



ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КОМПЛЕКС МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ*

Корнев Ю.В., Карнет Ю.Н., Джага А.О., Ликунова П.А., Широкова Ю.В.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

В составе гасителей колебаний в различных областях промышленности часто применяются элементы конструкции из эластомерных композитов. Отличительной особенностью эластомерных композитов являются высокие обратимые деформации при малых нагрузках, которые обеспечивают данному классу материалов восприимчивость к воздействию колебаний различной частоты и интенсивности.

В настоящей работе были проведены ускоренные испытания по исследованию влияния УФ-излучения на комплекс упруго-прочностных и упруго-гистерезисных свойств эластомерных композитов на основе бутилкаучука и СКЭПТ, наполненных техуглеродом П-324 с добавлением частиц микрошунгита. Исследовались также ненаполненные составы. Образцы выдерживались под УФ лампой в течение месяца. Исследовались упруго-прочностные свойства до и после облучения образцов эластомерных композитов. Для оценки изменения упруго-гистерезисных свойств поверхности образцов применялся метод наноиндентирования. Изменение структуры поверхности образцов эластомерных композитов до и после УФ облучения контролировалось с помощью оптического микроскопа.

В ходе эксперимента было установлено существенное влияние добавок технического углерода и микрошунгита на физико-механические характеристики образцов. При воздействии УФ-излучения существенные изменения упруго-прочностных свойств наблюдаются у ненаполненных составов. Упруго-прочностные свойства наполненных составов не претерпели существенных изменений. Для наполненных составов на основе бутилкаучука установлена наибольшая прочность, по сравнению с остальными составами. Максимальное значение относительного гистерезиса при индентировании получено для образцов на основе СКЭПТ наполненных техуглеродом и микрошунгитом.

При анализе данных, полученных методом наноиндентирования, выявлено, что добавление микрошунгита замедляет процесс старения образцов под действием УФ-излучения. Установлено, что для образцов эластомерных композитов на основе СКЭПТ и бутил-каучука деструкция полимерной матрицы протекает по разному механизму.

Ключевые слова: эластомерные композиты; гасители колебаний; относительный гистерезис; УФ-излучение; прочность; наноиндентирование

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №22-19-00678.

INFLUENCE OF THE EXPOSURE OF UV-RADIATION ON THE COMPLEX OF MECHANICAL PROPERTIES OF ELASTOMER COMPOSITES FOR APPLICATION IN DESIGNS OF VIBRATION DAMPERERS

Kornev Yu.V., Karnet Yu.N., Dzhaga A.O., Likunova P.A., Shirokova Yu.V

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

ABSTRACT

Structural elements made of elastomeric composites are often used as part of vibration dampers in various industries. A distinctive feature of elastomeric composites is high reversible deformations at low loads, which provide this class of materials with susceptibility to the effects of vibrations of various frequencies and intensities.

In this work, accelerated tests were carried out to study the effect of UV radiation on the complex of elastic-strength and elastic-hysteresis properties of elastomeric composites based on butyl rubber and EPDM filled with carbon black N-324 with the addition of microsclungite particles. Unfilled formulations were also investigated. The samples were kept under a UV lamp for a month. The elastic-strength properties were studied before and after irradiation of samples of elastomeric composites. To assess the change in the elastic-hysteresis properties of the surface of the samples, the nanoindentation method was used. Changes in the structure of the surface of samples of elastomeric composites before and after UV irradiation were monitored using an optical microscope.

During the experiment, a significant effect of carbon black and microsclungite additives on the physical and mechanical characteristics of the samples was established. When exposed to UV radiation, significant changes in the elastic-strength properties are observed in unfilled compositions. The elastic-strength properties of the filled compositions have not undergone significant changes. For filled compounds based on butyl rubber, the highest strength has been established compared to other compounds. The maximum value of the relative hysteresis during indentation was obtained for samples based on EPDM filled with carbon black and microsclungite.

When analyzing the data obtained by nanoindentation, it was found that the addition of microsclungite slows down the aging process of samples under the action of UV radiation. It has been established that for samples of elastomeric composites based on EPDM and butyl rubber, the destruction of the polymer matrix proceeds according to a different mechanism.

