

УДК 539.3

Э. И. СТАРОВОЙТОВ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

ИЗМЕНЕНИЕ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ ТРЕХСЛОЙНУЮ ПЛАСТИНУ

Рассмотрено изменение величины интегрального нейтронного потока при прохождении через упругую трехслойную пластину. Согласно экспериментальным данным принято, что при малых деформациях изменение объема материала прямо пропорционально интегральному нейтронному потоку. Затухание потока при прохождении через материалы слоев принято экспоненциальным. Получены расчетные формулы для определения интегрального нейтронного потока в слоях пластины. Приведены расчетные зависимости.

Ключевые слова: трехслойная пластина, упругость, нейтронный поток, затухание.

Введение. Вопросам расчета напряженно-деформированного состояния слоистых, в том числе трехслойных элементов конструкций, уделяется большое внимание, так как во многих случаях они являются составляющими сложных и ответственных сооружений. Потребность оценки прочностных характеристик подобных конструкций, работающих в условиях комплексных внешних воздействий, обуславливает необходимость создания соответствующих расчетных моделей для описания их деформирования при различных нагрузках, включая радиационные. Этой проблеме посвящен ряд работ.

Свободные, вынужденные и резонансные колебания трехслойных пластин, в том числе связанных с упругим основанием Винклера, исследовались в работах [1–5]. Решения получены в перемещениях разложением в ряд по системам собственных ортонормированных функций, изучено влияние жесткости основания на частоты и амплитуды колебаний. Работы [6, 7] посвящены развитию модели деформирования круговых трехслойных пластин, учитывающих сжимаемость заполнителя. Функция сжимаемости принималась линейной по толщине заполнителя. В статьях [8, 9] рассмотрено напряженно-деформированное состояние круговой трехслойной пластины, связанной с упругим двухпараметрическим основанием Пастернака. Для связи напряжений с деформациями принимались соотношения теории малых упругопластических деформаций. Деформирование круговой трехслойной пластины в своей плоскости под действием неосесимметричных нагрузок исследовано в публикациях [10, 11]. Аналитический анализ изгиба круглой сэндвич-пластины проведен в статье [12]. Термосиловое и нестационарное нагружения трехслойных цилиндрических оболочек изучалось в работах [13–15]. Статьи [16, 17] посвящены исследованию деформирования двухслойных пластин и трехслойных стержней при циклических и локальных

нагрузках. Влияние нейтронного облучения на механические свойства материалов описано в монографии [18]. В статье [19] исследовано деформирование трехслойного стержня в нейтронном потоке.

Нами исследовано распространение нейтронного потока по толщине пластины и его влияние на деформирование конструкции. Численная апробация решения проведена для случая металлополимерного пакета пластины.

1 Постановка задачи. Внешние несущие слои несимметричной по толщине трехслойной круговой пластины предполагаются тонкими, толщиной $h_1 \neq h_2$. Для них принимаются гипотезы Кирхгофа о несжимаемости, прямолинейности и перпендикулярности деформированных нормалей к срединной поверхности слоев. Заполнитель считается жестким, достаточно толстым ($h_3 = 2c$), учитывается его работа в тангенциальном направлении. Для него справедлива гипотеза о прямолинейности и несжимаемости деформированной нормали, которая поворачивается относительно срединной поверхности на некоторый угол $\psi(r)$. Постановка задачи и ее решение проводится в цилиндрической системе координат r, φ, z . Срединная плоскость заполнителя принимается за координатную, ось z направлена перпендикулярно вверх, к первому слою.

При облучении элементов конструкций нейтронами, ионами, электронами изменяются механические свойства материалов: твердость, предел текучести, пластичность, ползучесть. Особый интерес представляет нейтронное облучение. Предполагается, что к внешней поверхности $z = c + h_1$ круговой трехслойной пластины подводится *нейтронный поток* плотностью $\varphi_0 = \text{const}$ в направлении, противоположном внешней нормали (рисунок 1).

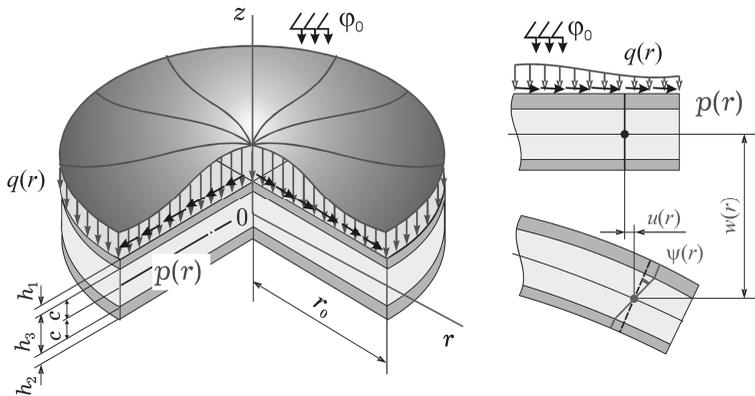


Рисунок 1 – Расчетная схема

В результате нейтронного облучения твердых тел возникает объемная деформация θ_v , изменяются механические характеристики материалов. Вли-

яние нейтронного облучения на параметры упругости (модуль Юнга, коэффициент Пуассона и т. д.) незначительно и в дальнейшем не учитывается.

Согласно экспериментальным данным при малых деформациях можно считать, что изменение объема материала прямо пропорционально интегральному нейтронному потоку [14]:

$$\theta_{jk} = B_k I_k(z), \quad (1)$$

где B_k – константа материала, получаемая из опыта; $I_k(z) = \varphi_k(z)t$ – интегральный нейтронный поток в k -м слое; φ_k – интенсивность потока, нейтрон/(м²·с), дошедшего за время t к поверхности с координатой z в k -м слое.

Если на поверхность пластины $z = c + h_1$, параллельно оси z падают нейтроны с интенсивностью φ_0 , то интенсивность потока нейтронов, доходящих до плоскости, которая параллельна границе $z = \text{const}$, будет убывать по экспоненте [18]. В нашем случае в верхнем слое интенсивность потока

$$\varphi_1(z) = \varphi_0 \exp(-\mu_1(h_1 + c - z)); \quad (2)$$

$$\mu_1 = \omega_1 n_0 = \omega_1 \frac{A_0 \rho_1}{A_1},$$

где μ_1 – величина макроскопического эффективного сечения, см⁻¹; ω_1 – эффективное сечение, отнесенное к одному ядру; n_0 – число ядер в 1 см³; A_0 – число Авогадро; ρ_1 – плотность; A_1 – атомный вес; нижний индекс – номер слоя, если другое не указано.

Для алюминия: $\omega_1 = 0,21 \cdot 10^{-24}$ см²; $A_0 = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹; плотность $\rho_1 = 2,7$ г/см³; $A_1 = 27$ а. е. м. Подставляя эти данные в (2), получим $\mu_1 = 1,26$ м⁻¹. Отметим, что μ_1 обратно величине свободного пробега нейтронов, которая для быстрых нейтронов в алюминии $\lambda_1 = 14,1 \dots 15,9$ см, в полиэтилене $\lambda_2 = 5,5 \dots 13,9$ см.

Следовательно, к моменту t через сечение z внешнего слоя пройдет интегральный поток

$$I_1(z, t) = \varphi_0 t \exp(-\mu_1(h_1 + c - z)). \quad (3)$$

При $z = c + h_1$ величина $I_0 = \varphi_0 t$ дает суммарный поток нейтронов на единицу площади поверхности тела. В реакторах φ_0 составляет порядка $10^{17} - 10^{18}$ нейтрон/м²с, а I_0 достигает значений $10^{23} - 10^{27}$ нейтрон/м², причем θ_1 достигает значений порядка 0,1. Следовательно, в зависимости от энергии нейтронов и облучаемого материала величина параметра B может быть порядка $10^{-28} - 10^{-23}$ м²/нейтрон.

При $z = c$ из формулы (2) следует интенсивность нейтронного потока на границе перехода из первого слоя I к заполнителю 3:

$$\varphi_{13} = \varphi_1(c) = \varphi_0 \exp(-\mu_1 h_1). \quad (4)$$

В заполнителе интенсивность потока нейтронов на плоскости $z = \text{const}$ и интегральный поток к моменту t

$$\begin{aligned}\varphi_3(z) &= \varphi_{13} \exp(-\mu_3(c-z)), \\ I_3(z, t) &= \varphi_{13} t \exp(-\mu_3(c-z)).\end{aligned}\quad (5)$$

На склейке заполнителя 3 с нижним несущим слоем 2 ($z = -c$) из соотношения (5) получим интенсивность нейтронного потока:

$$\varphi_{32} = \varphi_3(-c) = \varphi_{13} \exp(-2\mu_3 c). \quad (6)$$

В нижнем слое интенсивность потока нейтронов на плоскости $z = \text{const}$ и интегральный поток к моменту t

$$\begin{aligned}\varphi_2(z) &= \varphi_{32} \exp(-\mu_2(-c-z)), \\ I_2(z, t) &= \varphi_{32} t \exp(-\mu_2(-c-z)).\end{aligned}\quad (7)$$

Таким образом, формулы (2)–(7) позволяют рассчитать интегральный нейтронный поток по толщине слоев трехслойной пластины в зависимости от координаты $z = \text{const}$.

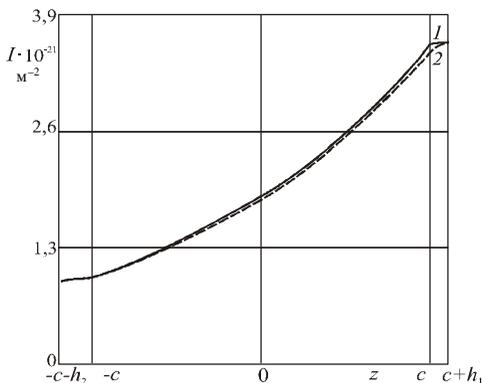


Рисунок 2 – Графики изменения интегрального нейтронного потока

Численные результаты получены для круговой трехслойной несимметричной по толщине пластины, слои которой набраны из материалов Д16Т–фторопласт-4–Д16Т. На рисунке 2 показано изменение величины интегрального нейтронного потока за время $t = 3600$ с при прохождении через пластины, имеющие следующие толщины слоев: 1 – $h_1 = 0,01$; $h_2 = 0,06$; $h_3 = 0,4$; 2 – $h_1 = 0,02$; $h_2 = 0,06$; $h_3 = 0,4$.

Из полученных результатов следует, что интегральный нейтронный поток уменьшается примерно в 3 раза.

Как показано выше, действие нейтронного потока ведет к изменению объема материала, что отражается на напряженно-деформированном состоянии конструкции. Принимая, что материалы слоев пластины в процессе деформирования проявляют упругие свойства, для описания их деформирования используют следующие физические уравнения состояния, учитывающие радиационное изменение объема (1):

$$s_{\alpha}^{(k)} = 2G_k \varepsilon_{\alpha}^{(k)}; \quad s_{rz}^{(3)} = 2G_3 \varepsilon_{rz}^{(3)};$$

$$\sigma^{(k)} = K_k (3\varepsilon^{(k)} - B_k I_k) \quad (k = 1, 2, 3; \alpha = r, \varphi). \quad (8)$$

где $s_{\alpha}^{(k)}, \varepsilon_{\alpha}^{(k)}$ – девиаторные, $\sigma^{(k)}, \varepsilon^{(k)}$ – шаровые части тензоров напряжений и деформаций; G_k, K_k – модули сдвига и объемного деформирования; $s_{rz}^{(3)}, \varepsilon_{rz}^{(3)}$ – касательное напряжение и сдвиговая деформация в заполнителе.

Заключение. Полученные формулы позволяют рассчитать изменение величины интегрального нейтронного потока при прохождении через трехслойную пластину любой конфигурации. Учитывая соотношения (8), можно дополнительно учесть влияние на этот поток эффектов, связанных с изменениями размеров, обусловленными действием различных нагрузок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № T20P-047)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Starovoitov, E. I.** Resonant effects of local loads on circular sandwich plates on an elastic foundation / E. I. Starovoitov, D. V. Leonenko // International Applied Mechanics. – 2010. – Vol. 46, No. 1. – P. 86–93.
- 2 **Aghalovyan, M. L.** Asymptotic Solution of the First 3D Dynamic Elasticity Theory Problem on Forced Vibrations of a Three-Layer Plate with an Asymmetric Structure / M. L. Aghalovyan, T. V. Zakaryan // Mechanics of Composite Materials. – 2019. – Vol. 55, Is. 1. – P. 1–12.
- 3 **Mogilevich, L. I.** Hydroelastic Oscillations of a Three-layer Plate Interacting with Vibrating Stamp / L. I. Mogilevich, V. S. Popov, A. V. Christoforova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 463, is. 2. – Paper 022079. – 6 p.
- 4 **Starovoitov, E. I.** Resonance vibrations of circular composite plates on an elastic foundation / E. I. Starovoitov, D. V. Leonenko, D. V. Tarlakovsky // Mechanics of Composite Materials. – 2015. – Vol. 51, No. 5. – P. 561–570.
- 5 **Леоненко, Д. В.** Колебания круговых трехслойных пластин, связанных с упругим основанием, под действием синусоидальных загрузок / Д. В. Леоненко // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2009. – № 3. – С. 89–94.
- 6 **Захарчук, Ю. В.** Перемещения в круговой трехслойной пластине со сжимаемым заполнителем / Ю. В. Захарчук // Механика. Исследования и инновации. – 2017. – Вып. 10. – С. 55–66.
- 7 **Захарчук, Ю. В.** Влияние сжимаемости заполнителя на перемещения в трёхслойной круговой симметричной пластине / Ю. В. Захарчук // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2018. – № 2. – С. 14–27.
- 8 **Козел, А. Г.** Уравнения равновесия упругопластической круговой пластины на основании Пастернака / А. Г. Козел // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – Вып. 11. – С. 127–133.
- 9 **Козел, А. Г.** Влияние сдвиговой жёсткости основания на напряжённое состояние сэндвич пластины / А. Г. Козел // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – № 6 (332). – С. 25–34.

10 **Нестерович, А. В.** Напряжения в круговой пластине типа Тимошенко при неосесимметричном растяжении-сжатии / А. В. Нестерович // *Механика. Исследования и инновации.* – 2018. – № 11. – С. 195–203.

11 **Нестерович, А. В.** Напряженное состояние круговой трехслойной пластины при осесимметричном нагружении в своей плоскости / А. В. Нестерович // *Механика. Исследования и инновации.* – 2019. – № 12. – С. 152–157.

12 **Zadeh, H. V.** Analytical bending analysis of a circular sandwich plate under distributed load / H. V. Zadeh, M. Tahani // *International Journal of Recent Advances in Mechanical Engineering.* – 2017. – Vol. 6, No.1. – P. 1–10.

13 **Fedotenko, G. V.** Three-Dimensional Non-stationary Motion of Timoshenko-Type Circular Cylindrical Shell / G. V. Fedotenko, V. V. Kalinchuk, A. Y. Mitin // *Lobachevskii Journal of Mathematics,* 2019. – Vol. 40, No. 3. – P. 311–320.

14 **Kayhani, M. H.** A general analytical solution for heat conduction in cylindrical multilayer composite laminates / M. H. Kayhani, M. Norouzi, A. A. Delouei // *International Journal of Thermal Science.* – 2012. – Vol. 52, No. 1. – P. 73–82.

15 **Старовойтов, Э. И.** Деформирование трехслойной круговой цилиндрической оболочки в температурном поле / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко, Д. В. Тарлаковский // *Проблемы машиностроения и автоматизации.* – 2016. – № 1. – С. 91–97.

16 **Moskvitin, V. V.** Deformation and variable loading of two-layer metal-polymer plates / V. V. Moskvitin, E. I. Starovoitov // *Mechanics of Composite Materials.* – 1985. – Vol. 21, No. 3. – P. 267–273.

17 **Старовойтов, Э. И.** Деформирование упругого трехслойного стержня локальными нагрузками / Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая, Д. В. Леоненко // *Проблемы машиностроения и автоматизации.* – 2001. – № 4. – С. 37–40.

18 **Ильюшин, А. А.** Упругопластические деформации полых цилиндров / А. А. Ильюшин П. М. Огибалов. – М. : Изд-во МГУ, 1960. – 224 с.

19 **Starovoitov, E. I.** Deformation of a three-layer rod with a compressible core in a neutron flow / E. I. Starovoitov, D. V. Leonenko // *International Applied Mechanics.* – 2020. – Vol. 56, No. 1. – P. 81–91.

E. I. STAROVOITOV,

Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

CHANGE IN THE NEUTRON FLUX AT PASSING THROUGH A THREE-LAYERED PLATE

The change in the integral neutron flux value at its passing through an elastic three-layered plate is investigated. According to experimental data, it is assumed that for small deformations, the change in the material volume is directly proportional to the integral neutron flux. The flow damping at passing through the layers' materials is assumed to be exponential. There are obtained the formulas for changes in the integral neutron flux in the plate layers. Calculation dependencies are given.

Keywords: three-layered plate, elasticity, neutron flux, attenuation.

Получено 01.09.2020