

УДК 620.17

А.С. Янкин, Р.В. Бульбович, С.В. Словигов, В.Э. ВильдеманПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ВЯЗКОУПРУГИХ НАПОЛНЕННЫХ
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ СЛОЖНЫХ
ДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Описаны и отработаны основные этапы проведения эксперимента на испытательной системе Instron ElectroPuls E10000. Проведены одноосные динамические испытания на растяжение/сжатие при различных значениях температуры и двухосные динамические испытания на растяжение/сжатие и кручение одновременно. Установлено влияние температуры на динамические свойства (угол сдвига фаз между осевыми напряжениями и деформациями, динамический модуль при растяжении/сжатии) при различных значениях амплитуды деформации нагружения и построены зависимости. Проведен сравнительный анализ значений динамических механических свойств (угол сдвига фаз между осевыми напряжениями и деформациями, динамический модуль при растяжении/сжатии, угол сдвига фаз между сдвиговыми напряжениями и деформациями, динамический модуль при кручении) при одноосных и двухосных (бимодальных) нагружениях с одинаковыми параметрами деформирования.

Ключевые слова: амплитуда деформации, бигармоническое (двухчастотное) нагружение, динамические механические свойства (анализ), динамический модуль, угол сдвига фаз между напряжениями и деформациями, угол потерь, низко модульные вязкоупругие композиты, полимерные материалы, растяжение, сжатие, кручение, сдвиг, деформации, динамические циклические нагружения, бимодальные (двухосные) нагружения, одноосные нагружения, температура, частота, амплитуда угла закручивания, мода, угол сдвига фаз между модами.

A.S. Yankin, R.V. Bulbovich, S.V. Slovikov, V.E. Wildemann

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**METHODOLOGICAL ASPECTS OF THE EXPERIMENTAL
RESEARCH OF VISCOELASTIC FILLED POLYMER
COMPOSITES WITH COMPLICATED DYNAMIC
CYCLICAL IMPACTS**

Were worked out the basic steps in conducting an experiment on electrodynamic test system Instron ElectroPuls E10000. Were conducted uniaxial dynamic trials tensile / compression at various temperature and dynamic trials biaxial tensile / compression and torsion simultaneously. Been ascer-

tained the effect of temperature on the dynamic mechanical properties (phase angle between the axial stress and strain, the dynamic modulus in tension / compression) for different values of the strain amplitude loading and were built depending. Was held comparative analysis of the values of the dynamic mechanical properties (phase angle between the axial stress and strain, the dynamic modulus in tension / compression, the phase angle between the shear stress and strain, the dynamic modulus in torsion) under uniaxial and biaxial (bimodal) loadings with identical parameters deformation.

Keywords: strain amplitude, biharmonic (two-frequency) loading, dynamic mechanical properties (analysis), dynamic modulus of elasticity, angle of lag between stress and deformation, loss angle, low-modulus viscoelastic composites, polymeric materials, tensile, compression, torsion, shear deformation, dynamic cyclic loading, bimodal (biaxial) loading, uniaxial loading, temperature, frequency, amplitude of the angle of twist, mode, the phase angle between the modes.

Введение

Конструкции, в которых находят применение вязкоупругие наполненные полимерные композиты, работают чаще всего в условиях действия сложных нестационарных статических и динамических нагрузок [1]. Необходимость оценки напряженно-деформированного состояния конструкции при таких нагрузках приводит к возрастанию роли динамического анализа работы конструкции с учетом специфических зависимостей динамических деформационных свойств наполненных полимерных композитов от условий нагружения.

Одним из эффективных методов определения динамических механических свойств (ДМС) вязкоупругих полимерных композитов является метод динамического механического анализа (ДМА) [2–11]. Методом DMA определяются независимые характеристики: динамический модуль при растяжении-сжатии (ДМРС) E^* и угол потерь или угол сдвига фаз между осевыми напряжениями и деформациями (УСФО) φ_E при динамических испытаниях на растяжение-сжатие, динамический модуль при кручении (ДМК) G^* и угол потерь или угол сдвига фаз между сдвиговыми напряжениями и деформациями (УСФС) φ_G при динамических испытаниях на сдвиг.