Keywords: elastomer composites; vibration dampers; relative hysteresis; UV radiation; strength; nanoindentation

ВВЕДЕНИЕ

Существует проблема уменьшения уровня колебаний конструкций, во многом она связана с необходимостью повышения прочности и снижения материалоемкости конструкций и выполнением технологических требований, предъявляемых условиями эксплуатации. Эта проблема возникает в различных областях техники: промышленном и гражданском строительстве, авиастроении, тяжелом, транспортном и энергетическом машиностроении, приборостроении и т.п.

К настоящему времени известны различные методы и средства борьбы с недопустимыми колебаниями конструкций, например, изменение жесткостных и инерционных параметров конструкций, применение виброизоляции, повышение

демпфирующих свойств с использованием материалов и конструкций с высокой поглощающей способностью и т.д. Но особое место среди них занимают гасители колебаний [1,2]. Их достоинством является достаточно простое получение желаемого эффекта уменьшения уровня колебаний при сравнительно малых затратах. Так же 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.

Гасители колебаний являются эффективным средством уменьшения колебаний различных конструкций при действии на них динамических нагрузок от машин или ветровой нагрузки. При работе гасителя энергия колебаний защищаемой конструкции передается гасителю, который благодаря этому колеблется с повышенной амплитудой.

В составе гасителей колебаний в различных областях промышленности часто применяются элементы конструкции из эластомерных композитов. Отличительной особенностью эластомерных композитов является высокие обратимые деформации при небольших нагрузках (модуль упругости до 50 МПа) которые обеспечивают данному классу материалов восприимчивость к воздействию колебаний малой частоты и интенсивности [3]. В состав эластомерных композитов входят полимерная основа (каучуки и их смеси) а также упрочняющие наполнители (как правило, частицы высокодисперсного диоксида кремния или углерода), а также ряд органических и неорганических компонентов – ингредиентов.

К гасителям колебаний предъявляются высокие требования как по механическим свойствам, так и по устойчивости к внешним воздействиям. При этом длительное воздействие ультрафиолетового излучения существенно влияет на комплекс свойств эластомерных композитов и требует дополнительного изучения [4-7].

Учитывая вышесказанное, целью настоящей работы является исследование влияния воздействия ультрафиолетового излучения на комплекс физико-механических свойств эластомерных композитов с целью их применения в составе конструкций гасителей колебаний

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе изготовление резиновых смесей проводилось в ИПРИМ РАН с использованием смесителя НААКЕ PolyLab Rheomix 3000 QC с рабочим объемом камеры 379 см³, 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°С.

Были исследованы составы на основе каучука СКЭПТ-50 и Бутил каучука БК-1675Н (БК). Данные каучуки 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 усиливающего (упрочняющего) компонента в смесь был добавлен технический углерод П-324 (ТУ), далее вводился ещё один наполнитель – микродисперсный шунгит (средний диаметр частиц порядка 5 мкм), т.е. были получены гибридно-наполненные образцы эластомерных композитов (2 наполнителя различной дисперсности: ТУ П-324 и микрошунгит)

для улучшения сопротивления воздействию ультрафиолетового излучения и износостойкости полученных резин.

Составы и номера образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Составы исследуемых образцов.

Ингредиенты		Номер образца / масс.ч.					
		1	2	3	4	5	6
1	Бутил Каучук (БК-1675Н)	100	100	–	–	100	–
2	Каучук СКЭПТ-50	–	–	100	100	–	100
3	Вулканизирующая группа	5	5	5,5	5,5	5	5,5
4	Оксид цинка	5	5	5	5	5	5
5	Техуглерод П-324	–	50	–	50	50	50
6	Шунгит микро	–	–	–	–	20	20

Исследование кинетики отверждения (вулканизации) проводилось на безроторном реометре Монсанто (ГОСТ 12535-67), кинетики набухания по ГОСТ 1817-2016.

Упруго-прочностные свойства определяли на универсальной разрывной машине UTS-10 по ГОСТ (ГОСТ 270-75). Скорость деформирования 500 мм/мин, комнатная температура. Контроль деформации осуществлялся с помощью датчиков механического экстензометра (L-датчика), нагрузка контролировалась датчиком нагрузки на верхней траверсе. Полученные зависимости $P(\epsilon)$ 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.

