Решение уравнения движения индентора получаем на основе интегрального преобразования Лапласа. Значение контактной силы определяется из условия совместимости перемещений индентора и пластины. После определения коэффициентов разложения искомых функций вычисляются перемещения, деформации и напряжения в слоях пластины.

Исследовано влияние скорости индентора на максимальные растягивающие напряжения на примере трехслойного ветрового стекла КамАЗ-5320 с размерами в плане 1024 и 662 мм. Наружные слои изготовлены из силикатного стекла и соединены слоем из полимерного материала. Индентор представлял собой стальной шар массой 227 г и радиусом 20 мм.

Оценка прочности остекления проводилась на основе первой теории прочности. Исследованы напряжения при различных скоростях столкновения остекления с индентором. При скорости индентора 7 м/с растягивающие напряжения в наружных слоях приближаются к допустимым значениям (120 МПа), а при 10 и 13 м/с происходит разрушение стекла.

Также исследовано влияние массы индентора на растягивающие напряжения в слоях остекления при скорости столкновения 5 м/с. Когда масса индентора равна 400 г, значения напряжений приближаются к своим допустимым значениям. При ударе индентором массой 500 г остекление разрушается.

Предложенный подход может быть использован при проектировании безопасного многослойного остекления средств наземного транспорта с учетом аварийных воздействий.

Список литературы

1 ГОСТ Р 51136–2008. Стекла защитные многослойные. Общие технические условия. – Взамен ГОСТ Р51136–987 ; введ. 2009-06-01. – М. : Стандартинформ, 2008. – 15 с.

2 **Бруль, С. Т.** К вопросу о моделировании воздействия ударной волны на корпус боевой машины / С. Т. Бруль, А. Ю. Васильев // Вестник НТУ «ХПИ». Машиноведение и САПР. – 2005. – № 53. – С. 29–34.

3 ГОСТ 5727–88. Стекло безопасное для наземного транспорта. Общие технические условия : с изм. № 3, утв. постановлением Госстандарта России от 27.08.2001 № 353-ст. – Введ. 2002-01-01. – М., 2002. – 5 с.

4 **Голяков, В. И.** Метод расчета взрывозащитного остекления / В. И. Голяков, А. А. Дайлов, В. А. Кишкин // Системы безопасности.– 2004.– № 4. – С. 26–27.

5 **Мильков, В. Г.** Двухосноориентированная полиэтилентерефталатная пленка. Всегда ли необходима в пулестойком и взрывобезопасном остеклениях? / В. Г. Мильков // Технологии безопасности. – 2004. – № 6. – С. 24–26.

6 Dynamic response of laminate composite shells with complex shape under low-velocity impact / N. Smetankina [et al.] // Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering-2020. – Springer : Cham, 2021. – Vol. 188. – P. 267–276.

7 **Jones, N.** Structural impact / N. Jones. – Cambridge : Cambridge Univ. Press, 1989. – 320 p.

УДК.539.3

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЕРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ С УЧЕТОМ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ

Н. Х. СОБИРОВ, А. И. ИСОМИДДИНОВ, А. АБДУСАТТАРОВ
Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан

Приведем результаты расчета тонкостенных стержней при пространственно-переменном нагружении на основе теории малых упругопластических деформаций и уточненной теории стержней [1–3]. При пространственно-переменном нагружении, т. е. при совместных продольных, поперечных и крутильных силах, законы распределения перемещений, деформаций и напряжений в сечениях стержня сложны, поэтому уточненная теория строится на основании ряда статических гипотез. На основании известных допущений выражения для перемещения точек стержня при переменном нагружении представим в виде [4]:

$$\begin{aligned} \bar{u}_1^{(n)} &= \bar{u}^{(n)} - y\bar{\alpha}_1^{(n)} - z\bar{\alpha}_2^{(n)} + \varphi\bar{\nu}^{(n)} + a_1\bar{\beta}_1^{(n)} + a_2\bar{\beta}_2^{(n)}, \\ \bar{u}_2^{(n)} &= \bar{v}^{(n)} - z\bar{\theta}^{(n)}, \quad \bar{u}_3^{(n)} = \bar{w}^{(n)} + y\bar{\theta}^{(n)}. \end{aligned} \tag{1}$$

На основе вариационного принципа Лагранжа с использованием соотношения Коши и связи между напряжениями и деформациями получено вариационное уравнение равновесия стержней при пространственно-переменном упругопластическом нагружении:

$$\frac{d}{dx}\left[\left(A^{\text{уп}}-A^{\text{пл}(n)}\right)\frac{d\overline{U}^{(n)}}{dx}+\left(B^{\text{уп}}-B^{\text{пл}(n)}\right)\overline{U}^{(n)}\right]+\left(C^{\text{уп}}+C^{\text{пл}(n)}\right)\frac{d\overline{U}^{(n)}}{dx}+\left(D^{\text{уп}}-D^{\text{пл}(n)}\right)\overline{U}^{(n)}=\overline{Q}^{(n)}; \tag{2}$$

$$\left\{-\left(A^{\text{уп}}-A^{\text{пл}(n)}\right)\frac{d\overline{U}^{(n)}}{dx}+\left(B^{\text{уп}}-B^{\text{пл}(n)}\right)\overline{U}^{(n)}-\overline{Q}_r^{(n)}\right\}d\overline{U}^{(n)}\Bigg|_r=0, \tag{3}$$

