

Далее функции перемещений, заданных и компенсирующих нагрузок разлагаются в тригонометрические ряды по функциям, которые удовлетворяют условиям шарнирного опирания прямоугольной пластины.

На примере ветровых стекол некоторых типов спецтехники проведено численное исследование температурных полей и напряжений в слоях остекления автомобилей спецтехники. Рассмотрены трехслойные композиции ветровых стёкол для КамАЗ-5320, Урал-432 и КрАЗ-260.

Температура, которая возникает при лесных пожарах, 100–930 °С [6]. При пожарах на нефтебазах, предприятиях химической и нефтехимической промышленности температура повышается до 2000 °С [7, 8].

Установлено, что температура разрушения многослойного остекления составляет 350 °С. Если температура превышает это значение, необходимо использовать специальные пожарные танки или многоцелевые легкие бронированные тягачи, в которых стеклоблоки оборудованы броневыми крышками. При этом наблюдения за дорогой механиком-водителем ведется через смотровые устройства.

Расчётные исследования показали, что температура в стекле для всех типов спецтехники при рассматриваемых условиях не превышает температуры разрушения. То есть остекление не разрушится при таких условиях, однако другие узлы машин могут выйти из строя при значительно меньших температурах. Поэтому во время тушения пожаров необходимо устанавливать безопасную дистанцию, на которой каждый тип спецтехники выдержит температурные нагрузки.

Список литературы

- 1 Голяков, В. И. Метод расчета взрывозащитного остекления / В. И. Голяков, А. А. Дайлов, В. А. Кишкин // Системы безопасности. – 2004. – № 4. – С. 26–27.
- 2 Мильков, В. Г. Двухосноориентированная подиэтиленерефталатная пленка. Всегда ли необходима в пулестойком и взрывобезопасном остеклениях? / В. Г. Мильков // Технологии безопасности. – 2004. – № 6. – С. 24–26.
- 3 Smetankina, N. Calculation of temperature fields in multilayer plates and shells with distributed sources / N. Smetankina, O. Postnyi // Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Srodowiska. – 2020. – Vol. 10, no. 2 – P. 28–31.
- 4 Stationary problem of heat conductivity for complex-shape multilayer plates / A. I. Malykhina [et al.] // Вестник Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина. Сер. Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления. – 2019. – Т. 41. – С. 46–54.
- 5 Сметанкина, Н. В. Нестационарное деформирование, термоупругость и оптимизация многослойных пластин и цилиндрических оболочек: [монография] / Н. В. Сметанкина. – Харьков: Миськдрук, 2011. – 376 с.
- 6 Валендик, Э. Н. Влияние пожаров на устойчивость хвойных пород / Э. Н. Валендик, А. И. Сухинин, А. И. Косов. – Красноярск, 2006. – 96 с.
- 7 Абрамов, Ю. А. Тепловые процессы в нагреваемом резервуаре / Ю. А. Абрамов, А. Е. Басманов // Коммунальное хозяйство городов. – № 67. – 2006. – С. 357–362.
- 8 Обеспечение пожарной безопасности резервуарного парка хранения нефтепродуктов, расположенного вблизи жилых и общественных зданий / Ю. Н. Шебеко [и др.] // Пожарная безопасность. – 2009. – № 2. – С. 33–41.

УДК 539.3

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХСЛОЙНОЙ КРУГЛОЙ ПЛАСТИНЫ ПОГОННЫМИ НАГРУЗКАМИ

Э. И. СТАРОВОЙТОВ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Введение. Современные требования машиностроения к оценке прочностных характеристик композитных конструкций, работающих в условиях повышенных внешних нагрузок, обуславливают необходимость создания расчетных моделей, описывающих их деформирование в физически нелинейной области при различного вида нагрузках, в том числе погонных. Этой проблеме посвящен ряд публикаций. Колебания неоднородных пластин и оболочек, в том числе при контактном взаимодействии, исследовались в статьях [1–5]. Отдельные задачи квазистатического деформирования упругопластических трехслойных элементов конструкций, в том числе связанных с упругим основанием, при однократных и циклических нагрузках решены в работах [6–14].

Для трехслойного пакета пластины приняты гипотезы ломаной линии. Во внешних несущих слоях несимметричной по толщине ($h_1 \neq h_2$) трехслойной круговой пластины приняты гипотезы

Кирхгофа. В жестком, достаточно толстом ($h_3 = 2c$) заполнителе справедлива гипотеза о прямолинейности и несжимаемости деформированной нормали, которая поворачивается относительно срединной поверхности на дополнительный угол $\psi(r)$. Учтена работа заполнителя в тангенциальном направлении. 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.

К наружной поверхности первого слоя ($z = c + h_1$) приложена нагрузка. В силу ее симметрии тангенциальные перемещения в слоях отсутствуют $u_\varphi^{(k)} = 0$ ($k = 1, 2, 3$ – номер слоя). Прогиб пластины w , относительный сдвиг в заполнителе ψ и радиальное перемещение координатной поверхности u не зависят от координаты φ . В дальнейшем эти функции $w(r), u(r), \psi(r)$ считаются искомыми. Все перемещения и линейные размеры пластины отнесены к ее радиусу r_0 . На контуре предполагается жесткая диафрагма ($\psi = 0$ при $r = 1$).

Для связи девиаторов и шаровых частей тензоров напряжений и деформаций в слоях используются нелинейные физические уравнения состояния:

$$s_\alpha^{(k)} = 2G_k(1 - \omega_k(\epsilon_u^{(k)}))\epsilon_\alpha^{(k)}, \quad \sigma^{(k)} = 3K_k\epsilon^{(k)},$$

$$s_{rz}^{(3)} = 2G_3(1 - \omega_k(\epsilon_u^{(3)}))\epsilon_{rz}^{(3)} \quad (k = 1, 2, 3; \alpha = r, \varphi),$$

где $\omega_k(\epsilon_u^{(k)})$ – функции физической нелинейности материалов слоев.

Система уравнений равновесия рассматриваемой трехслойной пластины в случае равномерно распределенной поверхностной нагрузки $q(r)$ известна. Ее решение при погонной поперечной силе $Q(r)$ получено методом упругих решений:

$$\psi^{(n)} = C_2^{(n)}I_1(\beta r) + C_3^{(n)}K_1(\beta r) + \psi_r^{(n)},$$

$$w^{(n)} = \frac{b_2}{b_3} \int \psi^{(n)} dr + \frac{a_3}{b_3 a_1} \int L_2^{-1}(p_\omega^{(n-1)}) dr + \frac{1}{b_3} \int L_3^{-1}(Q) dr - \frac{1}{b_3} \int L_3^{-1}(q_\omega^{(n-1)}) dr -$$

$$-\frac{C_1^{(n)}}{4b_3} r^2 (\ln r - 1) + \frac{C_5^{(n)} r^2}{4b_3} + C_6^{(n)} \ln r + C_4^{(n)},$$

где n – номер приближения; a_i, b_i – постоянные коэффициенты; $C_1^{(n)}, \dots, C_8^{(n)}$ – константы интегрирования; L_2^{-1}, L_3^{-1} – интегральные операторы;

$$\psi_r^{(n)} = \frac{\gamma_1 Q_0 a}{\beta} H_0(a-r) \left(\frac{1}{\beta r} - K_1(\beta r) I_0(\beta a) - I_1(\beta r) K_0(\beta a) \right) + \frac{C_1^{(n)} \gamma_1}{\beta^2 r} -$$

$$-K_1(\beta r) \left[\frac{b_3}{b_1 b_3 - b_2^2} \left[\int I_1(\beta r) h_\omega^{(n-1)} r dr - \frac{a_2 b_3 - a_3 b_2}{a_1 b_3} \int I_1(\beta r) p_\omega^{(n-1)} r dr \right] - \gamma_1 \int I_1(\beta r) \left(\int q_\omega^{(n-1)} r dr \right) dr \right] +$$

$$+ I_1(\beta r) \left[\frac{b_3}{b_1 b_3 - b_2^2} \left[\int K_1(\beta r) h_\omega^{(n-1)} r dr - \frac{a_2 b_3 - a_3 b_2}{a_1 b_3} \int K_1(\beta r) p_\omega^{(n-1)} r dr \right] - \gamma_1 \int K_1(\beta r) \left(\int q_\omega^{(n-1)} r dr \right) dr \right];$$

$$\int L_3^{-1}(Q) dr = \frac{Q_0 a}{4} \left(r^2 - a^2 - a^2 \ln \left(\frac{r}{a} \right) - r^2 \ln \left(\frac{r}{a} \right) \right) H_0(a-r).$$

Величины $p_\omega^{(n-1)}, h_\omega^{(n-1)}, q_\omega^{(n-1)}$ называют «дополнительными» внешними нагрузками, они на первом шаге полагают равными нулю, а в дальнейшем вычисляют по результатам предыдущего приближения. Если на пластину действуют погонные моменты интенсивности $M_0 = \text{const}$, распределенные по окружности радиуса $r = a$, то решение задачи можно получить, используя разность приведенных выше решений.

Полученные решения позволяют исследовать напряженно-деформированное состояние трехслойных круговых пластин при погонных силовых и моментных нагрузках. Численные результаты показали существенное влияние физической нелинейности материалов слоев на перемещения в пластине.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект № T20P-047).

Список литературы

- 1 Starovoirov, É. I. Resonant effects of local loads on circular sandwich plates on an elastic foundation / É. I. Starovoirov, D. V. Leonenko // International Applied Mechanics. – 2010. – Vol. 46, no. 1. – P. 86–93.
- 2 Starovoirov, É. I. Circular sandwich plates under local impulsive loads / É. I. Starovoirov, D. V. Leonenko, A. V. Yarovaia // International Applied Mechanics. – 2003. – Vol. 39, no. 8. – P. 945–952.
- 3 Starovoirov, É. I. Vibrations of circular sandwich plates under resonant loads / É. I. Starovoirov, D. V. Leonenko, A. V. Yarovaia // International Applied Mechanics. – 2003. – Vol. 39, no. 12. – P. 1458–1463.
- 4 Леоненко, Д. В. Колебания элементов авиационных конструкций, возбужденные тепловым воздействием / Д. В. Леоненко, Л. Н. Рабинский, Э. И. Старовойтов // Известия вузов. Авиационная техника. – 2016. – № 4. – С. 25–32.
- 5 Леоненко, Д. В. Радиальные собственные колебания упругих трехслойных цилиндрических оболочек / Д. В. Леоненко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2010. – № 3 (12). – С. 53–56.
- 6 Starovoirov, É. I. Thermoelastic bending of a sandwich ring plate on an elastic foundation / É. I. Starovoirov, D. V. Leonenko // International Applied Mechanics. – 2008. – Vol. 44, no. 9. – P. 1032–1040.
- 7 Старовойтов, Э. И. Термосиловое нагружение трехслойных пологих оболочек / Э. И. Старовойтов // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1989. – № 5. – С. 114–119.
- 8 Старовойтов, Э. И. Сопротивление материалов / Э. И. Старовойтов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 384 с.
- 9 Захарчук, Ю. В. Перемещения в круговой трехслойной пластине со сжимаемым наполнителем / Ю. В. Захарчук // Механика. Исследования и инновации. – 2017. – № 10 (10). – С. 55–66.
- 10 Захарчук, Ю. В. Влияние сжимаемости наполнителя на перемещения в трёхслойной круговой симметричной пластине / Ю. В. Захарчук // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2018. – № 2. – С. 14–27.
- 11 Козел, А. Г. Уравнения равновесия упругопластической круговой пластины на основании пастернака / А. Г. Козел // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – № 11 (11). – С. 127–133.
- 12 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.
- 13 Нестерович, А. В. Напряжения в круговой пластине типа Тимошенко при неосесимметричном растяжении-сжатии / А. В. Нестерович // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – № 11 (11). – С. 195–203.
- 14 Нестерович, А. В. Напряженное состояние круговой трехслойной пластины при осесимметричном нагружении в своей плоскости / А. В. Нестерович // Механика. Исследования и инновации. – 2019. – № 12 (12). – С. 152–157.

УДК 539.37

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБ ИЗГИБЕ ПОДАТЛИВОЙ НА ПОПЕРЕЧНЫЙ СДВИГ ДЛИННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПАНЕЛИ ОВАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Е. А. СТОРОЖУК

Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, г. Киев

Композитные цилиндрические оболочки переменной кривизны находят широкое применение в различных отраслях техники как конструктивные элементы машин и приборов. Высокие требования к точности и достоверности результатов исследований указанных элементов конструкций требуют кроме учета действительных условий эксплуатации, также и учета особенностей их деформирования (деформаций поперечного сдвига).

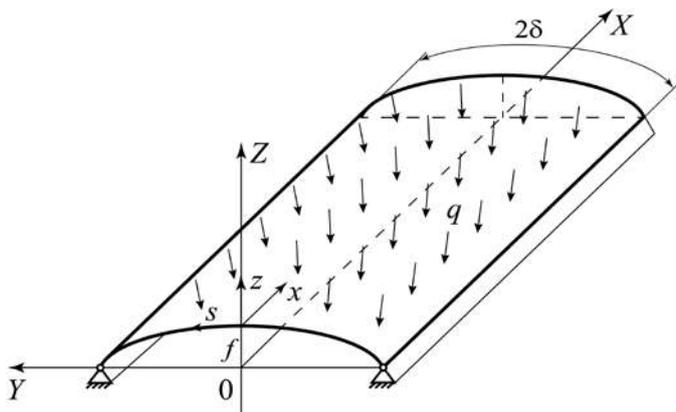


Рисунок 1 – Цилиндрическая панель овального поперечного сечения

Рассмотрим незамкнутую бесконечно длинную пологую цилиндрическую оболочку овального поперечного сечения постоянной толщины h , изготовленную из трансверсально-изотропного материала (рисунок 1). Для описания геометрии оболочки введем декартовую систему координат (X, Y, Z) , ось OX которой параллельна образующей. Плоскость поперечного сечения оболочки отнесем к системе координат (Y, Z) , а срединную поверхность – к криволинейной ортогональной системе координат (x, s) , сопряженной с линиями главных кривизн. Предполагаем, что оболочка имеет постоянные жесткостные характеристики D_N, D_M, D_Q и нагружена равномерным нормальным давлением интенсивности $q = \text{const}$. Из изложенного выше следует, что перемещения, деформации и напряжения в каж-