Упруго-гистерезисные свойства определялись на высокоточном измерительном комплексе NanoTest 600 с применением сферо-конического индентора с углом при вершине 60° и радиусом закругления 10 мкм. Индентирование проводилось в режиме контролируемой нагрузки, с преднагрузкой 0,01 мН, максимальная нагрузка 1,5 мН. Снимались зависимости нагрузка-глубина индентирования, на стадиях нагрузки и разгрузки. Для расчета приведённого модуля упругости экспериментальные данные обрабатывались по методу Герца (multipoint) [8].

Источником УФ-излучения являлась ультрафиолетовая лампа TUV 15W/G15 LL фирмы «PHILIPS» мощностью 15 W, длина волны 253,7 нм, удельная мощность облучения не менее 10,0 Вт/м². Длительность облучения составляла 1 месяц (4 недели).

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

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

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.

Таблица 2.

Данные кинетики отверждения.

Свойства/№ образца	1	2	3	3 (170)	4	5	6	6 (170)
M_{\min} [dN·m]	9,45	13,99	8,21	8,17	11,82	15,76	12,79	12,79
M_{\max} [dN·m]	19,09	33,08	15,69	16,89	28,67	38,11	30,99	29,91
t_{ind} [min]	5	2,9	13	8,02	6	3,2	5,4	3,9
t_{90} [min]	18,5	12	22,5	16,4	19,99	18,5	19,5	11,6
v [%/min]	7,4	11	10,5	11,9	7,15	6,5	7,1	13

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

Из таблицы 2 видно, что оптимум отверждения варьируется от 12 до 22 минут, что является типичным значением для большинства эластомерных композитов. Максимальная скорость наблюдается у составов с добавлением ТУ (образцы 2, 4), а добавление шунгита снижает скорость вулканизации в случае с бутилкаучуком (образец 5).

С целью оценки плотности (частоты) поперечных связей после вулканизации проводились испытания по оценке стойкости резин к набуханию в растворителе (бензол). Результаты экспериментов представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Данные кинетики отверждения.

Образец	Растворитель	$P_{исх}$, г	$P_{раст}$, г	$P_{сух}$, г	Q_{\max} , %	Золь, %
1	Бензол	4,910	10,370	4,950	111,20	-0,81
2		5,870	10,070	5,910	71,55	-0,68
3		4,565	14,540	4,175	218,51	9,34
3 170°		4,540	13,990	4,200	208,15	8,10
4		5,540	12,590	5,170	127,26	7,16
5		6,245	10,020	6,330	60,45	-1,34
6		5,930	12,300	5,575	107,42	6,37
6 170°		5,915	12,240	5,580	106,93	6,00

Из данных таблицы 3 для составов на основе СКЭПТ наблюдается высокий процент золя (экстрагируемых компонентов) что говорит о минимальной плотности (частоты) межмолекулярных связей. Это может негативно сказаться

на упруго-прочностных свойствах, но, в то же время, позволит повысить количество рассеянной энергии в образцах при циклической деформации.

В ходе экспериментов определяли действительную составляющую комплексного динамического модуля сдвига в зависимости от относительной деформации (эффект Пэйна [9,10]) для резиновых смесей с различными наполнителями.

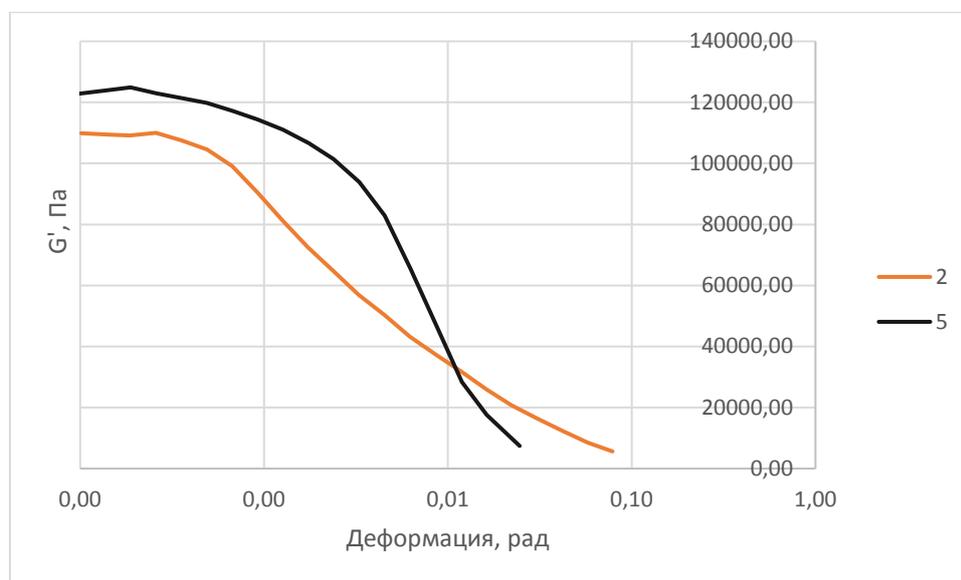


Рис.1. Зависимость действительной составляющей комплексного динамического модуля упругости (G') от амплитуды деформации (γ): образец 2 – БК+ТУ, образец 5 – БК+ТУ+микрошунгит.

Полученные результаты, представленные на рис.1, говорят о незначительном росте значений действительной составляющей комплексного динамического модуля упругости (G') с добавлением частиц микрошунгита в состав образцов эластомерных композитов на основе бутилкаучука. Тем не менее, для образца 5 отмечается более выраженное снижение значений G' при больших значениях амплитуды деформации, что говорит о значительном эффекте Пэйна, видимо в связи с большей объемной концентрацией наполнителей в смеси (ТУ+шунгит), чем в случае образца 2, где один наполнитель – ТУ.

Далее оценивались упруго-прочностные свойства эластомерных композитов при растяжении, до УФ-облучения. После того, как получившиеся смеси были отверждены в оптимальном режиме вулканизации, были вырублены образцы лопаток и проведены испытания на разрывной машине UTS-10. Результаты экспериментов представлены на рис.2 и в табл.4.

На графике рис.2 и в таблице 4 видно, как меняются упруго-прочностные свойства эластомерных композитов до УФ-облучения после введения в их состав наполнителей. Максимальные значения прочности получены для составов на основе БК с добавлением техуглерода П-324 и микрошунгита (образец 2 и 5), средний уровень прочности получен для наполненных составов на основе СКЭПТ (образцы 4 и 6). Минимальные значения прочности наблюдаются для ненаполненных составов (образцы 1 и 3).

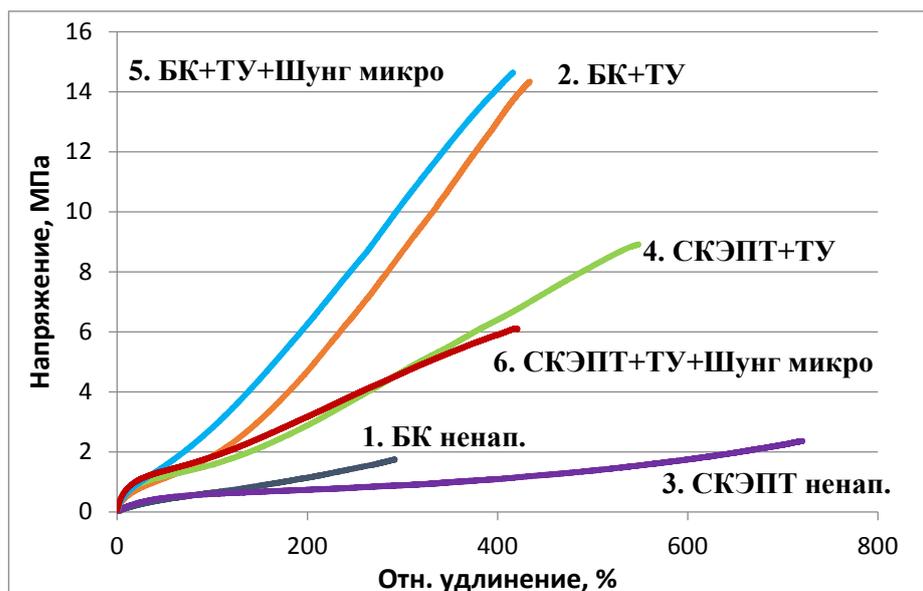


Рис.2. Упруго-прочностные свойства эластомерных композитов при растяжении, образцы 1-6, до УФ-облучения.

