

УДК 539.3:539.4.014.13:53.083.2

## РЕЗОНАНСНЫЙ МОНИТОРИНГ СТРУКТУРЫ СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЫ

© 2007 г. Т.И. Белянкова<sup>1</sup>, И.Е. Анджинович<sup>1</sup>, Д.Н. Шейдаков<sup>2</sup>

Разработан эффективный метод контроля структуры слоистых композитных материалов. Метод основан на регистрации изменения динамических свойств системы датчик – слоисто-неоднородная среда.

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема оценки состояния и прочностного ресурса узлов и деталей является решающей для повышения надежности эксплуатации транспортных средств и оборудования и предотвращения аварийных ситуаций, особенно для изделий, выполненных из композиционных материалов. На стадии производства для контроля качества изготовления деталей широко используются методы акустического контроля. Достаточно полный обзор этих методов, их достоинств и недостатков приведен в работах [1–5]. Однако использование ультразвука накладывает определенные ограничения на структуру композиционных материалов (исключаются, например, сотовые материалы, волокнистые, зернистые), а использование низкочастотных акустических методов [3, 4] – на форму изделий и свойства материала (слабое демпфирование). Использование этих методов для контроля остаточного ресурса узлов и деталей в процессе эксплуатации сопряжено с большими трудностями как принципиального характера, так и аппаратно-измерительного обеспечения.

В настоящей работе предлагается эффективный подход к контролю структуры слоистых композитных материалов, основанный на регистрации изменения резонансных свойств системы датчик – слоисто-неоднородная среда. Преимуществом подобного подхода является его интегральный, основанный на использовании низкочастотных колебаний, характер, что позволяет в значительной мере увеличить кон-

тролируемую одним датчиком площадь и тем самым открывает перспективу создания систем непрерывного мониторинга – дистанционного контроля состояния деталей и узлов, выполненных из слоистых композиционных материалов.

### 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ДАТЧИК – СРЕДА

При описании математической модели системы датчик–среда будем полагать, что жесткость контактирующего элемента датчика значительно превышает жесткость материала исследуемого объекта. Такое предположение вполне оправданно для подавляющего большинства реальных ситуаций. Это позволяет в качестве модели датчика использовать жесткий массивный штамп, а в качестве исследуемого объекта – упругую (вязкоупругую) неоднородную (композитную) среду. Для иллюстрации эффективности и информативности предлагаемого подхода к контролю структуры слоистого материала рассмотрим колебания датчика на поверхности составной среды, представляющей собой пакет из двух слоев (слой I –  $h_2 \leq x_3 \leq h_2 + h_1 = h$  и слой II –  $0 \leq x_3 \leq h_2$ ), толщина и упругие параметры которых равны соответственно  $h_1, \lambda^{(1)}, \mu^{(1)}$  и  $h_2, \lambda^{(2)}, \mu^{(2)}$ . Нижняя грань пакета жестко сцеплена с недеформируемым основанием, общая его толщина  $h$  полагается фиксированной. Изменение структуры среды моделируется либо полным сцеплением слоев, либо отсутствием трения между ними. Для прозрачности изложения ограничимся случаем вертикальных поступательных колебаний полосового штампа, занимающего в плане область  $|x_1| \leq 1, |x_2| \leq \infty$ , колебания полагаем установивши-

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт механики и прикладной математики им. И.И. Воровича Южного федерального университета, Ростов-на-Дону.

<sup>2</sup> Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону.

мися, трение в области контакта отсутствующим.

Задача сводится к согласованному решению уравнения движения массивного тела

$$-\omega^2 mw = F - R, \quad R = \int_{-1}^1 q_3(x_1) dx_1 \quad (1.1)$$

и краевой задачи о колебании слоя, на поверхности которого заданы смешанные условия:

$$w = u_3(x_1, h), \quad |x_1| \leq 1, \quad |x_2| \leq \infty, \quad (1.2)$$

$$q_3(x_1) = 0, \quad |x_1| > 1, \quad |x_2| \leq \infty. \quad (1.3)$$

Здесь  $m$  – масса датчика;  $w$  и  $\omega$  – амплитуда и частота его колебаний;  $F$  – амплитуда внешней силы, приложенной к штампу,  $R$  – амплитуда реактивной силы, действующей на штамп со стороны среды,  $u_3(x_1, x_3)$  – амплитуда перемещения произвольной точки среды,  $q_3(x_1)$  – амплитуда вертикальной компоненты вектора напряжений, возникающих при контакте штампа с основанием.

## 2. КРАЕВАЯ ЗАДАЧА О КОЛЕБАНИЯХ СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЫ

Рассмотрим задачу о колебаниях слоисто-неоднородной среды, представляющей собой пакет слоев (I)  $|x_1|, |x_2| \leq \infty, h_2 \leq x_3 \leq h$  и (II)  $|x_1|, |x_2| \leq \infty, 0 \leq x_3 \leq h_2$ , жестко сцепленный с недеформируемым основанием. Будем предполагать, что между слоями имеет место либо полное сцепление (задача (а)), либо отсутствие трения (задача (б)). Действие штампа заменим заданной распределенной нагрузкой  $q_3(x_1)e^{i\omega t}$ .

Краевая задача описывается уравнениями движения ( $n = 1, 2$ )

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{11}^{(n)}}{\partial x_1} + \frac{\partial \theta_{13}^{(n)}}{\partial x_3} &= \rho^{(n)} \frac{\partial^2 u_1^{(n)}}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \theta_{31}^{(n)}}{\partial x_1} + \frac{\partial \theta_{33}^{(n)}}{\partial x_3} &= \rho^{(n)} \frac{\partial^2 u_3^{(n)}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.1)$$

с граничными условиями: на поверхности среды  $x_3 = h$

$$\theta_{33}^{(1)} = \begin{cases} q_3(x_1)e^{i\omega t}, & |x_1| \leq 1, \quad |x_2| \leq \infty, \\ 0, & |x_1| > 1, \quad |x_2| \leq \infty; \end{cases} \quad (2.2)$$

в основании пакета  $x_3 = 0$

$$u_1^{(2)} = 0, \quad u_3^{(2)} = 0. \quad (2.3)$$

На границе слоев  $x_3 = h_2$  имеют место: в задаче (а) – полное сцепление слоев

$$\theta_{3k}^{(1)} = \theta_{3k}^{(2)}, \quad u_k^{(1)} = u_k^{(2)}, \quad k = 1, 3; \quad (2.4)$$

в задаче (б) – отсутствие трения между слоями

$$\theta_{31}^{(1)} = \theta_{31}^{(2)} = 0, \quad \theta_{33}^{(1)} = \theta_{33}^{(2)}, \quad u_3^{(1)} = u_3^{(2)}. \quad (2.5)$$

В формулах (2.1)–(2.5) приняты следующие обозначения:  $\rho^{(n)}$  – плотность материала соответствующего слоя,

$$\theta_{11}^{(1)} = (\lambda^{(n)} + 2\mu^{(n)})u_{1,1}^{(n)} + \lambda^{(n)}u_{3,3}^{(n)},$$

$$\theta_{33}^{(n)} = \lambda^{(n)}u_{1,1}^{(n)} + (\lambda^{(n)} + 2\mu^{(n)})u_{3,3}^{(n)},$$

$$\theta_{13}^{(n)} = \theta_{31}^{(n)} = \mu^{(n)}(u_{1,3}^{(n)} + u_{3,1}^{(n)}).$$

Учитывая установившийся характер колебаний, будем полагать, что все величины представляются в виде  $f(x_1, t) = f(x_1)\exp(-i\omega t)$ , далее экспоненциальный множитель опускается.

В последующем изложении используются безразмерные параметры

$$u'_k = \frac{u_k}{h}, \quad x'_k = \frac{x_k}{h}, \quad \mu' = \frac{\mu}{\mu^{(2)}}, \quad \lambda' = \frac{\lambda}{\mu^{(2)}}, \quad \rho' = \frac{\rho}{\rho^{(2)}}.$$

В качестве безразмерной частоты используется параметр

$$\alpha_2^2 = \frac{\rho^{(2)}\omega^2 h^2}{\mu^{(2)}}.$$

Далее штрихи опускаем.

## 3. РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ

Решение краевой задачи (а) (2.1)–(2.3) и (2.4) либо задачи (б) (2.1)–(2.3) и (2.5) представляется в виде ( $n = 1, 2$ )

$$\begin{aligned} \int_{-1}^1 k^{(n)}(x_1 - \xi, x_3, \alpha_2) q_3(\xi, \alpha_2) d\xi &= u_3^{(n)}(x_1, x_3), \\ k^{(n)}(x_1, x_3, \alpha_2) &= \frac{1}{2\pi \Gamma} \int K^{(n)}(\alpha, x_3, \alpha_2) e^{-i\alpha x_1} d\alpha, \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} K_{33}^{(n)} &= \sum_{k=1}^2 \left[ \Delta_{2,k+4(n-1)} \operatorname{ch} \sigma_k^{(n)} x_3 + \right. \\ &\quad \left. + \Delta_{2,k+4(n-1)+2} \operatorname{sh} \sigma_k^{(n)} x_3 \right], \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\Delta_{kp} = \frac{\Delta_{kp}^0}{\Delta^0}, \quad k, p = 1, 2, \dots, 8,$$

$$\Delta^0 = \det \| T_{kp} \|_{k,p=1,2,\dots,8}, \quad (3.3)$$

где функции  $\Delta_{kp}^0$  ( $k = 1, 2, \dots, 8$ ) являются алгебраическими дополнениями соответствующих

элементов матрицы  $\|T_{kp}\|_{k,p=1}^8$ , которые для задачи (а) имеют вид ( $k = 1, 2$ )

$$\begin{aligned} T_{1k} &= l_{1k}^{(1)} \operatorname{ch} \sigma_k^{(1)} h, & T_{1,k+2} &= l_{1k}^{(1)} \operatorname{sh} \sigma_k^{(1)} h, \\ T_{1,k+4} &= T_{1,k+6} = T_{2,k+4} = T_{2,k+6} = 0, \\ T_{2k} &= l_{2k}^{(1)} \operatorname{sh} \sigma_k^{(1)} h, & T_{2,k+2} &= l_{2k}^{(1)} \operatorname{ch} \sigma_k^{(1)} h, \\ T_{3k} &= l_{1k}^{(1)} \operatorname{sh} \sigma_k^{(1)} h_2, & T_{3,k+2} &= f_{1k}^{(1)} \operatorname{ch} \sigma_k^{(1)} h_2, \\ T_{3,k+4} &= -f_{1k}^{(2)} \operatorname{sh} \sigma_k^{(2)} h_2, & T_{3,k+6} &= -f_{1k}^{(2)} \operatorname{ch} \sigma_k^{(2)} h_2, \quad (3.4) \\ T_{4k} &= f_{2k}^{(1)} \operatorname{ch} \sigma_k^{(1)} h_2, & T_{4,k+2} &= f_{2k}^{(1)} \operatorname{sh} \sigma_k^{(1)} h_2, \\ T_{4,k+4} &= -f_{1k}^{(2)} \operatorname{ch} \sigma_k^{(2)} h_2, & T_{4,k+6} &= -f_{2k}^{(2)} \operatorname{sh} \sigma_k^{(2)} h_2, \\ T_{5k} &= l_{1k}^{(1)} \operatorname{ch} \sigma_k^{(1)} h_2, & T_{5,k+2} &= l_{1k}^{(1)} \operatorname{sh} \sigma_k^{(1)} h_2, \\ T_{5,k+4} &= -l_{1k}^{(2)} \operatorname{ch} \sigma_k^{(2)} h_2, & T_{5,k+6} &= -l_{1k}^{(2)} \operatorname{sh} \sigma_k^{(2)} h_2, \\ T_{6k} &= l_{2k}^{(1)} \operatorname{sh} \sigma_k^{(1)} h_2, & T_{6,k+2} &= l_{2k}^{(1)} \operatorname{ch} \sigma_k^{(1)} h_2, \\ T_{6,k+4} &= -l_{2k}^{(2)} \operatorname{sh} \sigma_k^{(2)} h_2, & T_{6,k+6} &= -l_{2k}^{(2)} \operatorname{ch} \sigma_k^{(2)} h_2, \\ T_{7k} &= T_{7,k+2} = T_{7,k+4} = 0, & T_{7,k+6} &= f_{1k}^{(2)}, \\ T_{8k} &= T_{8,k+2} = T_{8,k+6} = 0, & T_{8,k+4} &= f_{2k}^{(2)}. \end{aligned}$$

Здесь

$$\begin{aligned} f_{11}^{(n)} &= -i\alpha(\sigma_1^{(n)})^{-1}, & f_{12}^{(n)} &= -i\alpha^{-1}\sigma_2^{(n)}, \\ f_{21}^{(n)} &= f_{22}^{(n)} = 1, \\ l_{11}^{(n)} &= -2\mu^{(n)}i\alpha, & l_{12}^{(n)} &= 2\mu^{(n)}i\alpha^{-1}\theta^{(n)}, \\ l_{21}^{(n)} &= 2\mu^{(n)}\frac{\theta^{(n)}}{\sigma_1^{(n)}}, & l_{22}^{(n)} &= 2\mu^{(n)}\sigma_2^{(n)}, \end{aligned}$$

$\sigma_k^{(n)}$  удовлетворяют характеристическому уравнению

$$\left(\sigma_1^{(n)} - \frac{\rho^{(n)}\kappa_2^2}{\lambda^{(n)} + 2\mu^{(n)}}\right) \left(\sigma_2^{(n)} - \frac{\rho^{(n)}\kappa_2^2}{\mu^{(n)}}\right)^2 = 0. \quad (3.5)$$

Для задачи (б) изменяется вид элементов в строках с номерами 3 и 5:

$$\begin{aligned} T_{3k} &= l_{1k}^{(1)} \operatorname{ch} \sigma_k^{(1)} h_1, & T_{3,k+2} &= l_{1k}^{(1)} \operatorname{sh} \sigma_k^{(1)} h_1, \\ T_{3,k+4} &= T_{3,k+6} = 0, & T_{5k} &= T_{5,k+2} = 0, \quad (3.6) \\ T_{5,k+4} &= l_{1k}^{(2)} \operatorname{ch} \sigma_k^{(2)} h_1, & T_{5,k+6} &= l_{1k}^{(2)} \operatorname{sh} \sigma_k^{(2)} h_1. \end{aligned}$$

#### 4. ИНТЕГРАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ЗАДАЧИ О ШТАМПЕ

Выражение (3.1) совместно с формулами (3.2)–(3.6) определяет перемещение произвольной точки структурно-неоднородной среды под действием нагрузки  $q_3(x_1)$ . В случае, когда колебания среды инициализируются осциллирующим штампом (датчиком), амплитуда колебаний которого равна  $u_3^0$ , в формулах (3.1), (3.2) необходимо положить  $x_3 = h$ ,  $u_3^{(1)} = u_3^0$ :

$$\int_{-1}^1 k^{(1)}(x_1 - \xi, h, \kappa_2) q_3(\xi, \kappa_2) d\xi = u_3^0, \quad (4.1)$$

$$k^{(1)}(x_1, h, \kappa_2) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} K^{(1)}(\alpha, h, \kappa_2) e^{-i\alpha x_1} d\alpha. \quad (4.2)$$

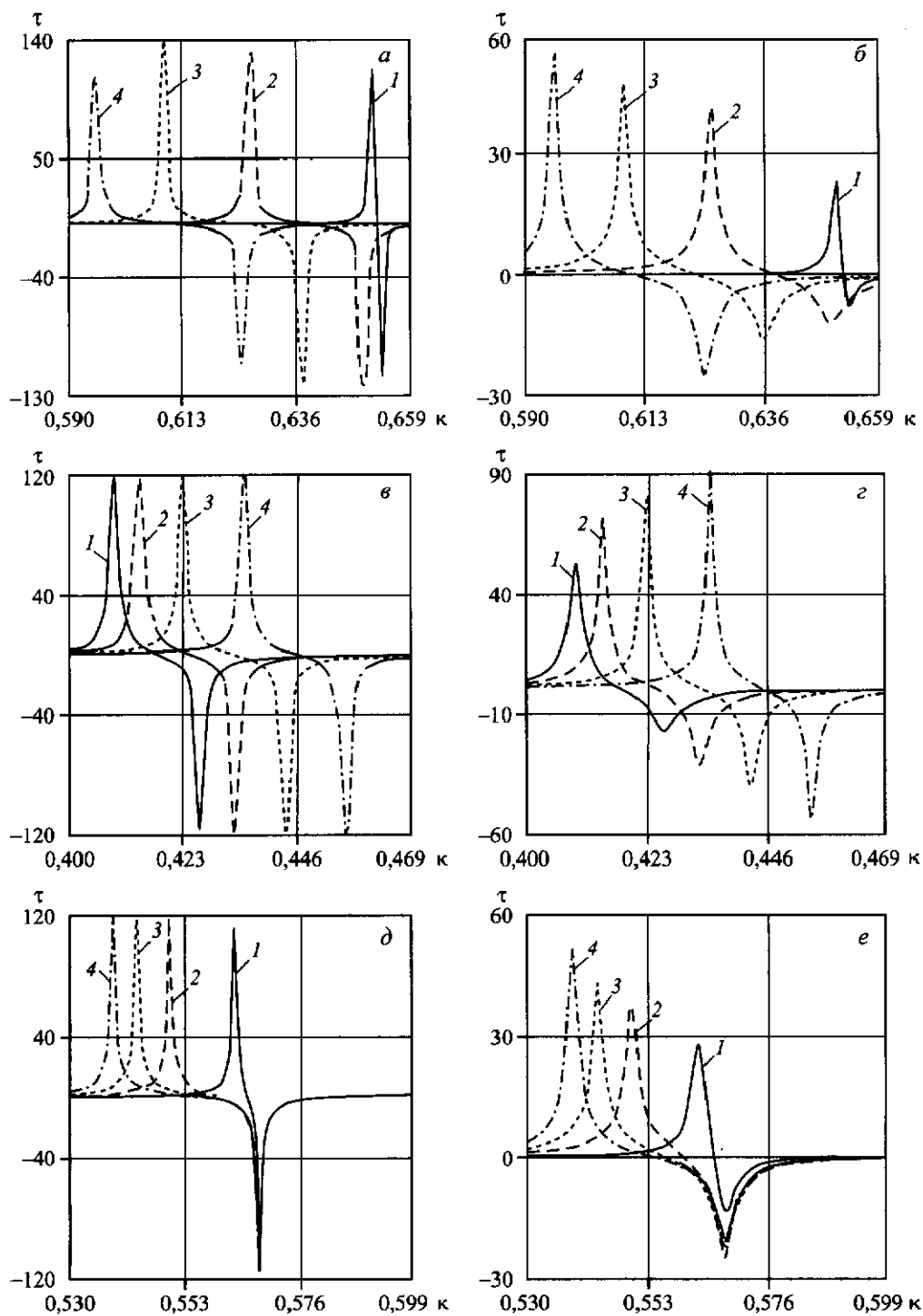
Выражение (4.1) представляет собой интегральное уравнение относительно неизвестной функции распределения контактных напряжений. Функция  $K_{33}^{(1)}(\alpha, h, \kappa_2)$  в представлении (4.2) является мероморфной в комплексной плоскости, имеет конечное, зависящее от частоты множество вещественных нулей и полюсов, что обуславливает осциллирующий характер функции  $K_{33}^{(1)}(\alpha, h, \kappa_2)$  и тем самым определяет необходимость использования для решения уравнения (4.1) специальных методов, учитывающих это обстоятельство [6–10]. В настоящей работе для решения используется обобщенный метод факторизации [11, 12], позволяющий с высокой точностью учитывать динамические свойства составной среды и проводить анализ влияния структуры среды на динамику контактирующего с ней штампа.

#### 5. ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ СРЕДЫ НА АМПЛИТУДУ КОЛЕБАНИЙ ДАТЧИКА

Введем в рассмотрение динамическую жесткость среды  $Q_0$  – реактивную силу, действующую со стороны среды на штамп, амплитуда колебаний которого равна 1. В силу линейности задачи реакция среды на произвольное перемещение штампа представится в виде

$$R = wQ_0. \quad (5.1)$$

Внося выражение (5.1) в формулу (1.1) и разрешая относительно  $w$ , получим формулу для вы-



**Рис. 1.** Влияние изменения структуры среды на амплитуду колебаний массивного датчика. Цифрами 1, 2, 3 и 4 обозначены кривые, соответствующие толщине верхнего слоя, равной 0,1; 0,2; 0,3 и 0,4. *a, б* – среда “нормального” типа,  $\mu = 0,5$ ; *в, г* – среда “аномального” типа,  $\mu = 1,5$ ; *д, е* – однородная среда,  $\mu = 1, 0$ . *a, в, д* – идеальное, *б, г, е* – вязкое основание

числения амплитуды поступательных вертикальных колебаний жесткого штампа

$$w = \frac{F}{Q_0 - \kappa_2^2 m}. \quad (5.2)$$

На рис. 1 представлены графики функций  $\tau = |w^-| - |w^+|$  ( $w^-$  и  $w^+$  – амплитуды колебаний штампа в случае отсутствия трения между слоями и в случае полного их сцепления соответственно), иллюстрирующие возможность контроля глубины залегания дефекта (расслоения) за счет регистрации изменения резонансной частоты системы датчик – композитная среда. Цифрами 1, 2, 3 и 4 обозначены кривые, рассчитанные для глубины залегания дефекта (толщины верхнего слоя), равной 0,1, 0,2, 0,3 и 0,4. На рис. 1а и 1б приведены графики для случая среды “нормального” типа (верхний слой более податлив), на рис. 1в и 1г – графики для среды “аномального” типа (верхний слой более жесткий). На рис. 1д и 1е представлены графики для случая, когда параметры слоев совпадают. Графики на рис. 1а, 1в и 1д рассчитаны для идеальной среды, на рис. 1б, 1г и 1е – для среды с вязким нижним слоем. Ширина частотного окна для всех случаев одна и та же.

Поскольку жесткость пакета сцепленных слоев превышает жесткость пакета скользящих, то резонансы при сцеплении (минимумы на рис. 1) лежат выше резонансов при скольжении (максимумы). Это следует из особенностей колебаний массивного тела на поверхности упругого слоя в докритической области частот, при которых резонансная частота обратно пропорциональна массе тела и прямо пропорциональна жесткости среды. Из графиков на рис. 1а следует, что для среды нормального типа при небольшой глубине залегания дефекта ( $h_1 = 0,1$ ) влияние условий контакта между слоями слабо сказывается на резонансной частоте колебаний датчика. Такой характер поведения датчика обусловлен тем, что общая жесткость пакета определяется параметрами подложки – более толстого ( $h_2 = h - h_1$ ) и более “жесткого” слоя. При увеличении глубины залегания дефекта (толщины верхнего слоя  $h_1 = 0,2; 0,3; 0,4$ ) влияние условий контакта на резонансную частоту колебаний штампа усиливается. Это обусловлено тем, что с увеличением толщины податливого слоя толщина “жесткого” слоя, равно как и жесткость всего пакета, уменьшается. Тем самым условия контакта между слоями начинают играть более

значительную роль в жесткости всей структуры и оказывают ощутимое влияние на амплитуду колебаний массивного тела.

На рис. 1в представлена обратная ситуация, когда жесткость нижнего слоя мала. Как следует из графиков, уже при толщине верхнего слоя  $h_1 = 0,1$  условия контакта между слоями значительно влияют на жесткость всего пакета. Это влияние возрастает до толщины  $h_1 = 0,3$ , далее ( $h_1 = 0,3; 0,4$ ) оно стабилизируется. Такой характер динамического поведения штампа обусловлен тем, что в этом случае общая жесткость пакета в меньшей степени зависит от жесткости нижнего, более толстого, но податливого слоя. С увеличением толщины жесткого слоя жесткость всей структуры также увеличивается при одновременном увеличении вклада в эту жесткость доли верхнего слоя (жесткость всей структуры увеличивается пропорционально толщине). Тем самым условия контакта между слоями хотя и играют значительную роль в жесткости всей структуры, но их влияние на динамику массивного штампа (с увеличением толщины верхнего слоя) стабилизируется.

На рис. 1д представлен случай, когда параметры слоев совпадают. Как и следовало ожидать, жесткость сцепленного пакета не зависит от толщины составляющих его слоев, но жесткость пакета с дефектом существенно зависит от глубины его залегания. Чем больше толщина верхнего слоя, т.е. чем глубже залегает дефект расслоения, тем больший частотный сдвиг наблюдается у резонанса.

Таким образом, наличие дефекта – проскальзывания между слоями – приводит к сдвигу резонансной частоты системы датчик–изделие, который определяется глубиной залегания дефекта, в область низких частот. Тем самым регистрация изменений резонансной частоты позволяет контролировать условия контакта между слоями, а также глубину залегания расслоения.

Аналогичное поведение также наблюдается, когда нижний слой обладает демпфирующими свойствами. При этом эффект проскальзывания приводит не только к сдвигу резонансной частоты, но и к изменению амплитуды колебаний датчика. Увеличение глубины залегания дефекта приводит к увеличению амплитуды колебаний для всех материалов, что представляется естественным, так как уменьшается толщина вязкого слоя. Однако вязкость нижнего слоя не влияет на характер изменения резонансной частоты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен эффективный подход к контролю структуры слоистых композитных материалов, основанный на регистрации изменения резонансных свойств системы датчик – слоисто-неоднородная среда.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 05-08-65499, 06-01-00726 и 06-08-96635р\_юг).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы неразрушающих испытаний / Под ред. Р. Шарпа. М.: Мир, 1972. 494 с.
2. Неразрушающие методы контроля / Под ред. В.Я. Кершенбаума. М., 1992. 254 с.
3. Неразрушающие испытания / Под ред. Р. Мак-Мастера. М.; Л.: Энергия, 1965. Т. 1. 504 с. Т. 2. 492 с.
4. Глазовский Б.А., Московенко И.Б. Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1977. 208 с.
5. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И., Лебедев В.К. Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах. Киев: Наукова думка, 1974. 106 с.
6. Ворovich И.И., Бабешко В.А. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.: Наука, 1979. 320 с.
7. Бабешко В.А. Обобщенный метод факторизации в пространственных динамических смешанных задачах теории упругости. М.: Наука, 1984. 256 с.
8. Бабешко В.А., Ворovich И.И., Образцов И.Ф. Явление высокочастотного резонанса в полуограниченных телах с неоднородностями // Изв. АН СССР. МТТ. 1990. № 3. С. 74–83.
9. Бабешко В.А. К расчету параметров высокочастотного резонанса в трехмерном случае // ДАН. 1994. Т. 335. № 1. С. 55–59.
10. Ворovich И.И., Бабешко В.А., Пряхина О.Д. Динамика массивных тел и резонансные явления в деформируемых средах. М.: Научный мир, 1999. 246 с.
11. Калинин В.В., Белянкова Т.И. Динамические контактные задачи для предварительно напряженных тел. М.: Физматлит, 2002. 240 с.
12. Калинин В.В., Белянкова Т.И. Динамические контактные задачи для предварительно напряженных электроупругих сред. М.: Физматлит, 2006. 272 с.

## RESONANCE MONITORING OF LAYERED INHOMOGENEOUS MEDIUM STRUCTURE

T.I. Belyankova, I.E. Andzhikovich, D.N. Sheidakov

The effective approach is offered to control the structure of layered composite materials. This approach is based on the registration of changes in a resonance behavior for the sensor-layered inhomogeneous medium system.

## REFERENCES

1. Sharpe R.S. (Ed.). 1970. *Research techniques in nondestructive testing*. L., Academic Press: 492 p.
2. Kershenbaum V.Ya. (Ed.). 1992. *Nerazrushayushchie metody kontrolya*. [Non-destructive control methods]. M., "Nauka i tekhnika": 254 p. (In Russian).
3. McMaster R.C. (Ed.). 1959. *Nondestructive testing handbook*. N.-Y., Ronald Press Company: 996 p.
4. Glagovskiy B.A., Moskovenko I.B. 1977. *Nizkochastotnye akusticheskie metody kontrolya v mashinostroenii*. [Low-frequency acoustic control methods in mechanical engineering]. Leningrad, "Mashinostroenie": 208 p. (In Russian).
5. Guz' A.N., Makhort F.G., Gushcha O.I., Lebedev V.K. 1974. *Osnovy ul'trazvukovogo nerazrushayushchego metoda opredeleniya napryazheniy v tverdykh telakh*. [Basics of ultrasonic nondestructive method for determining the stresses in solids]. Kiev, "Naukova dumka": 106 p. (In Russian).
6. Vorovich I.I., Babeshko V.A. 1979. *Dinamicheskie smeshannye zadachi teorii uprugosti dlya neklassicheskikh oblastey*. [Dynamic mixed problems of elasticity theory for nonclassical regions]. M., "Nauka": 320 p. (In Russian).
7. Babeshko V.A. 1984. *Obobshchenny metod faktorizatsii v prostranstvennykh dinamicheskikh smeshannykh zadachakh teorii uprugosti*. [Generalized factorization method in spatial dynamic mixed problems of elasticity]. M., "Nauka": 256 p. (In Russian).
8. Babeshko V.A., Vorovich I.I., Obratsov I.F. 1990. [The phenomenon of high-frequency resonance in semi-infinite bodies with inhomogeneities]. *Izvestiya akademii nauk SSSR. Mekhanika tverdogo tela*. (3): 74–83. (In Russian).
9. Babeshko V.A. 1994. [On the calculation of high-frequency resonance parameters in the three-dimensional case]. *Doklady akademii nauk*. 335(1): 55–59. (In Russian).
10. Vorovich I.I., Babeshko V.A., Pryakhina O.D. 1999. *Dinamika massivnykh tel i rezonansnye yavleniya v deformiruemyykh sredakh*. [The dynamics of massive bodies and resonance phenomena in deformable media]. M., "Nauchnyy mir": 246 p. (In Russian).
11. Kalinchuk V.V., Belyankova T.I. 2002. *Dinamicheskie kontaktnye zadachi dlya predvaritel'no napryazhennykh tel*. [Dynamic contact problems for prestressed bodies]. M., "Fizmatlit": 240 p. (In Russian).
12. Kalinchuk V.V., Belyankova T.I. 2006. *Dinamicheskie kontaktnye zadachi dlya predvaritel'no napryazhennykh elektrouprugikh sred*. [Dynamic contact problems for prestressed electroelastic media]. M., "Fizmatlit": 272 p. (In Russian).