

ЗАКОНОМЕРНОСТИ И МОДЕЛИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ВЯЗКОУПРУГИХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ*

С.В. Словиков, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
А.С. Янкин, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
В.Э. Вильдеман, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
А.В. Бабушкин, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
А.В. Ильиных, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
Д.С. Лобанов, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

Проведена серия натурных испытаний высоконаполненного низкомолекулярного полимерного композита с различными механическими сложными видами воздействия при различных температурах. Получены новые данные о закономерностях вязкоупругого поведения композитных материалов в виде экспериментальных зависимостей вязкоупругих параметров. В результате исследования закономерностей термомеханического динамического поведения низкомолекулярного высоконаполненного полимера получены новые данные влияния условий нагружения на вязкоупругие параметры. Разработана феноменологическая многофакторная математическая модель описания вязкоупругого поведения конструкционного полимерного композитного материала при сложных видах воздействия. В ходе научно-исследовательской работы были разработаны основы экспериментально-теоретического аппарата идентификации деформационных свойств вязкоупругих полимеров в условиях сложных режимов нагружения с учетом возможностей новейших испытательных систем, средств измерения и прикладного программного обеспечения. Создана программа экспериментальных исследований динамического вязкоупругого поведения материала в условиях, близких к эксплуатационным. Получены верифицированные коэффициенты многофакторной феноменологической математической модели описания вязкоупругого поведения конструкционного полимерного композита.

Ключевые слова: динамический (комплексный) модуль, угол потерь, динамический механический анализ (свойства), высоконаполненные вязкоупругие полимерные композиты, двухчастотное нагружение, интегральный ряд Вольтерра–Фреше.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-01-96003).

Материалы с вязкоупругими свойствами широко применяют для изготовления элементов виброизоляционных, противоударных и других систем защиты изделий и аппаратов от динамических воздействий, а также в качестве топлива двигателей летательных аппаратов. Расчет и конструирование подобных систем требуют решения динамических задач вязкоупругости с последующим оптимальным выбором свойств материала. Стремление к более адекватному прогнозированию динамического поведения как материала, так и конструкции ведет к созданию более точных математических моделей вязкоупругого поведения различных материалов в условиях сложных законов нагружения. Использование феноменологического подхода для получения достаточно простых математических моделей, количественно описывающих механическое поведение вязкоупругих материалов на основе процедуры параметрической идентификации, позволило создать новый инженерный аппарат для исследования конструкций на основе вязкоупругих материалов. Реализация феноменологической математической модели позволила использовать современные эффективные математические методы исследования не только качественной, но и количественной стороны явления.

Представлена модель на основе общей формы записи физически нелинейных операторов вязкоупругой среды в виде интегрального ряда Вольтерры

$$\begin{aligned} \sigma(t) = & \int_{-\infty}^t E_1(t-\tau_1) d\varepsilon(\tau_1) + \\ & + \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t E_2(t-\tau_1; t-\tau_2) d\varepsilon(\tau_1) d\varepsilon(\tau_2) + \\ & + \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t E_3(t-\tau_1; t-\tau_2; t-\tau_3) d\varepsilon(\tau_1) d\varepsilon(\tau_2) d\varepsilon(\tau_3) + \\ & + \dots + \int_{-\infty}^t \dots \int_{-\infty}^t E_n(t-\tau_1; \dots; t-\tau_n) d\varepsilon(\tau_1) \dots d\varepsilon(\tau_n) + \dots \end{aligned}$$

Экспериментальные исследования высоконаполненного полимерного ком-

позита проведены на новейшем экспериментальном оборудовании типа Instron E10000 с использованием специализированного программного обеспечения и современных высокоточных средств измерения, а также температурной камеры. Система быстродействующей обратной связи новейших испытательных систем обеспечила высокоточную реализацию заданных режимов воздействия. Для измерения применялись высокоточные поверенные системы. Математическое моделирование механического поведения материалов осуществлялось с использованием оригинальных алгоритмов и программ [1–3].

Методика была отработана на низко модульном материале, который обладает вязкоупругими свойствами, представляет собой высоконаполненную полимерную композицию и используется в конструкциях аэрокосмической техники. Из исследуемого материала были изготовлены образцы круглого сечения.

Геометрия используемых образцов существенно влияет на определяемые вязкоупругие характеристики вследствие возникновения сложного неоднородного вида напряженно-деформированного состояния при нагружении. Поэтому для определения «истинных» вязкоупругих характеристик композита были решены соответствующие динамические осесимметричные задачи на растяжение–сжатие в программном обеспечении ANSYS. Постоянство коэффициента Пуассона наполненных полимеров часто не подтверждается экспериментально. Исходя из этого, помимо варьирования «истинных» значений динамического модуля E_{uc}^* , при определении напряженно-деформированного состояния также варьировались значения коэффициента Пуассона μ_{uc}^* . На основе анализа напряженно-деформированного состояния определялись значения динамического модуля, соответствующие экспериментальной ситуации [4].

При проведении испытаний необходимо также учитывать жесткость элементов

нагружающей системы, так как перемещения, фиксируемые встроенным датчиком установки, будут складываться из перемещений образца и перемещений элементов этой установки.

Для определения вязкоупругих параметров при таких режимах нагружения была разработана методика [1, 3] с использованием преобразований Фурье. Данная методика позволяет учесть геометрию используемых образцов, а также жесткость элементов нагружающей системы при определении вязкоупругих параметров.

Для определения зависимостей вязкоупругих параметров от условий нагружения были проведены двухчастотные экспериментальные исследования [4–6]. С целью сопоставления результатов поставлены одночастотные эксперименты. Проверена возможность использования принципа температурно-временной аналогии. Функция температурно-временного смещения описана полиномом второй степени. С использованием принципа температурно-временной аналогии построены

графические зависимости вязкоупругих параметров в широких диапазонах частот (от 10^{-9} до 10^8 Гц) и температур (от -50 до 45°C).

Для обоснования применения используемой математической модели был проведен гармонический анализ выходных сигналов с последующим расчетом коэффициентов гармонических искажений. Анализ результатов показал целесообразность использования предложенной математической модели.

Полученные экспериментальные результаты необходимы для определения зависимостей вязкоупругих параметров от различных условий нагружения, а также определения констант многофакторной математической модели. Разработаны оригинальные методические рекомендации к проведению двухчастотных опытов. Описана методика определения вязкоупругих параметров при сложных гармонических нагрузках, которая учитывает жесткость элементов нагружающей системы и геометрический фактор образца.

Библиографический список

1. Янкин А.С., Словигов С.В., Бульбович Р.В. Определение динамических механических свойств низкоимпульсных вязкоупругих композитов при бигармоническом законе нагружения // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2013. – Т. 19. – № 1. – С. 141–151.
2. Янкин А.С., Словигов С.В., Бульбович Р.В., Вильдеман В.Э. Методические вопросы экспериментальных исследований вязкоупругих наполненных полимерных композитов при сложных динамических циклических воздействиях // *Вестник ПНИПУ. Механика*. – 2013. – № 4. – С. 180–192.
3. Янкин А.С., Словигов С.В., Бульбович Р.В., Вильдеман В.Э., Павлоградский В.В. Вязкоупругие характеристики высоконаполненных полимерных композитов при двухчастотных воздействиях // *Механика композитных материалов*. – 2016. – Т. 52. – № 1. – С. 115–128.
4. Янкин А.С. Влияние частот бигармонического (двухчастотного) нагружения на механическое поведение имитатора твердого топлива // *Вестник ПНИПУ. Механика*. – 2015. – № 4. – С. 273–292.
5. Янкин А.С., Словигов С.В., Бульбович Р.В., Вильдеман В.Э. Влияние амплитуды деформации высокочастотной составляющей бигармонического (двухчастотного) закона нагружения на динамические механические свойства низкоимпульсных вязкоупругих композитов // *Механика композитных материалов*. – 2013. – Т. 49. – № 6. – С. 1005–1012.
6. Янкин А.С., Словигов С.В., Бульбович Р.В., Вильдеман В.Э. Особенности поведения низкоимпульсных вязкоупругих полимерных композитов при варьировании амплитуды деформации низкочастотной составляющей бигармонической нагрузки // *Вестник ПНИПУ. Механика*. – 2014. – № 3. – С. 233–251.

REGULARITIES AND MODELS OF DYNAMIC THERMOMECHANICAL BEHAVIOR OF VISCOELASTIC COMPOSITE MATERIALS UNDER COMPLEX STRESS STATE

S.V. Slovikov, A.S. Yankin, V.E. Wildemann, A.V. Babushkin, A.V. Ilinykh, D.S. Lobanov

Perm National Research Polytechnic University

A series of natural tests of a highly-filled low modulus polymer composite with various kinds of complex mechanical exposure at different temperatures was carried out. New data on the regularities of viscoelastic behavior of composite materials in the form of experimental dependences of viscoelastic parameters were obtained. As a result of investigation of the regularities of thermo-mechanical dynamic behavior of the highly-filled low modulus polymer new data of the effect of loading conditions on viscoelastic parameters were obtained. A phenomenological multi-factor mathematical model to describe viscoelastic behavior of the structural polymeric composite material under complex types of action impact is developed. In the course of scientific research the basis of an experimental and theoretical apparatus of identification of deformative properties of viscoelastic polymers in complex loading conditions was developed, taking into account the features of the latest test systems, measurement tools and application software. A programme of experimental research of dynamic viscoelastic behavior of the material in the conditions close to the operational ones was created. We obtained verified coefficients of the multivariate phenomenological mathematical model to describe viscoelastic behavior of the structural polymer composite.

Keywords: complex dynamic modulus, loss angle, dynamic mechanical analysis (properties), highly-filled viscoelastic polymer composites, two-frequency (dual-frequency) loadings, Volterra-Frechet integral series.

Сведения об авторах

Словиков Станислав Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра экспериментальной механики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: sslovikov@ya.ru

Янкин Андрей Сергеевич, научный сотрудник Центра экспериментальной механики, ПНИПУ; e-mail: yas.cem@yandex.ru

Вильдеман Валерий Эрвинович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций, ПНИПУ; e-mail: wildemann@pstu.ru

Бабушкин Андрей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры механики композиционных материалов и конструкций, ПНИПУ; e-mail: bav651@yandex.ru

Ильиних Артем Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики композиционных материалов и конструкций, ПНИПУ; e-mail: ilinih@yandex.ru

Лобанов Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, научный сотрудник Центра экспериментальной механики, ПНИПУ; e-mail: cem.lobanov@gmail.com

Материал поступил в редакцию 21.10.2016 г.