Таблица 4.

Упруго-прочностные свойства эластомерных композитов при растяжении.

№ Образца	1	2	3	4	5	6
Показатели	Значение показателя (коэффициент вариации, %)					
Свойства до УФ-облучения						
Напряжение при удл. 300%, МПа	–	8,7 (6,3)	0,9 (3,7)	4,7 (2)	10,3 (4,5)	4,6 (1,8)
Прочность при растяжении, МПа	1,7 (8,5)	14,3 (15,7)	2,4 (12,6)	8,9 (1)	14,6 (3,7)	6,1 (5,3)
Относительное удлинение, %	292,1 (8,7)	434 (13,1)	720,7 (7,7)	548,4 (11,1)	416,3 (3,4)	421,1 (5,8)
Удельная работа деформации на разрушение, МДж/м ³	1,39	26,5	8,1	24,1	28,9	14,3
Свойства после 4 недель УФ-облучения						
Напряжение при удл. 300%, МПа	1,7 (6,7)	9,3 (2,5)	1,0 (2,5)	4,6 (0,8)	10,5 (1,3)	4,9 (1,7)
Прочность при растяжении, МПа	2,3 (9,7)	17,9 (2,0)	1,3 (4,6)	9,6 (2,0)	14,5 (1,5)	6,8 (0,6)
Относительное удлинение, %	360,6 (8,9)	505,3 (3,5)	421,4 (5,2)	576,1 (6,0)	409,6 (1,1)	438,2 (1,0)
Удельная работа деформации на разрушение, МДж/м ³	2,6	40,17	3,52	24,83	28,55	16,40

После УФ-облучения эластомерных композитов в течение 4 недель, отмечается (табл.4) увеличение прочности при разрыве и относительного удлинения для образцов 1 (БК), 2 (БК+ГУ). Для образца 3 (СКЭПТ), наоборот отмечается уменьшение значения прочности и относительного удлинения при разрыве. На составах с шунгитом (образцы 5 и 6), а также на основе СКЭПТ с техническим углеродом П-324 (образец 4), значения прочности и относительного удлинения при разрыве после УФ-облучения практически не изменяются. После воздействия УФ-излучения, удельная работа деформации на разрушение возрастает для образцов 1 и 2, на основе БК. Это связано с механизмом разрушения полимерной матрицы при воздействии УФ-излучения. Видимо, это следствие разрушение макромолекул и формирование более длинных межмолекулярных связей за счет рекомбинации образующихся радикалов, однако этот механизм требует дополнительного изучения. Для ненаполненного образца 3 на основе СКЭПТ отмечается заметное снижение удельной работы деформации на разрушение после воздействия УФ-излучения. Это так же связано с механизмом разрушения полимера и здесь видно, что он заметно отличается от образца 1 (ненаполненный состав на основе БК). Приведенные в таблице 4 данные показывают, что введение наполнителя на основе углерода (ГУ П-324), а также добавка шунгита, позволяют повысить устойчивость эластомерных композитов, исследованных в настоящей работе, к воздействию УФ-излучения.

Следующим этапом работы было исследование эластомерных композитов методом наноиндентирования. Результаты экспериментов до и после УФ-облучения представлены в таблице 5. Следует отметить увеличение значений приведённого модуля упругости при добавлении наполнителей (техуглерод и шунгит) в состав эластомерных композитов как на основе БК, так и на основе СКЭПТ. После УФ-облучения для образцов 1, 2, 3, 5 отмечается уменьшение твердости. Приведённый модуль упругости после УФ-облучения несколько снижается для образцов 2 и 5 (на основе БК), для образцов 3, 4, 6 (на основе СКЭПТ) несколько возрастает, что говорит о различном механизме деструкции полимерной матрицы для СКЭПТ и БК. Относительный гистерезис существенно возрастает для образцов 1, 3, 5, в этих образцах процесс деструкции эластомерной матрицы протекает наиболее интенсивно. Для образцов 4 и 6 интенсивность деструкция под воздействием УФ-облучения минимальна.

Таблица 5.

Упруго-гистерезисные свойства эластомерных композитов при наноиндентировании.

№ Образца	1	2	3	4	5	6
Параметр	Значение (разброс, %)					
Свойства до УФ-облучения						
Твёрдость, МПа	47,7 (41,9)	28,4 (9,1)	35,6 (45,1)	22,4 (20,6)	27,6 (26,6)	18,4 (16,9)
Приведённый модуль упругости, МПа	175,7 (12,2)	186,6 (10,2)	146,1 (14,4)	175,2 (19,25)	194,7 (12,3)	167,2 (17)
Относительный гистерезис при наноиндентировании	0,2	0,5	0,4	0,6	0,5	0,6

Свойства после УФ-облучения						
Твёрдость, МПа	23,6 (10,3)	26,0 (16,7)	15,4 (9,6)	25,3 (15,0)	16,9 (16,1)	23,6 (10,3)
Приведённый модуль упругости, МПа	182,0 (16,4)	123,7 (9,9)	164,0 (8,0)	211,2 (11,7)	171,6 (14,5)	182,0 (16,4)
Относительный гистерезис при наноиндентировании	0,6	0,5	0,7	0,6	0,7	0,6

В ходе экспериментов по наноиндентированию осуществлялось выдерживание индентора в течение 100 секунд при максимальной нагрузке, что позволяет оценить ползучесть образцов эластомерных композитов. Наибольшее изменение свойств при воздействии УФ-облучения наблюдается для образца 3 (СКЭПТ ненаполненный). Для данного образца на рис.3 представлены зависимости глубины индентирования во времени. Отмечается увеличение начальной, максимальной глубины индентирования, а также скорости изменения глубины индентирования (наклон кривой), в том числе и на начальном её участке, для образца 3 после УФ-облучения. Полученные данные свидетельствуют о процессах деструкции в материале, который приводит к разрушению макромолекул, а так же поперечных связей в эластомерной матрице.

Кроме механических свойств эластомерных композитов оценивалось изменение структуры поверхности исследованных образцов до и после УФ-облучения с помощью оптического микроскопа Альтами МЕТ 5Т. Результаты экспериментов представлены на рис.4. Из полученных изображений видно, что процесс деструкции эластомерной матрицы для образцов на основе БК и СКЭПТ протекает по различному механизму.

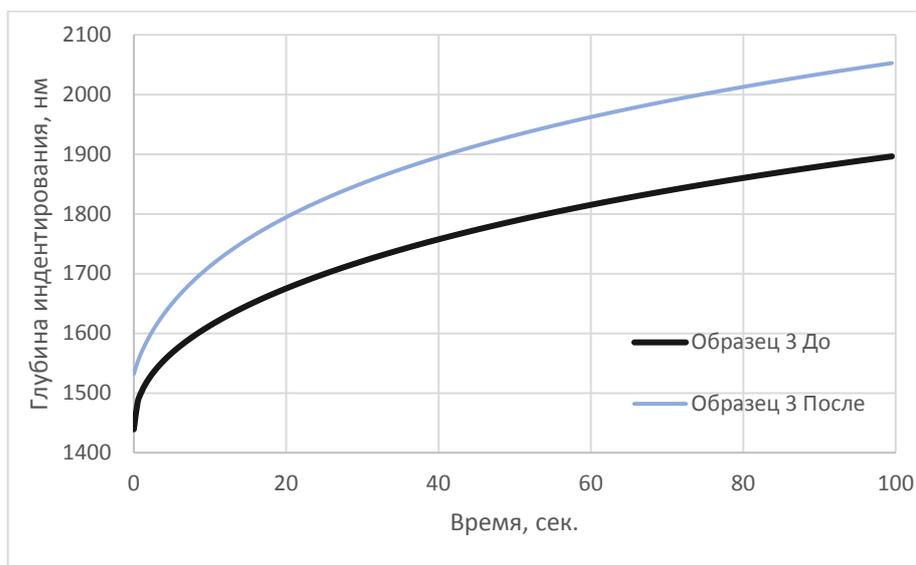


Рис.3. Изменение глубины индентирования при максимальной нагрузке 1,5 мН во времени (эффект ползучести) для образца 3 эластомерного материала на основе СКЭПТ до и после УФ-облучения.

