než 0°C . Při snížení teploty pod uvedenou hranici se již krycí vrstva DP dostává do přechodové oblasti, kdy dochází k výraznému zvýšení jak reálné, tak i imaginární části Youngova modulu, což vede ke snížení elasticity a zvýšení tepelných ztrát v pryžové krycí vrstvě.

Podobně na obrázku č. 2 je porovnávána teplotní závislost reálné části Youngova modulu a ztrátové tangenty pro vzorky 1, 3, 7 a 8, naměřené při budící frekvenci 1 Hz, s rychlostí ohřevu $2^\circ\text{C}/\text{min}$. Heterogenní charakter hlavního přechodu je viditelný pro vzorky 1 a 3. U provozně namáhaného vzorku 7 byl naměřen pouze přechod u teploty $T_g \approx -30^\circ\text{C}$, protože měření bylo u tohoto vzorku provedeno až od -40°C . Vzorek č. 8 je opatřen krycí pryžovou vrstvou typu GT, která je určena pro přepravu olejových a mastných materiálů. Doporučený teplotní rozsah DP s touto krycí vrstvou je -20°C až $+120^\circ\text{C}$. Tomu zřejmě odpovídá i složení použité směsi, kdy teplota T_g je u tohoto vzorku -45°C a tím je oblast použitelnosti pásu posunuta k teplotám nižším o 20°C ve srovnání s DP typu AA, BAA, resp. ZAA. Vzhledem k tomu, že směs GT je určena pro přepravu olejových a mastných materiálů, odpovídá tomuto požadavku i mechanické chování krycí pryžové vrstvy v oblasti



Obr. 3: Reálná část Youngova modulu pružnosti stanovená při frekvenci 1 Hz a teplotě 20 °C

kaučukovitěho plató. Jak je z obrázku č. 2 zřejmé, je hodnota reálné části Youngova modulu a ztrátové tangenty v oblasti teplot od -20 °C až do +30 °C vyšší v porovnání s hodnotami odpovídajícími krycím vrstvám AA, BAA a ZAA.

Mechanické vlastnosti všech měřených vzorků DP jsou přehledně shrnuty ve sloupcovém grafu na obrázku č. 3. Je zde uvedena hodnota reálné části Youngova modulu stanovená při frekvenci budicího pole 1 Hz a teplotě 20 °C. Vidíme z něj, že hodnoty rovnovážného modulu jsou poněkud nižší pro vzorky obsahující polyamidová vlákna než pro vzorky s vlákny polyesterovými. Dále je z obrázku zřejmé, že zatímco u nových vzorků 3, 4 a 5 nevidíme prakticky žádný rozdíl v hodnotě reálného modulu, stárnutí v peci se projevilo zvýšením modulu vzorků 4 a 5 (u vzorku 5 došlo ke změně z 29 na 50 MPa). Vzorek č. 6a skladovaný na slunci vykazuje zvýšenou hodnotu modulu (45 MPa) ve srovnání se vzorkem 6b, u něhož byla naměřena hodnota 30 MPa. To znamená, že tato část DP výrazně změnila své mechanické vlastnosti – zestárla – již během skladování. To je zřejmě také důvod, proč se vliv stárnutí v peci za zvýšené teploty u tohoto vzorku neprojevil. Zvýšení rovnovážného modulu způsobené stárnutím vzorků za provozu se nejvýrazněji projevilo u vzorku 8, u kterého byla naměřena hodnota modulu 53 MPa.

5 Závěr

Naše měření ukázala, že metoda měření dynamických mechanických vlastností vzorků DP v širokém teplotním oboru je dobrým nástrojem pro stanovení jejich opotřebení a tím i životnosti. Metoda totiž umožňuje sledovat nejen změny teploty skelného přechodu a šířku přechodové oblasti během stárnutí, ale i změny hodnot rovnovážného modulu v kaučukovitěm plató. Pro systematické vyhodnocení těchto změn, ke kterým

během provozu dochází, je zapotřebí vytvořit širokou databázi mechanického chování nových vzorků používaných v pásové dopravě, aby změny, způsobené provozním stárnutím, mohly být s touto databází porovnány.

Poděkování

Tento projekt byl realizován za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu (FR-TI1/583).

Literatura

- [1] McCrum N.G., Read B.E., Williams G.: *Anelastic and Dielectric Effects in Polymeric Solids*. London: Dover Publications, 617 s., 1991. ISBN 0-486-66752-9.
- [2] Donth E.J.: *The Glass Transition*. Berlin: Springer, 420 s., 2001. ISBN 3-642-07519-3.
- [3] Ferry J.D.: *Viscoelastic Properties of Polymers*. New York: J. Wiley & Sons, 641 s., 1980. ISBN 0-471-04894.
- [4] Franta I. a kol.: *Gumárenská technologie: zpracování kaučukových směsí a vlastnosti pryže*. Praha: SNTL, 536 s., 1969.
- [5] Bakule R., Havránek A.: *Měření fyzikálních vlastností pryžových materiálů pro dopravní pásy při nízkých teplotách II.*, Výzkumná zpráva, Praha: MFF UK, 1988.