

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ И ВЯЗКОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИННЫХ РЕЗИН

<sup>1</sup>Шилько С. В., <sup>1</sup>Дробыш Т. В., <sup>1</sup>Петроковец Е. М., <sup>1</sup>Сазанков А. П.,  
<sup>2</sup>Хотько А. В.

<sup>1</sup>Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого» НАН Беларуси, Гомель

<sup>2</sup>Открытое акционерное общество «Белишина», Бобруйск

**Введение.** С позиций механики автомобильная шина представляет собой геометрически сложное изделие из резинокордного композита, матричный материал которого (резина), являясь эластомером, допускает большие упругие деформации и при этом обладает определенной вязкостью [1, 2]. Повышение конкурентоспособности отечественных автомобильных шин основано на расчетной оптимизации геометрических параметров слоистой конструкции шины, характеристик армирования слоев, состава резиновых смесей и технологического режима изготовления указанных изделий, исходя из заданных технических показателей [3]. На современном уровне это достигается проведением конечноэлементного анализа напряженно-деформированного состояния автомобильных шин, что предполагает получение исходных данных о свойствах шинных резин, прежде всего, модулей упругости и реологических параметров. Для аналитического описания температурно-временных эффектов, возникающих при циклическом нагружении шинных резин с частотой порядка 10 Гц, привлекается теория вязкоупругого деформирования. Это позволяет прогнозировать диссипативные потери, определяющие сопротивление качению и тепловыделение (саморазогрев) шин при эксплуатации. Однако практикуемые механические и трибоиспытания являются либо весьма длительными и дорогостоящими, либо не в полной мере отражают условия эксплуатации рассматриваемых резинотехнических изделий.

**Целью исследования** является апробация методики ускоренного определения упругих и вязкоупругих характеристик шинных резин.

В статье приведены результаты механических испытаний шинных резин при циклическом растяжении с последующей релаксацией.

**Методика эксперимента.** В проектировочных и поверочных расчетах автомобильных шин используются модели гиперупругих материалов (например, описание Муни-Ривлина [4]) и линейные модели вязкоупругого деформирования наследственного типа [5, 6] (модель Прони и т. п.), имеющиеся в программной среде конечноэлементного анализа MSC.Marc [7, 8]. При идентификации этих моделей следует планировать лабораторные исследования деформационных свойств шинных резин таким образом, чтобы обеспечить соответствие напряженно-деформированного состояния образцов резин и функциональных элементов автомобильных шин (протектора, брекера и др.).

Нужно учитывать, что деформации рассматриваемых материалов при качении шин достаточно велики – в радиальных шинах они достигают 20 %, а для шин диагональной конструкции характерны деформации до 40 %. Не менее важно выявление реологических особенностей резин выбором условий тестирования, близких эксплуатационным нагрузочно-скоростным режимам. Так, известно, что при работе шин происходит чередование быстрого циклического растяжения и относительно продолжительной стадии релаксации (отдыха).

Из вышесказанного следует целесообразность испытаний шинных резин в виде комбинации квазистатического малоциклового растяжения и последующей кратковременной релаксации с регулируемой дискретностью получаемой диаграммы «напряжение – время».

С этой целью могут быть использованы возможности современного автоматизированного испытательного оборудования, в частности, машин для механических испытаний материалов типа Instron 5567 (Великобритания), показанной на рис. 1, а. Достоинством этой модели является прецизионный механический привод, возможность программирования процедуры испытаний, автоматическая калибровка силоизмерителя и высокая точность регистрации усилий во всем диапазоне удлинений эластомерных образцов при одноосном растяжении. Такие возможности позволяют рационализировать весьма трудоемкую и длительную процедуру характеристики вязкоупругих свойств шинных резин в результате значительного уменьшения числа образцов и затрат времени без потери точности экспериментальных данных.

Для апробации методики экспериментального исследования были взяты 100 стандартных образцов 20-ти составов шинных резин производства ОАО «Белшина» (по 5 образцов каждой смеси) в виде двухсторонних лопаток размером 115×6×2 мм, изготовленные при помощи штанцевого ножа (рис. 1, б). Условия испытаний: температура воздуха 22 °С, относительная влажность воздуха 50 %, давление 750 мм рт. ст. Эти образцы были испытаны на циклическое растяжение в кинематическом режиме (при заданной амплитуде перемещения активного захвата машины) с максимально возможной скоростью нагружения 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 характеристики стадии существенного изменения растягивающих напряжений во времени (далее происходило незначительное уменьшение напряжений).

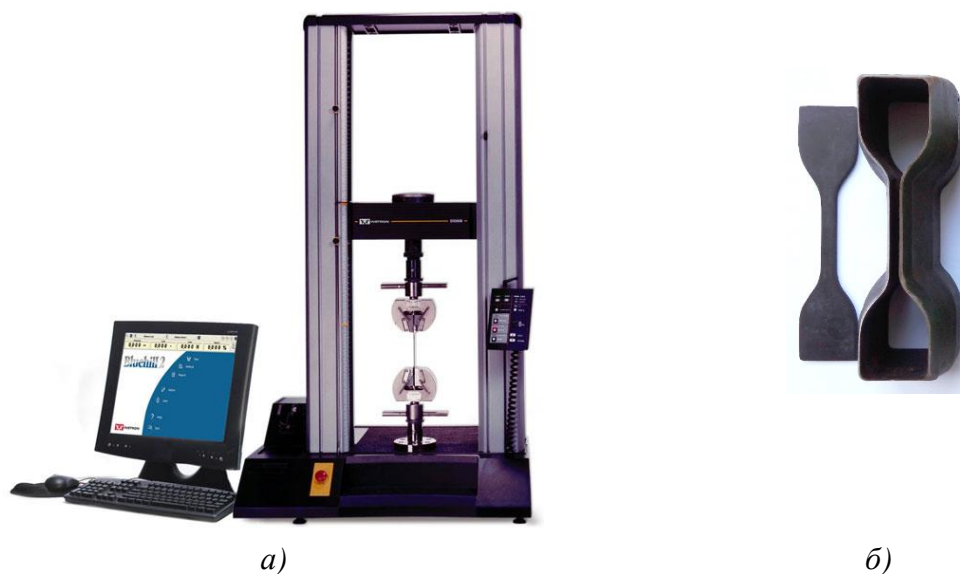


Рис. 1. Испытательная машина Instron 5567 (а), вид образцов и инструмента для их изготовления (б)

**Результаты испытаний.** В ходе комбинированных испытаний была получена достаточно полная информация об упругих и вязкоупругих свойствах исследуемых материалов при амплитудных значениях деформации растяжения 50 % и 100 %.

В качестве примера на рис. 2–5 представлены зависимости напряжения от деформации и напряжения от времени для всех исследуемых образцов при максимальном значении деформации растяжения 100 %. Можно заметить, что проведенные испытания

быстро выявляют существенное различие деформационного поведения резин в зависимости от их функционального назначения. Форма гистерезисных петель стабилизируется на втором цикле нагружения, а релаксационные процессы в исследуемых эластомерах в основном завершаются 10 минут.

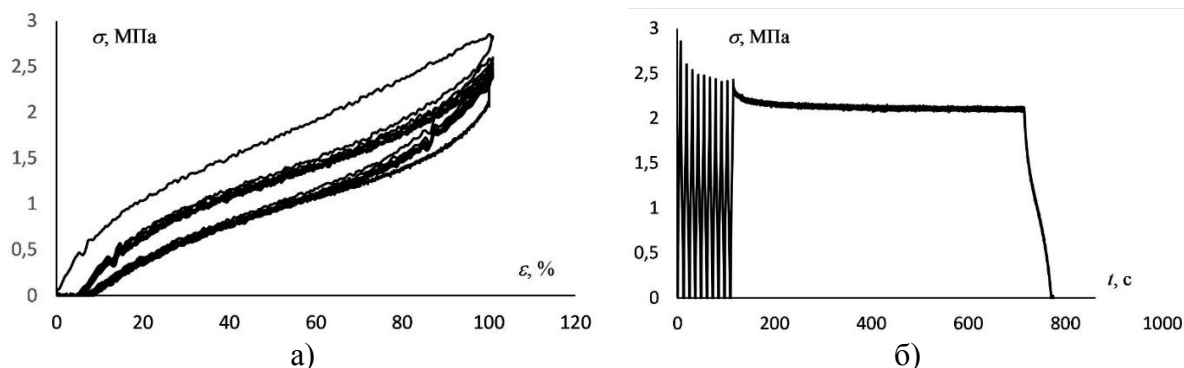


Рис. 2. Зависимости «напряжение – деформация» (а) и «напряжение – время» (б) протекторной резины

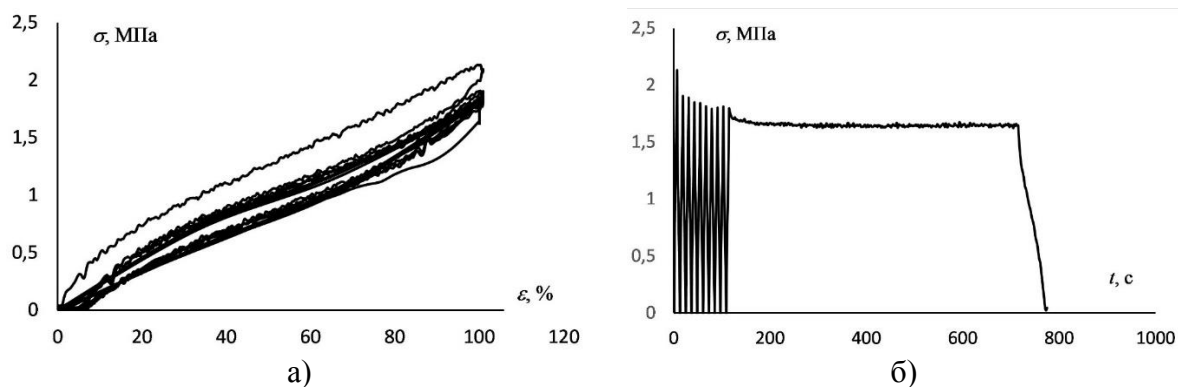


Рис. 3. Зависимости «напряжение – деформация» (а) и «напряжение – время» (б) материала подканавочного слоя

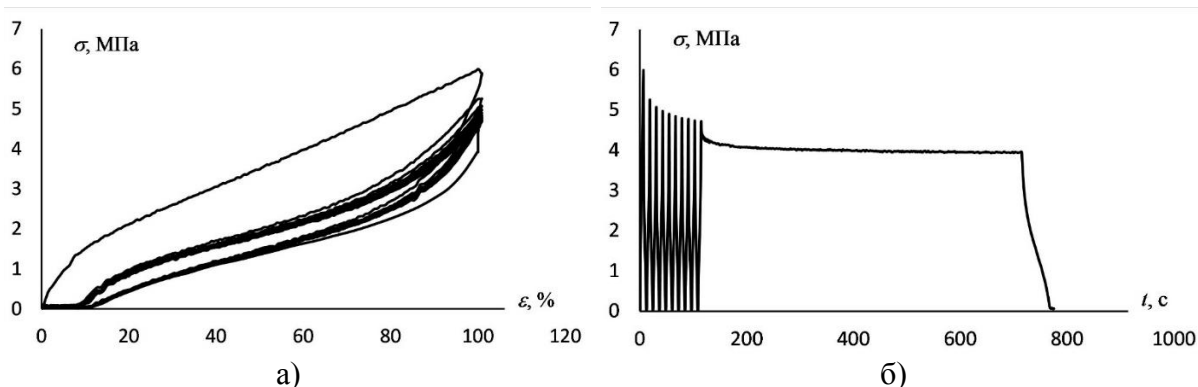


Рис. 4. Зависимости «напряжение – деформация» (а) и «напряжение – время» (б) материала брекера

Экспериментальные данные используются авторами для идентификации моделей гиперупругого деформирования (Муни–Ривлина) и вязкоупругого деформирования (Прони) по методике, описанной в работе [9].

**Выводы.** Экспериментально исследованы упруго-диссипативные свойства шинных резин с получением зависимостей «напряжение – время» и «напряжение – деформация» в условиях циклического нагружения и последующей релаксации при максимальном значении деформации растяжения 50 % и 100 %.

Апробированную методику испытаний и полученные данные целесообразно использовать для определения параметров моделей гиперупругого и вязкоупругого деформирования, реализуемых в программном обеспечении конечноэлементного анализа MSC.Marc. Практическая значимость результатов состоит в оптимизации рецептур резиновых смесей и конструкции шин по упруго-диссипативным критериям.

**Благодарности.** Исследование выполнено по х/д И27/2020 «Характеризация вязкоупругих свойств шинных резин ЦМК ЗМШ» в соответствии с п. 1.3.2 Программы научного сопровождения по обеспечению создания новых типоразмеров шин ОАО «Белшина» на 2020–2023 г.г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бухин, Б. Л. Введение в механику пневматических шин / Б. Л. Бухин. – М.: Химия, 1988. – 222 с.
2. Nakajima, Y. Advanced Tire Mechanics / Y. Nakajima // Springer Nature Singapore Pte Ltd. – 2019. – P. 1264.
3. 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. – С. 11–18.
4. Rivlin, R. S. Large elastic deformations of isotropic materials, VII, Experiments on the deformation of rubber / R. S. Rivlin, D. W. Saunders // Phil. Trans. Roy. Soc. – London, 1951. – No 243 (Pt. A). – P. 251–288.
5. Кристенсен, Р. Введение в теорию вязкоупругости / Р. Кристенсен. – М.: Мир, 1974. – С. 340.
6. Кравчук, А. С. Механика полимерных и композиционных материалов: учебное пособие / А. С. Кравчук, В. П. Майборода, Ю. С. Уржумцев. – М.: Наука, 1985. – 303 с.
7. User Documentation. Vol. A: Theory and User Information: Copyright ©2017 MSC Software Corporation.
8. User Documentation. MAR10 Experimental Elastomer Analysis: Copyright ©2017 MSC Software Corporation.
9. Шилько, С. В. Определение реологических параметров полимерных материалов на основе идентификации вязкоупругой модели Прони по результатам статических и динамических испытаний / С. В. Шилько [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2017. – № 3. – С. 33–38.

Поступила: 26.01.2021