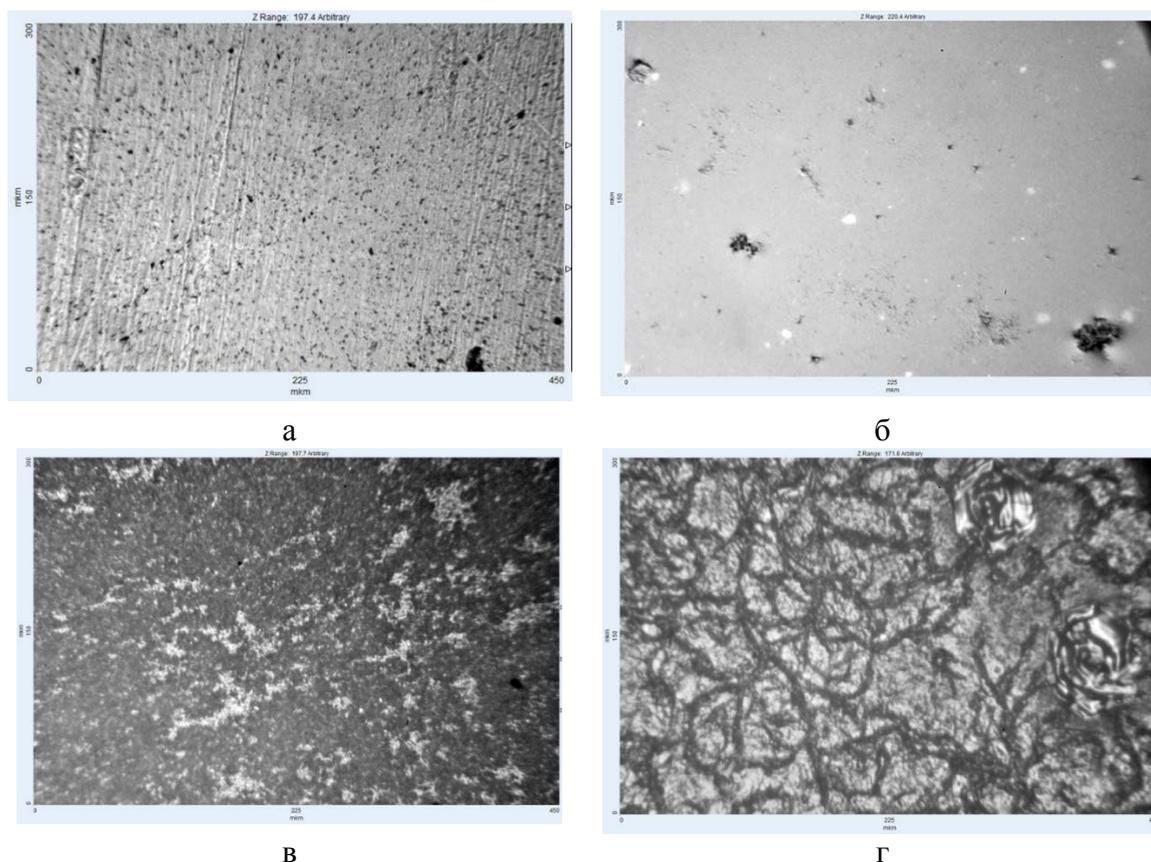


Рис.4. Изменение структуры поверхности эластомерных композитов при УФ-облучении для образца 1 (на основе БК): а – до облучения, б – после облучения. И для образца 3 (на основе СКЭПТ): в – до облучения, г – после облучения. Сканы 300х450 мкм.

Так, поверхность образца 1 практически полностью разрушается и превращается в клейкую массу, т.е. происходит активная деструкция макромолекул под воздействием УФ-излучения (см. рис.4а,б). Поверхность образца 3 (на основе СКЭПТ) разрушается менее интенсивно (см. рис.4в,г), но на ней появляются крупные трещины, которые не наблюдаются у образца 1.

ВЫВОДЫ

1) При исследовании эластомерных композитов на основе СКЭПТ и БК установлено, что под воздействием УФ-излучения со временем относительный гистерезис при наноиндентировании увеличивается, а твердость снижается, что говорит о процессе деструкции поверхностного слоя образцов. А в случае образцов 1 и 3 не только поверхностного слоя, но и материала в объеме.

2) Полученные данные о деструкции поверхности образцов подтверждаются данными оптической микроскопии при исследовании образцов до и после облучения. Показано, что механизм деструкции отличается в составах на основе БК и СКЭПТ.

3) Показано, что введение наполнителей в составы эластомерных композитов приводит к заметному увеличению относительного гистерезиса при наноиндентировании.

4) Установлено, что среди наполненных образцов максимальной прочностью обладают составы на основе бутил каучука, а максимальный относительный гистерезис при наноиндентировании получен для образца 6 на основе СКЭПТ с добавлением ТУ и микрошунгита.

5) Показано, что добавление шунгита в состав эластомерных композитов на основе СКЭПТ замедляет процесс старения образцов при воздействии УФ-облучения.

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.: ил.
3. Резниченко С.В., Морозов Ю.Л. *Большой Справочник Резинщика. Часть 1. Каучуки и ингредиенты.* – М.: ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ», 2012. – 744 с.; ил.
4. Резниченко С.В., Морозов Ю.Л. *Большой Справочник Резинщика. Часть 2. Резины и резинотехнические изделия.* – М.: ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ», 2012. – 648 с.; ил.
5. Rizwan M. and 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. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.110114
6. Costa P., Ribeiro S., Botelho G., Machado A.V., Lanceros Mendez S. *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. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2015.02.002
7. Bhowmick A.K., White J.R. *Thermal, UV- and sunlight ageing of thermoplastic elastomeric natural rubber-polyethylene blends* // Journal of materials science. – 2002. – Vol.37. – Pp.5141-5151.
8. Fischer-Cripps A.C. *Nanoindentation.* – New York: Springer, 2011. – 282 p. DOI 10.1007/978-1-4419-9872-9_10
9. Wang M.-J. *Effect of Polymer-Filler and Filler-Filler Interactions on Dynamic Properties of Filled Vulcanizates* // Rubber Chem. Technol., Rubber reviews. – 1998. – Vol.71. – No.3. – Pp.520-589.
10. Roland C.M. *Reinforcement of Elastomers* // Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. – 2016. – Pp.1-9.

REFERENCES

1. Shklyarchuk F.N., Danilin A.N. *Nelinejnye kolebaniya i galopirovanie provoda s obledeneniem [Nonlinear oscillations and galloping of the iced wire]*. 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 unsteady hysteresis in problems of oscillation of mechanical systems]. Moskva, Izdatel'stvo MAI, 2021, 164 p.
3. Reznichenko S.V., Morozov Yu.L. *Bol'shoj Spravochnik Rezinshhika. Chast' 1. Kauchuki i ingredienty [A Large Guide Of The Rubber Band. Part 1. Rubbers and ingredients]*. Moskva, OOO "Izdatel'skij tsentr "Tekhinform" MAI", 2012, 744 p.
 4. Reznichenko S.V., Morozov Yu.L. *Bol'shoj Spravochnik Rezinshhika. Chast' 2. Reziny i rezinotekhnicheskie izdeliya [A Large Guide Of The Rubber Band. Part 2. Rubbers and rubber products]*. Moskva, OOO "Izdatel'skij tsentr "Tekhinform" MAI", 2012, 648 p.
 5. Rizwan M. and 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.
 6. Costa P., Ribeiro S., Botelho G., Machado A.V., Lanceros Mendez S. *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.
 7. Bhowmick A.K., White J.R. *Thermal, UV- and sunlight ageing of thermoplastic elastomeric natural rubber-polyethylene blends*. Journal of materials science, 2002, Vol.37, Pp.5141-5151.
 8. Fischer-Cripps A.C. *Nanoindentation*. New York: Springer, 2011, 282 p.
 9. Wang M.-J. *Effect of Polymer-Filler and Filler-Filler Interactions on Dynamic Properties of Filled Vulcanizates*. Rubber Chem. Technol., Rubber reviews, 1998, Vol.71, No.3, Pp.520-589.
 10. Roland C.M. *Reinforcement of Elastomers*. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2016, Pp.1-9.

Поступила в редакцию 14 апреля 2023 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

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

Джага Артем Олегович. – инж.-исслед., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Ликунова Полина Александровна – студ., ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия

Широкова Юлия Васильевна – студ., ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия