

НЕЛИНЕЙНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В НАПОЛНЕННЫХ ЭЛАСТОМЕРАХ¹

Зезин Ю.П. Ломакин Е.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Представлены результаты экспериментального исследования релаксационных свойств эластомерного композита на основе гидрированного нитрил-бутадиенового каучука, упрочненного наночастицами технического углерода N-110. Испытания материала на релаксацию напряжений при растяжении проведены в широком диапазоне значений деформации при двух уровнях температуры – 20°C и 50°C. На основе полученных экспериментальных данных показано, что релаксационный модуль исследуемого материала (отношение текущего значения напряжения к заданной величине деформации) существенно зависит от деформации. Для описания полученных экспериментальных данных приняты нелинейные определяющие соотношения наследственного типа, предполагающие введение дополнительных функций для учета влияния деформаций или напряжений на вязкоупругие свойства материала. Использование такого подхода позволило представить экспериментальные кривые релаксации, полученные при различных значениях деформации, в виде обобщенных зависимостей приведенного релаксационного модуля от времени. Данные зависимости использованы для идентификации характеристик вязкоупругого поведения материала. Влияние температуры на вязкоупругие свойства композита учтено на основе метода температурно-временной аналогии.

Ключевые слова: эластомеры наполненные; релаксация напряжений; вязкоупругость; определяющие соотношения; температуры; эксперименты

NONLINEAR STRESS RELAXATION IN FILLED ELASTOMERS

Zezin Yu.P., Lomakin E.V.

Lomonosov Moscow state university, Moscow, Russia

SUMMARY

The results of investigation of nonlinear viscoelastic properties of filled elastomer on the base of nitril-butadiene rubber filled by nanoparticles of technical carbon N-110 are presented. The tests of material on the stress relaxation under tension were carried out in wide range of deformations at two values of temperature – 20°C and 50°C. On the base of obtained experimental data it was shown that the relaxation modulus of the investigated material (the ratio of current value of stress to given value of strain) dependences essentially on strain. The inherited type nonlinear constitutive equations were taken to description of obtained experimental data. These equations suppose the introduction of added functions to take into account of the influence of strain on the viscoelastic properties of material. The use of this approach enables us to represent

¹ Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 15-08-03604).

of the experimental relaxation curves at different values of strain in the form of generalized dependencies of the reduced relaxation modulus on time. These dependencies were used to identification of characteristics of viscoelastic behavior of material. The influence of temperature on the viscoelastic properties of material was taken into account on the base of the time-temperature analogy method.

Key words: filled elastomers; stress relaxation; viscoelasticity; constitutive equations; temperature; experiments

ВВЕДЕНИЕ

Незаполненные каучуки являются гиперупругими материалами, механические свойства которых не зависят от времени или скорости приложения нагрузки. Тем не менее, в различных отраслях современной техники широко используются наполненные полимерные системы на основе каучуков. Введение в состав эластомеров дисперсных частиц неорганических наполнителей приводит к существенному повышению деформационных характеристик и прочности эластомеров. Уменьшение размера частиц наполнителя приводит к более высоким механическим характеристикам эластомеров. Влияние размера частиц наполнителя на свойства подробно обсуждается в работе [1]. В частности, отмечается, что введение зернистого наполнителя в состав каучуков приводит к увеличению их жесткости и прочности в несколько раз. Использование в качестве наполнителя наноразмерных частиц (в том числе и частиц технического углерода) приводит к увеличению модуля Юнга и прочности материалов в десятки раз. При этом эластомеры, наполненные наночастицами, сохраняют предельную деформацию, характерную для незаполненных каучуков. В конечном счете, упрочнение каучуков наноразмерными частицами дает возможность достигать более высоких значений механических характеристик эластомерных материалов и установить объемное содержание частиц для достижения требуемого уровня прочности и жесткости композита.

Эластомерные нанокомпозиты широко применяются в различных отраслях современной техники. Силиконовые каучуки, упрочненные наноразмерными частицами диоксида кремния (аэросил) используются в эндопротезировании и медицинском оборудовании. Многочисленные каучуки с техническим углеродом в качестве усиливающего наполнителя широко применяются для производства различных резинотехнических изделий. Введение наночастиц в состав резиновых смесей приводит к формированию упорядоченной пространственной сетки. При этом молекулярная подвижность полимерных цепей в полной мере не подавляется. В результате прочность и жесткость эластомерных композитов с наноразмерным наполнителем многократно возрастают при сохранении высокой эластичности исходного каучука. К основным недостаткам наполненных эластомеров следует отнести их ярко выраженное вязкогиперупругое поведение [2]. Основной причиной вязкоупругой природы сопротивления эластомерных композитов механическим нагрузкам является процесс накопления повреждений при деформировании в виде разрушения связей на границе полимер-наполнитель и разрыв перенапряженных молекулярных цепей каучука. В результате деформирование наполненных эластомеров сопровождается интенсивными процессами релаксации напряжений.

Элементы конструкций из полимерных материалов могут эксплуатироваться в напряженном состоянии длительное время. Во многих случаях

работоспособность таких деталей определяется процессами релаксации напряжений в материале. В частности, безопасная эксплуатация уплотнений зависит от уровня напряжений на поверхности контакта между уплотняемым элементом и уплотнительной манжетой или прокладкой. Результаты экспериментального исследования влияния релаксационных процессов в наполненном эластомере на работоспособность фланцевого уплотнения трубопровода представлена в работе [3]. Показано, что усилие затяжки фланцевого соединения с уплотняющей прокладкой из наполненного эластомера может уменьшаться на величину до 50% в течение пяти минут.

Надежная эксплуатация пакерного уплотнения нефтяных скважин также зависит от релаксационных процессов в наполненном эластомере уплотняющей манжеты. При установке уплотнения задается смещение манжеты пакера, которое остается постоянным в течение длительного времени. Работоспособность уплотнения определяется величиной напряжений на поверхности контакта между уплотнением и стенкой трубы [4]. В результате протекающих в материале манжеты релаксационных процессов контактное напряжение постоянно уменьшается и может достигнуть критического уровня.

Существенная зависимость релаксационных характеристик наполненных эластомеров от уровня деформации не позволяет использовать для оценки процесса падения напряжений в элементах уплотнений соотношения линейной теории вязкоупругости. Эти соотношения предполагают независимость релаксационного модуля материала от деформации. В настоящее время известно большое число исследований нелинейного поведения наполненных эластомеров и нелинейных соотношений теории вязкоупругости. обстоятельный обзор последних работ в этой области дан в [5]. В данной работе отметим наиболее значительные исследования последнего времени. Феноменологические определяющие соотношения [6,7] позволяют описать основные эффекты нелинейного деформирования и реакцию вязкоупругих материалов на различные внешние воздействия.

Более перспективная эндохронная теория [8] позволяет учесть влияние различных факторов нагружения в рамках единого подхода. Обобщение эндохронной теории на случай конечных деформаций представлено в [9]. Дальнейшее развитие теории [10] привело к соотношениям, позволяющим не только учесть влияние гидростатического давления и температуры на свойства материала, но также оценить уровень накопления повреждений в материале в процессе деформирования. Экспериментальная проверка указанных обобщений показала, что эндохронный подход дает возможность достаточно полно описывать различные особенности механического поведения высоконаполненных полимерных систем. При этом определяющие соотношения включают значительное число функций и параметров, определение которых связано с большим объемом экспериментальных исследований.

Эластомерные композиты, используемые для элементов различных уплотнений, часто проявляют существенный разброс механических характеристик в пределах 10-15%. В этой связи для подобных материалов повышение точности описания их механического поведения за счет увеличения объема экспериментальных исследований не всегда оправдано. Более целесообразным в этом случае представляется разработка более простых определяющих соотношений, позволяющих описывать наиболее существенные проявления нелинейного поведения на основе ограниченного объема стандартных испытаний материала.

Целью данной работы является исследование нелинейных вязкоупругих свойств эластомерного композита на основе гидрированного нитрил-бутадиенового каучука, широко применяющегося для изготовления уплотняющих элементов различных устройств. Усиливающим наполнителем в этом материале является технический углерод N-110 с содержанием около 50% по массе. Представлены результаты испытаний композита на релаксацию напряжений в широком диапазоне деформаций при двух значениях температуры – 20°C и 50°C. Для описания зависимости релаксационных характеристик материала от деформации рассмотрено соответствующее нелинейное определяющее соотношение теории вязкоупругости. На основе полученных экспериментальных данных определены параметры и материальные функции, входящие в принятые соотношения.

1. МАТЕРИАЛ

В данной работе проведено экспериментальное исследование релаксационных свойств эластомерного композита на основе гидрированного нитрил-бутадиенового каучука, содержащего в качестве усиливающего наполнителя 50% по массе технического углерода марки N 110. Этот наполнитель характеризуется узким распределением частиц по размерам в пределах 20-25 нм с удельной поверхностью $1.25 \cdot 10^5$ м²/кг и истинной плотностью 1850 кг/м³. Плотность композита составляет 1220 кг/м³. Подобные материалы широко используются для изготовления манжет пакерного уплотнения нефтяных скважин и различных уплотнительных элементов ответственных узлов современной техники. Материалы для исследований поставлялись в виде пластин 150x150 мм толщиной около 2 мм.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Испытания композита на растяжение проведены на образцах-лопатках с длиной рабочей части 40 мм. Образцы вырезались из пластин материала с применением специального шанцевого ножа соответствующей формы. Испытания проведены с использованием специальной электромеханической установки [11], позволяющей задавать режим испытания материала при постоянной скорости перемещения активного захвата. При этом нагружение образца может осуществляться в широком диапазоне значений скорости деформации: от 10^{-6} до 10^{-2} с⁻¹. Регистрация растягивающего усилия в процессе испытания, осуществлялась с использованием тензометрической системы измерения, состоящей из тензометрического динамометра, тензодатчика которого подключаются по мостовой схеме к цифровому тензометрическому усилителю типа Spider и персональному компьютеру для визуализации и автоматической обработки экспериментальных данных. Деформация образца в процессе испытания определялась по перемещению активного захвата. При этом использовалось эффективное значение длины рабочей части образца, которое определялось на основе сопоставления тарировочных измерений деформации «по базе» и «по захватам». Установка оснащена термокамерой, позволяющей проводить испытания материалов в широком диапазоне значений температуры: от -50°C до 200°C. Для каждого режима испытаний использовалось по три образца. Расхождение между значениями напряжения в испытаниях с одинаковыми режимами нагружения не

превосходили 10%. Результаты испытаний представлены кривыми релаксации напряжений при различных уровнях деформации для двух значений температуры, 20°C и 50°C.

Длительные испытания на релаксацию напряжений при растяжении проведены в соответствии с методикой, описанной в работе [12]. Особенностью методики является использование приспособления для деформирования образца в виде жесткой рамы с узлом нагружения его растягивающим усилием до заданного уровня деформации. Приспособление позволяет длительное время выдерживать образец при постоянной деформации и периодически измерять значения релаксирующей нагрузки.

3. ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ ДЕФОРМАЦИИ НА РЕЛАКСАЦИОННЫЙ МОДУЛЬ ИССЛЕДУЕМОГО КОМПОЗИТА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

В результате испытаний материала получена серия зависимостей растягивающего усилия от времени. Экспериментальные данные представлены в виде зависимостей от времени релаксационного модуля композита - отношения текущего значения условного напряжения σ к значению деформации ε_0 , при котором проводилось испытание.

На рис.1 приведена серия зависимостей релаксационного модуля от времени, полученных при различных уровнях деформации ε_0 при температуре 20°C.

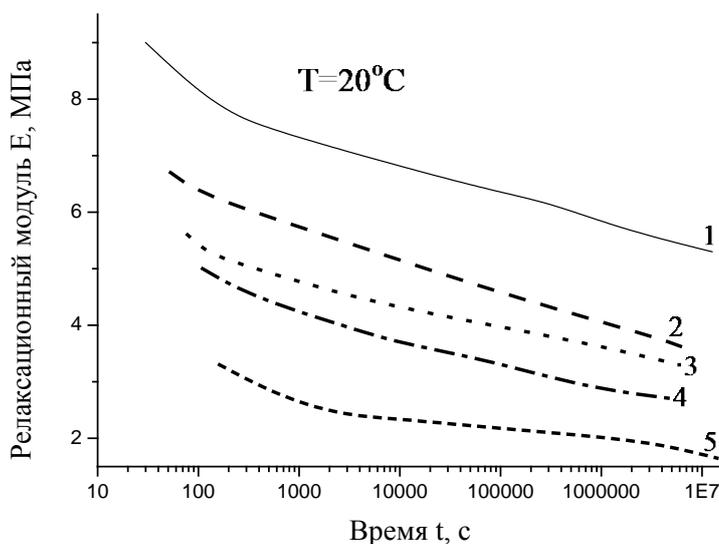


Рис.1. Экспериментальные зависимости релаксационного модуля E от времени для исследуемого наполненного эластомера при температуре 20°C и различных значениях деформации: 1 – 0,105; 2 – 0,185; 3 – 0,286; 4 – 0,38; 5 – 0,56.

На рис.2 представлена серия аналогичных зависимостей, полученных при температуре испытаний 50°C. Из представленных данных видно, что релаксационный модуль исследуемого композита существенно зависит от заданного уровня деформации. Соотношения линейной теории вязкоупругости предполагают независимость релаксационного модуля материала от деформации. Для описания этого вида нелинейности релаксационных свойств эластомерного композита возможно использовать простое соотношение нелинейной теории

вязкоупругости, которое для случая одноосного растяжения принимает следующий вид [13]

$$\sigma(t) = E_0 \left[\varepsilon \varphi(\varepsilon) - \int_0^t \Gamma(t-\tau) \varepsilon(\tau) \varphi(\varepsilon) d\tau \right] \quad (1)$$

где: E_0 – мгновенный модуль упругости; $\Gamma(t-\tau)$ – ядро релаксации; $\varphi(\varepsilon)$ – материальная функция, определяющая влияние уровня деформации на релаксационные свойства композита; τ – переменная интегрирования.

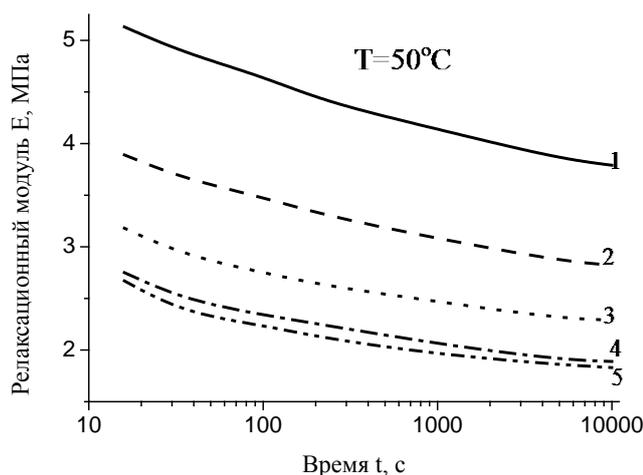


Рис.2. Экспериментальные зависимости релаксационного модуля E от времени для исследуемого наполненного эластомера при температуре 50°C и различных значениях деформации: 1 – 0,102; 2 – 0,192; 3 – 0,334; 4 – 0,439; 5 – 0,522.

