## УДК 539.3; 678.073

## С.В. ШИЛЬКО, канд. техн. наук, доц.

заведующий лабораторией «Механика композитов и биополимеров»<sup>1</sup> E-mail: shilko\_mpri@mail.ru

## Д.А. ЧЕРНОУС, канд. техн. наук, доц.

ведущий научный сотрудник лаборатории «Механика композитов и биополимеров»<sup>1</sup> доцент кафедры «Техническая физика и теоретическая механика»<sup>2</sup> E-mail: charnavus74@gmail.com

## А.В. ХОТЬКО

начальник отдела расчетных исследований механики шин управления проектирования и конструирования шин инженерно-технического центра<sup>3</sup> E-mail: hotkoav2017@gmail.com

## А.П. САЗАНКОВ

младший научный сотрудник лаборатории «Механика композитов и биополимеров»<sup>1</sup> E-mail: alex.saz.job@gmail.com

## С.Н. БУХАРОВ, канд. техн. наук

заведующий сектором «Виброакустика материалов и узлов трения машин»<sup>1</sup> E-mail: sbuharov@mpri.org.by

<sup>1</sup>Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь <sup>2</sup>Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

<sup>3</sup>ОАО «Белшина», г. Бобруйск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 28.10.2021.

# РАСЧЕТ ВЯЗКОУПРУГИХ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШИННЫХ РЕЗИН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Для прогнозирования гистерезисных потерь при качении автомобильных шин исследованы вязкоупругие и термомеханические свойства шинных резин. Температурные зависимости модуля упругости и тангенса механических потерь, полученные методами динамического механического анализа и комбинированных испытаний в режиме квазистатического циклического растяжения с последующей релаксацией, использованы для расчетного определения деформационных и диссипативных параметров 20 составов резин. В качестве базового теоретического описания резины как термореологически простого материала использована линейная вязкоупругая модель Прони, для идентификации которой привлекается температурно-временная аналогия Willams-Landel-Ferry (WLF). Достоинством используемого расчетно-экспериментального подхода является возможность определения параметров уравнения WLF независимо от значений других характеристик материала. Для описания больших упругих деформаций изучаемого эластомера использована достаточно простая потенциальная функция Муни-Ривлина для несжимаемого материала. Релаксационная кривая, полученная посредством квазистатических испытаний, использована для оценки адекватности построенной механико-математической модели. В частности, сопоставление экспериментальной кривой релаксации с результатами расчетов для протекторной резины показало расхождение, не превышающее 15 %. Выполненный анализ вязкоупругих и термомеханических параметров шинных резин охватывает (а по частотам значительно превышает) спектр эксплуатационных температур и нагрузок автомобильных шин. Полученные результаты могут быть использованы при расчетной оптимизации состава материалов и конструкции автомобильных шин по критерию сопротивления качению и минимизации теплообразования в шине в процессе движения.

Ключевые слова: шинные резины, вязкоупругость, релаксация, температура, частота деформирования, метод динамического механического анализа

DOI: https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-2-59-24-30

Введение. Автомобильная шина является сложным и высоконагруженным композитным изделием, состоящим из адгезионно соединенных деталей (протектора, подканавочного слоя, боковины, брекера, бортовой ленты, наполнительного шнура), каждая из которых выполняет определенную функцию [1-3]. Эти функции реализуются при использовании резин (резиновых смесей), обладающих высокой эластичностью, адгезионной и демпфирующей способностью, прочностью и износостойкостью. Повышение конкурентоспособности указанных изделий основано на оптимизации состава резиновых смесей и армирующего корда, технологии изготовления и конструкции шин, что предполагает их проектировочные и поверочные расчеты с использованием данных о вязкоупругих и термомеханических свойствах шинных резин [4]. К примеру, определение гистерезисных потерь в резинах позволяет оптимизировать сопротивление качению автомобильных шин и снизить теплообразование в шине в процессе движения.

На упруго-диссипативные параметры рассматриваемых эластомерных материалов существенное влияние оказывают температура и нагрузочно-скоростные условия эксплуатации. Следовательно, для прогнозирования технических характеристик разрабатываемых автомобильных шин следует получить экспериментальные зависимости упруго-диссипативных параметров (прежде всего, модуля упругости и тангенса механических потерь) шинных резин от температуры и частоты деформирования. Однако применение стандартных методов испытаний во всем диапазоне значений факторов, влияющих на характеристики резиновых смесей, является весьма трудоемким.

Целью исследования является разработка и апробация новой расчетно-экспериментальной методики характеризации термовязкоупругих свойств шинных резин.

Экспериментальная часть. Определение температурно-частотных зависимостей модуля упругости и тангенса угла механических потерь. Для экспериментального исследования упруго-диссипативных свойств шинных резин использовался метод динамического механического анализа (ДМА). Его реализация в приборе DMA Q800 позволяет задавать сложные температурные программы (нагрева, выдержки и охлаждения) в сочетании с различными вариантами нагружения (динамический многочастотный, 1-частотный, статический).

Конструкция прибора предусматривает высокоточный контроль нагрузки с использованием бесконтактного линейного двигателя, опирание вала нагружателя на воздушные подшипники и прецизионное оптическое измерение перемещений образца.

При помощи специально сделанного штанцевого ножа были изготовлены 100 призматических образцов размером 60×6×2 мм 20 резиновых смесей. Механические свойства резиновых смесей при циклическом растяжении исследованы в температурном диапазоне –3...+85 °С при 7 частотах нагружения, которые в поличастотном режиме работы прибора задавались в сторону уменьшения, т. е. 200, 150, 100, 50, 10, 1 и 0,1 Гц. Этот диапазон варьирования управляющих параметров позволяет прогнозировать упруго-диссипативные свойства резин для любых эксплуатационных условий на основе вязкоупругих моделей резины и принципа температурно-временной аналогии. Полученные зависимости динамического модуля упругости и тангенса угла механических потерь от температуры и частоты деформирования для резиновой смеси № 1 (протектор) представлены на рисунке 1.

Определение вязкоупругих характеристик материала при растяжении посредством малоциклового нагружения и последующей релаксации. При исследовании упругих и вязкоупругих свойств шинных резин представляется возможным использование программируемых машин для статических механических испытаний, работающих в режиме квазистатического циклического нагружения при максимально возможной скорости деформирования с последующей кратковременной релаксацией и регулируемым шагом дискретизации получаемой диаграммы «напряжение-время». Предложенная методика позволяет совместить 2 и более вида испытаний на одном образце и получить необходимый объем информации о деформационных и диссипативных свойствах при сокращении длительности испытаний.

Циклические и релаксационные испытания выполнялись на универсальной испытательной машине Instron 5567 (Великобритания). Для их проведения при помощи штанцевого ножа были изготовлены 100 стандартных образцов в виде 2-сторонних лопаток размером 115×6×2 мм (по 5 образцов каждой смеси), которые были испытаны на циклическое растяжение в кинематическом



Рисунок 1 — Зависимости модуля упругости *E* и тангенса угла механических потерь δ резиновой смеси № 1 от частоты деформирования и температуры *T* Figure 1 — Dependences of the elasticity modulus *E* and the mechanical loss tangent δ of rubber composition no. 1 on the deformation frequency and temperature *T* 

режиме со скоростью перемещения активного захвата 500 мм/мин с последующей релаксацией, начинающейся в момент достижения амплитудного значения перемещения 10-го цикла. Длительность релаксации для всех резиновых смесей составляла 10 мин, что было достаточным для характеризации наиболее активной фазы изменения растягивающих напряжений во времени. В результате указанного программного квазистатического нагружения была получена достаточно полная информация о вязкоупругих свойствах исследуемых материалов.

На рисунке 2 представлены зависимости напряжения от деформации и напряжения от времени для образца № 1 при максимальном значении деформации растяжения 50 %.

Анализ напряженно-деформированного состояния испытанных образцов. В качестве базового теоретического описания резины как термореологически простого материала была использована линейная вязкоупругая модель Прони [1, 2], имеющая вид:

$$\sigma_{ij}(t) = \int_{0}^{t} 2G(t-\tau) \frac{de_{ij}}{d\tau} d\tau + \delta_{ij} \int_{0}^{t} K(t-\tau) \frac{d\theta}{d\tau} d\tau, \quad (1)$$

где

$$G(\xi) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^{n_G} G_i e^{-\frac{\xi}{\lambda_i^G}}; \quad K(\xi) = K_{\infty} + \sum_{i=1}^{n_K} K_i e^{-\frac{\xi}{\lambda_i^K}}; \quad (2)$$

$$G(0) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^{n_G} G_i = \mu; \quad K(0) = \sum_{i=1}^{n_K} K_i = K.$$
(3)



Рисунок 2 — Зависимости напряжения от деформации (a) и напряжения от времени (b) для образца № 1 при максимальном значении деформации растяжения 50 % Figure 2 — Dependence of stress on strain (a) and stress on time (b) for sample no. 1 with a maximum value of tensile strain of 50 %

В рамках допущения о независимости коэффициента Пуассона резины от частоты и температуры (v = const = 0,49), параметры вязкоупругой модели Прони при сдвиге ( $G_i, \lambda_i^G$ ) и при объемном деформировании ( $K_i, \lambda_i^K$ ) можно выразить через соответствующие характеристики для одноосного напряженного состояния ( $E_i, \lambda_i^E$ ):

$$G_{i} = 2(1 + \nu)E_{i}, K_{i} = 3(1 - 2\nu)E_{i}, \lambda_{i}^{G} = \lambda_{i}^{K} = \lambda_{i}^{E}.$$
 (4)

При изменении осевой деформации вязкоупругого материала по гармоническому закону с частотой  $\omega$ , зависимость осевого напряжения от времени при одноосном напряженном состоянии определяется соотношением:

$$\sigma(t) = \left(E'(\omega) + iE''(\omega)\right)\varepsilon_{\max}e^{i\omega t}, \qquad (5)$$

где *E'*, *E''* — действительная и мнимая компоненты комплексного модуля упругости, называемые модулем накопления и модулем потерь соответственно;  $\varepsilon_{max}$  — амплитуда деформирования.

Можно показать, что в рамках модели Прони компоненты комплексного модуля упругости определяются соотношениями:

$$E'(\omega) = E\left(1 - \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{1 + \omega^2 \left(\lambda_i^E\right)^2}\right);$$
  

$$E''(\omega) = E\omega \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i \lambda_i^E}{1 + \omega^2 \left(\lambda_i^E\right)^2}.$$
(6)

Здесь введены обозначения:

$$E = E_{\infty} + \sum_{i=1}^{n} E_i; \quad \delta_i = \frac{E_i}{E}.$$
 (7)

Температурная зависимость времен релаксации  $\lambda_i^E$  может быть описана выражениями:

$$\lambda_i^E(T) = a_T \left( T - T_0 \right) \lambda_{i0}^E, \tag{8}$$

где  $\lambda_{i0}^{E}$  — время релаксации, соответствующее температуре приведения  $T_0$ ;  $a_T$  — некоторая функция температуры, называемая функцией температурно-временного смещения ( $a_T(0) = 1$ ). Для термореологически простого материала функция смещения не зависит от номера *i*. Наиболее распространенным способом задания данной функции является эмпирическое уравнение WLF:

$$\lg a_T = -\frac{c_1 \left(T - T_0\right)}{c_2 + T - T_0},$$
(9)

где  $c_1, c_2$  — экспериментально определяемые величины, рассматриваемые как характеристики материала для заданной температуры приведения  $T_0$ .

Для определения констант уравнения WLF будем использовать принцип температурно-частотной аналогии, который можно сформулировать в виде равенств:

$$E'(\omega, T) = E'(\omega a_T) = E'(\lg(\omega a_T)) =$$
  
= E'(lg \omega + lg a\_T). (10)

Таким образом, зависимости модуля упругости от аргумента  $lg(\omega)$  для различных фиксированных значений температуры сдвинуты относительно друг друга по оси  $lg(\omega)$  на величину  $lg(a_{\tau})$ . Следовательно, получив экспериментальные зависимости модуля упругости от частоты при различных температурах и произведя математические преобразования, можно установить зависимость от температуры функции смещения. Принцип температурно-частотной аналогии применим для всех модулей упругости материала. Нами для определения констант с1 и с2 использован модуль накопления. Пересчитав экспериментальные значения, получим ряд (в данном случае 20) зависимостей модуля накопления от частоты при различных температурах (рисунок 3).

В качестве температуры приведения выберем 20 °С ( $T_0 = 293$  K). Параллельно сместим кривые зависимостей модуля накопления от аргумента lg( $\omega$ ) до перекрытия с соседней кривой. Кривые, лежащие выше кривой для  $T = T_0$ , смещаются вдоль оси lg( $\omega$ ) вправо, а кривые, лежащие ниже кривой для  $T = T_0$ , — влево. Затем, суммируя смещения для соседних кривых, определим смещения каждой кривой по отношению к кривой приведения ( $T = T_0$ ). На рисунке 4 маркерами показана полученная в результате смещений и последующего сглаживания результирующая кривая.

Смещение кривой, соответствующей температуре T, по отношению к кривой, соответствующей температуре приведения, является значением функции  $lg(a_T)$ . Вид полученной функции смещения представлен на рисунке 4. Аппроксимировав данный набор смещений согласно уравнению WLF (9) по методу наименьших квадратов, полу-



Рисунок 3 — Схема построения обобщенной кривой модуля накопления. Числа у кривых соответствуют температуре в °C Figure 3 — Scheme for constructing a generalized curve of the storage modulus. Numbers of the curves correspond to the temperature in °C



Рисунок 4 — Функция температурно-временного смещения: сплошная кривая — результат обработки экспериментальных данных; пунктирная — аппроксимация функцией WLF Figure 4 — Temperature-time displacement function: solid curve — result of processing experimental data; dashed curve — approximation by the WLF function

чим значения констант  $c_1, c_2$ . Для смеси № 1 получено  $c_1 = 19,6$ ;  $c_2 = 131,3$  К.

Достоинством описанной расчетно-экспериментальной методики является возможность определения параметров уравнения WLF независимо от значений других характеристик материала.

Анализ результатов динамического механического анализа (см. рисунок 1) позволяет, независимо от значений мгновенного модуля E и констант  $c_1, c_2$ , определить параметры вязкоупругой модели Прони  $\delta_i, \lambda_i^E$  исходя из экспериментальных значений тангенса угла механических потерь tgß при температуре приведения  $T_0 = 20$  °C = 293 К. При  $T = T_0$  функция температурно-временного сдвига принимает значение 1. Следовательно, аналитическую зависимость тангенса угла механических потерь при температуре приведения от аргумента  $x = \lg(f)$  можно представить следующей функцией:

$$tg\beta(x) = 2\pi 10^{x} \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_{i}\lambda_{i0}^{E}}{1 + 4\pi^{2}10^{2x} \left(\lambda_{i0}^{E}\right)^{2}} \times \left(1 - \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_{i}}{1 + 4\pi^{2}10^{2x} \left(\lambda_{i0}^{E}\right)^{2}}\right)^{-1}.$$
(11)

На обобщенной кривой тангенса угла механических потерь, построенной с использованием ранее определенных констант уравнения WLF, обнаруживаются 3 выраженных максимума (рисунок 5). Поэтому в рядах Прони можно ограничится 3 слагаемыми n = 3. Константы  $\delta_i$ ,  $\lambda_{i0}^E$  (i = 1...3) определяются путем минимизации целевой функции, равной сумме квадратов разностей значений функции tg $\beta(x)$  и экспериментальных значений тангенса угла механических потерь при температуре приведения.

Указанная минимизация сводится к решению системы нелинейных уравнений, что было выполнено в программной среде MathCad. Получены следующие значения параметров ядра релаксации резиновой смеси  $\mathbb{N}$  1:  $\delta_1 = 0,265$ ,  $\delta_2 = 0,198$ ,  $\delta_3 = 0,139$ ,



Рисунок 5 — Зависимость тангенса угла механических потерь от частоты нагружения для смеси № 1: сплошная кривая обобщенная экспериментальная кривая; пунктирная — результаты аппроксимации функцией (11) Figure 5 — Dependence of the mechanical loss tangent on the loading frequency for composition no. 1: solid curve — generalized experimental curve; dashed — results of approximation by function (11)

 $\lambda_{10}^{E} = 0,657$  мс,  $\lambda_{10}^{E} = 194,01$  мс,  $\lambda_{10}^{E} = 54\,690$  мс. На рисунке 5 приведено сопоставление экспериментальной обобщенной кривой тангенса угла механических потерь с расчетами по формуле (11) при данных значениях параметров.

Элементы автомобильных шин при эксплуатации испытывают большие деформации. При этом материал данных элементов ведет себя как гиперупругий. Поэтому наряду с параметрами уравнения WLF и модели Прони необходимо установить значения параметров упругого потенциала, описывающего геометрически нелинейное деформирование материала. Самым простым является потенциал Муни–Ривлина для несжимаемого материала [10]. Для одноосного напряженного состояния испытуемого образца временная зависимость инженерного (определенного по исходной площади поперечного сечения) осевого напряжения задается соотношением

$$\sigma(t) = \frac{1}{L(t)} \left( S(t) - \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_{i0}^E} \int_0^t S(\tau) \exp\left(-\frac{t-\tau}{\lambda_{i0}^E}\right) d\tau \right), (12)$$

где  $L(t) = 1 + \varepsilon(t)$  — кратность удлинения образца, связанная с осевой деформацией  $\varepsilon$ .

Функция S(t) соответствует истинному (определенному по текущей площади поперечного сечения) осевому напряжению без учета вязкости материала:

$$S(t) = 2\left(Z_1 + \frac{Z_2}{L(t)}\right)\left(L(t)^2 - \frac{1}{L(t)}\right), \quad (13)$$

где *Z*<sub>1</sub>, *Z*<sub>2</sub> — параметры потенциала Муни–Ривлина.

При испытании на одноосное растяжение-сжатие задается функция времени  $\varepsilon(t)$  и измеряется напряжение  $\sigma$ . С использованием функции (12) и с учетом (13) для аппроксимации экспериментальной зависимости  $\sigma(t)$  при известных значениях релаксационных параметров  $\delta_i$ ,  $\lambda_{i0}$  методом наименьших квадратов вычислялись параметры потенциала Муни–Ривлина  $Z_1$  и  $Z_2$ .

На рисунке 6 представлена экспериментальная диаграмма «напряжение-деформация» для 1-го цикла нагружения, аппроксимируемая функцией (12). По значениям релаксационных параметров из таблицы методом наименьших квадратов были найдены значения параметров  $Z_1 = 1,035$  МПа и  $Z_2 = 0,683$  МПа, для которых по формуле (12) была построена расчетная диаграмма «напряжение-деформация» (см. рисунок 6). Зная значения параметров  $Z_1$  и  $Z_2$ , можно оценить мгновенный модуль сдвига материала для малых деформаций  $G_0 = 2(Z_1 + Z_2) = 3,436$  МПа.

Полный набор значений термовязкоупругих характеристик материала резиновой смеси № 1 приведен в таблице.

Для дополнительной оценки адекватности построенной механико-математической модели использовалась релаксационная кривая после 10 циклов



Рисунок 6 — Диаграмма 1-го цикла нагружения образца смеси № 1: сплошная кривая — аппроксимация функцией (12); пунктирная кривая — экспериментальная диаграмма Figure 6 — Diagram of the first loading cycle of the composition sample no. 1: solid curve — approximation by function (12); dashed curve — experimental diagram

Таблица — Термовязкоупругие характеристики материала смеси № 1 Table — Thermoviscoelastic characteristics of the material composition no. 1

Модель	Муни–Ривлина			Прони						Willams-Landel-Ferry		
Параметр	<i>Z</i> <sub>1</sub> , МПа	<i>Z</i> <sub>2</sub> , МПа	<i>G</i> <sub>0</sub> , МПа	$\lambda i_0$ , MC			$\delta_i$			<i>Т</i> <sub>0</sub> , К	<i>c</i> <sub>1</sub>	с2, К
				1	2	3	I	2	3			
Значение	0,73	0,42	2,3	0,65	194	54 690	0,26	0,19	0,13	293	19,64	131,33

растяжения. Сопоставление экспериментальной кривой релаксации с результатами расчетов по данной формуле при ранее установленных значениях характеристик смеси показали расхождение, не превышающее 15 %. Несколько завышенные расчетные оценки связаны с нагревом образца при циклическом деформировании.

Заключение. В работе приведены результаты экспериментального исследования вязкоупругих и термомеханических свойств 20 шинных резин методами динамического механического анализа и комбинированных испытаний на квазистатическое циклическое растяжение с последующей релаксацией.

На основе полученных экспериментальных данных и представленных аналитических зависимостей вычислены значения термовязкоупругих параметров исследованных эластомеров. Выполненный анализ шинных резин охватывает (а по частотам значительно превышает) спектр эксплуатационных нагрузок автомобильных шин.

Полученные результаты могут быть использованы при расчетной оптимизации состава материалов и конструкции автомобильных шин по критерию сопротивления качению и минимизации теплообразования в шине в процессе движения.

Работа выполнена по проекту Т21ЭТ-016 и п. 1.3.2 Программы научного сопровождения по обеспечению создания новых типоразмеров шин ОАО «Белшина» (2020–2023 годы).

#### Список литературы

- Mechanics of pneumatic tires / ed. S.K. Clark. Washington: 1 National Bureau of Standards, 1971. - 857 p.
- 2. Бухин, Б.Л. Введение в механику пневматических шин / Б.Л. Бухин. — М.: Химия. 1988. — 222 с.
- Nakajima, Y. Advanced tire mechanics / Y. Nakajima. Singa-3. pore: Springer, 2019. - 1265 p.
- 4. Хотько, А.В. Возможности оптимального проектирования автомобильной шины по критерию пространственной равнопрочности / А.В. Хотько, С.В. Шилько, С.Н. Бухаров // Механика машин, механизмов и материалов. — 2020. -№ 4(53). — С. 11–18. Кристенсен, Р. Введение в теорию вязкоупругости / Р. Кри-
- 5. стенсен. — М.: Мир, 1974. — 340 с.
- 6. Кравчук, А.С. Механика полимерных и композиционных материалов: учеб. пособие / А.С. Кравчук, В.П. Майборода, Ю.С. Уржумцев. — М.: Наука, 1985. — 303 с.
- Ghoreishy, M.H.R. Determination of the parameters of the 7. Prony series in hyper-viscoelastic material models using the finite element method / M.H.R. Ghoreishy // J. Materials & Design. — 2012. — Vol. 35. — Pp. 791–797. — DOI: https:// doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.057.
- 8. Chen, T. Determining a Prony series for a viscoelastic material from time varying strain data [Electronic resource] / T. Chen. - NASA Langley Technical Report Server, 2000. 26 p. - Mode of access: https://www.cs.odu.edu/~mln/ltrs-pdfs/ NASA-2000-tm210123.pdf. — Date of access: 10.09.2021.
- 9. Park, S.W. Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part I - A numerical method based on Prony series / S.W. Park, R.A. Schapery // Int. J. of Solids and Structures. — 1999. — Vol. 36, iss. 11. — Pp. 1653–1675. DOI: https://doi.org/10.1016/S0020-7683(98)00055-9.
- 10. Rivlin, R.S. Large elastic deformations of isotropic materials VII. Experiments on the deformation of rubber / R.S. Rivlin, D.W. Saunders // Philos. Trans. Royal Soc. A. -- 1951. Vol. 243, iss. 865. — Pp. 251–288. — DOI: https://doi. org/10.1098/rsta.1951.0004.

SHIL'KO Sergey V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Laboratory "Mechanics of Composites and Biopolymers"<sup>1</sup> E-mail: shilko mpri@mail.ru

## CHERNOUS Dmitriy A., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Leading Researcher of the Laboratory "Mechanics of Composites and Biopolymers"1 Associate Professor of the Department "Technical Physics and Theoretical Mechanics"<sup>2</sup> E-mail: charnavus74@gmail.com

## KHOTKO Alexander V.

Head of the Calculation Studies of Tire Mechanics Division of the Tire Design and Construction Department of the R&D Center<sup>3</sup>

E-mail: hotkoav2017@gmail.com

## SAZANKOV Aleksey P.

Junior Researcher of the Laboratory "Mechanics of Composites and Biopolymers"1 E-mail: alex.saz.job@gmail.com

BUHAROV Sergey N., Ph. D. in Eng.

Head of the Sector "Vibroacustics of Materials and Tribojoints of Machines"1 E-mail: sbuharov@mpri.org.by

<sup>1</sup>V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the NAS of Belarus, Gomel, Republic of Belarus <sup>2</sup>Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus <sup>3</sup>BELSHINA JSC, Bobruisk, Republic of Belarus

## CALCULATION OF VISCOELASTIC AND THERMOMECHANICAL PARAMETERS OF TIRE RUBBERS BASED ON THE RESULTS OF DYNAMIC TESTS

Viscoelastic and thermomechanical properties of tire rubbers have been studied to predict hysteresis losses during rolling of automobile tires. The temperature dependences of the elasticity modulus and the tangent of mechanical losses obtained by dynamic mechanical analysis and combined tests in the mode of quasi-static cyclic stretching with subsequent relaxation were used for the calculated determination of the deformation and dissipative parameters of 20 rubber compositions. As a basic theoretical description of rubber as a thermorheologically simple material, a linear viscoelastic Prony model is used, for the identification of which the Willams-Landel-Ferry (WLF) temperature-time analogy is used. The advantage of the computational and experimental approach used is the ability to determine the parameters of the WLF equation regardless of the values of other material characteristics. A fairly simple Mooney-Rivlin potential function for an incompressible material is used to describe large elastic deformations of the elastomer under study. The relaxation curve obtained by means of quasi-static tests is applied to assess the adequacy of the constructed mechanical and mathematical model. In particular, the comparison of the experimental relaxation curve with the results of calculations for tread rubber showed a discrepancy not exceeding 15%. The performed analysis of viscoelastic and thermomechanical parameters of tire rubbers covers (and significantly exceeds in frequencies) the range of operating temperatures and loads of automobile tires. The results obtained can be used in the computational optimization of the composition of materials and the design of automobile tires according to the criterion of rolling resistance and minimizing heat generation in the tire during movement.

*Keywords: tire rubbers, viscoelasticity, relaxation, temperature, deformation frequency, dynamic mechanical analysis method* 

DOI: https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-2-59-24-30

#### References

- 1. *Mechanics of pneumatic tires*. Washington, National Bureau of Standards, 1971. 857 p.
- Bukhin B.L. Vvedenie v mekhaniku pnevmaticheskikh shin [Introduction to the mechanics of pneumatic tires]. Moscow, Khimiya Publ., 1988. 222 p. (in Russ.).
- Nakajima Y. Advanced tire mechanics. Singapore, Springer, 2019. 1265 p.
- Khotko A.V., Shil'ko S.V., Buharov S.N. Vozmozhnosti optimalnogo proektirovaniya avtomobilnoy shiny po kriteriyu prostranstvennoy ravnoprochnosti [Possibilities for optimal design of a car tire based on a criterion of spatial strength balance]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 4(53), pp. 11–18 (in Russ.).
- 5. Christensen R.M. *Theory of viscoelasticity. An introduction.* New York, London, Academic Press, 1971.
- Kravchuk A.S., Mayboroda V.P., Urzhumtsev Yu.S. *Mekhani-ka polimernykh i kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of polymer and composite materials]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 303 p. (in Russ.).

- Ghoreishy M.H.R. Determination of the parameters of the Prony series in hyper-viscoelastic material models using the finite element method. *Materials & design*, 2012, vol. 35, pp. 791–797. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.057.
- Chen T. Determining a Prony series for a viscoelastic material from time varying strain data. 2000. 26 p. Available at: https:// www.cs.odu.edu/~mln/ltrs-pdfs/NASA-2000-tm210123.pdf (accessed 10 September 2021).
- Park S.W., Schapery R.A. Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part I – a numerical method based on Prony series. *International journal of solids and structures*, 1999, vol. 36, iss. 11, pp. 1653–1675. DOI: https://doi. org/10.1016/S0020-7683(98)00055-9.
- Rivlin R.S., Saunders D.W. Large elastic deformations of isotropic materials VII. Experiments on the deformation of rubber. *Philosophical transactions of the royal society A*, 1951, vol. 243, iss. 865, pp. 251–288. DOI: https://doi.org/10.1098/ rsta.1951.0004.