Сформулированная задача гидроупругости (1)–(4) исследовалась методом возмущений. Это позволило перейти к линеаризованной задаче динамики тонкого слоя вязкой жидкости в узкой клиновидной щели, но с учетом локального члена инерции. Данная задача решалась методом итераций подобно [5]. В результате определены законы изменения гидродинамических параметров в жидкости. На следующем этапе решалось уравнение (4) для режима установившихся гармонических колебаний. После этого были определены гидроупругий отклик стенки и соответствующая ему характеристика фазового сдвига. Данные характеристики можно исследовать численно, и в частности, с их помощью найти резонансные частоты колебаний стенки канала.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание по теме 125020501400-6).

Список литературы

1 Аэрогидроупругость конструкций / А. Г. Горшков, В. И. Морозов, А. Т. Пономарев, Ф. Н. Шклярчук. – М. : Физматлит, 2000. – 592 с.

2 Fluid-structure interactions: cross-flow-induced instabilities / M. P. Païdoussis, S. J. Price, E. Langre Cambridge : Cambridge University Press, 2010. – 414 p.

3 **Константинеску, В. Н.** Газовая смазка / В. Н. Константинеску. – М. : Машиностроение, 1968. – 718 с.

4 **Попов В. С.** Моделирование взаимодействия стенки канала с упругозакрепленным торцевым уплотнением / В. С. Попов, А. А. Попова // Компьютерные исследования и моделирование. – 2020. – Т. 12, № 2. – С. 387–400.

5 **Попов, В. С.** Моделирование гидроупругих колебаний стенки канала, имеющей нелинейно-упругую опору / В. С. Попов, А. А. Попова // Компьютерные исследования и моделирование. – 2022. – Т. 14. – № 1. – С. 79–92.

6 **Могилевич, Л. И.** Продольные и поперечные колебания упругозакрепленной стенки клиновидного канала, установленного на вибрирующем основании / Л. И. Могилевич, В. С. Попов, А. А. Попова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2018. – № 3. – С. 28–36.

7 **Mogilevich, L. I.** Mathematical modeling of elastically fixed wall longitudinal oscillations of wedge-shaped channel under foundation vibration / L. I. Mogilevich, V. S. Popov, L. N. Rabinsky // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2016. – Vol. 12, № 4. – P. 9–17.

8 **Лойцянский, Л. Г.** Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Дрофа, 2003. – 840 с.

УДК 539.3

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СФЕРИЧЕСКОМ УПРУГОМ СЛОЕ С ВЯЗКОУПРУГИМ ПОКРЫТИЕМ

С. Г. ПШЕНИЧНОВ

Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

Развитие современных технологий, а также появление новых материалов создают необходимость исследований динамики кусочно-однородных сред с вязкоупругими компонентами. Некоторые результаты в этой области, полученные в недавнее время, содержатся, например в работах [1–6], при этом в большинстве известных публикаций внимание уделяется не переходным волновым процессам, а гармоническим колебаниям и волнам. Среди разнообразных подходов к изучению нестационарных волн в средах рассматриваемого типа весьма важным является развитие аналитических методов построения решений соответствующих начально-краевых задач, однако на сегодня достигнутых успехов в этом направлении явно недостаточно. В настоящей работе представлены результаты исследований нестационарных процессов в сферическом упругом слое с вязкоупругим покрытием, полученные на основе более ранних аналитических разработок [7, 8].

Рассмотрена задача о распространении нестационарных возмущений в кусочно-однородном полом шаре, состоящем из двух однородных концентрических сферических слоев с условиями непрерывности на границе между ними. Один слой – из упругого материала, другой же, более тонкий, который будем называть покрытием, является вязкоупругим. Конструкция изначально покоится, но в момент $t = 0$ на внешнюю поверхность полого шара начинает действовать равномерно распределенная нормальная нагрузка $P(t)$, при этом полость шара остается свободной.

В сферической системе координат с началом в центре шара соотношения $R = R_0$, $R = R_2$ для радиальной координаты R определяют границу полости и нагруженную границу, а условие $R = R_1$ задает границу между однородными слоями, при этом $R_0 \le R \le R_1$ соответствует первому слою, $R_1 \le R \le R_2$ – второму. Введем безразмерные величины ($j = 1,2,3$, $n = 1,2$):

$$x_0 = R_0 / R_2, \quad x_1 = R_1 / R_2, \quad x = R / R_2, \quad \tau = t/t_0, \quad \gamma_{\text{v}}^{(n)}(\tau) = t_0 T_{\text{v}}^{(n)}, \quad \gamma_{\text{s}}^{(n)}(\tau) = t_0 T_{\text{s}}^{(n)}, \quad e_n = c_2 / c_n,$$

$$u^{(n)}(x,\tau) = u_R^{(n)} / R_2, \quad \sigma_j^{(n)}(x,\tau) = P_j^{(n)} / (2G_0^{(n)}), \quad P_0\psi(\tau) = P / (2G_0^{(2)}), \quad w_n = (1-\nu_0^{(n)}) / (1-2\nu_0^{(n)}),$$

где индекс n соответствует номеру слоя; $t_0 = R_2/c_2$; $u_R^{(n)}$ – радиальное перемещение, $P_1^{(n)}, P_2^{(n)}, P_3^{(n)}$ – радиальное и окружные напряжения, при этом $P_2^{(n)} \equiv P_3^{(n)}$; P_0 – безразмерная константа; $G_0^{(n)}, \nu_0^{(n)}, c_n$ – мгновенные значения модуля сдвига и коэффициента Пуассона, а также скорость продольных упругих волн. Вязкоупругим покрытием является либо второй, либо первый слой и для него $T_v^{(n)}, T_s^{(n)}$ – ядра объемной и сдвиговой релаксации, для упругого же слоя $T_{\text{v}}^{(n)} \equiv T_{\text{s}}^{(n)} \equiv 0$. Математическая формулировка задачи включает уравнения динамики ($n = 1,2$):

$$(1-\hat{\gamma}_1^{(n)})\{(u^{(n)}(x,\tau))' + 2u^{(n)}(x,\tau)/x\}' - (e_n)^2 \ddot{u}^{(n)}(x,\tau) = 0, \quad x_{n-1} \le x \le x_n, \tag{1}$$

граничные условия

$$\sigma_1^{(2)}(1,\tau) = -P_0\psi(\tau), \quad \sigma_1^{(1)}(x_0,\tau) = 0, \quad \tau > 0, \tag{2}$$

начальные условия

$$u^{(n)}(x,0) = 0, \quad \dot{u}^{(n)}(x,0) = 0, \tag{3}$$

условия непрерывности на границе между слоями

$$u^{(1)}(x_1,\tau) = u^{(2)}(x_1,\tau), \quad G_0^{(1)}\sigma_1^{(1)}(x_1,\tau) = G_0^{(2)}\sigma_1^{(2)}(x_1,\tau) \tag{4}$$

и определяющие соотношения

$$\sigma_1^{(n)}(x,\tau) = w_n(1-\hat{\gamma}_1^{(n)})[u^{(n)}(x,\tau)]' + 2(w_n - 1)(1-\hat{\gamma}_2^{(n)})u^{(n)}(x,\tau)/x,$$

$$\sigma_2^{(n)}(x,\tau) = \sigma_3^{(n)}(x,\tau) = (w_n - 1)(1-\hat{\gamma}_2^{(n)})[u^{(n)}(x,\tau)]' + [w_n(1-\hat{\gamma}_1^{(n)}) + (w_n - 1)(1-\hat{\gamma}_2^{(n)})]u^{(n)}(x,\tau)/x. \tag{5}$$

Здесь штрих и точка обозначают дифференцирование по x и τ соответственно, при этом для упругого компонента оба оператора $\hat{\gamma}_1^{(n)}, \hat{\gamma}_2^{(n)}$ нулевые, а для вязкоупругого покрытия эти операторы определяются соотношениями ($n = 1$ или 2):

$$\hat{\gamma}_j^{(n)}\xi(\tau) = \int_0^\tau \gamma_j^{(n)}(\tau-\chi)\xi(\chi)\,d\chi, \quad j = 1,2, \quad \gamma_1^{(n)}(\tau) = [(1+\nu_0^{(n)})\gamma_v^{(n)}(\tau) + 2(1-2\nu_0^{(n)})\gamma_s^{(n)}(\tau)]/[3(1-\nu_0^{(n)})],$$

$$\gamma_2^{(n)}(\tau) = [(1+\nu_0^{(n)})\gamma_v^{(n)}(\tau) - (1-2\nu_0^{(n)})\gamma_s^{(n)}(\tau)]/(3\nu_0^{(n)}).$$

Задача (1)–(5) является частным случаем более общей для кусочно-однородного полого шара, состоящего из произвольного числа N однородных вязкоупругих концентрических слоев [8]. Для ее исследования применено интегральное преобразование Лапласа по времени и представлено соответствующее решение в изображениях, а затем в оригиналах [8]. В настоящей же работе $N = 2$ и один из слоев является упругим.

Для вязкоупругого покрытия примем условие $\gamma_v^{(n)}(\tau) \equiv 0$, а сдвиговую релаксацию будем описывать сингулярным ядром Ржаницына – Колтунова (n = 1 или 2):

$$\gamma_{\text{s}}^{(n)}(\tau) = Ae^{-B\tau}\tau^{\delta-1} \quad \text{при} \quad A\Gamma(\delta)(B)^{-\delta} < 1, \quad A > 0, \quad B > 0, \quad 0 < \delta < 1, \tag{6}$$

где A, B, δ – константы, $\Gamma(\delta)$ – гамма-функция аргумента δ.

На основе решения начально-краевой задачи (1)–(5), построенного с использованием результатов работы [8], исследованы переходные волновые процессы в упругом сферическом слое с вязкоупругим покрытием, которому соответствует сингулярное ядро сдвиговой релаксации вида (6). Рассмотрен случай, когда упругим является первый (внутренний) слой, а также случай, когда внутренним слоем является вязкоупругое покрытие. Расчеты выполнены при различных геометрических и физико-механических исходных данных. Получены новые результаты, демонстрирующие эффекты, которые связаны как со слоистостью рассматриваемых сферических конструкций, так и с вязкостью материала покрытий.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ им. М. В. Ломоносова.

Список литературы

1 **Петров, А. Н.** Расчет методом граничных элементов динамики составных вязкоупругих тел // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Механика деформируемого твердого тела. – 2011. – № 4 (4). – С. 1694–1696.

2 **Hosseini-Hashemi, S.** Dynamic behavior of multi-layered viscoelastic nanobeam system embedded in a viscoelastic medium with a moving nanoparticle / S. Hosseini-Hashemi, H. Bakhshi Khaniki // J. Mech. – 2017. – Vol. 33, № 5. – P. 559–575.

3 **Hyung, Suk Lee.** Viscowave – a new solution for viscoelastic wave propagation of layered structures subjected to an impact load / Hyung Suk Lee // Int. J. Pavement Eng. – 2014. – Vol. 15, № 6. – P. 542–557.

4 Khudoynazarov K. Longitudinal-radial vibrations of a viscoelastic cylindrical three-layer structure // Facta universitatis. Series: Mechanical Engineering. – 2024. – Vol. 22, № 3. Spec. is. – P. 473–484.

5 **Alizadeh, V.** Overall dynamic properties of locally resonant viscoelastic layered media based on consistent field integration for oblique anti-plane shear waves / V. Alizadeh // Mech. Mater. – 2021. – Vol. 160. – 103981. – URL: https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.103981.

6 **Borcherdt, R. D.** Viscoelastic Waves and Rays in Layered Media / R. D. Borcherdt. – Cambridge : Cambridge University Press, 2020. – 450 p.

7 **Пшеничнов, С. Г.** Динамические задачи линейной вязкоупругости для кусочно-однородных тел / С. Г. Пшеничнов // Известия РАН. МТТ. – 2016. – № 1.– С. 79 –89.

8 **Пшеничнов, С. Г.** Волны в неоднородном вязкоупругом полом шаре / С. Г. Пшеничнов // Проблемы прочности и пластичности. – 2025. – Т. 87, № 1. – С. 103–112.

УДК 620.174.21

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛС И РСТ ПРИ СВАРКЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ В ГАЗОТУРБОСТРОЕНИИ

Л. Н. РАБИНСКИЙ, А. В. БАБАЙЦЕВ
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Т. Т. ФОЗИЛОВ
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация
Филиал АО «ОДК» «НИИД», г. Москва, Российская Федерация
МГТУ «СТАНКИН, г. Москва, Российская Федерация

Во второй половине XX века активно развивались технологии создания неразъемных соединений деталей авиационных и ракетных двигателей. Технология электронно-лучевой сварки позволяет с высокой точностью и наиболее защищенно сваривать металлы, которые невозможно сваривать на открытом воздухе, например, титановые сплавы, т. к. титан начинает реагировать с воздушной атмосферой и отдельно водородом при относительно малых температурах. Однако со временем появились сплавы на основе того же титана, а далее никеля и некоторые стали, которые, как считается, невозможно сварить методами сварки с применением плавления. На данный момент существует некоторое количество способов твердофазной сварки, однако позволяет получать равнопрочное соединение без потери механических свойств материалов исключительно сварка трением [1].

В данном труде речь идет о конкретном ее подвиде – ротационной (инерционной) сварке трением. Ее основное преимущество – скорость выполнения операции, а также относительно невысокие требования к подготовке кромок деталей, поскольку при трении две соединяющиеся кромки истираются и посредством давления, при достижении 75–80 % от температуры плавления материалов, свариваются.

Однако многими учеными-исследователями отмечается, что при РСТ выполняется некоторая деградация физико-механических свойств, как и изначально микроструктуры в зонах сварного соединения, происходит это ввиду термомеханического воздействия самого процесса сварки, а также нередко неравномерного теплоотвода и быстрого остывания детали после процесса, что в свою очередь вызывает концентрацию всех типов остаточных напряжений.