ДМА возможно использовать для обработки результатов при одновременном действии осевых и сдвиговых нагрузок (бимодальное нагружение). При действии более сложного динамического нагружения (например, при бигармоническом бимодальном нагружении) необходимо использовать более сложную методику разложения экспериментальных данных в ряд Фурье [12, 13] для определения деформационных характеристик.

1. Этапы проведения эксперимента

Для проведения экспериментальных исследований динамических механических свойств на базе Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета используется электродинамическая испытательная система Instron ElectroPuls E10000 (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид электродинамической испытательной системы Instron ElectroPuls E10000



Рис. 2. Общий вид образцов для динамических испытаний

На данной установке можно проводить динамические испытания на растяжение-сжатие, кручение, а также на растяжение-сжатие и кручение одновременно. Комплектация также включает в себя температурную камеру Instron 3119, благодаря которой можно проводить испытания при различных температурах в диапазоне от -60°C до $+250^{\circ}\text{C}$.

При анализе механических свойств конструкции ракетных двигателей широкое распространение получил высоконаполненный полимерный композитный материал марки «ПДИ», свойства которого рассматривались в работах [2, 10, 12, 13].

Для проведения экспериментальных исследований динамических механических свойств материала марки «ПДИ» были изготовлены образцы круглого сечения $\varnothing=36,5^{\pm 0,1}$ мм и высотой $39,5^{\pm 1,5}$ мм. Образцы материала приклеивались с торцов к металлической оснастке, выполненной в виде «грибков» при помощи эпоксидного клея (рис. 2).

Перед проведением испытаний с целью обеспечения заданного режима деформирования предварительно уточняется жесткость исследуемого материала. Для этого в программном обеспечении Instron Console имеется программа-мастер для настройки жесткости. Возможно также ввести жесткость образца вручную, если она известна. Для того чтобы реальный режим деформирования как можно точнее повторял задаваемый, необходимо настроить коэффициент обратной связи. Для этого в Instron Console существует программа-мастер настройки обратной связи. Далее в программном обеспечении Instron WaveMatrix прописывается закон деформирования или нагружения. Для определения ДМС WaveMatrix использует метод ДМА. При простом нагружении образцов с одной частотой дополнительных расчетов проводить не требуется. Однако при обработке более сложных режимов нагружения необходимо разрабатывать новые методики. Например, при определении ДМС в условиях действия бигармонической нагрузки разработана и реализована в программном обеспечении MathCAD специальная методика [12, 13].

Значения ДМС после проведения экспериментальных исследований, будь то простые одночастотные испытания либо сложные бигармонические, представляются в виде электронных таблиц. При одночастотных нагружениях определяются значения: динамического модуля E^* , его действительной части E' , мнимой части E'' угла потерь φ_E – при динамических испытаниях на растяжение-сжатие; динамического модуля G^* , его действительной части G' , мнимой части G'' , угла потерь φ_G – при динамических испытаниях на сдвиг. При бигармонических (двухчастотных) испытаниях на растяжение-сжатие определяются значения динамического модуля низкочастотной составляющей (НЧС) E_1^* , его действительной части E_1' , мнимой части E_1'' , угла потерь НЧС φ_{E1} , динамического модуля высокочастотной составляющей (ВЧС) E_2^* , его действительной части E_2' , мнимой части E_2'' , угла потерь ВЧС φ_{E2} .

2. Экспериментальные исследования при различных температурах

На испытательной системе Instron ElectroPuls E10000 и на изготовленных образцах (см. рис. 2) проведены одноосные динамические испытания на растяжение-сжатие при различных значениях температуры. Для реализации изотермического режима испытаний проводилось термостатирование образцов в термокамере в течение 3 часов. Деформирование образцов проводилось по динамическому закону вида

$$f_{\varepsilon}(t) = \varepsilon_a \cdot \sin 2\pi\nu t, \quad (1)$$

где ν – частота деформирования; ε_a – амплитуда деформации; t – время. Параметры нагружения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры деформирования образцов и определяемые характеристики ДМС

Режим деформирования	Параметры деформирования		Температура опыта, °С	Характеристики ДМС	
	частота, Гц	амплитуда деформации, %		E^*	Φ_E
	ν	ε_a	T		
1	10	2,0	24	18,17	10,54
2		2,5		17,59	10,44
3		3,0		17,01	10,35
4		2,0	30	16,34	13,83
5		2,5		15,79	13,62
6		3,0		15,24	13,52
7		2,0	40	12,18	16,01
8		2,5		11,72	15,93
9		3,0		11,27	15,88

Как видим, угол сдвига фаз практически не зависит от амплитуды деформаций, при этом зависимость от температуры является существенной. ДМС композита определялись с помощью программного обеспечения Instron WaveMatrix. В результате обработки были получены зависимости ДМРС от температуры при различных значениях амплитуды деформации (см. табл. 1) (рис. 3).

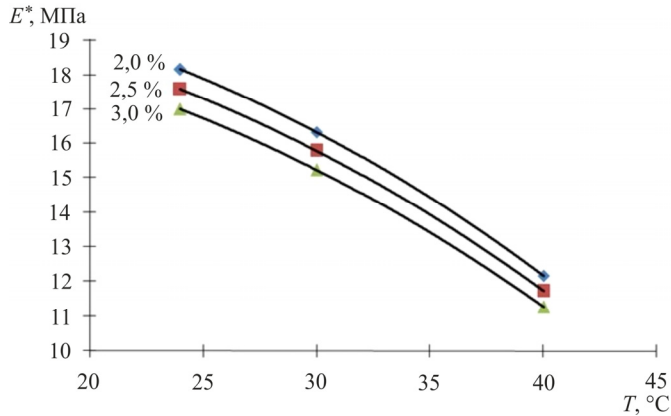


Рис. 3. Зависимость динамического модуля от температуры при различных значениях амплитуды деформации (значения слева от графиков)

Из табл. 1 и рис. 3 видно, что температура существенно влияет на ДМС исследованного композита, что характерно для подобных вязкоупругих материалов [11]. В исследованном интервале температур при увеличении температуры динамический модуль уменьшается, а угол потерь увеличивается. Амплитуда деформации в исследованном диапазоне практически не оказывает влияние на УСФО, но влияет на ДМРС (при меньших значениях амплитуды деформации ДМРС имеет большие значения). Зависимости динамического модуля от амплитуды деформации описываются линейными функциями вида

$$E^*(\varepsilon_a) = K \cdot \varepsilon_a + B. \quad (2)$$

Эквидистантность кривых на рис. 3 говорит о том, что при любом значении температуры коэффициент K остается постоянным, а изменяется только значение B .

3. Экспериментальные исследования на растяжение-сжатие и сдвиг

Бимодальные динамические нагрузки вида

$$\begin{cases} f_\varepsilon(t) = \varepsilon_a \cdot \sin 2\pi\nu_\varepsilon t, \\ f_\gamma(t) = \gamma_a \cdot \sin 2\pi\nu_\gamma t, \end{cases} \quad (3)$$

где ν_ε , ν_γ – частоты нагружений на растяжение-сжатие (первая мода) и сдвиг (вторая мода) соответственно; γ_a – амплитуда угла закручивания

ния, задавались с одновременным наложением двух законов деформирования: растяжения-сжатия (первая мода) и сдвига (вторая мода).

Были также проведены одноосные динамические испытания на растяжение-сжатие и одноосные динамические испытания на сдвиг.

Параметры деформирования приведены в табл. 2, температура опыта – 24 °С. Угол сдвига фаз между модами равен нулю, т.е. наибольшему растяжению соответствовал наибольший угол закручивания образца.

Таблица 2

Параметры деформирования образцов и определяемые характеристики ДМС

Режим деформирования	Параметры деформирования по модам				Определяемые ДМС			
	первая		вторая		E^* , МПа	φ_{E^*} , град	G^* , МПа	φ_{G^*} , град
	ν_{ε} , Гц	ε_{a2} , %	ν_{γ} , Гц	γ_{a2} , град				
10	1	2	1	3	13,95	16,83	4,38	16,13
11	1	2	–	–	13,96	16,85	–	–
12	–	–	1	3	–	–	4,29	16,21

Из табл. 2 видно, что в исследованном диапазоне деформирования ДМС при двухосном (бимодальном) нагружении (см. табл. 2, режим нагружения 10) практически не отличаются от соответствующих ДМС, определенных при одноосных нагружениях образцов (см. табл. 2, режимы нагружения 11 и 12).

Заключение

Отработаны основные этапы экспериментальных исследований на испытательной системе Instron Electropuls E10000, связанные с реализацией сложного динамического нагружения исследуемого образца из вязкоупругого наполненного полимерного композитного материала в виде бигармонического бимодального нагружении с вариацией частоты нагружения и температуры проведения опыта. При постановке динамического опыта использовалось программное обеспечение Instron Console и WaveMatrix.

Исследования механического поведения названного материала при сложных динамических циклических воздействиях показали, что температура опыта существенно влияет на динамические свойства

композита, увеличение температуры опыта приводит к увеличению значений угла потерь и уменьшению значений динамического модуля.

Амплитуда деформации практически не оказывает влияния на угол сдвига фаз между осевыми напряжениями и деформациями, но влияет на динамический модуль при растяжении-сжатии, причем при меньших значениях амплитуды деформации динамический модуль имеет большие значения. Кривые зависимостей динамического модуля от температуры опыта при различных значениях амплитуды деформации эквидистантны, что указывает на линейную зависимость значений динамического модуля от амплитуды деформации.

Сопоставление динамических свойств при одноосных и двухосных нагружениях с одинаковыми параметрами деформирования показало, что характеристики, определенные при бимодальном деформировании, не отличаются от характеристик, определенных при одноосных нагружениях образцов.

Для дальнейших исследований с помощью испытательной системы Instron Electropuls E10000 и подходов, предложенных в работе [12, 13], представляют интерес более сложные динамические испытания, например:

- бимодальные испытания с углами сдвига фаз между модами, отличными от нуля, а также с разными частотами для мод нагружения (например, $\nu_\epsilon = 0,1$ Гц, $\nu_\gamma = 1$ Гц);
- бигармонические испытания на кручения (по второй моде);
- бимодальные бигармонические испытания на растяжение-сжатие (по первой моде) и кручении (по второй моде) и др.

Последующий сравнительный анализ динамических механических свойств, определенных в широком диапазоне варьирования температурой опыта, частотой и амплитудой нагружения по первой и второй модам позволит получить универсальные специфические зависимости динамических деформационных свойств наполненных полимерных композитов от условий нагружения в форме, удобной для динамического анализа работы композитной конструкции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 13-01-96003 p_урал_a, 13-08-96016 p_урал_a).

Библиографический список

1. Москвитин В.В. Сопротивление вязкоупругих материалов (применительно к зарядам ракетных двигателей на твердом топливе). – М.: Наука, гл. ред. Физматлит, 1972. – 328 с.
2. Словиков С.В., Бульбович Р.В. Экспериментальное исследование динамических механических свойств вязкоупругих материалов // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Механика. – 2010. – № 2 – С. 104–112.
3. Словиков С.В. Методика исследования зависимости механических свойств полиуретановых изделий от температуры // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика. – 2012. – № 2 – С. 177–189.
4. Словиков С.В. Совершенствование экспериментального метода исследования диссипативных и прочностных свойств полиуретана // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика. – 2013. – № 2 – С. 145–153.
5. Влияние температуры и содержания наполнителя на динамические модули нанокompозита с полиэтиленовой матрицей / В.В. Шадрин, Л.А. Комар, Г.П. Башин, А.В. Ярушин // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2011. – № 4 – С. 64–68.
6. Detailed analysis of dynamic mechanical properties of TPU nanocomposite: The role of the interfaces / Marco Aurilia, Filomena Piscitelli, Luigi Sorrentino, Marino Lavorgna, Salvatore Iannace // European Polymer Journal. – 2011. – Vol. 47. – Iss. 5. – P. 925–936.
7. Dynamic mechanical analysis and dynamic infrared linear dichroism study of the frequency-dependent viscoelastic behavior of a poly (ester urethane) / Yanqia Wang, Richard A. Palmer, Jon R. Schoonover, Steven R. Aubuchon // Vibrational Spectroscopy. – 2006. – Vol. 42. – Iss. 1. – P. 74–77.
8. Melo José Daniel D., Radford Donald W. Time and temperature dependence of the viscoelastic properties of CFRP by dynamic mechanical analysis // Composite Structures. – 2005. – Vol. 70. – Iss. 2. – P. 240–253.
9. Goertzen W.K., Kessler M.R. Dynamic mechanical analysis of carbon/epoxy composites for structural pipeline repair // Composites Part B: Engineering. – 2007. – Vol. 38. – Iss. 1. – P. 1–9.
10. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / В.Э. Вильдеман, М.П. Третьяков, Т.В. Третьякова, Р.В. Бульбович, С.В. Словиков, А.В. Бабуш-

кин, А.В. Ильиных, Д.С. Лобанов, А.В. Ипатова / Под ред. В.Э. Вильдемана. – М.: Физматлит, 2012. – 204 с.

11. Методы прикладной вязкоупругости / А.А. Адамов, В.П. Матвеевко, Н.А. Труфанов, И.Н. Шардаков. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 411 с.

12. Янкин А.С., Словиков С.В., Бульбович Р.В. Определение динамических механических свойств низко модульных вязкоупругих композитов при бигармоническом законе нагружения // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2013. – Т. 19. – № 1. – С. 141–151.

13. Yankin A.S., Slovikov S.V., Bulbovich R.V. Determination of the dynamic mechanical properties of low-modulus viscoelastic composites at the biharmonic law of loading // Composites: Mechanics, Computations, Applications. – 2013. – Vol. 4. – Iss. 2. – P. 139–150.

References

1. Moskvitin V.V. Soprotivlenie vyazkouprugikh materialov (primenitelno k zaryadam raketnikh dvigateley na tverdom toplive) [The resistance of visco-elastic materials (in relation to the charges of solid propellant rocket engine)]. Moscow: Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1972, 328 p.

2. Slovikov S.V., Bulbovich R. V. Experimentalnoe issledovanie dinamicheskikh mekhanicheskikh svoystv vyazkouprugikh materialov [Experimental study of the dynamic mechanical properties of visco-elastic materials]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2010, no. 2, pp. 104-112.

3. Slovikov S.V. Metodika issledovaniya zavisimosti mekhanicheskikh svoystv poliuretanovykh izdeliy ot temperatury [Technique to study the mechanical properties of polyurethane-based products on the temperature]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2012, no. 2, pp. 177-189.

4. Slovikov S.V. Sovershenstvovanie eksperimentalnogo metoda issledovaniya dissipativnykh i prochnostnykh svoystv poliuretana [Improvement of the experimental method of research and the strength of the dissipative polyurethane]. *Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2013, no. 2, pp. 145-153.

5. Shadrin V.V., Komar L.A., Bashin G.P., Yarushin A.V. Vliyanie temperatury i sodержaniya napolnitelya na dinamicheskie moduli nano-

kompozita s polietilenovoy matritsey [Effect of temperature and filler content on the dynamic moduli of the nanocomposite with a polyethylene matrix]. *Vestnik Permskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Informatika*, 2011, no. 4, pp. 64-68.

6. Marco Aurilia, Filomena Piscitelli, Luigi Sorrentino, Marino Lavorgna, Salvatore Iannace. Detailed analysis of dynamic mechanical properties of TPU nanocomposite: The role of the interfaces. *European Polymer Journal*, 2011, vol. 47, iss. 5, pp. 925-936.

7. Yanqia Wang, Richard A. Palmer, Jon R. Schoonover, Steven R. Aubuchon. Dynamic mechanical analysis and dynamic infrared linear dichroism study of the frequency-dependent viscoelastic behavior of a poly (ester urethane). *Vibrational Spectroscopy*, 2006, vol. 42, iss. 1, pp. 74-77.

8. José Daniel D. Melo, Donald W. Radford. Time and temperature dependence of the viscoelastic properties of CFRP by dynamic mechanical analysis. *Composite Structures*, 2005, vol. 70, iss. 2, pp. 240-253.

9. Goertzen W.K., Kessler M.R. Dynamic mechanical analysis of carbon/epoxy composites for structural pipeline repair. *Composites Part B: Engineering*, 2007, vol. 38, iss. 1, pp. 1-9.

10. Vildeman V.E., Tretyakov M.P., Tretyakova T.V., Bulbovich R.V. Slovikov S.V., Babushkin A.V., Ilyanich A.V., Lobanov D.S., Ipatova A.V.. Eksperimentalnyye issledovaniya svoystv materialov pri slozhnykh termomekhanicheskikh vozdeystviyakh [Experimental studies of the properties of materials under complex thermomechanical impacts]. Ed. by V.E. Vildeman Moscow: Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 2012. 204 p.

11. Adamov A.A., Matveyenko V.P., Trufanov N.A., Shardakov I.N. Metody prikladnoy vyazkouprugosti [Methods applied viscoelasticity]. Yekaterinburg: UrO RAN, 2003. 411 p.

12. Yankin A.S., Slovikov S.V., Bulbovich R.V. Opredelenie dinamicheskikh mekhanicheskikh svoystv nizkomodulnykh vyazkouprugikh kompozitov pri bigarmonicheskom zakone nagruzheniya [Determination of the dynamic mechanical properties of low-modulus viscoelastic composites at the biharmonic law of loading]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsey*, 2013, no. 1, pp. 141-151.

13. Yankin A.S., Slovikov S.V., Bulbovich R.V. Determination of the dynamic mechanical properties of low-modulus viscoelastic composites at the biharmonic law of loading. *Composites: Mechanics, Computations, Applications*, 2013, vol. 4, iss. 2, pp. 139-150.

Об авторах

Бульбович Роман Васильевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, декан аэрокосмического факультета, профессор кафедры ракетно-космической техники и энергетических систем Пермского национального исследовательского политехнического университета (614000, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: dekan_akf@pstu.ru).

Вильдеман Валерий Эрвинович (Пермь, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор, директор Центра экспериментальной механики, профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций Пермского национального исследовательского политехнического университета (614000, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: wildemann@pstu.ru).

Словиков Станислав Васильевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614000, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: sws@au.ru).

Янкин Андрей Сергеевич (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614000, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: yas.cem@yandex.ru).

About the authors

Bulbovich Roman Vasilevich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Aerospace, Professor of Aerospace Technology and Power Plants Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614000, Perm, Russian Federation, e-mail: dekan_akf@pstu.ru).

Wildemann Valeriy Ervinovich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor, Director of the Center of Experimental Mechanics, Professor of Mechanics of Composite Materials and Structures, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614000, Perm, Russian Federation, e-mail: wildemann@pstu.ru).

Slovikov Stanislav Vasilevich (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, a senior researcher at the Center of Experimental Mechanics Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614000, Perm, Russian Federation, e-mail: sws@au.ru).

Yankin Andrey Sergeevich (Perm, Russian Federation) – junior researcher at the Center of Experimental Mechanics Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614000, Perm, Russian Federation, e-mail: yas.cem@yandex.ru).

Получено 02.12.2013