УДК 539.3

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВЯЗКОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОЛУСФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Н. А. Абросимов, В. Г. Баженов, Н. А. Куликова

Научно-исследовательский институт механики Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород
E-mails: abrosimov@dk.mech.unn.ru, bazhenov@dk.mech.unn.ru, knadya2004@mail.ru

Предложена методика определения жесткостных и реологических характеристик композитных материалов, основанная на минимизации рассогласования экспериментальных данных и результатов компьютерного моделирования процесса деформирования композитных полусферических оболочек при взрывном нагружении. С использованием данной методики проведен анализ демпфирующих характеристик хаотически армированных полимерных материалов.

Ключевые слова: динамика, композиты, вязкоупругие характеристики, численное моделирование.

При проектировании конструкций современной техники широко используются новые композитные материалы, обладающие, в отличие от металлов, существенно лучшими диссипативными свойствами. Поскольку композитный материал и конструкция создаются, как правило, в рамках единого технологического процесса, возникает задача определения упругих и демпфирующих характеристик композитного материала при его работе в конструкции, решение которой необходимо для построения адекватных моделей деформирования материала и конструкции с целью последующего прогнозирования их поведения при заданных воздействиях. Традиционные способы решения этой задачи, основанные на испытаниях образцов методом свободных затухающих колебаний, зачастую оказываются неприемлемыми из-за существенного влияния на результаты измерений условий закрепления, способа возбуждения колебаний, неоднородности напряженно-деформированного состояния и технологических трудностей изготовления образцов.

Одним из методов определения параметров моделей деформирования является непосредственное использование экспериментальной информации, получаемой при нагружении элементов конструкций. Такие способы идентификации материалов и моделей применялись для определения эффективных упругих характеристик композитных материалов на основе статических экспериментов [1–4]. Среди работ, посвященных определению физико-механических характеристик при динамических испытаниях, можно отметить лишь исследования [5, 6], в которых анализируются экспериментальные результаты и определяются демпфирующие характеристики композитных материалов при взрывном нагружении

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 05-08-50212, 05-01-00837, 05-01-08055) и ФЦНТП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники" (код проекта РИ-112/001/404).

колец и полусферических оболочек. Данная статья представляет собой развитие этих исследований, связанное с разработкой экспериментально-расчетного подхода к определению жесткостных и реологических характеристик композитного материала на примере деформирования динамически нагруженных полусферических оболочек. По сути, этот метод является решением обратной задачи, позволяющим получить характеристики материала и модели, используемые в расчетах конкретной конструкции. Метод решения задачи идентификации жесткостных и реологических характеристик композитных материалов основывается на сопоставлении информации, полученной в эксперименте, и численного решения прямой задачи вязкоупругого динамического деформирования полусферической оболочки.

1. Рассмотрим полусферическую оболочку в гауссовой криволинейной системе координат α_i $(i=\overline{1,3})$, коэффициенты Ламе и главные кривизны которой равны

$$H_1 = A_1 z_1, \qquad H_2 = A_2 z_2, \qquad H_3 = 1, \qquad k_1 = k_2 = k = 1/R. \tag{1}$$

Здесь $A_1 = R$; $A_2 = R\sin\alpha_1$; $z_1 = z_2 = z = 1 + k\alpha_3$; α_1 — центральный угол, определяющий положение точки на меридиане оболочки; α_3 — расстояние между точкой и срединной поверхностью оболочки; R — радиус полусферической оболочки.

Поскольку элементы конструкций, изготовленные из композитных материалов, являются неоднородными, обладают низкой по сравнению с металлами сдвиговой жесткостью и не всегда являются тонкостенными, для описания их напряженно-деформированного состояния необходимо использовать неклассические теории оболочек.

Для построения разрешающей системы уравнений неклассической теории полусферических оболочек применяется принцип возможных перемещений в сочетании с методом рядов [7]. Компоненты вектора перемещения u_i $(i=\overline{1,3})$ аппроксимируем конечными рядами по нормальной координате α_3:

$$u_i(\alpha_1,\alpha_3,t) = u_i^0(\alpha_1,t) + u_i^1(\alpha_1,t)x + \sum_{n=2}^{N} u_i^n(\alpha_1,t)P_n(x) \tag{2}$$

$(-1 \leqslant x = 2\alpha_3/h \leqslant 1$; $P_n(x)$ — полиномы Лежандра).

С учетом соотношений (1), (2) деформации полусферической оболочки можно представить в виде

$$\begin{gathered} e_{11} = (\varepsilon_{11} + \chi_{11}x + \chi_{11}^n)/z, \qquad e_{22} = (\varepsilon_{22} + \chi_{22}x + \chi_{22}^n)/z, \\ e_{33} = \chi_{33} + \chi_{33}^n, \qquad e_{13} = (\varepsilon_{13} + \varepsilon_{13}^n)/z + \chi_{13} + \chi_{13}^n, \end{gathered} \tag{3}$$

где

$$\varepsilon_{11} = k\Big(\frac{\partial u_1^0}{\partial\alpha_1} + u_3^0\Big), \qquad \varepsilon_{22} = k(u_1^0\operatorname{ctg}\alpha_1 + u_3^0), \qquad \chi_{11} = k\Big(\frac{\partial u_1^1}{\partial\alpha_1} + u_3^1\Big),$$

$$\chi_{22} = k(u_1^1\operatorname{ctg}\alpha_1 + u_3^1), \qquad \chi_{11}^n = k\Big(\sum_{n=2}^{N}\frac{\partial u_1^n}{\partial\alpha_1}P_n(x) + \sum_{n=2}^{N}u_3^nP_n(x)\Big),$$

$$\chi_{22}^n = k\Big(\operatorname{ctg}\alpha_1\sum_{n=2}^{N}u_1^nP_n(x) + \sum_{n=2}^{N}u_3^nP_n(x)\Big),$$

$$\chi_{33} = \frac{2}{h}u_3^1, \qquad \chi_{33}^n = \frac{2}{h}\sum_{n=2}^{N}u_3^nP_n'(x), \qquad \varepsilon_{13} = k\Big(\frac{\partial u_3^0}{\partial\alpha_1} - u_1^0\Big),$$

$$\varepsilon_{13}^n = k\Big(\frac{\partial u_3^1}{\partial\alpha_1}\,x + \sum_{n=2}^N \frac{\partial u_3^n}{\partial\alpha_1}\,P_n(x) - u_1^1 x - \sum_{n=2}^N u_1^n P_n(x)\Big),$$

$$\chi_{13} = \frac{2}{h}\,u_1^1, \qquad \chi_{13}^n = \frac{2}{h}\,\sum_{n=2}^N u_1^n P_n'(x).$$

Связь между напряжениями и деформациями устанавливается на основе реологических уравнений Максвелла — Томсона, которые в данном случае можно представить в виде

$$\begin{gathered}
\sigma_{ii} = \sum_{j=1}^3 C_{ij}^0 e_{ij}^0 \quad (i = \overline{1,3}\,), \qquad \sigma_{13} = G_{13}^0 e_{13}', \\
e_{ii}^0 = e_{ii} - \Big(1 - \frac{C_{ii}^\infty}{C_{ii}^0}\Big)\int_0^t R(t-\tau)e_{ii}(\tau)\,d\tau, \\
e_{ij}^0 = e_{jj} - \Big(1 - \frac{C_{ij}^\infty}{C_{ij}^0}\Big)\int_0^t R(t-\tau)e_{jj}(\tau)\,d\tau, \\
e_{13}' = e_{13} - \Big(1 - \frac{G_{13}^\infty}{G_{13}^0}\Big)\int_0^t R(t-\tau)e_{13}(\tau)\,d\tau.
\end{gathered} \tag{4}$$

Здесь C_{ij}^0, C_{ij}^∞, G_{13}^0, G_{13}^∞ — мгновенные и длительные жесткостные характеристики; $R(t) = \beta\,\mathrm{e}^{-\beta t}$ — ядро релаксации; β — параметр, характеризующий время релаксации; t — время процесса. Входящие в (4) вязкоупругие характеристики образуют вектор $b = (E_{11}^0, E_{11}^\infty, E_{22}^0, E_{22}^\infty, E_{33}^0, E_{33}^\infty, G_{13}^0, G_{13}^\infty, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, \beta)^{\mathrm{т}}$, который в дальнейшем необходимо определить.

Для вывода уравнений движения полусферической незакрепленной оболочки, нагруженной импульсом внутреннего давления, используем вариационное уравнение динамики [7], которое с учетом аппроксимаций (2) и построенных на их основе геометрических (3) и физических (4) соотношений записывается в виде

$$\begin{aligned}
\int_0^\pi \Big[&kN_{11}\,\frac{\partial\,(\delta u_1^0)}{\partial\alpha_1} + k(N_{22}\operatorname{ctg}\alpha_1 - Q_1)\delta u_1^0 + kQ_1\,\frac{\partial\,(\delta u_3^0)}{\partial\alpha_1} + k(N_{11} + N_{22})\delta u_3^0 + \\
&+ kM_{11}\,\frac{\partial\,(\delta u_1^1)}{\partial\alpha_1} + \Big(k(M_{22}\operatorname{ctg}\alpha_1 - M_{13}) + \frac{2}{h}\,Q_{13}\Big)\delta u_1^1 + kM_{13}\,\frac{\partial\,(\delta u_3^1)}{\partial\alpha_1} + \\
&+ \Big(k(M_{11} + M_{22}) + \frac{2}{h}\,Q_{33}\Big)\delta u_3^1 + k\sum_{n=2}^N M_{11}^n\,\frac{\partial\,(\delta u_1^n)}{\partial\alpha_1} + k\operatorname{ctg}\alpha_1\sum_{n=2}^N M_{22}^n\delta u_1^n - \\
&- k\sum_{n=2}^N M_{13}^n\delta u_1^n + \frac{2}{h}\sum_{n=2}^N M_{13}'^n\delta u_1^n + k\sum_{n=2}^N M_{13}^n\,\frac{\partial\,(\delta u_3^n)}{\partial\alpha_1} + k\sum_{n=3}^N M_{11}^n\delta u_3^n + \\
&+ k\sum_{n=3}^N M_{22}^n\delta u_3^n + \frac{2}{h}\sum_{n=2}^N M_{33}^n\delta u_3^n\Big]R^2\sin\alpha_1\,d\alpha_1 +
\end{aligned}$$

$$+\int\limits_0^{\pi}\Big[\sum_{n=0}^{N}\Big(B_{1n}^0\ddot u_1^0+B_{1n}^1\ddot u_1^1+\sum_{m=2}^{N}B_{1n}^m\ddot u_1^m\Big)\delta u_1^n+$$

$$+\sum_{n=0}^{N}\Big(B_{3n}^0\ddot u_3^0+B_{3n}^1\ddot u_3^1+\sum_{m=2}^{N}B_{3n}^m\ddot u_3^m\Big)\delta u_3^n\Big]R^2\sin\alpha_1\,d\alpha_1-$$

$$-\int\limits_0^{\pi}\Big[F_3^0\delta u_3^0+F_3^1\delta u_3^1+\sum_{n=2}^{N}F_3^n\delta u_3^n\Big]\,d\alpha_1=0, \qquad (5)$$

где

$$N_{11}=\frac{h}{2}\int\limits_{-1}^{1}\sigma_{11}z\,dx,\qquad N_{22}=\frac{h}{2}\int\limits_{-1}^{1}\sigma_{22}z\,dx,$$

$$M_{11}=\frac{h}{2}\int\limits_{-1}^{1}\sigma_{11}z\,dx,\qquad M_{22}=\frac{h}{2}\int\limits_{-1}^{1}\sigma_{22}z\,dx,\qquad M_{13}=\frac{h}{2}\int\limits_{-1}^{1}\sigma_{13}z\,dx,$$

$$Q_{1}=\frac{h}{2}\int\limits_{-1}^{1}\sigma_{13}z\,dx,\qquad Q_{13}=\frac{h}{2}\int\limits_{-1}^{1}\sigma_{13}z^2\,dx,\qquad Q_{33}=\frac{h}{2}\int\limits_{-1}^{1}\sigma_{33}z^2\,dx,$$

$$M_{11}^n=\frac{h}{2}\int\limits_{-1}^{1}\sigma_{11}zP_n(x)\,dx,\qquad M_{22}^n=\frac{h}{2}\int\limits_{-1}^{1}\sigma_{22}zP_n(x)\,dx,$$

$$M_{33}^n=\frac{h}{2}\int\limits_{-1}^{1}\sigma_{33}z^2P_n'(x)\,dx,\qquad M_{13}^n=\frac{h}{2}\int\limits_{-1}^{1}\sigma_{13}zP_n(x)\,dx,\qquad M_{13}'^n=\frac{h}{2}\int\limits_{-1}^{1}\sigma_{13}z^2P_n'(x)\,dx,$$

$$B_{in}^n=\rho\,\frac{2}{2n+1}\Big(\frac{h}{2}+k^2\,\frac{h^3}{8}\Big(\frac{(n+1)^2}{4n^2+8n+3}+\frac{n^2}{4n^2-1}\Big)\Big)\qquad (n=\overline{0,N},\quad i=1,3),$$

$$B_{in+1}^n=\rho h^2k\,\frac{n+1}{(2n+1)\sqrt{4n^2+8n+3}}\qquad (n=\overline{0,N-1}\,),$$

$$B_{in+2}^n=\rho\,\frac{h^3}{4}\,k^2\,\frac{n^2+3n+2}{(2n+3)(2n+1)\sqrt{4n^2+12n+5}}\qquad (n=\overline{0,N-2}\,),$$

$$F_3^n=(-1)^np_3R^2\sin\alpha_1(1-kh/2)^2\qquad (n=\overline{0,N}\,).$$

Применяя к (5) стандартную вариационную технику, получим уравнения движения оболочки

$$\frac{\partial\,(N_{11}\sin\alpha_1)}{\partial\alpha_1}-N_{22}\cos\alpha_1+Q_1\sin\alpha_1=\Big(B_{10}^0\ddot u_1^0+B_{10}^1\ddot u_1^1+\sum_{m=2}^{N}B_{10}^m\ddot u_1^m\Big)R\sin\alpha_1,$$

$$\frac{\partial\,(Q_1\sin\alpha_1)}{\partial\alpha_1}-(N_{11}+N_{22})\sin\alpha_1+kF_3^0=\Big(B_{30}^0\ddot u_3^0+B_{30}^1\ddot u_3^1+\sum_{m=2}^{N}B_{30}^m\ddot u_3^m\Big)R\sin\alpha_1,$$

$$
\begin{gathered}
\frac{\partial\,(M_{11}\sin\alpha_1)}{\partial\alpha_1} - M_{22}\cos\alpha_1 + \Big(M_{13} - \frac{2}{h}\,RQ_{13}\Big)\sin\alpha_1 = \\
= \Big(B_{11}^0\ddot{u}_1^0 + B_{11}^1\ddot{u}_1^1 + \sum_{m=2}^{N} B_{11}^m\ddot{u}_1^m\Big)R\sin\alpha_1, \\
\frac{\partial\,(M_{13}\sin\alpha_1)}{\partial\alpha_1} - (M_{11}+M_{22})\sin\alpha_1 - \frac{2}{h}\,RQ_{33}\sin\alpha_1 + kF_3^1 = \\
= \Big(B_{31}^0\ddot{u}_3^0 + B_{31}^1\ddot{u}_3^1 + \sum_{m=2}^{N} B_{31}^m\ddot{u}_3^m\Big)R\sin\alpha_1, \\
\frac{\partial\,(M_{11}^n\sin\alpha_1)}{\partial\alpha_1} - M_{22}^n\cos\alpha_1 + \Big(M_{13}^n - \frac{2}{h}\,RM_{31}'^n\Big)\sin\alpha_1 = \\
= \Big(B_{1n}^0\ddot{u}_1^0 + B_{1n}^1\ddot{u}_1^1 + \sum_{m=2}^{N} B_{1n}^m\ddot{u}_1^m\Big)R\sin\alpha_1 \quad (n=\overline{2,N}\,), \\
\frac{\partial\,(M_{13}^n\sin\alpha_1)}{\partial\alpha_1} - \Big(M_{11}^n + M_{22}^n + \frac{2}{h}\,RM_{33}^n\Big)\sin\alpha_1 + kF_3^n = \\
= \Big(B_{3n}^0\ddot{u}_3^0 + B_{3n}^1\ddot{u}_3^1 + \sum_{m=3}^{N} B_{3n}^m\ddot{u}_3^m\Big)R\sin\alpha_1 \quad (n=\overline{2,N}\,)
\end{gathered}
\tag{6}
$$

и нулевые граничные условия при $\alpha_1 = 0, \pi$:

$$
N_{11} = 0, \quad Q_1 = 0, \quad M_{11} = 0, \quad M_{13} = 0, \quad M_{11}^n = 0, \quad M_{13}^n = 0 \quad (n=\overline{2,N}\,). \tag{7}
$$

Начальные условия, которым должно удовлетворять решение поставленной выше задачи, также являются нулевыми:

$$
u_1^n(\alpha_1,0) = 0, \quad \dot{u}_1^n(\alpha_1,0) = 0, \quad u_3^n(\alpha_1,0) = 0, \quad \dot{u}_3^n(\alpha_1,0) = 0 \quad (n=\overline{0,N}\,). \tag{8}
$$

Соотношения (2)–(8) представляют собой замкнутую систему интегро-дифференциальных уравнений, необходимых для исследования нестационарных процессов деформации в нетонких полусферических оболочках, выполненных из вязкоупругих композитных материалов. Точность полученной системы уравнений определяется количеством членов, удерживаемых в аппроксимирующих рядах (2). Сформулированная начально-краевая задача решается на основе явной вариационно-разностной схемы [7].

2. Задача определения жесткостных и реологических характеристик сводится к задаче нелинейного программирования. Допустим, что имеется численное решение сформулированной выше начально-краевой задачи о динамическом поведении композитной полусферической оболочки в виде временных зависимостей окружных и меридиональных деформаций на внешней поверхности оболочки. Считаем, что имеются соответствующие тензограммы деформаций, полученные в экспериментах. Поскольку расчетные и экспериментальные осциллограммы деформаций являются условно моногармоническими затухающими колебаниями, можно определить максимальные и минимальные значения расчетных e_{ii}^m и экспериментальных e_{ii}^{*m} деформаций, а также соответствующие моменты времени t_i^m и t_i^{*m} $(m=\overline{1,M}\,)$, в которые они достигаются.

Ниже рассматривается параметризованный вариант постановки задачи идентификации параметров модели вязкоупругого поведения материала оболочки. Требуется найти набор параметров (вектор) физических соотношений (4) $b_* = (E_{11}^0, E_{11}^\infty, E_{22}^0,$

$E_{22}^{\infty}, E_{33}^{0}, E_{33}^{\infty}, G_{13}^{0}, G_{13}^{\infty}, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, \beta)^{\mathrm{т}}$, при которых математическая модель (2)–(8), описывающая динамическое поведение вязкоупругих полусферических оболочек, лучше всего согласуется с экспериментальными данными. В результате задача сводится к минимизации целевой функции нескольких переменных, представляющей собой сумму среднеквадратичных отклонений теоретических и экспериментальных значений деформаций [9]

$$C(b) = \sum_{k=1}^{K} \Big\{ \sum_{m=1}^{M} \Big[\sum_{i=1}^{2} \Big(\Big(\frac{e_{ii}^{m} - e_{ii}^{*m}}{e_{ii}^{*}} \Big)^2 + \Big(\frac{t_i^m - t_i^{*m}}{t^*} \Big)^2 \Big) \Big] \Big\}_k .$$

Здесь K — число точек, для которых имеются экспериментальные данные о деформациях; e_{ii}^{*} — максимальные значения окружных и меридиональных деформаций в первом полупериоде колебаний; t^* — время процесса. Границы области поиска и ограничения, налагаемые на значения физико-механических характеристик материалов, следуют из общих физических принципов и экспериментальных данных [6, 10].

При выборе метода решения сформулированной задачи идентификации вязкоупругих характеристик композитных материалов необходимо учитывать ряд факторов: чувствительность методов оптимизации к погрешностям экспериментальных измерений деформаций, сложность вычисления производных целевой функции, многоэкстремальный характер целевой функции и большие вычислительные затраты при ее формировании. С учетом отмеченных трудностей был выбран синтез методов адаптивного случайного поиска и детерминированных прямых алгоритмов локальной оптимизации, в которых строится нелокальная аппроксимация функции по ее значениям в ряде точек [11].

3. Применимость предлагаемого подхода оценивалась на примере осесимметричного деформирования полусферической оболочки (рис. 1) толщиной $h = 0{,}006$ м и радиусом $R = 0{,}049$ м, выполненной из хаотически армированного полимерного материала и нагруженной импульсом внутреннего давления [8].

В ходе вычислений предусматривался предварительный анализ чувствительности целевой функции по переменным проектирования для оценки возможности определения параметров определяющих соотношений в данной задаче. Кроме того, для повышения эффективности расчетов подбор жесткостных и реологических характеристик осуществлялся на последовательно расширяющихся временных интервалах.

На рис. 2 приведены результаты экспериментальных исследований [6] и теоретических расчетов с найденными параметрами физических соотношений (4). Наблюдается достаточно хорошее качественное и удовлетворительное количественное согласие экспериментальных и теоретических результатов.

На основе осциллограмм деформаций, приведенных на рис. 2, анализировалась зависимость логарифмического декремента затухания δ от временного интервала процесса деформирования (числа циклов колебаний). В табл. 1 приведены значения декремента за-

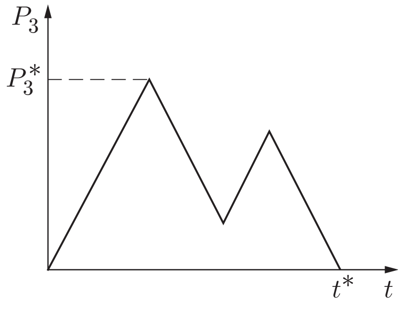
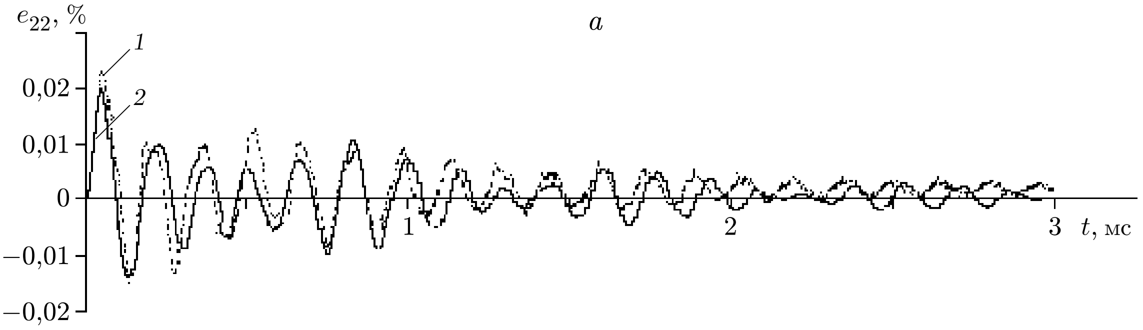


Рис. 1. Схема нагружения ($P_3^* = 0{,}3$ МПа, $t^* = 0{,}4 \cdot 10^{-4}$ с)



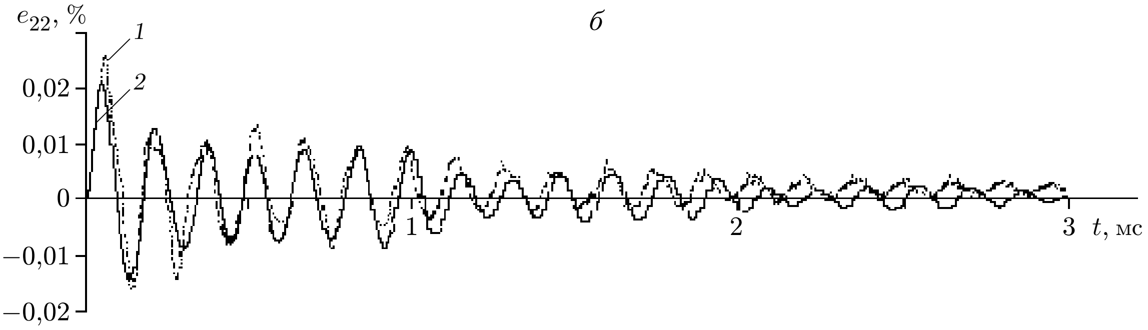


Рис. 2. Осциллограммы окружных деформаций на внешней поверхности изотропной вязкоупругой (*а*) и ортотропной вязкоупругой (*б*) оболочек вблизи экватора:
а — $E^0 = 61$ ГПа, $\nu = 0{,}33$, $E^\infty = 54{,}9$ ГПа, $\beta = 20\,000$ с$^{-1}$; *б* — $E_1^0 = 50{,}7$ ГПа, $E_1^\infty = 41{,}7$ ГПа, $E_2^0 = 63{,}7$ ГПа, $E_2^\infty = 57{,}3$ ГПа, $E_3^0 = 47{,}2$ ГПа, $E_3^\infty = 39{,}7$ ГПа, $\nu_{12} = 0{,}22$, $\nu_{13} = 0{,}26$, $\nu_{23} = 0{,}28$, $G_{13}^0 = 43{,}35$ ГПа, $G_{13}^\infty = 35{,}2$ ГПа, $\beta = 18\,300$ с$^{-1}$; *1* — экспериментальные данные [6]; *2* — результаты расчета

Таблица 1

Оболочка	δ							δ_0	δ_*
	$n = 3$	$n = 5$	$n = 7$	$n = 9$	$n = 11$	$n = 13$	$n = 15$		
Изотропная	0,5707	0,1768	0,1685	0,2714	0,1223	0,1484	0,2101	0,2383	0,2166
Ортотропная	0,3869	0,2128	0,1598	0,2331	0,1635	0,1676	0,1936	0,2168	0,2166

тухания δ в зависимости от числа периодов колебаний n, а также среднее теоретическое значение δ_0 и экспериментальное значение δ_*.

Из анализа полученных данных следует, что декремент затухания зависит от интервала, по которому он рассчитывается. Однако среднее значение декремента затухания δ_0 хорошо согласуется с экспериментальным значением δ_* [6], причем для ортотропной модели поведения материала оболочки результаты расчетов практически совпадают с экспериментальными данными.

Проведен анализ зависимости логарифмического декремента от параметра тонкостенности полусферической оболочки R/h. В табл. 2 приведены значения среднего декремента в области экватора при различных значениях R/h. Видно, что по мере уменьшения толщины оболочки декремент сначала существенно увеличивается, а затем, при $R/h \geqslant 20$, становится практически постоянным. Полученный результат согласуется с аналогичными данными для традиционных материалов [10].

Таблица 2

R/h	δ
4	0,1033
8	0,2260
15	0,3770
30	0,3675
50	0,3698

Таким образом, проведенный экспериментально-теоретический анализ нестационарного деформирования полусферических оболочек, выполненных из хаотически армированного полимерного материала, свидетельствует об эффективности предлагаемого метода идентификации динамических вязкоупругих свойств композитных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Воронцов Г. В., Плющев Б. И., Резниченко А. И.** Определение приведенных упругих характеристик армированных композитных материалов методами обратных задач тензометрирования // Механика композит. материалов. 1990. № 4. С. 733–736.
2. **Суворова Ю. В., Добрынин В. С.** Определение свойств композита в конструкции методом параметрической идентификации // Механика композит. материалов. 1989. № 1. С. 150–157.
3. **Алфутов Н. А., Зиновьев П. А., Таирова Л. П.** Идентификация упругих характеристик однонаправленных материалов по результатам испытаний многослойных композитов // Расчеты на прочность. М.: Машиностроение, 1989. Т. 30. С. 16–31.
4. **Матвеенко В. П., Юрлова Н. А.** Идентификация упругих постоянных композитных оболочек на основе статических и динамических экспериментов // Изв. РАН. Механика твердого тела. 1998. № 3. С. 12–20.
5. **Демешкин А. Г., Козеко М. Е., Корнев В. М., Кургузов В. Д.** Демпфирующие характеристики композитных конструкционных материалов, изготовленных намоткой // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 1. С. 190–195.
6. **Володина Л. В., Гердюков Н. Н., Зотов Е. В. и др.** Реакция полусферических оболочек из ВВ на действие импульсной нагрузки (экспериментально-расчетное исследование). Вещества, материалы и конструкции при интенсивных динамических воздействиях // Тр. Междунар. конф. “V Харитоновские темат. науч. чтения”. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2003.
7. **Абросимов Н. А., Баженов В. Г.** Нелинейные задачи динамики композитных конструкций. Н. Новгород: Изд-во Нижегор. гос. ун-та, 2002.
8. **Зотов Е. В., Гердюков Н. Н., Володина Л. В.** Миниатюрное сферическое взрывное нагружающее устройство // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 2. С. 134–140.
9. **Абросимов Н. А.** Идентификация моделей вязкоупругого деформирования композитных оболочек вращения при импульсном нагружении // Пробл. прочности и пластичности. 2002. Вып. 64. С. 20–26.
10. **Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.** Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. Киев: Наук. думка, 1971.
11. **Поляк Б. Т.** Введение в оптимизацию. М.: Наука, 1983.

Поступила в редакцию 17/VIII 2005 г.