Таблица 1 – **Максимальные значения расчетных величин для параллелепипеда**

k	$v^{(k)}$	$w^{(k)}$	$\sigma_x^{(k)}$	$\sigma_y^{(k)}$	$\sigma_z^{(k)}$
По обобщенному принципу Мазинга – Москвитина					
1	0,61749	–0,10211	–4518,0	–4524,8	–6618,9
2	–0,58752	0,09732	4342,7	4348,4	6464,4
3	0,55699	–0,09248	–4156,4	–4160,9	–6301,2
4	–0,55331	0,09191	4130,2	4134,6	6278,3
5	0,52489	–0,08742	–3964,0	–3967,4	–6124,4
6	–0,53542	0,08910	4014,5	4018,2	6177,9
7	0,50982	–0,08505	–3865,7	–3868,4	–6039,3
8	–0,52310	0,08717	3933,3	3936,5	6107,8
9	0,49896	–0,08335	–3793,3	–3795,7	–5977,1
По обобщенной диаграмме Гусенкова – Шнейдеровича					
k	$v^{(k)}$	$w^{(k)}$	$\sigma_x^{(k)}$	$\sigma_y^{(k)}$	$\sigma_z^{(k)}$
1	0,61749	–0,10211	–4518,0	–4524,8	–6618,9
2	–0,42184	0,07179	3297,7	3295,4	5588,6
3	0,52101	–0,08723	–3872,6	–3874,8	–6086,6
4	–0,37912	0,06525	2987,4	2982,8	5356,2
5	0,48632	–0,08189	–3627,8	–3628,2	–5894,1
6	–0,35978	0,06229	2841,6	2835,9	5253,9
7	0,46875	–0,07920	–3493,8	–3493,2	–5801,7
8	–0,34201	0,05955	2716,4	2709,6	5153,4
9	0,45861	–0,07765	–3414,2	–3412,9	–5750,0

Расчеты выполнены при следующих данных: $\alpha_1 = 0,4;\ A^* = 1,15,\ G_T = 0,05;\ Q = 2,02$, æ = 0,03. Материал конструкции – циклически упрочняющийся алюминиевый сплав Д-16Т. Условия появления вторичных, третичных и подобных пластических областей: $\bar{\sigma}_u^{(k)} \geq \alpha_k \sigma_s$, где α_k – масштабный коэффициент. Сравнивая значения расчетных величин (с чертой): перемещений, $\bar{w}^{(k)}$ и напряжений $\bar{\sigma}_x^{(k)}, \bar{\sigma}_y^{(k)}, \bar{\sigma}_z^{(k)}$ при k = 2 и k = 9, заметим, что они различаются соответственно на 12,23; 16,46 и 14,48; 14,55; 8,71 % соответственно. В этом случае значения расчетных величин по Мазингу при $k = 1$ и k = 9 различаются соответственно на 19,19; 18,36 и 16,04; 16,11; 9,69 %, а по Гусенкову – Шнейдеровичу – на 25,7; 23,94 и 24,43; 24,58; 13,11 %. При k = 9 разница расчетных величин по двум теориям составляет 8,07; 6,95 и 9,98; 10,11; 3,7 %.

Таким образом, можно заключить, что разница между результатами, полученными по двум теориям, небольшая (порядка 10 %), что подтверждается экспериментально.

Список литературы

1 **Ильюшин, А. А.** Пластичность. Ч. 1. Упруго-пластические деформации. / А. А. Илюшин. − М. : Логос, 2004. − 388 с.

2 **Буриев, Т.** Алгоритмическая система расчета трёхмерных упругих тел / Т. Буриев, М. М. Расулмухамедов. – Ташкент : Кибернетика АН РУз, 1994. – 147 с.

3 **Абдусаттаров, А.** К процедуре расчета пространственных конструкций при переменных нагружениях с учетом упрочнения-разупрочнения / А. Абдусаттаров, М. М. Расулмухамедов // Проблемы механики. – 2015. – № 2. – С. 40–43.

4 **Гусенков, А. П.** Малоцикловая прочность оболочечных конструкций / А. П. Гусенков, Г. В. Москвитин, В. Н. Хорошилов. – М. : Наука, 1989. − 254 с.

УДК 539.3

ДЕФОРМИРОВАНИЕ КРУГОВОЙ ПЯТИСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ, СИММЕТРИЧНОЙ ПО ТОЛЩИНЕ

В. С. САЛИЦКИЙ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В последнее время значительно возрос спрос на использование слоистых тонкостенных элементов конструкций в авиа-, ракето-, машиностроении и строительстве. Это обусловливает необходимость разработки математических моделей и методов их расчета на различные виды и типы нагрузок. Методы расчета и постановки краевых задач для слоистых элементов конструкций приведены в монографиях [1–5]. В статьях [6–11] рассмотрены некоторые задачи колебаний и нестационарных нагружений слоистых элементов конструкций. В работах [12–17] приведены результаты исследования статического деформирования слоистых круговых пластин. Публикация [18] посвящена выводу уравнений равновесия пятислойной пластины.

Рассмотрена упругая круговая пятислойная пластина с жесткими заполнителями. Постановка задачи и ее решение проведены в цилиндрической системе координат r, φ, z, связанной со срединной плоскостью центрального несущего слоя. Во всех тонких несущих слоях справедливы гипотезы Кирхгофа: нормаль остается несжимаемой, прямолинейной и перпендикулярной к деформированной срединной поверхности. В несжимаемых по толщине заполнителях, воспринимающих нагрузку в тангенциальном направлении, нормаль остается прямолинейной, не изменяет своей длины и поворачивается на некоторый дополнительный угол $\psi(r)$. На внешний слой пластины действует осесимметричная равномерно распределенная вертикальная нагрузка q = const. На контуре пластины предполагается наличие жесткой диафрагмы, препятствующей относительному сдвигу слоев. Через $w(r)$ обозначен прогиб срединной поверхности заполнителей; h_k – толщина k-го слоя.

Продольные и поперечные перемещения в слоях $u^{(k)}(r, z)$ выражаются через две искомые функции $w(r)$ и $\psi(r)$:

– в несущих слоях 1, 2, 4 –

$$u_r^{(4)} = -zw,_r + h_3\psi, \quad (0,5h_1 + h_3 \le z \le 0,5h_1 + h_3 + h_2)\,,$$

$$u_r^{(1)} = -zw,_r\,, \quad (-0,5h_1 \le z \le 0,5h_1)\,,$$

$$u_r^{(2)} = -zw,_r - h_3\psi, \quad (-0,5h_1 - h_3 - h_2 \le z \le -0,5h_1 - h_3)\,,$$

– в заполнителе 3, 5 –

$$u_r^{(5)} = -zw,_r + (z - 0,5h_1\psi), \quad (0,5h_1 \le z \le 0,5h_1 + h_3)\,,$$

$$u_r^{(3)} = -zw,_r + (z + 0,5h_1\psi), \quad (-0,5h_1 - h_3 \le z \le -0,5h_1),$$

где z – координата рассматриваемого волокна по вертикали; запятая в нижнем индексе обозначает операцию дифференцирования по следующей за ней координате.

Компоненты тензора деформаций в слоях получим из перемещений (1), применяя соотношения Коши. Напряжения связаны с деформациями законом Гука. Используя вариационный принцип Лагранжа, получим следующую систему обыкновенных дифференциальных уравнений для определения искомых функций $w(r)$ и $\psi(r)$:

$$L_2(a_4\psi - a_5 w,_r) - 2h_3G_3\psi = 0\,,$$

$$L_3(a_5\psi - a_6 w,_r) = -q\,.$$

Здесь запятая в нижнем индексе обозначает дифференцирование по следующей за ней координате, коэффициенты a_i вычисляются через механические и геометрические характеристики слоев, дифференциальные операторы L_2 (*оператор Бесселя*), L_3 определяются соотношениями

$$L_2(g) \equiv \left(\frac{1}{r}(rg),_r\right),_r \equiv g,_{rr} + \frac{g,_r}{r} - \frac{g}{r^2}\,,$$

$$L_3(g) \equiv \frac{1}{r}\big(rL_2(g)\big),_r \equiv g,_{rrr} + \frac{2g,_{rr}}{r} - \frac{g,_r}{r^2} + \frac{g}{r^3}\,.$$

После решения системы (2) для рассматриваемой пластины, защемленной по контуру, получим выражения для искомых функций:

$$\psi = \frac{q(a_5{}^2 - a_4a_6)}{4a_5a_6h_3G_3}\left(r_0\frac{I_1(\beta r)}{I_1(\beta r_0)} - r\right),$$

$$w = \frac{q(a_5{}^2 - a_4a_6)}{4a_6{}^2h_3G_3}\left(r_0\frac{I_0(\beta r) - I_0(\beta r_0)}{\beta I_1(\beta r_0)} - \frac{r^2 - r_0{}^2}{2}\right) + \frac{q}{64a_6}(r^2 - r_0{}^2)^2\,.$$

По полученному решению можно определить радиальные перемещения в слоях пластины, по ним – деформации, затем с помощью закона Гука – напряжения.

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 **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.

7 **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.

8 **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.

9 **Fedotenkov, G. V.** Identification of non-stationary load upon Timoshenko beam / G. V. Fedotenkov, D. V. Tarlakovsky, Y. A. Vahterova // Lobachevskii journal of mathematics. – 2019. – Vol. 40, no. 4. – P. 439–447.

10 **Вестяк, В. А.** Распространение нестационарных объемных возмущений в упругой полуплоскости / В. А. Вестяк, А. С. Садков, Д. В. Тарлаковский // Изв. РАН МТТ. – 2011. – Т. 46, № 2. – С. 130–140.

11 **Tarlakovskii, D. V.** Nonstationary 3D motion of an elastic spherical shell / D. V. Tarlakovskii, G. V. Fedotenkov // Mechanics of Solids. – 2015. – Vol. 46, no. 5. – P. 779–787.

12 **Старовойтов, Э. И.** Термосиловое нагружение трехслойных пологих оболочек / Э. И. Старовойтов // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1989. – № 5. – С. 114–119.

13 **Захарчук, Ю. В.** Перемещения в круговой трехслойной пластине со сжимаемым заполнителем / Ю. В. Захарчук // Механика. Исследования и инновации. – 2017. – № 10. – С. 55–66.

14 **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.

15 **Нестерович, А. В.** Радиальное и тангенциальное неосесимметричное нагружение круговой трехслойной пластины / А. В. Нестерович // Механика. Исследования и инновации. – 2020. – № 13. – С. 116–121.

16 Deformation of a Step Composite Beam in a Temperature Field / É. I. Starovoitov [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Vol. 88, no. 4. – P. 1023–1029.

17 **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. – 2020. – Vol. 12, Spec. is. – P. 79–90.

18 **Салицкий, В. С.** Уравнения равновесия круговой пятислойной пластины в усилиях / В. С. Салицкий // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : материалы XXVII Междунар. симпозиума им. А. Г. Горшкова. – 2021. – Т. 1. – С. 199–201.

УДК 626.193/.197:656.2

СПОСОБЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КОРРОЗИИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Я. С. САМОСУДОВА
Филиал Самарского государственного университета путей сообщения,
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Проблема коррозии на железнодорожном транспорте является чрезвычайно актуальной. По статистике, одной из наиболее частых причин возникновения аварий являются различного рода коррозионные повреждения (рисунок 1).

Коррозия не только наносит огромные убытки, но и может служить причиной капитальных и текущих ремонтов линий движения составов. Кроме того, она опасна еще и тем, что может создать угрозу для жизни пассажиров (электрички, пассажирские поезда). Если на отдельном участке сильно подверглись коррозии металлические рельсы или другие части линии, возможно, что этот отрезок пути просто перекроют на достаточно длительное время.