где $\overline{Q}^{(n)}$, $\overline{Q}_{\tilde{A}}^{(n)}$ – векторы внешних сил; матрицы A, B, C, D – квадратичные матрицы девятого порядка; $\overline{U}^{(n)}=\left\{\overline{u}^{(n)}, \overline{\alpha}_1^{(n)}, \overline{\alpha}_2^{(n)}\ \lambda_2^{(n)}, \nu^{(n)}, \beta_1^{(n)}, \beta_2^{(n)}, \overline{w}^{(n)}, \overline{\theta}^{(n)}, \nu^{(n)}\right\}$ – искомые векторы функции девятого порядка. Для определения значений расчетных величин используется формула [1]

$$U^{(k)}=U'+\sum_{k=2}^{kk}(-1)^{k-1}\overset{=}{\bar{U}}^{(k)},\quad \sigma_{ij}^{(k)}=\sigma'_{ij}+\sum_{k=2}^{kk}(-1)^{k-1}\overline{\sigma}_{ij}^{(k)}. \tag{4}$$

Для решения краевой задачи используется метод конечных разностей и метод упругих решений, сформулированных нелинейных алгебраических уравнений с соответствующими граничными условиями, решается методом матричной прогонки с помощью следующей рекуррентной формулы:

$$\vec{V}_i=\alpha_i\vec{V}_{i+1}+\beta_i;\qquad i=N-1,\ ...,\ 1, \tag{5}$$

здесь $\alpha_i=\left(\overline{B}_i-\overline{C}_i\alpha_{i-1}\right)^{-1}\overline{A}_i$; $\beta_i=\left(\overline{B}_i-\overline{C}_i\alpha_{i-1}\right)^{-1}\left(\overline{C}_i\beta_{i-1}-\overline{F}_i\right)$. $\quad(6)$

Для реализации вышеприведенного алгоритма составлена модифицированная комплексная программа на объектно-ориентированном языке Delphi. Комплекс программ работает в диалоговом режиме [5]. На основе разработанного алгоритма произведен расчет тонкостенных стержней прямоугольного поперечного сечения, защемленного по торцам при знакопеременном нагружении с учетом накопления повреждений. Задача решена при следующих исходных данных.

Материальные константы кинетического уравнения повреждаемости: A = 1,2·10^{-4}; α = β = 5; γ = 0,8; α_1 = 0,97; B = 1,4·10^3; ε_s = 0,0015. За внешнюю нагрузку приняты следующие значения: $f_0^+=25$; $f_0^-=50$; $\bar{f}_0^+=10$; $\bar{f}_0^-=5$ (кг/см^2); $\alpha=\pi/3$; $\alpha^*=\pi/2$; $\gamma=\pi/4$; $\gamma^*=\pi/6$.

В таблице 1 приводятся численные результаты вектора перемещений в зависимости от числа итерации γ (при $N=40$, k = 2 и k = 10).

Максимальное значения компонентов вектора перемещений на основе различных диаграмм деформирования приведены в таблице 1. Результаты численного эксперимента показывают, что с увеличением числа циклов нагружения изменяются зоны пластичности и повреждаемости, а это, в свою очередь, влияет на кинетику НДС стержня.

Таблица 1

x	k = 2			k = 10		
	Модель Мазинга – Москвитина (γ = 4)	Модель Гусенкова–Шнейдеровича (γ = 4)	Модель Буриева (γ = 5)	Модель Мазинга – Москвитина (γ = 3)	Модель Гусенкова – Шнейдеровича (γ = 3)	Модель Буриева (γ = 4)
$W^{(k)}$						
0,5	0,274187	0,274189	0,274398	0,274144	0,274132	0,274375
$\alpha_1^{(k)}$						
0,3	0,722022	0,722027	0,722560	0,721904	0,721872	0,722499
$\beta_1^{(k)}$						
0,1	0,019853	0,019854	0,019871	0,019851	0,019851	0,019869
$V^{(k)}$						
0,5	0,257083	0,257084	0,257279	0,257043	0,257030	0,257261
$\alpha_2^{(k)}$						
0,3	0,676963	0,676968	0,677462	0,676851	0,676819	0,677415

На рисунках 1, 2 показаны зоны пластичности и поврежденности соответственно для поперечного сечения $x = 0{,}0$; $x = 0{,}5$ при $k = 2$ (a, b) и при $k = 10$ (c, d).

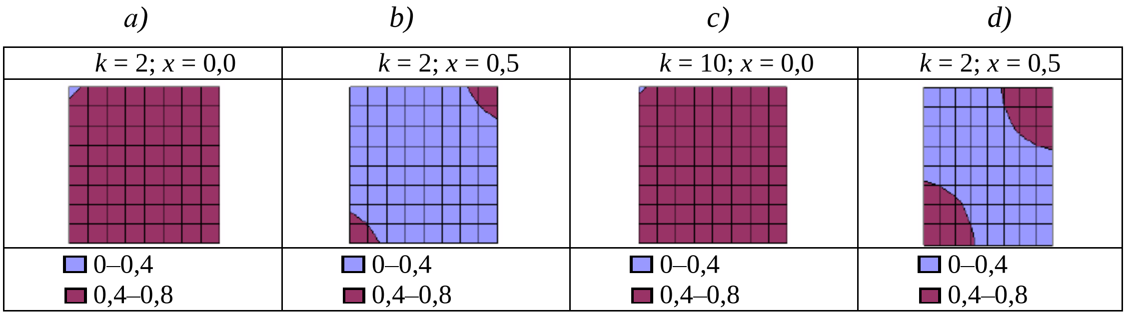

Рисунок 1 – Кинетика изменения зоны пластичности

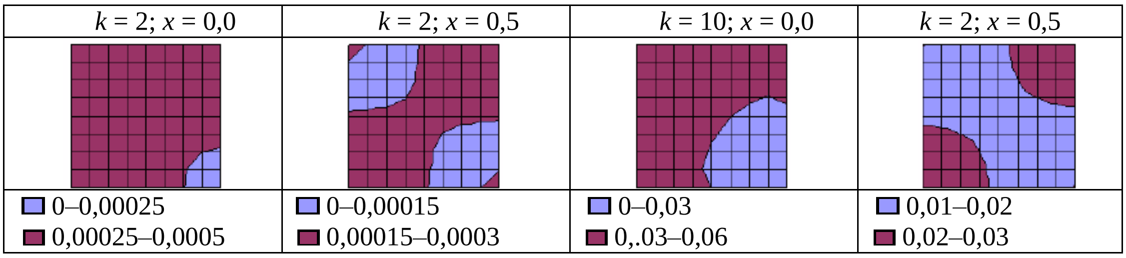

Рисунок 2 – Кинетика изменения зоны поврежденности

Список литературы

1 **Москвитин, В. В.** Циклические нагружения элементов конструкций / В. В. Москвитин. – М. : URSS, 2019. – 344 с.

2 **Власов, В. З.** Тонкостенные упругие стержни / В. З. Власов. – М. : Физматгиз, 1959. – 568 с.

3 **Старовойтов, Э. И.** Повторное знакопеременное деформирование упругопластических трехслойных стержений / Э. И. Старовойтов, Д. М. Савицкий // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2013. – № 1. – С. 17–22.

4 **Кабулов, В. К.** Алгоритмизация в теории упругости и деформационной теории пластичности / В. К. Кабулов. – Ташкент : Фан, 1966. – 394 с.

5 **Абдусаттаров, А.** Упругопластический расчет стержней при пространственно-переменном нагружении с учетом повреждаемости / А. Абдусаттаров, А. И. Исомиддинов // Упругость и не упругость. – М. : Изд-во Московского университета, 2016. – С. 57–65.

УДК 539.3

ИЗГИБ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ В НЕЙТРОННОМ ПОТОКЕ

Э. И. СТАРОВОЙТОВ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Введение. В монографиях [1–3] разработаны модели деформирования трехслойных элементов конструкций при квазистатических и динамических нагрузках. Свободные, вынужденные и резонансные колебания трехслойных пластин и оболочек, в том числе связанных с упругим основанием Винклера, исследовались в публикациях [4–7]. Нестационарное нагружение трехслойных цилиндрических оболочек изучалось в работе [8]. Перемещения в круговой трехслойной пластине под действием неосесимметричных нагрузок исследовано в статье [9]. Статьи [10–14] посвящены исследованию квазистатического деформирования трехслойных пластин и оболочек. Влияние нейтронного облучения на механические свойства материалов описано в монографии [15].

Предполагается, что для внешних несущих слоев $h_1 \neq h_2$ несимметричной по толщине трехслойной круговой пластины приняты гипотезы Кирхгофа. В жестком заполнителе ($h_3 = 2c$), выполняется гипотеза Тимошенко.

В начальный момент времени к внешней поверхности $z = c + h_1$ пластины подводится *нейтронный поток* плотностью φ_0 в направлении, противоположном внешней нормали. Согласно экспериментальным данным при малых деформациях в линейном приближении можно считать, что изменение объема материала прямо пропорционально интегральному нейтронному потоку [15]: