УДК 536.24

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

П. Ф. ПРОНИНА, О. В. ТУШАВИНА
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Необходимой предпосылкой надежного функционирования космического аппарата, его систем, установленной на нем научной аппаратуры является обеспечение необходимого теплового режима всех его элементов.

Математическое моделирование теплообмена большинства типов космических аппаратов связано с рядом трудностей, обусловленных сложностью и значительной неопределенностью протекания физических процессов внешнего и внутреннего теплообмена между их элементами. В связи с этим большое значение при создании космических аппаратов имеет его тепловая отработка, представляющая собой совокупность тепловых экспериментов (испытаний) и проводимых на основе их результатов мероприятий по доработке (в случае необходимости) средств обеспечения теплового режима, а иногда и конструкции аппарата.

Проводилось исследование динамического поведения многослойных покрытий для оценки распределения температурных потоков в экранно-вакуумной теплоизоляции, а также исследование влияния ионизирующего излучения на физико-механические характеристики теплоизоляции.

Приводятся результаты расчетов. Показано, что использование многослойных покрытий для оценки распределения температурных потоков в экранно-вакуумной теплоизоляции дает положительный эффект.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSFF-2023-0007).

УДК 539.3

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ВЯЗКОУПРУГОГО ЦИЛИНДРА КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ СДВИГОВОЙ НАГРУЗКИ

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

Материалы, обладающие наследственными свойствами, широко используются в современном производстве. Важным направлением в области изучения переходных волновых процессов в таких материалах является применение аналитических и численно-аналитических методов исследования [1–8]. В данной работе построено решение задачи о распространении нестационарных волн в вязкоупругом однородном изотропном полом цилиндре конечной длины при воздействии на стенки полости сдвиговой нагрузки в рамках осесимметричной постановки.

Рассмотрим полый цилиндр длины $2L$ с внутренним и внешним радиусами R_0 и R_1, состоящий из однородного изотропного линейно-вязкоупругого материала с мгновенными значениями модуля сдвига G_0 и коэффициента Пуассона ν_0, ядрами объемной и сдвиговой релаксации $T_v(t), T_s(t)$, а также скоростями продольных и поперечных упругих волн c_1, c_2. Введем цилиндрическую систему координат R, θ, Z, ось Z которой совпадает с продольной осью цилиндра, берет начало в центре одного из торцов и направлена к другому торцу. Цилиндр изначально покоится, а в момент $t = 0$ к поверхности полости $R = R_0$ приложена касательная осесимметричная нагрузка $Q(Z,t)$. Внешняя поверхность $R = R_1$ свободна, а оба торца $Z = 0$ и $Z = 2L$ контактируют с абсолютно жесткими и при этом абсолютно гладкими поверхностями. Введем безразмерные величины:

$$r = R/R_1, \quad z = Z/R_1, \quad r_0 = R_0/R_1, \quad l = L/R_1, \quad \tau = t/t_0, \quad \gamma_v(\tau) = t_0 T_v, \quad \gamma_s(\tau) = t_0 T_s, \quad \alpha = c_1/c_2,$$
$$u_r(r,z,\tau) = W_R/R_1, \quad u_z(r,z,\tau) = W_Z/R_1, \quad \sigma_{rr}(r,z,\tau) = P_{RR}/(2G_0), \quad \sigma_{zz}(r,z,\tau) = P_{ZZ}/(2G_0),$$
$$\sigma_{rz}(r,z,\tau) = P_{RZ}/(2G_0), \quad \sigma_{\theta\theta}(r,z,\tau) = P_{\theta\theta}/(2G_0),$$

$$a_1(\tau)=[(1+\nu_0)\gamma_v(\tau)+2(1-2\nu_0)\gamma_s(\tau)]/[3(1-\nu_0)],$$
$$a_2(\tau)=\gamma_s(\tau),\qquad a_3(\tau)=[(1+\nu_0)\gamma_v(\tau)-(1-2\nu_0)\gamma_s(\tau)]/(3\nu_0),$$

где W_R, W_Z – радиальное и осевое перемещения, $P_{RR}, P_{ZZ}, P_{RZ}, P_{\theta\theta}$ – напряжения, $t_0 = R_1 / c_1$. Пусть $Q(Z,t) = 2G_0 q_0 f(\tau) p(z)$, где функции $p(z)$, $f(\tau)$ и константа q_0 – безразмерные. Будем считать, что ползучесть материала ограничена.

Постановка задачи в потенциалах включает в себя уравнения динамики

$$(1-\hat{a}_1)\Delta\varphi_1(r,z,\tau)-\frac{\partial^2\varphi_1(r,z,\tau)}{\partial\tau^2}=0\,, \tag{1}$$
$$(1-\hat{a}_2)\Delta^*\varphi_2(r,z,\tau)-\alpha^2\frac{\partial^2\varphi_2(r,z,\tau)}{\partial\tau^2}=0\,,$$

граничные условия

$$u_z(r,0,\tau)=0,\quad \sigma_{rz}(r,0,\tau)=0\,,\quad u_z(r,2l,\tau)=0,\quad \sigma_{rz}(r,2l,\tau)=0 \tag{2}$$
$$\sigma_{rz}(1,z,\tau)=\sigma_{rr}(1,z,\tau)=0,\quad \sigma_{rz}(r_0,z,\tau)=q_0 f(\tau)p(z),\quad \sigma_{rr}(r_0,z,\tau)=0,\qquad \tau>0$$

и начальные условия

$$\varphi_j(r,z,0)=0\,,\quad \frac{\partial\varphi_j}{\partial\tau}(r,z,0)=0,\quad j=1,2\,. \tag{3}$$

при этом

$$u_r=\frac{\partial\varphi_1}{\partial r}-\frac{\partial\varphi_2}{\partial z},\qquad u_z=\frac{\partial\varphi_1}{\partial z}+\frac{\partial\varphi_2}{\partial r}+\frac{\varphi_2}{r}, \tag{4}$$

$$\sigma_{rr}=(w-1)(1-\hat{a}_3)\Delta\varphi_1+(1-\hat{a}_2)\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial r}-\frac{\partial\varphi_2}{\partial z}\right),\qquad w=(1-\nu_0)/(1-2\nu_0)\,,$$
$$\sigma_{zz}=(w-1)(1-\hat{a}_3)\Delta\varphi_1+(1-\hat{a}_2)\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial z}+\frac{\partial\varphi_2}{\partial r}+\frac{\varphi_2}{r}\right),$$
$$\sigma_{\theta\theta}=(w-1)(1-\hat{a}_3)\Delta\varphi_1+(1-\hat{a}_2)\frac{1}{r}\left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial r}-\frac{\partial\varphi_2}{\partial z}\right),\quad \sigma_{rz}=(1-\hat{a}_2)\left[\frac{1}{2}\Delta^*\varphi_2+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial r}-\frac{\partial\varphi_2}{\partial z}\right)\right],$$
$$\Delta=\frac{\partial^2}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}+\frac{\partial^2}{\partial z^2},\qquad \Delta^*=\Delta-\frac{1}{r^2}\,,$$

где все переменные с крышкой обозначают соответствующие операторы:

$$\hat{a}_j\psi(r,z,\tau)=\int_0^\tau a_j(\tau-\xi)\psi(r,z,\xi)\,d\xi\,,\qquad j=1,2,3\,. \tag{5}$$

Для решения задачи (1)–(5) используется разложение функций $p,\varphi_j,u_r,u_z,\sigma_{rr},\sigma_{zz},\sigma_{\theta\theta},\sigma_{rz}$ в ряды Фурье по координате z, а также преобразование Лапласа по времени. Рассмотрен случай, когда $f(\tau)=h(\tau)$ – функция Хевисайда. После нахождения членов рядов Фурье для перемещений и напряжений в пространстве изображений их оригиналы строятся в различных формах в зависимости от типа наследственных ядер $\gamma_v(\tau), \gamma_s(\tau)$. Если эти ядра принадлежат множеству функций класса

$$\sum_{n=1}^{N} a_n\exp(-b_n\tau),\quad 0\le\sum_{n=1}^{N} a_n/b_n<1,\quad b_n>0\quad (n=1,2,\,\dots,N)\,,$$

где константы a_n,b_n и N для каждого ядра свои, то оригиналы членов рядов Фурье можно представить в виде рядов по вычетам в полюсах изображений. При этом отсутствие точек ветвления у изображений на комплексной плоскости обеспечивается доказанной ранее теоремой [9]. При ядрах более общего вида решение в оригиналах для каждого члена ряда Фурье представлено в форме, содержащей интеграл по положительной части мнимой оси, а также слагаемое, определяемое решением статической задачи теории упругости, в которой константами материала являются длительные модули. Построенное решение справедливо во всем диапазоне изменения времени при отсутствии требования малости вязкости.

Список литературы

1 **Баженов, В. Г.** Методы граничных интегральных уравнений и граничных элементов в решении задач трехмерной динамической теории упругости с сопряженными полями. – М. : Физматлит, 2008 – 352 с.

2 **Желтков, В. И.** Переходные функции в динамике вязкоупругих тел / В. И. Желтков, Л. А. Толоконников, Н. Г. Хромова // Докл. РАН. – 1993. – Т. 329, № 6. – С. 718–719.

3 **Ильясов, М. Х.** Нестационарные вязкоупругие волны / М. Х. Ильясов. – Баку, 2011 – 330 с.

4 **Круссер, А. И.** Численный анализ нелинейных колебаний пластины на вязкоупругом основании под действием подвижной осциллирующей нагрузки на основе моделей с дробными производными / А. И. Круссер, М. В. Шитикова // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. физ.-мат. науки. – 2022. – Т. 26, № 4. – С. 694–714. – DOI : 10.14498/vsgtu1957.

5 **Лычева, Т. Н.** Спектральные разложения в динамических задачах вязкоупругости / Т. Н. Лычева, С. А. Лычев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 4. – С. 120–150. – DOI : 10.15593/perm.mech/2016.4.08

6 **Филиппов, И. Г.** Математическая теория колебаний упругих и вязкоупругих пластин и стержней / И. Г. Филиппов, В. Г. Чебан. – Кишинев : Штиинца, 1988. – 190 с.

7 **Colombaro, I.** On the propagation of transient waves in a viscoelastic Bessel medium / I. Colombaro, A. Giusti, F. Mainardi // Z. Angew. Math. Phys. – 2017. – 68. – Art. number: 62. – DOI : 10.1007/s00033-017-0808-6.

8 **Rossikhin, Yu. A** Analysis of the Viscoelastic Sphere Impact Against a Viscoelastic Uflyand-Mindlin Plate Considering the Extension of its Middle Surface / Yu. A. Rossikhin, M. V. Shitikova, Thanh Trung Phan // Shock and Vibration. – 2017. – Art. ID 5652023. – https://doi.org/10.1155/2017/5652023.

9 **Пшеничнов, С. Г.** Нестационарные динамические задачи линейной вязкоупругости / С. Г. Пшеничнов // Известия РАН. МТТ. – 2013. – № 1. – С. 84–96.

УДК 539.422.52

ДИНАМИКА ТРЕХСЛОЙНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ С ВНУТРЕННИМИ ДЕФЕКТАМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗОК РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

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

М. И. МАРТИРОСОВ, Д. В. ДЕДОВА
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация
Корпорация «Иркут», г. Москва

Трехслойные панели представляют собой конструкцию, состоящую из двух тонких прочных внешних слоев – обшивок, часто выполненных из полимерных композиционных материалов (ПКМ), которые связаны между собой слоем заполнителя, разделяющего внешние (несущие) слои. Для конструкций с заполнителем при действии внешних нагрузок характерна совместная работа всех составных элементов слоистого пакета. Заполнитель воспринимает поперечное сжатие и поперечный сдвиг и предохраняет достаточно тонкие несущие слои (из ПКМ) от местной и общей потери устойчивости, обеспечивая их совместную работу и высокую жесткость. Несущие слои воспринимают продольное растяжение, сжатие, изгиб и поперечный сдвиг в своей плоскости и предохраняют от внешних воздействий заполнитель.

Трехслойные панели широко применяются в различных отраслях современной промышленности, например, в авиастроении. Такое распространение панели приобрели благодаря малому весу, высокой удельной прочности, устойчивости при сжатии, значительной жесткости на изгиб, хорошим тепло- и звукоизолирующим свойствам, высокой технологичности и возможностью полной автоматизации процесса изготовления, хорошей эксплуатационной надежности вследствие отсутствия концентраторов напряжений, высоким качествам формы и поверхности. Важным преимуществом таких панелей является высокое сопротивление акустическим воздействиям.

В гражданской авиации такие панели используются при изготовлении интерьеров пассажирских самолетов, элементов конструкции планеров: киля и форкиля, кока, закрылков, предкрылков, рулей направления, стабилизаторов, элеронов, рулей высоты и т. д.

По способности воспринимать продольные усилия заполнители можно разделить на два вида:

– легкий заполнитель, который обладает малым по сравнению с несущими слоями модулем упругости в направлении, параллельном поверхности несущих слоев;

– жесткий заполнитель, который обладает сравнимым по величине с несущими слоями модулем упругости в направлении, параллельном поверхности несущих слоев.