

Список литературы

- 1 Старовойтов, Э. И. Основы теории упругости, пластичности и вязкоупругости : учеб. для студентов строительных спец. вузов / Э. И. Старовойтов. – Гомель : БелГУТ, 2001. – 344 с.
- 2 Gorshkov, A. G. Harmonic Vibrations of a Viscoelastoplastic Sandwich Cylindrical Shell / A. G. Gorshkov, É. I. Starovoitov, A. V. Yarovaya // International applied mechanics. – 2001. – Vol. 37, no. 9. – P. 1196–1203.
- 3 Kuznetsova, E. L. Methods of diagnostic of pipe mechanical damage using functional analysis, neural networks and method of finite elements / E. L. Kuznetsova, G. V. Fedotenkov, E. I. Starovoitov // INCAS Bulletin. – Vol. 12, Spec. is. – 2020. – P. 79–90.
- 4 Starovoitov, É. I. Vibrations of round three-layer plates under the action of distributed local loads / É. I. Starovoitov, D. V. Leonenko, A. V. Yarovaya // Strength of materials. – 2002. – Vol. 34, no. 5. – P. 474–481.
- 5 Маркова, М. В. Инерционная математическая модель динамического деформирования круговой трёхслойной ступенчатой пластины / М. В. Маркова // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. Естественные науки. – 2021. – № 6 (129). – С. 164–170.
- 6 Маркова, М. В. Собственные колебания круговой трёхслойной ступенчатой пластины / М. В. Маркова // Механика. Исследования и инновации. – 2021. – Вып. 14 (14). – С. 147–158.
- 7 Маркова, М. В. Постановка начально-краевой задачи об осесимметричных колебаниях круговой трёхслойной пластины переменной толщины / М. В. Маркова, Д. В. Леоненко // Теоретическая и прикладная механика. – 2022. – № 36. – С. 3–10.
- 8 Деформирование трёхслойной круговой пластины на упругом основании / А. Г. Горшков [и др.] // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2005. – Т. 2, № 1. – С. 16–22.
- 9 Козел, А. Г. Деформирование круговой трёхслойной пластины на основании Пастернака / А. Г. Козел // Теоретическая и прикладная механика. – 2017. – № 32. – С. 235–240.
- 10 Захарчук, Ю. В. Уравнения равновесия упругопластической круговой пластины со сжимаемым наполнителем / Ю. В. Захарчук // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – Вып. 11. – С. 80–87.
- 11 Старовойтов, Э. И. Деформирование упругопластической круговой трёхслойной пластины на основании Винклера при термосиловом нагружении / Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая, Д. В. Леоненко // Проблемы прочности. – 2007. – № 5. – С. 68–80.
- 12 Старовойтов, Э. И. Термосиловое нагружение трёхслойных пологих оболочек / Э. И. Старовойтов // Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела. – 1989. – Вып. 5. – С. 114–119.
- 13 Нестерович, А. В. Радиальное и тангенциальное неосесимметричное нагружение круговой трёхслойной пластины / А. В. Нестерович // Механика. Исследования и инновации. – 2020. – Вып. 13. – С. 116–121.
- 14 Трацевская, Е. Ю. Демпфирующие свойства слабосвязных трехфазных грунтов / Е. Ю. Трацевская // Литосфера. – 2019. – № 2 (51). – С. 115–121.

УДК 539.3

ТРЕХСЛОЙНАЯ КРУГОВАЯ ПЛАСТИНА СО СЖИМАЕМЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ В ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ

Ю. В. ШАФИЕВА

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Постановки и методики решения краевых задач о деформировании слоистых элементов конструкций приведены в монографиях [1–5]. Термосиловое нагружение цилиндрических упругих и вязкоупругих оболочек исследовано в работах [6, 7]. Упругопластические пластины, связанные с основанием Пастернака, а также при неосесимметричном нагружении, рассмотрены в статьях [8, 9]. Публикации [10–18] посвящены исследованию деформирования упругих и упругопластических круглых трёхслойных пластин со сжимаемым наполнителем при изотермических нагружениях.

Здесь приводится постановка и решение краевой задачи о деформировании круглой трёхслойной пластины в температурном поле. Используется цилиндрическая система координат. В тонких несущих слоях справедливы гипотезы Кирхгофа. В жестком наполнителе, воспринимающем нагрузку в тангенциальном и вертикальном направлениях, нормаль остается прямолинейной, поворачивается на некоторый дополнительный угол $\psi(r)$, обжатие по толщине принимается линейным. Деформации малые.

На внешний слой стержня действует осесимметричная распределенная нагрузка $q = q(r)$ и падает тепловой поток q_t . На контуре пластинки предполагается наличие жесткой диафрагмы, препятствующей относительному сдвигу слоев и обжатию наполнителя. Через $w(r)$ и $u(r)$ обозначены прогиб и продольное перемещение срединной плоскости наполнителя, $v(r)$ – функция, характеризующая сжимаемость наполнителя.

Продольные и поперечные перемещения в слоях $u^{(k)}(r, z)$ и $w^{(k)}(r, z)$ выражаются через четыре искомые функции $w(r)$, $u(r)$, $\psi(r)$ и $v(r)$. Используя вариационный принцип Лагранжа, получим систему дифференциальных уравнений равновесия, служащую для определения искомых функций:

$$\begin{aligned} L_2(a_1u + a_2\psi - a_3w_{,r} - a_4v_{,r}) + K_3^- v_{,r} &= 0, \\ L_2(a_2u + a_5\psi - a_6w_{,r} - a_7v_{,r}) - 2cG_3\psi &= 0; \\ L_3(a_3u + a_6\psi - a_8w_{,r} - a_9v_{,r}) &= -q, \\ L_3(a_4u + a_7\psi - a_9w_{,r} - a_{10}v_{,r}) + \frac{c}{6} \left(2K_3 - \frac{1}{3}G_3 \right) \left(v_{,rr} + \frac{v_{,r}}{r} \right) - K_3^- \left(u_{,r} + \frac{u}{r} \right) - \frac{1}{2c} K_3^+ v &= -q, \end{aligned}$$

где a_i – коэффициенты, определяемые термоупругими и геометрическими параметрами слоев; L_2, L_3 – дифференциальные операторы [10, 11].

Следует отметить, что если в полученной системе положить функцию сжимаемости $v(r) \equiv 0$, то первые три уравнения совпадут с известной системой уравнений равновесия для круговой пластины с жестким несжимаемым наполнителем [1, 2].

Краевая задача замыкается добавлением к уравнениям равновесия кинематических граничных условий. При жесткой заделке контура пластины должны выполняться требования

$$u = \psi = w = v = w_{,r} = 0 \text{ при } r = r_0.$$

При шарнирном опирании контура пластины

$$u = \psi = w = 0, \quad M_r = \sum_{k=1}^3 \int_{h_k} \sigma_r^{(k)} z dz = 0,$$

где $\sigma_r^{(k)}$ – радиальное напряжение; M_r – изгибающий момент.

Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений равновесия несимметричной по толщине трехслойной пластины со сжимаемым жестким наполнителем получено в виде

$$\begin{aligned} v &= -\frac{C_7}{\beta} J_0(\beta r) + \frac{q_0 r}{2\beta^2} (p_1 + p_2) + C_9, \\ \psi &= -\frac{q_0 r^3}{16a_6} - \frac{1}{a_6} (a_3u - a_8w_{,r} - a_9v_{,r}) + C_3 \frac{r}{2}; \\ u &= b_1 v_{,r} + (b_2 + b_3) \frac{q_0 r^3}{16} + C_5 \frac{r}{2}; \\ w &= \frac{a_2 a_6 - a_3 a_5}{a_6^2 - a_5 a_8} \int u dr - \frac{a_6 a_7 - a_5 a_9}{a_6^2 - a_5 a_8} v - \frac{a_5 q_0}{64(a_6^2 - a_5 a_8)} r^4 + C_{10} \frac{r^2}{4} + C_{12}, \end{aligned}$$

где C_i – константы интегрирования, определяемые из граничных условий.

Это решение отличается от полученных ранее учетом зависимости упругих параметров материалов слоев от температуры, которая рассчитывается по формуле Белла [1, 2].

Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Конвергенция».

Список литературы

- 1 Горшков, А. Г. Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций / А. Г. Горшков, Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая. – М. : Физматлит, 2005. – 576 с.
- 2 Горшков, А. Г. Теория упругости и пластичности / А. Г. Горшков, Э. И. Старовойтов, Д. В. Тарлаковский. – М. : Физматлит, 2011. – 416 с.
- 3 Старовойтов, Э. И. Деформирование трехслойных физически нелинейных стержней / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко, Л. Н. Рабинский. – М. : МАИ, 2016. – 184 с.
- 4 Журавков, М. А. Математические модели механики твердого тела / М. А. Журавков, Э. И. Старовойтов. – Минск : БГУ, 2021. – 535 с.
- 5 Старовойтов, Э. И. Механика материалов / Э. И. Старовойтов. – Гомель : БелГУТ, 2011. – 380 с.
- 6 Gorshkov, A. G. Harmonic Vibrations of a Viscoelastoplastic Sandwich Cylindrical Shell / A. G. Gorshkov, É. I. Starovoi-tov, A. V. Yarovaya // International applied mechanics. – 2001. – Vol. 37, no. 9. – P. 1196–1203.
- 7 Старовойтов, Э. И. Термосиловое нагружение трехслойных пологих оболочек / Э. И. Старовойтов // Изв. АН СССР. Мех. твердого тела. – 1989. – № 5. – С. 114–119.
- 8 Козел, А. Г. Решение задачи об изгибе упругопластической круговой пластины на основании Пастернака / А. Г. Козел // Теоретическая и прикладная механика. – 2019. – № 34. – С. 165–171.

9 Нестерович, А. В. Осесимметричное нагружение круглой физически нелинейной трехслойной пластины в своей плоскости / А. В. Нестерович // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – Т. 48. – № 3. – С. 24–29.

10 Горшков, А. Г. Колебания трехслойных стержней под действием локальных нагрузок различных форм / А. Г. Горшков, Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Экологический вестник научных центров черноморского экономического сотрудничества. – 2004. – № 1. – С. 45–52.

11 Захарчук, Ю. В. Трехслойная круговая упругопластическая пластина со сжимаемым наполнителем / Ю. В. Захарчук // Проблемы физики, математики и техники. – 2018. – № 4 (37). – С. 72–79.

12 Старовойтов, Э. И. Нелинейное деформирование трехслойной пластины со сжимаемым наполнителем / Э. И. Старовойтов, Ю. В. Захарчук // Механика машин, механизмов и материалов. – 2019. – № 3 (48). – С. 26–33.

13 Старовойтов, Э. И. Изгиб упругопластической круговой трехслойной пластины со сжимаемым наполнителем / Э. И. Старовойтов, Ю. В. Захарчук // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2020. – Т. 26, № 1. – С. 58–73.

14 Starovoitov, E. I. Elastic circular sandwich plate with compressible filler under axially symmetrical thermal force load / E. I. Starovoitov, Y. V. Zakharchuk, E. L. Kuznetsova // Journal of the Balkan Tribological Association. – 2021. – Vol. 27, no. 2. – P. 175–188.

15 Захарчук, Ю. В. Уравнения равновесия упругопластической круговой пластины со сжимаемым наполнителем / Ю. В. Захарчук // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – Вып. 11. – С. 80–87.

16 Захарчук, Ю. В. Напряженно-деформированное состояние круговой трехслойной пластины со сжимаемым наполнителем / Ю. В. Захарчук // Механика. Исследования и инновации. – 2019. – Вып. 12. – С. 66–75.

17 Захарчук, Ю. В. Перемещения в упругой круговой трехслойной пластине со сжимаемым наполнителем / Ю. В. Захарчук // Теоретическая и прикладная механика. – 2020. – С. 61–69.

18 Захарчук, Ю. В. Упругое деформирование круговых трехслойных пластин со сжимаемым наполнителем осесимметричными нагрузками / Ю. В. Захарчук // Теоретическая и прикладная механика. – 2022. – С. 34–41.

УДК 536.413:678.01

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ АБС- И АБС/ПММА-ПЛАСТИКОВ ПОСЛЕ УСКОРЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

С. В. ШИЛЬКО, Т. В. ДРОБЫШ, А. П. САЗАНКОВ

*Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого
Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель*

В последние годы в транспортном и сельскохозяйственном машиностроении активно применяются крупногабаритные детали кузова (крыши, капоты, оболочечные элементы) из АБС-пластиков, а также их сплавов с полиметметакрилатом (ПММА). Коэффициент термического линейного расширения (КТЛР) этих материалов на порядок выше, чем у металлов, что приводит к заметным изменениям размеров вышеуказанных изделий в эксплуатационном интервале температур $-40...+35$ °С, причем КТЛР зависит от направления, что обусловлено технологической анизотропией при изготовлении. Стесненная деформация изделий при нагреве в условиях жесткого закрепления на несущей раме машины может привести к нежелательному короблению и внутренним напряжениям. В этой связи при проектировании подобных конструкций востребованы экспериментальные данные, характеризующие КТЛР АБС- и АБС/ПММА-пластиков. Также представляет интерес прогнозирование изменений КТЛР этих материалов в процессе эксплуатации при воздействии влаги, температуры и солнечного излучения.

Цель работы – определение коэффициента термического линейного расширения АБС- и АБС/ПММА-пластиков и получение экспресс-оценки его эксплуатационных изменений в результате климатического воздействия.

Исследовались АБС- и АБС/ПММА-пластики трех производителей на образцах, вырезанных из листовых заготовок в двух ортогональных направлениях. Ускоренные (800 часов) лабораторные климатические испытания (КИ) с использованием везерометра Q-SUN XENON Xe-3-NS путем интенсификации температурно-влажностного воздействия и ультрафиолетового излучения были эквивалентны 10 годам эксплуатации. Коэффициент линейного термического расширения в температурном диапазоне $-40...+35$ °С определяли на dilatометре DIL801 (TA Instruments).

На рисунке 1 показаны характерные температурные зависимости коэффициента линейного термического расширения $\alpha(t)$, обозначенного параметром Alfa в соответствии с программным обеспечением dilatометра, полученные до и после климатических испытаний. На температурных зависимостях КТЛР изучаемых АБС- и АБС/ПММА-пластиков, можно выделить 3 участка: 1) падающая