

Но несмотря на недостатки, переработка текстильных отходов в теплоизоляционные материалы имеет большой потенциал для решения проблемы отходов текстильной промышленности и для создания экологически чистых и эффективных теплоизоляционных материалов. Утилизация отходов текстильной промышленности в теплоизоляционных материалах решает проблему отходов и имеет экологические и экономические преимущества. Негодная к носке одежда также может использоваться в качестве теплоизолятора после сортировки и очистки. Необходимы дальнейшие исследования для улучшения качества переработанных материалов и расширения их применения.

#### Список цитируемых источников

1. Агрегированные статистические данные об отходах по республике, областям, г. Минску, административным районам, отдельным городам, по видам экономической деятельности, по группам, видам и классам опасности отходов производства; а также данные о выполнении мероприятий по сокращению объемов образования и (или) накопления отходов производства за 2019 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2020/06/Агрегированные-данные-статистика.pdf>. – Дата доступа: 01.04.2024.
2. Обзор отрасли: обзор 2022 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://globalfashionagenda.org/news-article/industry-insights-2022-in-review/>. – Дата доступа: 01.04.2024.
3. Об объемах сбора вторичных материальных ресурсов и отходов товаров и упаковки, размерах расходования денежных средств, полученных от производителей и поставщиков, в 2023 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vtoroperator.by/upload/iblock/fd7/iltp3sfwfhlbg207vyz2cd975t3umj2q/Отчет%20Оператора%20ВМР%20за%202023%20год.pdf>. – Дата доступа: 01.04.2024.
4. Переработка отходов текстильной и легкой промышленности: теория и практика. Материалы докладов Международной научно-практической конференции, 30 ноября 2016 г. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2016. – 128 с.

УДК 539.3

## ИЗГИБ ЛОКАЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ КРУГЛОЙ ПЯТИСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ

**В.С. Салицкий**

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

## BENDING BY LOCAL LOAD OF A CIRCULAR FIVE-LAYER PLATE

**V.S. Salicki**

Belarusian state university of transport, Gomel, Belarus

**Аннотация.** Исследован изгиб упругой круглой пятислойной пластины под действием распределенной по кругу локальной поперечной нагрузки. В симметричной по толщине пластине три тонких несущих слоя (два внешних и один внутренний), деформирование которых подчиняется гипотезам Кирхгофа. В двух относительно толстых заполнителях справедлива гипотеза Тимошенко. Система дифференциальных уравнений равновесия пластины получена вариационным методом Лагранжа. Аналитическое решение задачи выписано в функциях Бесселя в конечном виде.

**Ключевые слова:** пятислойная пластина, круговая нагрузка, аналитическое решение.

**Annotation.** The bending of an elastic circular five-layer plate under the action of a local transverse load distributed in a circle was studied. The plate, symmetrical in thickness, has three thin load-bearing layers (two external and one internal), the deformation of which obeys Kirchhoff's hypotheses. In two relatively thick aggregates, Timoshenko's hypothesis is valid. The system of differential equations for the equilibrium of the plate was obtained by the Lagrange variational method. The analytical solution of the problem is written in Bessel functions in final form.

**Keywords:** five-layer plate, circular load, analytical solution.

В связи с возросшими современными требованиями промышленности к прочности и материалоемкости конструкций резко усилился спрос на использование композитных, в том числе пятислойных, материалов. Поэтому постановка и решение соответствующих краевых задач является актуальной проблемой.

Монографии [1–4] посвящены разработке механико-математических моделей и методов расчета слоистых элементов конструкций. В статьях [5, 6] указаны особенности квазистатического и динамического деформирования трехслойных стержней и оболочек. Пятислойные пластины рассмотрены в работах [7–11].

На симметричную по толщине пятислойную круглую пластину действует локальная нагрузка, равномерно распределенная по кругу относительного радиуса  $r \leq b$ . Ее можно представить в следующем аналитическом виде:

$$q(r) = q_0 H_0(b-r), \quad (1)$$

где  $H_0(x)$  – функция Хэвисайда;  $q_0$  – интенсивность распределенной нагрузки.

Для тонких жестких внешних и внутреннего несущих слоев толщинами  $h_2 = h_4, h_1$  принимаются гипотезы Кирхгофа. В более толстых заполнителях – гипотеза Тимошенко о прямолинейности и несжимаемости нормали, которая поворачивается на некоторый дополнительный угол  $\psi(r)$ . Задача решается в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$ , связанной со срединной плоскостью внутреннего несущего слоя. Все перемещения в пластине выражаются через прогиб пластины  $w(r)$  и сдвиг в заполнителях  $\psi(r)$ .

Система уравнений равновесия, полученная в [8, 9] при непрерывно распределенной нагрузке, в случае нагрузки (1) принимает вид

$$\begin{aligned} L_2(a_4 \psi - a_5 w_{,r}) - 2cG_3 \psi &= 0, \\ L_3(a_5 \psi - a_6 w_{,r}) &= -q_0 H_0(b-r), \end{aligned} \quad (2)$$

где запятой в индексе обозначена производная по следующей координате; коэффициенты

$$\begin{aligned} a_4 &= \left[ 2K_2^+ h_2 h_3^2 + 2K_3^+ \frac{h_3^3}{3} \right], & a_5 &= \left[ K_2^+ h_2 h_3 (h_1 + 2h_3 + h_2) + 2K_3^+ h_3 \left( \frac{h_1 h_3}{4} + \frac{h_3^2}{3} \right) \right], \\ a_6 &= \left[ 2K_2^+ h_2 \left( \frac{h_1^2}{4} + \frac{h_1 h_2}{2} + h_1 h_3 + \frac{h_2^2}{3} + h_2 h_3 + h_3^2 \right) + K_1^+ \frac{h_1^3}{12} + 2K_3^+ h_3 \left( \frac{h_1^2}{4} + \frac{h_1 h_3}{2} + \frac{h_3^2}{3} \right) \right], \end{aligned}$$

$L_2, L_3$  – дифференциальные операторы

$$L_2(g) \equiv g_{,rr} + \frac{g_{,r}}{r} - \frac{g}{r^2}, \quad L_3(g) \equiv g_{,rrr} + \frac{2g_{,rr}}{r} - \frac{g_{,r}}{r^2} + \frac{g}{r^3}.$$

Решение системы (2) для пластины, заделанной по контуру, следующее:

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{\gamma_1 q_0}{\beta^2} \left\{ \frac{I_1(\beta r)}{I_1(\beta)} \left( \frac{b^2}{2} - bK_1(\beta)I_1(\beta b) \right) + bI_1(\beta b)K_1(\beta r) + \right. \\ &+ \left. \frac{H_0(b-r)}{2} \left[ \frac{b^2}{r} - r + 2b(K_1(\beta b)I_1(\beta r) - I_1(\beta b)K_1(\beta r)) \right] - \frac{b^2}{2r} \right\}, \\ w &= \frac{a_5}{a_6} \frac{\gamma_1 q_0}{\beta^2 I_1(\beta)} \left\{ \frac{I_0(\beta r)}{\beta I_1(\beta)} \left( \frac{b^2}{2} - bK_1(\beta)I_1(\beta b) \right) - \frac{b^2 I_0(\beta) \beta}{2\beta^2 I_1(\beta)} + \frac{bI_1(\beta b)}{\beta^2 I_1(\beta)} - \frac{bI_1(\beta b)K_0(\beta r)}{\beta} - \right. \\ &- \left. \frac{b^2}{2} \ln(r) \frac{H_0(b-r)}{2} \left[ \frac{b^2 - r^2}{2} + b^2 \ln\left(\frac{r}{b}\right) + \frac{2b}{\beta} (K_1(\beta b)I_0(\beta r) + I_1(\beta b)K_0(\beta r)) - \frac{2}{\beta^2} \right] \right\} + \\ &+ \frac{q_0}{8a_6} \left\{ \left( \frac{r^4 - 5b^4}{8} - \frac{b^4}{2} \ln\left(\frac{r}{b}\right) - b^2 r^2 \ln\left(\frac{r}{b}\right) + \frac{b^2 r^2}{2} \right) H_0(b-r) + b^2 r^2 (\ln r - 1) + \frac{b^2}{4} r^2 (2 - b^2) + \frac{b^4}{2} \ln r + \frac{b^4}{4a_6} + \frac{b^2}{2a_6} \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $I(x), K(x)$  – функции Бесселя и Макдональда;  $\beta, \gamma_1$  – коэффициенты, выражаемые через  $a_i$ .

**Список цитируемых источников**

1. Горшков, А.Г. Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций / А. Г. Горшков, Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 576 с.
2. Журавков, М. А. Математические модели механики твердого тела / М. А. Журавков, Э. И. Старовойтов. – Минск : БГУ, 2021 – 535 с.
3. Zhuravkov, M. A. Mechanics of Solid Deformable Body / M. A. Zhuravkov, Lyu Yongtao, E. I. Starovoitov. – Singapore : Springer, 2022. – 317 p.
4. Абдусаттаров, А. Деформирование и повреждаемость упругопластических элементов конструкций при циклических нагружениях / А. Абдусаттаров, Э. И. Старовойтов, Н. Б. Рузиева. – Ташкент : Ideal Press, 2023. – 381 с.
5. Deformation of a Step Composite Beam in a Temperature Field / E.I. Starovoitov [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Vol. 88, № 4. – P. 1023–1029.
6. Старовойтов, Э. И. Исследование спектра частот трехслойной цилиндрической оболочки с упругим наполнителем / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – 21, № 2. – С. 162–169.
7. Салицкий, В. С. Уравнения равновесия круговой пятислойной пластины в усилиях / В. С. Салицкий // Мат. XXVII Междунар. симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. – 2021. – Т. 1. – С. 199–201.
8. Салицкий, В. С. Изгиб защемлённой по контуру круговой пятислойной пластины / В. С. Салицкий // Механика. Исследования и инновации. – Гомель, 2022. – Вып. 15 – С. 209–213.
9. Салицкий, В. С. Изгиб круговой пятислойной пластины / В. С. Салицкий // Теоретическая и прикладная механика. – Минск, 2023. – Вып. 38 – С. 234–239.
10. Лачугина, Е. А. Поперечные колебания пятислойной упругой круговой пластины с жесткими заполнителями / Е. А. Лачугина // Механика. Исследования и инновации. – 2022. – Вып. 15. – С. 212–219.
11. Лачугина, Е. А. Частоты собственных колебаний пятислойной круговой пластины / Е. А. Лачугина // Теоретическая и прикладная механика. – Минск : БНТУ, 2023. – Вып. 38. – С. 227–233.

УДК 629.331+629.3.024

**РАЗВИТИЕ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ В КОНТЕКСТЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЯ**

**И.А. Серебряков**

Белорусский национальный технический университет; г. Минск, Беларусь

**DEVELOPMENT OF AUTOMOBILE DIAGNOSTICS IN THE CONTEXT OF MODERN AUTOMOTIVE TRENDS**

**I.A. Serebryakov**

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

**Аннотация.** Мировая автомобильная промышленность движется вперёд ускоряющимися темпами. Китайские фирмы, ставшие за последние несколько лет сильными игроками на мировом автомобильном рынке, навязывают серьёзную конкуренцию другим автопроизводителям, и это вынуждает все бренды, не планирующие терять рынок, инвестировать в новые разработки, налаживать технологические процессы, расширять взаимодействие и т. д. В этой статье рассмотрено влияние данных тенденций на этап эксплуатации и диагностирования автомобилей.

**Ключевые слова:** современный электромобиль, развитие автомобилестроения, диагностирование автомобилей, алгоритм диагностирования, тяговая аккумуляторная батарея, электродвигатель.