Для режима релаксации напряжений ($\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{const}$) соотношение (1) имеет вид

$$E(t) / \varphi(\varepsilon_0) = E_0 \left[1 - \int_0^t \Gamma(t-\tau) d\tau \right] \quad (2)$$

где: $E(t) = \sigma(t) / \varepsilon_0$ – зависимость релаксационного модуля от времени. Из соотношения (2) следует, что для двух кривых релаксации, полученных при различных уровнях деформации ε_1 и ε_2 , имеет место простое соотношение между значениями релаксационного модуля и функции $\varphi(\varepsilon)$

$$E(t, \varepsilon_1) / E(t, \varepsilon_2) = \varphi(\varepsilon_1) / \varphi(\varepsilon_2) \quad (3)$$

Для экспериментального определения $\varphi(\varepsilon)$ предположим, что $\varphi(\varepsilon_0) = 1$ при наименьшем значении деформации в исследуемом диапазоне, т.е. $\varepsilon_0 = 0,105$ для рассматриваемой серии кривых релаксации, представленных на рис.1. В этом случае соотношение (3) позволит определить ряд значений функции $\varphi(\varepsilon)$ для более высоких значений деформации. Результаты определения $\varphi(\varepsilon)$ в соответствии с описанной методикой представлены в Табл.1.

Таблица 1.

Результаты экспериментального определения функции $\varphi(\varepsilon)$.

i	T, °C	ε_i	$E(\varepsilon_i) / E(\varepsilon_1)$
1	20	0.105	1
2	20	0.185	0.74
3	20	0.286	0.638
4	20	0.38	0.531
5	20	0.56	0.326
1	50	0.102	1
2	50	0.197	0.687
3	50	0.334	0.495
4	50	0.439	0.379
5	50	0.522	0.351

Для дальнейших вычислений принята степенная аппроксимация функции $\varphi(\varepsilon) = a(1 - \varepsilon)^b$, где a и b – постоянные, $a = 1.323$, $b = -3.02$. На рис.3 представлено сопоставление принятой аппроксимации $\varphi(\varepsilon)$ со значениями функции φ , определенными по кривым релаксации, которые представлены на рис.1 и рис.2.

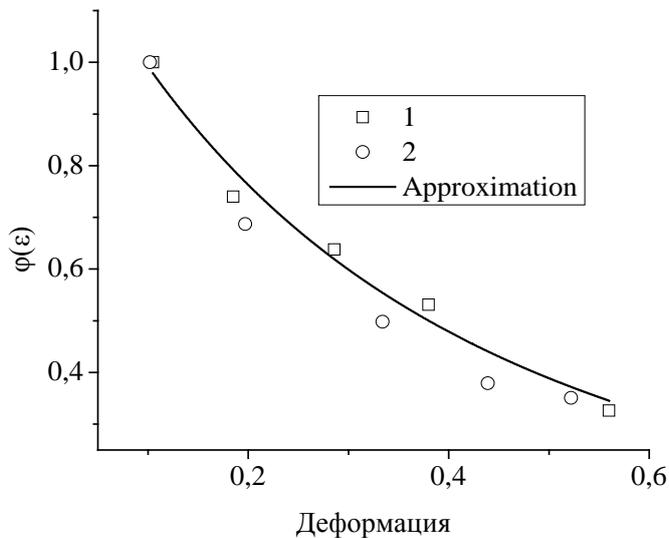


Рис.3. Результаты определения материальной функции нелинейности релаксационных свойств $\varphi(\varepsilon)$ при различных значениях температуры: 1 – 20°C; 2 – 50°C.

Представленные на рис.3 экспериментальные данные показывают, что $\varphi(\varepsilon)$ можно считать независимой от температуры. Далее, использование $\varphi(\varepsilon)$ и соотношения (2) позволяют представить серию экспериментальных зависимостей релаксационного модуля от времени в виде единой обобщенной зависимости в координатах: приведенный релаксационный модуль $(E(\varepsilon) / \varphi(\varepsilon))$ – время (t). Для исследуемого композита подобные зависимости представлены на рис.4 для температуры 20°C и на рис.5 для температуры 50°C. Данные обобщенные

зависимости приведенного релаксационного модуля могут быть использованы для идентификации ядра релаксации принятого определяющего соотношения – $\Gamma(t - \tau)$. С этой целью примем определенный вид ядра релаксации в виде суммы экспонент [14]

$$\Gamma(t) = \sum_{i=1}^n E_i \exp(-\alpha_i t) \quad (4)$$

где: E_i, α_i – постоянные. В данной работе использовано 5 членов в соотношении (4). Данное количество экспонент обеспечивает хорошую аппроксимацию диаграмм релаксации напряжений с расхождением между реальными и расчетными зависимостями, не превышающими 10%, что меньше разброса экспериментальных данных при испытаниях исследуемого материала.

В соответствии с принятой аппроксимацией определяющее соотношение (1) для режима релаксации напряжений может быть представлено в следующем виде

$$\frac{E(t)}{E_0 \varphi(\varepsilon)} = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{\alpha_i} (1 - \exp(-\alpha_i t)) \quad (5)$$

Это соотношение и экспериментально определенные зависимости приведенного релаксационного модуля от времени были использованы для определения постоянных E_i, α_i методом наименьших квадратов. Результаты определения постоянных E_i и α_i представлены в Табл.2.

Таблица 2.

Результаты экспериментального определения параметров ядра релаксации E_i и α_i

i	E_i , МПа	α_i
1	0.1008	$5.23 \cdot 10^{-7}$
2	0.435	$1.32 \cdot 10^{-5}$
3	0.07	$1.43 \cdot 10^{-4}$
4	0.078	$2.1 \cdot 10^{-3}$
5	0.3877	$5.1 \cdot 10^{-2}$

Далее, полученные значения постоянных принятого ядра релаксации использованы для расчета теоретической зависимости релаксационного модуля от времени. Эта зависимость представлена на рис.4 (кривая б).

Для описания нелинейных релаксационных свойств исследуемого эластомера при температуре 50°C с применением принятого определяющего соотношения (1) и полученных экспериментальных значений мгновенного модуля упругости и параметров ядра релаксации (5) используем широко применяющийся в механике полимеров метод температурно-временной аналогии [15]. В соответствии с этим принципом влияние температуры T на вязкоупругие свойства материала учитывается изменением масштаба физического времени в соответствии с функцией температурно-временного сдвига $a_T(T)$.

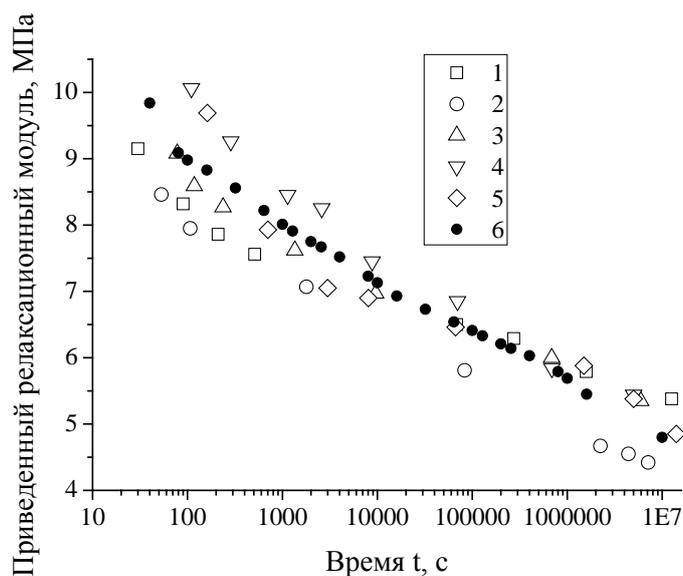


Рис.4. Зависимость от времени приведенного релаксационного модуля при температуре 20°C и различных значениях деформации: 1 – 0,105; 2 – 0,185; 3 – 0,286; 4 – 0,38; 5 – 0,56; 6 – расчетная зависимость, полученная с использованием принятого ядра релаксации.

При решении краевых задач о напряженно-деформированном состоянии вязкоупругих тел применение этого принципа сводится к замене в принятых определяющих соотношениях физического времени t на модифицированное: $t' = t / a_T(T)$. Как правило, функция температурно-временного сдвига экспериментально определяется как величина смещения рассматриваемой кривой ползучести или релаксации при температуре T вдоль логарифмической шкалы времени до совпадения ее с кривой, полученной при температуре приведения. В отличие от общепринятого метода определения функции $a_T(T)$ в данной работе величина температурно-временного смещения определялась как формальный параметр, позволяющий компенсировать расхождение между экспериментальными данными и результатами расчетов при описании свойств материала с применением принятого определяющего соотношения (1).

Расчетная зависимость приведенного релаксационного модуля от времени, полученная с использованием метода температурно-временной аналогии и соотношений (1) и (5), представлена на рис.5 (кривая 5). Принятое значение логарифма функции сдвига при температуре 50°C составляло -4,528.

Из сопоставления экспериментальных зависимостей приведенного релаксационного модуля от времени с результатами расчетов видно, что принятые определяющие соотношения и вид ядра релаксации описывают нелинейные релаксационные свойства исследуемого эластомера с точностью около 10%, что не превышает естественный разброс механических характеристик материалов этого класса.

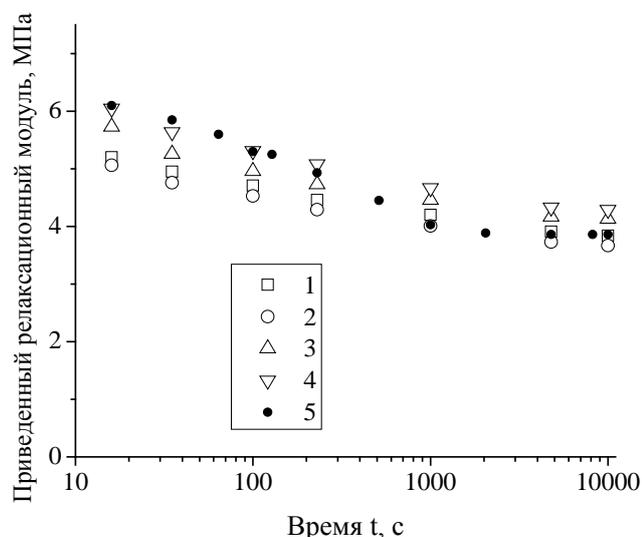


Рис.5. Зависимость от времени приведенного релаксационного модуля при температуре 50°C и при различных значениях деформации: 1 – 0,102; 2 – 0,192; 3 – 0,334; 4 – 0,439; 5 – расчетная зависимость, полученная с использованием принятого ядра релаксации и метода температурно-временной аналогии.

ВЫВОДЫ

Проведено экспериментальное исследование релаксационных свойств эластомерного композита на основе гидрированного нитрил-бутадиенового каучука, упрочненного наночастицами технического углерода N-110, в широком диапазоне значений деформации при температуре 20 и 50°C. Показано, что материал проявляет нелинейные вязкоупругие свойства: релаксационный модуль композита существенно зависит от уровня деформации. Для описания полученных экспериментальных данных использовано нелинейное соотношение теории вязкоупругости, предполагающее определение дополнительной материальной функции, учитывающей влияние деформации на релаксационные свойства эластомера. С использованием принятого определяющего соотношения экспериментальные кривые релаксации представлены в виде обобщенных зависимостей приведенного релаксационного модуля от времени. Обобщенные зависимости использованы для определения мгновенного модуля упругости и ядра релаксации в принятых соотношениях. Влияние температуры на вязкоупругие свойства материала описано с применением метода температурно-временной аналогии. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчетов показали, что принятый подход позволяет описывать нелинейные вязкоупругие свойства исследуемого эластомера с погрешностью, не превышающей 10%, что меньше естественного разброса механических характеристик материалов этого класса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мошев В.В. Структурная механика зернистых композитов на эластомерной основе. – М.: Наука, 1992. – 78 с.

2. *Белякова Т.А., Зезин Ю.П., Ломакин Е.В.* Термовязкогиперупругое поведение эластомерных материалов, модифицированных наночастицами наполнителя // Изв. РАН. МТТ. – 2010. – №4. – С.63-81.
3. *Nassar S.A., Alkelani A.A.* Clamp load loss to elastic interaction and gasket creep relaxation in bolted joints // Trans. ASME. J. Pressure Vessel Technol. – 2006. – N4. – P.394-401.
4. *Гусейнли З.С.* Факторы, определяющие герметизирующую способность уплотнения пакерного оборудования // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2015. – №2. – С.25-27.
5. *Зезин Ю.П., Ломакин Е.В.* Экспериментальное исследование вязкоупругих свойств усиленных наночастицами эластомеров // Изв. РАН. МТТ. – 2015. – Т.50. – №4. – С.6-19.
6. *Ozipek S., Becker E.B.* Constitutive equations for solid propellants // J. Engn. Mater. Technol. – 1997. – Vol.119. – N2. – P.125-132.
7. *Park S.W., Schapery R.A.* A viscoelastic constitutive model for particulate composites with growing damage // Int. J. of Solids Structures. – 1997. – Vol.34. – N8. – P.931-947.
8. *Быков Д.Л., Коновалов Д.Н.* Нелинейная эндохронная теория стареющих вязкоупругих материалов // Изв. РАН. МТТ. – 2002. – №4. – С.63-74.
9. *Быков Д.Л., Коновалов Д.Н.* Определяющие соотношения деформирования и разрушения наполненных полимерных материалов в процессе преобладающего осевого растяжения в различных баротермических условиях // Изв. РАН. МТТ. – 2008. – №6. – С.40-148.
10. *Быков Д.Л., Коновалов Д.Н., Пелешко В.А.* Определяющие соотношения для расчета процессов квазистатического деформирования, повреждения и разрушения тел (в том числе с концентраторами) из наполненных полимерных материалов // Изв. РАН. МТТ. – 2011. – №6. – С.34-54.
11. *Зезин Ю.П., Керштейн И.М., Малинин Н.И.* Методика исследования трещиностойкости полимерных материалов в условиях вибрационного нагружения // Заводская лаборатория. – 1975. – №8. – С.1010-1012.
12. *Белякова Т.А., Зезин Ю.П., Крапивин К.Ю., Ломакин Е.В.* Релаксация напряжений в напoненных эластомерах / Сб. статей к 75-летию Е.И. Шемякина “Проблемы механики деформируемых тел и горных пород”. – М.: Физматлит, 2006. – С.83-86.
13. *Москвитин В.В.* Сопротивление вязкоупругих материалов. – М.: Наука, 1972. – 328 с.
14. *Алфрей Т.* Механические свойства высокополимеров. – М.: Иностран. лит., 1952. – 620 с.
15. *Ферри Дж.* Вязкоупругие свойства полимеров. – М.: Иностран. лит., 1963. – 535 с.

Поступила в редакцию 3 августа 2015 года.

Сведения об авторах:

Зезин Юрий Павлович – д.т.н., в.н.с., НИИ механики Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия; e-mail: yuzezin@gmail.com
 Ломакин Евгений Викторович – д.ф.-м.н., член-корр. РАН, зав. кафедрой, Кафедра теории пластичности, Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия