

УДК. 538.9, 539.4  
EDN ХКСМДН (<https://elibrary.ru/xksmdh>)  
DOI 10.33113/mkmk.ras.2024.30.04.07



## **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ, НАПОЛНЕННЫХ ЧАСТИЦАМИ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ И УГЛЕРОДА, ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ\***

Корнев Ю.В., Гилязова Р.Ф., Муромцев Д.Н., Карнет Ю.Н.

*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия*

### **АННОТАЦИЯ**

Исследование направлено на решение проблемы обеспечения долговременной работоспособности изделий из эластомерных композитов, которые применяются в составе гасителей колебаний в различных конструкциях. Отличительной особенностью эластомерных композитов являются высокие обратимые деформации при малых нагрузках и хорошие диссипативные свойства, которые обеспечивают данному классу материалов восприимчивость к воздействию колебаний.

В настоящей работе было проведено экспериментальное исследование механических свойств эластомерных композитов, разработанных для применения в качестве элементов конструкций гасителей колебаний. А также представлены результаты ускоренных испытаний по исследованию влияния ультрафиолетового (УФ) излучения на микромеханические характеристики эластомерных композитов на основе смеси бутилкаучука (БК) и этилен-пропиленового каучука (СКЭПТ), наполненных тухуглеродом П-324 с добавлением частиц породы шунгит различной дисперсности. Исследовались также ненаполненные составы на основе СКЭПТ с целью оценки ползучести при наноиндентировании до и после процесса УФ-облучения. Образцы выдерживались под УФ лампой до 12 недель. Изменение структуры поверхности образцов эластомерных композитов до и после УФ-облучения контролировалось с помощью оптического микроскопа.

Разработаны эластомерные композиты для применения в составе конструкций гасителей колебаний ЛЭП. Установлено, что требуемый комплекс механических характеристик данных материалов достигается за счёт применения в составе комбинации БК и СКЭПТ, а также добавления субмикрочастиц породы шунгит (5 об.%). Установлено, что воздействие УФ по-разному влияет на структуру поверхности и на микромеханические характеристики образцов в зависимости от состава. При изучении образцов эластомерных композитов на основе СКЭПТ установлено, что добавка микрочастиц породы шунгит увеличивает устойчивость данных композитов к воздействию УФ. Показано, что добавка (5 об.%) субмикрочастиц породы шунгит в составе эластомерных композитов на основе комбинации БК и СКЭПТ позволяет повысить относительный гистерезис данных материалов и при этом сохранить комплекс упруго-прочностных свойств.

В экспериментах по наноиндентированию установлено, что ползучесть (Стеер-эффekt) образцов эластомерных композитов меняется при воздействии УФ. Отмечается увеличение скорости и максимальной глубины индентирования при воздействии УФ на образцы. Получены коэффициенты для функции, описывающей изменение глубины индентирования (внедрения) во времени: до и после облучения образцов эластомерных композитов.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №22-19-00678).

**Ключевые слова:** эластомерные композиты; гасители колебаний; относительный гистерезис; субмикрочастицы породы шунгит; УФ-излучение; прочность; наноиндентирование

## **MECHANICAL PROPERTIES OF ELASTOMERIC COMPOSITES FILLED WITH PARTICLES BASED ON SILICON DIOXIDE AND CARBON FOR APPLICATION AS ELEMENTS OF VIBRATION DAMPERS STRUCTURES**

Kornev Yu.V., Gilyazova R.F., Muromtsev D.N., Karnet Yu.N.

*Institute of Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

### **ABSTRACT**

The study is aimed at solving the problem of ensuring long-term performance of products made of elastomer composites, which are used as part of vibration dampers in various designs. A distinctive feature of elastomer composites is high reversible deformations at low loads and good dissipative properties, which provide this class of materials with susceptibility to vibrations.

In this paper, an experimental study of the mechanical properties of elastomer composites developed for use as structural elements of vibration dampers was conducted. The results of accelerated tests to study the effect of ultraviolet (UV) radiation on the micromechanical characteristics of elastomer composites based on a mixture of butyl rubber (BR) and ethylene-propylene rubber (EPDM) filled with P-324 carbon black with the addition of shungite particles of varying dispersion were presented. Unfilled EPDM-based compositions were also studied to assess creep during nanoindentation before and after the UV irradiation process. The samples were kept under a UV lamp for up to 12 weeks. Changes in the surface structure of the elastomer composite samples before and after UV irradiation were monitored using an optical microscope.

Elastomeric composites have been developed for use in power transmission line vibration damper structures. It has been established that the required set of mechanical properties of these materials is achieved by using a combination of BR and EPDM in the composition, as well as adding submicroparticles of shungite rock (5 vol.%). It has been established that exposure to UV has different effects on the surface structure and micromechanical properties of samples depending on the composition. When studying samples of elastomeric composites based on EPDM, it was found that the addition of microparticles of shungite rock increases the resistance of these composites to UV exposure. It has been shown that the addition (5 vol.%) of submicroparticles of shungite rock in the composition of elastomeric composites based on a combination of BR and EPDM allows increasing the relative hysteresis of these materials and, at the same time, preserving a set of elastic-strength properties.

In experiments on nanoindentation it was found that creep (Creep effect) of elastomer composite samples changes under UV influence. An increase in the rate and maximum depth of indentation is noted under UV influence on samples. Coefficients were obtained for the function describing the change in the depth of indentation (penetration) over time before and after irradiation of elastomer composite samples.

**Keywords:** elastomer composites, vibration dampers, relative hysteresis, submicroparticles of shungite rock, UV radiation, strength, nanoindentation.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время известны различные методы и средства борьбы с негативным воздействием колебаний на конструкции, например, изменение жесткостных и инерционных параметров конструкций, применение виброизоляции, повышение демпфирующих свойств с использованием материалов с хорошими диссипативными свойствами и высокой поглощающей способностью и т.д. Но важное место среди них занимают гасители колебаний [1,2]. Их достоинством является достаточно простое получение желаемого эффекта уменьшения уровня колебаний при сравнительно малых затратах. Также плюсом является возможность их учета и использования как на начальных этапах проектирования конструкции, так и в самом процессе её эксплуатации после выявления неудовлетворительных динамических качеств.

Одной из актуальных задач является обеспечение долговременной работоспособности и надежности изделий из эластомерных композитов, которые применяются в составе гасителей колебаний в различных конструкциях. Гасители колебаний являются важным элементом ЛЭП, мостов, двигателей и других конструкций и применяются для снижения воздействия на конструкцию вибраций различных частот.

Высокий интерес к эластомерам как к конструкционным материалам обосновывается их исключительными свойствами. Они могут обратимо и значительно (более 300%) деформироваться под нагрузкой. Эластомеры обладают высокой адгезией, устойчивостью к разрыву, истиранию, воздействию различных газов, воды и пара, имеют низкую температуру стеклования (до  $-90^{\circ}\text{C}$ ), обладают хорошими изоляционными и диссипативными свойствами [3]. Эти характеристики обеспечивают данному классу материалов восприимчивость к динамическому режиму нагружения различной частоты и амплитуды деформации.

Контроль комплекса механических свойств эластомерных композитов осуществляется путем сочетания в их составе различных каучуков (полимерной основы) и применения частиц высокодисперсных наполнителей [3,4]. При создании данного класса материалов важно понимать как состав и структура дисперснонаполненного композита обеспечивает механические свойства, заданные условиями эксплуатации изделий, а также их потенциал к деградации в экстремальных условиях окружающей среды, включающих длительную работу под действием естественного ультрафиолетового излучения [5-7].

К элементам конструкции гасителей колебаний предъявляются высокие требования как с точки зрения механических характеристик, так и устойчивости к внешним воздействиям, например, температуры, длительности и интенсивности воздействия ультрафиолетового излучения и др. При этом длительное воздействие ультрафиолетового излучения существенно влияет на комплекс свойств эластомерных композитов и требует дополнительного анализа и изучения [5-9].

Учитывая вышесказанное, целью настоящей работы является разработка эластомерных композитов, для применения в качестве элементов конструкции гасителей колебаний. А также изучение влияния воздействия ультрафиолетового излучения на микромеханические свойства поверхности образцов эластомерных композитов. Оценка комплекса упругопрочностных и гистерезисных свойств гибридно-наполненных эластомерных композитов на основе бутил-

и этиленпропилендиенового каучуков (и их смеси) с частицами технического углерода и добавлением микро- и субмикрочастиц породы шунгит.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе изготовление резиновых смесей проводилось в ИПРИМ РАН с применением смесителя HAAKE PolyLab Rheomix 3000 QC с рабочим объемом камеры 379 см<sup>3</sup>, датчиками крутящего момента и температуры на стенках смесителя и самой смеси. Заполняемость камеры в ходе изготовления смесей составляла 75%. Процесс смешения осуществлялся в две стадии, максимальная температура при смешении составляла 154°C.

Были исследованы составы на основе смеси бутил каучука БК-1675Н (БК) и этиленпропилендиенового каучука СКЭПТ-50. Данные каучуки были выбраны, потому что они имеют широкий рабочий диапазон температур, устойчивы к внешним (погодным) воздействиям и резины на их основе обладают повышенными значениями гистерезиса.

В качестве упрочняющего наполнителя в смесь были добавлены частицы технического углерода П-324 (ТУ), кроме того, в состав добавлялся ещё один наполнитель – микродисперсный шунгит (средний диаметр частиц порядка 5 мкм) или субмикрошунгит (средний диаметр частиц порядка 0,4 мкм), т.е. были получены гибридно-наполненные образцы эластомерных композитов (2 наполнителя различной дисперсности: ТУ П-324 и микрошунгит/субмикрошунгит). Частицы породы шунгит были добавлены в состав композитов для контроля сопротивления воздействию ультрафиолетового излучения и износостойкости полученных образцов. Составы и номера образцов представлены в Таблице 1.

Исследование кинетики отверждения (вулканизации) образцов эластомерных композитов проводилось на безроторном реометре MonTech MDR-3000 (ГОСТ 12535-67).

Упруго-прочностные свойства образцов эластомерных композитов определяли на универсальной разрывной машине Zwick UTS-10 по ГОСТ 270-75. Скорость деформирования 500 мм/мин, комнатная температура.

Таблица 1.

Составы исследуемых образцов.

Ингредиенты		Номер образца / масс.ч.			
		01	1	2	3
1	Бутил каучук (БК-1675Н)	70	70	70	70
2	Каучук СКЭПТ-50	30	30	30	30
3	Вулканизирующая группа	7,8	7,8	7,8	7,8
4	Техуглерод П-324	–	50	50	50
5	Шунгит микро (5 мкм)	–	–	20	–
6	Шунгит субмикро (0,4 мкм)	–	–	–	20

Контроль деформации осуществлялся с помощью датчиков механического экстензометра (L-датчика) разрывной машины Zwick UTS-10, нагрузка контролировалась датчиком нагрузки на верхней траверсе. Полученные зависимости  $P(\varepsilon)$  «напряжение – относительная деформация» для всех образцов

экспортировались в программу AdvancedGrapher v.2.08. В этой программе подбирались функции, и затем проводилось интегрирование полученных зависимостей. Найденный интеграл для зависимости «напряжение (в МПа) – относительная деформация (%)» является значением удельной работы деформации на разрушение образца. Относительный гистерезис определялся при деформациях от 10 до 20% на двадцатом цикле в соответствии с ГОСТ 252-75.

Упруго-гистерезисные свойства образцов эластомерных композитов определялись на высокоточном измерительном комплексе NanoTest 600 с применением сфероконического индентора с углом при вершине  $60^\circ$  и радиусом закругления 10 мкм. Индентирование проводилось в режиме контролируемой нагрузки, с преднагрузкой 0,01 мН, максимальные нагрузки – 0,7, 1,5 и 6,0 мН. Снимались зависимости «нагрузка – глубина индентирования», на стадиях нагрузки и разгрузки. Для расчета приведённого модуля упругости экспериментальные данные обрабатывались по методу Герца (multipoint) [10,11]. Данные Среер-эффекта – ползучесть при наноиндентировании были получены при нагрузке 1,5 мН. В этом эксперименте нагрузка фиксируется и регистрируется изменение глубины индентирования, что характеризует преимущественно релаксационные свойства эластомерного композита [11-13].

Источником УФ-излучения являлась ультрафиолетовая лампа TUV 15W/G15 LL фирмы «PHILIPS» мощностью 15 W, длина волны 253,7 нм, удельная мощность излучения не менее  $10,0 \text{ Вт/м}^2$ . Длительность облучения составляла до 12 недель.

Оценку изменения структуры поверхности образцов эластомерных композитов до и после УФ-облучения проводили с помощью оптического микроскопа Альтами MET 5T.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При изготовлении смесей эластомерных композитов оценивался крутящий момент на первой стадии смешения. Из полученных данных установлено, что при добавлении в составы эластомерных композитов частиц микро- и субмикрощунгита крутящий момент и температура смешения на первой стадии практически не меняется. Были получены значения крутящего момента порядка  $155 \text{ Н}\cdot\text{м}$  и температуры порядка  $143^\circ\text{C}$ . Возможно это связано с тем, что добавка частиц породы шунгит в составы эластомерных композитов относительно небольшая по объёму (порядка 5% по объёму).

После изготовления резиновых смесей данные составы обрабатывались на вальцах и затем оценивались их вулканизационные характеристики с целью определения оптимума вулканизации (отверждения) с применением безроторного реометра. Результаты обработки полученных кинетических кривых (зависимость крутящего момента от времени) представлены в Таблице 2.

Из Таблицы 2 видно, что оптимум отверждения варьируется от 18 до 23 минут, что является нормальным значением для большинства составов эластомерных композитов на основе смеси каучуков БК и СКЭПТ. Максимальная скорость наблюдается у состава с частицами ТУ П-324 (образец 1), а добавление частиц шунгита несколько снижает скорость вулканизации (см. образцы 2, 3).

Таблица 2.

Данные кинетики отверждения образцов эластомерных композитов.

Свойства/№ образца	01	1	2	3
$M_{\min}$ [dN·m]	8,21	3,2	3,7	3,8
$M_{\max}$ [dN·m]	15,69	20,9	22,3	22,6
$t_{ind}$ [min]	13	2,3	2,3	2,1
$t_{90}$ [min]	22,5	18,4	23,1	23,3
$v$ [%/min]	10,5	6,2	4,8	4,7

Здесь:  $M_{\min}$  – минимальный крутящий момент;  $M_{\max}$  – максимальный крутящий момент;  $t_{ind}$  – время начала вулканизации;  $t_{90}$  – оптимальное время вулканизации;  $v$  – скорость вулканизации.

Далее проводили исследование отвержденных образцов эластомерных композитов и оценивали структуру их поверхности после воздействия УФ излучения. Полученные результаты представлены на рис.1.

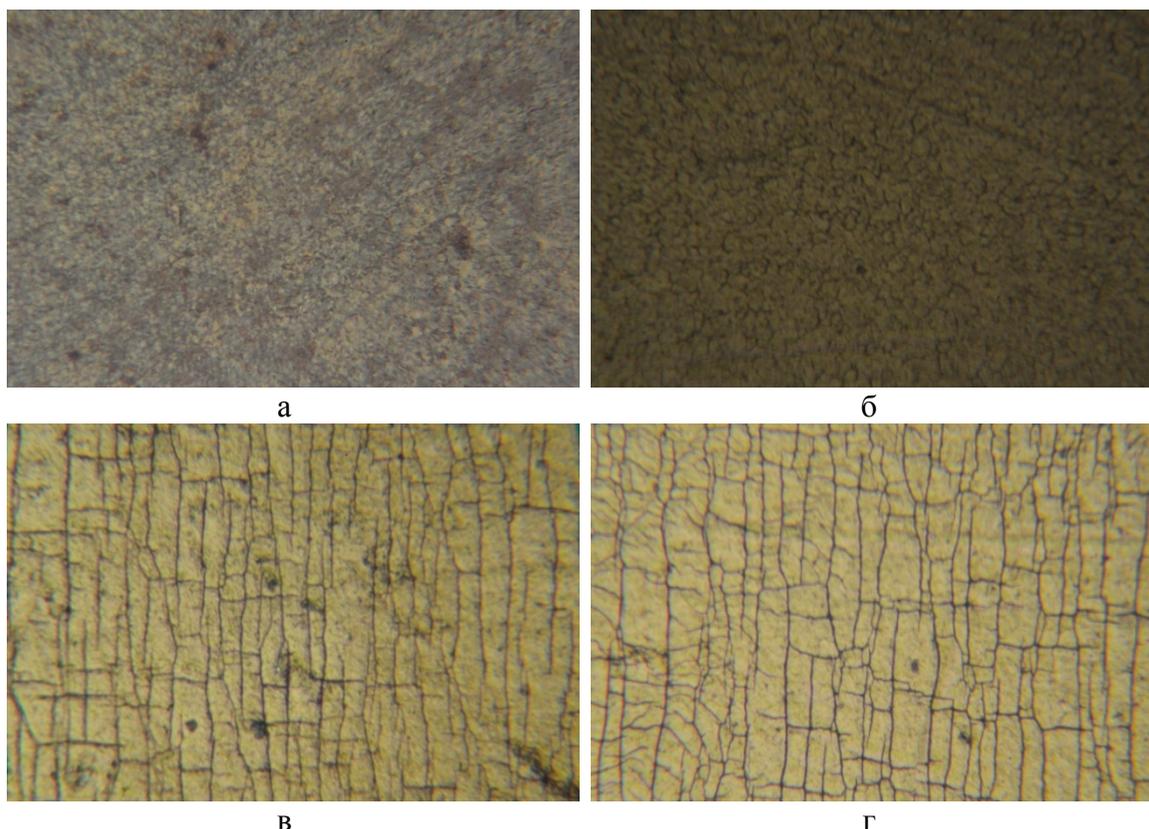


Рис.1. Изменение структуры поверхности образца эластомерного композита до и после облучения ультрафиолетом (образец 1). Увеличение 400X.  
 а) 0 недель, б) 2 недели, в) 7 недель, г) 12 недель.

Показаны изображения поверхности образца одного состава (образец 1) перед облучением и через 2, 7 и 12 недель после воздействия УФ-излучения. На рис.1 можно видеть, как меняется структура поверхности образца со временем УФ-облучения, происходит постепенное разрушение поверхности, появляются

трещины и кластеры между трещинами, а также увеличивается их количество с увеличением времени воздействия УФ-облучения.

На следующем этапе работы оценивались микромеханические характеристики поверхности образцов эластомерных композитов, чтобы понять, как изменение структуры поверхности образцов связано со свойствами материала. Результаты экспериментальных исследований, полученные методом наноиндетирования, представлены на рис.2.

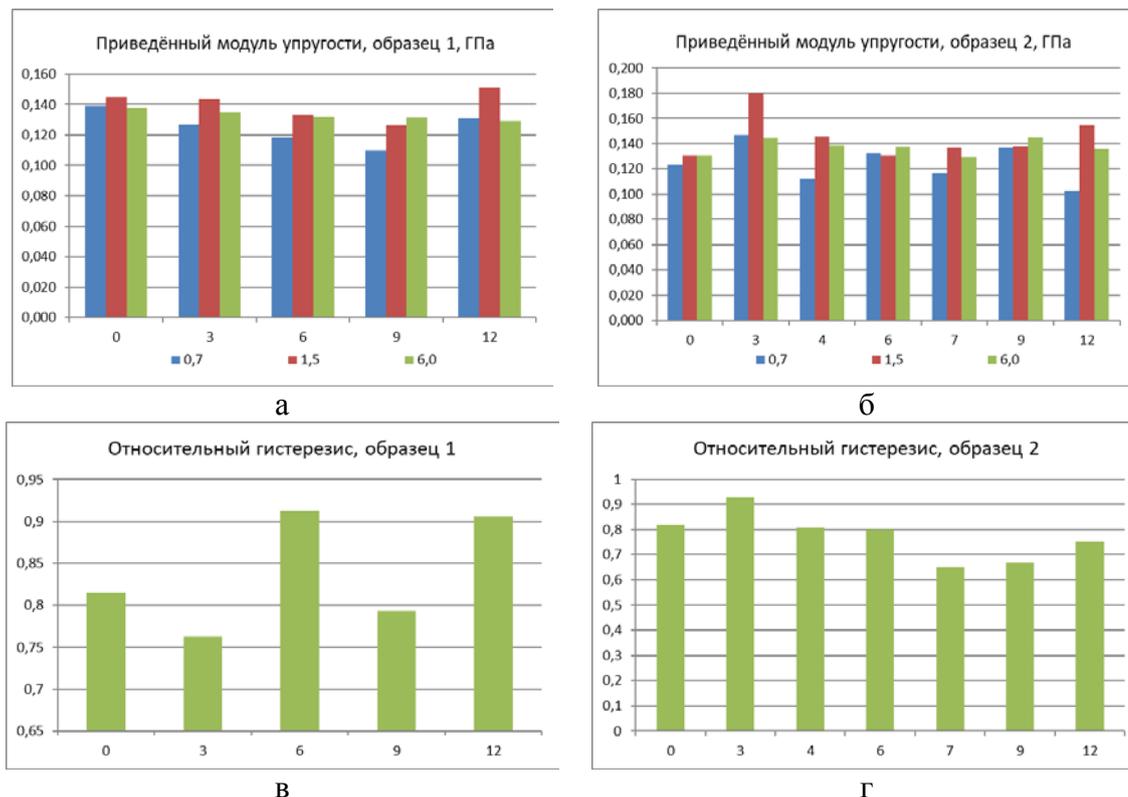


Рис.2. Микромеханические характеристики при наноиндетировании (нагрузки: 0,7, 1,5, 6,0 мН) поверхности эластомерных композитов при облучении ультрафиолетом во времени, от 0 до 12 недель. а) приведённый модуль упругости при различных нагрузках для образца 1, б) приведённый модуль упругости при различных нагрузках для образца 2, в) относительный гистерезис для образца 1, г) относительный гистерезис для образца 2.

Из приведенных на рис.2. диаграмм видно, что при нагрузке 0,7 мН для образца 1 наблюдается некоторое снижение приведенного модуля упругости, а также увеличение относительного гистерезиса (это отношение рассеянной в образце энергии к затраченной на деформацию при наноиндетировании) с увеличением времени облучения. Это говорит о постепенной деструкции поверхности образца. При этом, для образца 2 приведенный модуль упругости проходит через максимум, также как и относительный гистерезис. Следовательно, воздействие УФ-излучения по-разному влияет на микромеханические характеристики образцов 1 и 2. Из полученных данных по микромеханическим характеристикам делаем вывод, что образец 2 более устойчив к УФ-излучению, чем образец 1. Таким образом, добавка частиц породы шунгит в состав эластомерных композитов позволяет несколько повысить устойчивость к воздействию УФ-излучения исследуемых эластомерных композитов.

В ходе экспериментов по наноиндентированию также были получены данные Стер-эффекта – ползучесть при наноиндентировании до и после облучения ультрафиолетом при нагрузке 1,5 мН, рис.3.

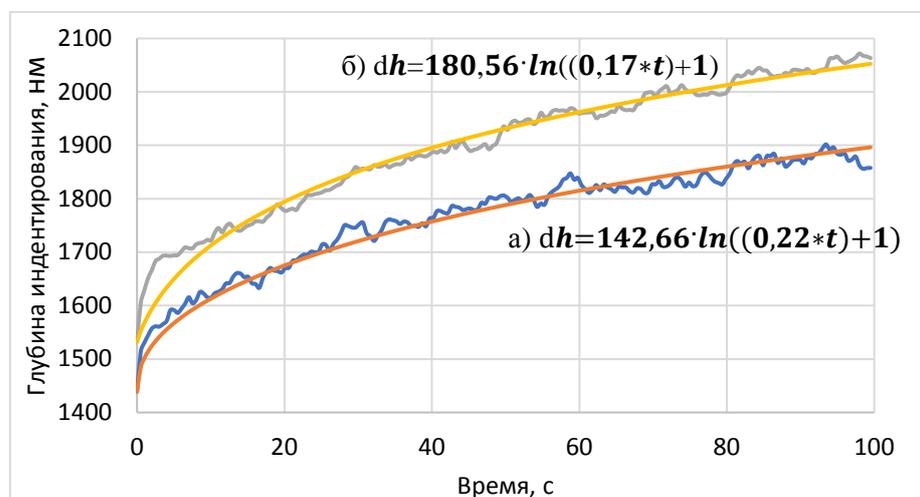


Рис.3. Изменение глубины индентирования при максимальной нагрузке 1,5 мН во времени (эффект ползучести) для образца 01 эластомерного композита; а) до, б) после УФ-облучения. Представлены экспериментальные данные и результаты аппроксимации.

Экспериментальные данные (рис.3) были получены для ненаполненного образца (образец 01), чтобы лучше оценить степень изменения свойств после воздействия УФ-излучения именно эластомерной фазы композита, которая подвергается деструкции. В этом эксперименте максимальная нагрузка фиксируется на 100 секунд и регистрируется изменение глубины индентирования, что характеризует как релаксационные свойства эластомера, так и процессы его разрушения [12]. В нашем случае за 100 секунд мы оцениваем начальную и установившуюся стадии ползучести [13], поэтому полученные данные (рис.3) характеризуют в основном релаксационные процессы в эластомере [12,13].

При воздействии УФ-излучения отмечается увеличение начальной, максимальной глубины индентирования, а также скорости изменения глубины индентирования (наклон кривой), в том числе и на начальном её участке, для образца 01 после УФ-облучения. Были получены коэффициенты для функций (рис.3), описывающих изменение глубины индентирования до и после облучения ультрафиолетом, таким образом, можно количественно описать изменение свойств эластомерного материала. Полученные данные свидетельствуют о процессах деструкции в материале, которые приводят к разрушению макромолекул, а также поперечных связей в эластомерной матрице, что, в том числе, заметно отражается на релаксационных свойствах эластомерных композитов.

Далее оценивали упруго-прочностные свойства эластомерных композитов при растяжении. После того, как получившиеся смеси были отверждены в оптимуме вулканизации, были вырублены образцы лопаток и проведены испытания на разрывной машине Zwick UTS-10. Результаты экспериментов представлены в Таблице 3.

Установлено, что добавление микро- и субмикрочастиц породы шунгит в состав образцов эластомерных композитов несколько снижает напряжение

при растяжении (Таблица 3), прочность при растяжении (Таблица 3), но незначительно, примерно на 10%, что приемлемо с точки зрения конструкционных характеристик. Также установлено, что с добавлением в состав эластомерных композитов частиц породы шунгит относительное удлинение при разрыве и удельная работа деформации при разрушении образцов увеличиваются, но незначительно. При этом показано, что относительный гистерезис на двадцатом цикле увеличивается существенно, на 39%. Максимальное значение относительного гистерезиса и минимальные значения коэффициента вариации получены для образца 3 с добавлением субмикрочастиц породы шунгит (Таблица 3). Таким образом, добавление субмикрочастиц породы шунгит позволяет существенно повысить значения относительного гистерезиса данного класса материалов и при этом обеспечить требуемые упруго-прочностные свойства, поэтому полученные конструкционные характеристики являются перспективными для применения эластомерных композитов в качестве элементов конструкций гасителей колебаний.

Таблица 3.

Упруго-прочностные свойства эластомерных композитов при растяжении.

Свойства	Номер образца			
	01	1	2	3
	Значение (разброс, %)			
Напряжение при удлинении 100%, МПа	0,6 (4,7)	4,0 (1,3)	4,2 (3,5)	4,1 (0,9)
Напряжение при удлинении 200%, МПа	1,1 (6,3)	9,5 (0,14)	8,4 (1,6)	8,2 (1,2)
Напряжение при удлинении 300%, МПа	-	-	12,7 (10,5)	12,4 (1,7)
Прочность при растяжении, МПа	1,7 (8,5)	14,9 (0,9)	13,1 (15,1)	13,3 (2,1)
Относительное удлинение при разрыве, %	292,1 (8,7)	285 (2,4)	313 (12,0)	322 (1,3)
Удельная работа деформации при разрушении, МДж/м <sup>3</sup>	1,39	19,24	20,89	21,75
Относительный гистерезис, 20 цикл, %	9,02	12,42	14,69	17,27

## ВЫВОДЫ

Разработаны эластомерные композиты для применения в конструкциях гасителей колебаний линий электропередач. Установлено, что требуемый комплекс механических свойств данных материалов достигается за счет применения в составе комбинации БК и СКЭПТ, а также добавления субмикрочастиц породы шунгит (5 об.%).

Установлено, что воздействие УФ-излучения по-разному влияет на структуру поверхности и микромеханические свойства образцов в зависимости от состава. При исследовании образцов эластомерных композитов на основе БК и СКЭПТ установлено, что добавление частиц породы шунгит повышает стойкость данных композитов к воздействию УФ-излучения.

Показано, что добавление (5 об.%) субмикрочастиц породы шунгит в состав образцов эластомерных материалов на основе комбинации БК и СКЭПТ позволяет повысить относительный гистерезис данных материалов, и при этом сохранить комплекс упруго-прочностных свойств.

Экспериментальное исследование упруго-прочностных свойств образцов эластомерных композитов показало, что добавление (5 об.%) субмикрочастиц шунгитовой породы в состав данных материалов позволяет минимизировать значения коэффициента вариации, что свидетельствует о более однородной структуре данных композитов даже по сравнению с образцом, наполненным только техническим углеродом.

В экспериментах по наноиндентированию установлено, что ползучесть (Стеер-эффект) образцов эластомерных композитов меняется при воздействии УФ-излучения. Отмечается увеличение скорости и максимальной глубины индентирования при воздействии УФ-излучения на образцы. Получены коэффициенты для функции, описывающей изменение глубины индентирования (внедрения) во времени: до и после УФ-облучения образцов эластомерных композитов, что позволяет количественно оценить изменение свойств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шклярчук Ф.Н., Данилин А.Н. *Нелинейные колебания и галопирование провода с обледенением* // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып.11. – С.188-197.
2. Данилин А.Н., Келбышева Е.С., Курдюмов Н.Н., Рабинский Л.Н., Семенов Н.А. *Моделирование нестационарного гистерезиса в задачах о колебании механических систем.* – М.: Издательство МАИ, 2021. – 164 с.
3. John S. Dick. *Rubber Technology Compounding and Testing for Performance, 3rd edition.* – Munich: Hanser Publishers, 2020. – 800 p.
4. James M. Kelly, Dimitrios A. Konstantinidis. *Mechanics of rubber bearings for seismic and vibration isolation.* – A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2011. – 222 p.
5. Корнев Ю.В., Карнет Ю.Н., Джага А.О., Ликунцова П.А., Широкова Ю.В., *Влияние воздействия ультрафиолетового излучения на комплекс механических свойств эластомерных композитов для применения в конструкциях гасителей колебаний* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2023. – Т.29. – №2. – С.260-271.
6. Karim Bensalem, Mostafa Eesaee, Meysam Hassanipour, Said Elkoun, Eric David, Kodjo Agbossou, Phuong Nguyen-Tri. *Lifetime estimation models and degradation mechanisms of elastomeric materials: A critical review* // Polymer Degradation and Stability. – 2024. – Vol.220. – 110644.
7. Boubakri A., Guermazi N., Elleuch K., Ayedi H.F. *Study of UV-aging of thermoplastic polyurethane material* // Materials Science and Engineering: A. – 2010. – Vol.527. – Iss.7-8. – Pp.1649-1654.
8. Rizwan M., Chandan M.R. *Mechanistic insights into the ageing of EPDM micro/hybrid composites for high voltage insulation application* // Polymer Degradation and Stability. – 2022. – Vol.204. – 110114.
9. Costa P., Ribeiro S., Botelho G., Machado A.V., Mendez S. Lanceros. *Effect of butadiene/styrene ratio, block structure and carbon nanotube content*

- on the mechanical and electrical properties of thermoplastic elastomers after UV ageing* // Polymer Testing. – 2015. – Vol.42. – Pp.225-233.
10. Fischer-Cripps A.C. *Nanoindentation*. New York: Springer, 2011. – 279 p.
  11. Pathak S., Kalidindi S.R. *Spherical nanoindentation stress-strain curves* // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2015. – Vol.91. – Pp.1-36.
  12. Aniskevich K., Starkova O., Jansons J., Aniskevich A. *Long-Term Deformability and Aging of Polymer Matrix Composites*. – Nova Sci. Publ., 2011. – 190 p.
  13. Анискевич К., Старкова О. *Оценка вязкопластической деформации ПЭВП, наполненного многостенными углеродными нанотрубками, с использованием соотношения скоростей реакции* // Механика композитных материалов. – 2021. – Т.57. – №5. – С.823-838.

## REFERENCES

1. Shklyarchuk F.N., Danilin A.N. *Nelinejnye kolebaniya i galopirovanie provoda s obledenением [Nonlinear oscillations and galloping of a wire with icing]*. Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki, 2013, Iss.11, Pp.188-197.
2. Danilin A.N., Kelbysheva E.S., Kurdyumov N.N., Rabinskij L.N., Semenov N.A. *Modelirovanie nestatsionarnogo gisterezisa v zadachakh o kolebanii mekhanicheskikh system [Modeling of non-stationary hysteresis in problems of oscillation of mechanical systems]*. Moskva, Izdatel'stvo MAI, 2021, 164 p.
3. John S. Dick. *Rubber Technology Compounding and Testing for Performance, 3rd edition*. Munich, Hanser Publishers, 2020, 800 p.
4. James M. Kelly, Dimitrios A. Konstantinidis. *Mechanics of rubber bearings for seismic and vibration isolation*. A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2011, 222 p.
5. Kornev Yu.V., Karnet Yu.N., Dzhaga A.O., Likunova P.A., Shirokova Yu.V., *Vliyanie vozdeystviya ul'trafioletovogo izlucheniya na kompleks mekhanicheskikh svoystv ehlastomernykh kompozitov dlya primeneniya v konstruktsiyakh gasitelej kolebanij [Influence of the exposure of uv-radiation on the complex of mechanical properties of elastomer composites for application in designs of vibration damperers]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsii, 2023, Vol.29, No.2, Pp.260-271.
6. Karim Bensalem, Mostafa Eesae, Meysam Hassanipour, Said Elkoun, Eric David, Kodjo Agbossou, Phuong Nguyen-Tri. *Lifetime estimation models and degradation mechanisms of elastomeric materials: A critical review*. Polymer Degradation and Stability, 2024, Vol.220, 110644.
7. Boubakri A., Guermazi N., Elleuch K., Ayedi H.F. *Study of UV-aging of thermoplastic polyurethane material*. Materials Science and Engineering: A, 2010, Vol.527, Iss.7-8, Pp.1649-1654.
8. Rizwan M., Chandan M.R. *Mechanistic insights into the ageing of EPDM micro/hybrid composites for high voltage insulation application*. Polymer Degradation and Stability, 2022, Vol.204, 110114.
9. Costa P., Ribeiro S., Botelho G., Machado A.V., Mendez S. Lancersos. *Effect of butadiene/styrene ratio, block structure and carbon nanotube content on the mechanical and electrical properties of thermoplastic elastomers after UV ageing*. Polymer Testing, 2015, Vol.42, Pp.225-233.
10. Fischer-Cripps A.C. *Nanoindentation*. New York: Springer, 2011, 279 p.
11. Pathak S., Kalidindi S.R. *Spherical nanoindentation stress-strain curves*. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2015, Vol.91, Pp.1-36.

12. Aniskevich K., Starkova O., Jansons J., Aniskevich A. *Long-Term Deformability and Aging of Polymer Matrix Composites*. Nova Sci. Publ., 2011, 190 p.
13. Aniskevich K., Starkova O. *Otsenka vyazkoplasticheskoy deformatsii PEhVP, napolnennogo mnogostennymi uglerodnymi nanotrubkami, s ispol'zovaniem sootnosheniya skorostej reaktsii [Evaluation of viscoplastic deformation of HDPE filled with multi-walled carbon nanotubes using reaction rate relationship]*. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 2021, Vol.57, No.5, Pp.823-838.

*Поступила в редакцию 08 октября 2024 года.*

---

Сведения об авторах:

Корнев Юрий Витальевич – к.т.н., с.н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: [yurikornev@mail.ru](mailto:yurikornev@mail.ru)

Гилязова Рената Фаритовна. – ст.лаб., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: [renata.gilyazova@gmail.com](mailto:renata.gilyazova@gmail.com)

Муромцев Денис Николаевич – асп., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: [muromtsevdn@mail.ru](mailto:muromtsevdn@mail.ru)

Карнет Юлия Николаевна – к.ф.-м.н., в.н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: [iam@iam.ras.ru](mailto:iam@iam.ras.ru)