

УДК 539.3:534.1

© 1998 г. В.С. САФРОНОВ, И.К. ТУРКИН

### ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН С ОТВЕРСТИЕМ ПРИ ДЕЙСТВИИ ОСЕВОГО СЖАТИЯ

Сотовые конструкции широко применяются в летательных аппаратах различных типов. Конструкциями с сотовым наполнителем выполняются силовые агрегаты, элементы механизации крыла и оперения, панели крыла и фюзеляжа.

По вопросам расчета и исследования несущей способности трехслойных сотовых конструкций опубликовано достаточно много работ [1–5].

Во всех работах конструкция рассматривается целой, без повреждений. Однако в процессе эксплуатации сотовые конструкции могут получать разного рода повреждения; что, естественно, выдвигает проблему оценки степени влияния сквозных отверстий на прочность и несущую способность трехслойных сотовых панелей. В публикуемой работе на основе энергетического критерия Тимошенко и критерия Брайена решена задача определения критической нагрузки трехслойной пластины со сквозным, произвольно расположенным отверстием. Полученный алгоритм определения критической нагрузки для поврежденной панели имеет практическую значимость, т.к. позволяет получить аналитическую оценку степени снижения несущей способности поврежденной трехслойной конструкции.

Рассмотрим трехслойную пластину с легким наполнителем, сжатую в одном направлении усилиями  $N_{y0}$  и имеющую центральное отверстие радиусом  $R$ .

Как показано в [2], энергетический критерий потери устойчивости пластины в форме Тимошенко, если имеет место первая краевая задача (на контуре пластины заданы усилия  $X_0, Y_0$ ), имеет вид

$$J_c = V - 2t \int (\mu_1 X_0 + \nu_1 Y_0) dS \quad (1)$$

где  $V$  – потенциальная энергия изгиба пластины,  $\mu_1, \nu_1$  – дополнительные контурные перемещения срединного слоя,  $t$  – толщина пластины.

Функционал (1) имеет место, если выполнены следующие условия:

$$\begin{aligned} q_{11} &= 0,5w_x^2 - \frac{1}{E}(\varphi_{yy} - \mu\varphi_{xx}) + \mu_{1,x} = 0 \\ q_{22} &= 0,5w_y^2 - \frac{1}{E}(\varphi_{xx} - \mu\varphi_{yy}) + \nu_{1,y} = 0 \\ q_{12} &= w_x w_y + \frac{2(1+\mu)}{E}\varphi_{xy} + \mu_{1,y} + \nu_{1,x} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

а для функции напряжений  $\varphi(x, y)$  имеют место граничные условия:

$$\partial\varphi_x / \partial S = 0, \quad \partial\varphi_y / \partial S = 0 \quad (3)$$

Здесь  $w(x, y)$  – прогиб пластинки,  $E$  – модуль упругости пластины,  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

В случае расчета трехслойных пластин уравнение (1) примет вид

$$J_c = V - 2t \int [(u_1^I + u_1^{II})X_0 + (v_1^I + v_1^{II})Y_0] dS + A_c \quad (4)$$

Здесь индексы I и II относятся к верхнему и нижнему несущим слоям,  $A_c$  – работа внешних сил, потраченная на сдвиг заполнителя,  $t$  – толщина несущих слоев.

Для этой задачи граничные условия равенства нулю дополнительных нагрузок  $X_1 = Y_1 = 0$  можно записать в виде

$$\partial \varphi_1 / \partial x = \partial \varphi_1 / \partial y = 0 \quad \text{или} \quad \varphi_1 = \partial \varphi_1 / \partial n = 0 \quad (5)$$

Строится приближенное решение рассматриваемой задачи, для которого будем считать достаточным выполнение кинематических граничных условий на внешнем контуре трехслойной пластины. Т.е., решая задачу на основе критерия Тимошенко, будем учитывать влияние отверстия в функционале (4) только на потенциальную энергию изгиба и на работу внешних сил по сдвигу заполнителя.

Работу внешних сил на сдвиг заполнителя представим в виде:

$$A_c = \frac{G_c}{h} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} [u_{\beta 1}^2 - u_{\beta 1}(t+h)w_x + 0,5t(h+0,5t)w_x^2 + v_{\beta 1}^2 - v_{\beta 1}(t+h)w_y + 0,5t(h+0,5t)w_y^2] dx dy \quad (6)$$

где  $G_c$  – модуль сдвига материала заполнителя,  $h$  – толщина заполнителя,  $a, b$  – размеры пластины в плане ( $b$  – размер в направлении сжатия).

Начало декартовой системы координат находится в центре пластины.

Положив  $N_{x0} = X_0 2t, N_{y0} = Y_0 2t, N_{x0} = N_{y0} = \text{const}$ , уравнение (2) преобразуется к виду

$$J_c = V - N_{x0} \int (u_1^I + u_1^{II}) dS - N_{y0} \int (v_1^I + v_1^{II}) dS + \frac{G_c}{h} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} [u_{\beta 1}^2 - u_{\beta 1}(t+h)w_x + 0,5t(h+0,5t)w_x^2 + v_{\beta 1}^2 - v_{\beta 1}(t+h)w_y + 0,5t(h+0,5t)w_y^2] dx dy \quad (7)$$

Приведенные выше рассуждения позволяют составить следующую схему решения задачи устойчивости трехслойных пластинок с легким заполнителем:

1. Задаются  $w = \sum b_k w_k$  ( $k = 1, 2, \dots$ ), где  $w_k$  удовлетворяет кинематическим граничным условиям. Вычисляется потенциальная энергия изгиба  $V$ .
2. Задаются  $\varphi^I = \sum C_k^I \varphi_k^I, \varphi^{II} = \sum C_k^{II} \varphi_k^{II}$ , для верхнего и нижнего несущих слоев, где  $\varphi = \varphi_{k,n} = 0$  на внешнем контуре.
3. Из уравнений (2), составленных для двух несущих слоев, находятся  $u_1^{I,II} = u_1^{I,II}(C_k^{I,II}, b_k), v_1^{I,II} = v_1^{I,II}(C_k^{I,II}, b_k)$  и получается система для определения  $C_k^{I,II} = C_k^{I,II}(b_k)$ .
4. Определяются  $u_1^{I,II} = u_1^{I,II}(b_k), v_1^{I,II} = v_1^{I,II}(b_k)$ , составляется функционал  $J_c$  по (7), который будет иметь квадратичную относительно  $b_k$  форму.
5. Критическое значение параметра внешней нагрузки определяется из уравнения  $\partial J_c / \partial b_k = 0$ .

Далее приводится решение по определению критической нагрузки для трехслойной сотовой пластины с центральным отверстием радиуса  $R$ , равномерно сжатой в одном направлении усилиями  $N_{y0}$ . Рассматривается пластина, шарнирно-опертая по контуру.

Функции прогиба и напряжений принимаются в виде

$$w(x, y) = \sum_{m=1,3} \sum_{k=1,3} b_{m,k} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{k\pi y}{b}\right) \quad (8)$$

$$\varphi^I(x, y) = \sum_{m=1,3} \sum_{k=1,3} C_{m,k}^I \cos^2\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos^2\left(\frac{k\pi y}{b}\right)$$

$$\varphi^{II}(x, y) = \sum_{m=1,3} \sum_{k=1,3} C_{m,k}^{II} \cos^2\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos^2\left(\frac{k\pi y}{b}\right)$$

Кинематические граничные условия для  $w(x, y)$  выполнены,  $\varphi^{I,II}(x, y) = \varphi_n^{I,II}(x, y) = 0$  на внешнем контуре. Функционал  $J_c$  для рассматриваемой задачи имеет вид

$$\begin{aligned} J_c = & V - 4N_{y,0} \int_0^a (v_1^I + v_1^{II}) dx + \frac{4G_c}{h} \int_0^a \int_0^b [(v_1^I - v_1^{II})^2 - \\ & - (v_1^I - v_1^{II})(h+t)w_y + 0,5t(h+0,5t)w_y^2] dx dy - \\ & - \frac{4G_c}{h} \int_0^R \int_0^{\sqrt{R^2-x^2}} [(v_1^I - v_1^{II})^2 - (v_1^I - v_1^{II})(h+t)w_y + 0,5t(h+0,5t)w_y^2] dx dy \end{aligned} \quad (9)$$

где  $v_1^I(x) = v_1^I(x, y)$ ,  $v_1^{II}(x) = v_1^{II}(x, y)$  определяются при  $y = -b/2$ .

Для первого приближения полагается

$$w(x, y) = b_{11} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) \quad (10)$$

$$\varphi^I(x, y) = C_{11}^I \cos^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos^2\left(\frac{\pi y}{b}\right)$$

$$\varphi^{II}(x, y) = C_{11}^{II} \cos^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos^2\left(\frac{\pi y}{b}\right)$$

где  $\varphi^I(x, y)$ ,  $\varphi^{II}(x, y)$  – функции напряжений для верхнего и нижнего несущих слоев.

Потенциальная энергия изгиба  $V$  примет вид

$$\begin{aligned} V = & 2D \int_0^a \int_0^b \left\{ \pi^4 b_{11}^2 \left[ \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 \cos^2\left(\frac{\pi y}{b}\right) \times \right. \right. \\ & \times \cos^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) + \frac{2(1-\mu)}{a^2 b^2} \left( \sin^2\left(\frac{\pi y}{b}\right) - \cos^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \right) \left. \left. \right\} dx dy - \\ & - 2D \int_0^R \int_0^{\sqrt{R^2-x^2}} \left\{ \pi^4 b_{11}^2 \left[ \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 \cos^2\left(\frac{\pi y}{b}\right) \cos^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{2(1-\mu)}{a^2 b^2} \left( \sin^2\left(\frac{\pi y}{b}\right) - \cos^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \right) \right] \right\} dx dy = \\ & = b_{11}^2 2D \pi^4 \left\{ \left[ \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 - \frac{2(1-\mu)}{a^2 b^2} \right] \frac{ab}{16} - \right. \end{aligned}$$

$$-\int_0^R \sqrt{R^2-x^2} \left[ \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 \cos^2\left(\frac{\pi y}{b}\right) \cos^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) + \frac{2(1-\mu)}{a^2 b^2} \times \right. \\ \left. \times \left( \sin^2\left(\frac{\pi y}{b}\right) - \cos^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \right) \right] dx dy \quad (11)$$

Оставшийся двойной интеграл берется численно методом Симпсона.

После соответствующих преобразований и интегрирования убеждаемся, что функционал (9) не зависит от  $C_{11}^{I,II}$ . Тогда выражение (9) приобретает вид

$$J_c = 4 \left[ b_{11}^2 \frac{ab}{16} D \pi^4 0,5 (0,5a^2 + 0,5b^2)^2 - \frac{1-\mu}{a^2 b^2} - b_{11}^2 L_1 - \right. \quad (12)$$

$$\left. - \frac{N_{y0} \pi^2 b_{11}^2 a}{16b} - N_{y0} B_1 + \frac{b_{11}^2 G_c t}{2h} \left( h + \frac{t}{2} \right) \frac{\pi^2 a}{16b} - b_{11}^2 L_2 \right]$$

$$L_1 = 2D \pi^4 \int_0^R \int_0^{\sqrt{R^2-x^2}} \left[ \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 \cos^2\left(\frac{\pi y}{b}\right) \cos^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) + \frac{2(1-\mu)}{a^2 b^2} \times \right. \quad (13)$$

$$\left. \times \left( \sin^2\left(\frac{\pi y}{b}\right) - \cos^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \right) \right] dx dy$$

$$L_2 = \frac{\pi^2 t G_c}{2hb^2} \left( h + \frac{t}{2} \right) \int_0^R \int_0^{\sqrt{R^2-x^2}} \left[ \cos^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos^2\left(\frac{\pi y}{b}\right) \right] dx dy \quad (14)$$

где  $D$  – цилиндрическая жесткость трехслойной пластины,  $B_1 = \text{const}$ .

Продифференцировав (12) по  $b_{11}$  и приравняв  $|\partial J_c / \partial b_{11}|$  к нулю, получим выражение для критической нагрузки трехслойной пластины, равномерно сжатой усилиями  $N_{y0}$  и имеющей центральное отверстие радиуса  $R$ :

$$N_{y*} = \left[ \pi^4 D \frac{ab}{16} 0,5 \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 - \frac{1-\mu}{a^2 b^2} - L_2 - L_1 + \frac{G_c \pi^2 a}{32hb} (h + 0,5t) \right] / \left( \frac{\pi^2 a}{16b} \right) \quad (15)$$

Если принять  $L_1 = L_2 = 0$ , получим выражение для критической нагрузки целой трехслойной сотовой пластины, сжатой в одном направлении, полученной в [5]:

$$N_* = \alpha 2\pi B (h + \frac{1}{2}t)^2 / a^2 \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{a^2 b^2}{2} \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 - \frac{1-\mu}{a^2 b^2} + \frac{G_c t a^2}{4hB(h + 0,5t)} \quad (17)$$

$$B = Et / (1 - \mu^2) \quad (18)$$

В случае защемления всех кромок пластины функция прогиба  $w(x, y)$  примет вид

$$w(x, y) = \sum_{m=1,3} \sum_{k=1,3} b_{m,k} \cos^2\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos^2\left(\frac{k\pi y}{b}\right) \quad (19)$$

Опуская вывод, запишем окончательное выражение для критической нагрузки защемленной трехслойной пластины, равномерно сжатой вдоль оси  $y$  усилиями  $N_{y0}$  и

имеющей центральное отверстие радиуса  $R$

$$N_{y*} = \left[ \pi^4 2D \left( \frac{1-\mu}{32ab} + \frac{3ab}{64} \left( \frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} + \frac{1}{6a^2b^2} \right) \right) - L_3 + \frac{3G_c \pi^2 a}{128hb} \left( h + \frac{t}{2} \right) - L_4 \right] / \left( \frac{3\pi^2 a}{64b} \right) \quad (20)$$

$$L_3 = 2D\pi^4 \int_0^R \int_0^{\sqrt{R^2-x^2}} \left\{ \frac{1}{a^4} \cos^4 \left( \frac{\pi y}{b} \right) \cos^2 \left( \frac{\pi x}{a} \right) + \frac{1}{b^4} \cos^4 \left( \frac{\pi x}{a} \right) \cos^2 \left( \frac{\pi y}{b} \right) + \frac{1}{2a^2b^2} \cos^2 \left( \frac{\pi x}{a} \right) \cos^2 \left( \frac{\pi y}{b} \right) \cos \left( \frac{2\pi x}{a} \right) \cos \left( \frac{2\pi y}{b} \right) + \frac{2(1-\mu)}{a^2b^2} \times \right. \\ \left. \times \cos^2 \left( \frac{\pi x}{a} \right) \cos^2 \left( \frac{\pi y}{b} \right) \left( 2 \sin^2 \left( \frac{\pi y}{b} \right) + 2 \sin^2 \left( \frac{\pi x}{a} \right) - 1 \right) \right\} dx dy \quad (21)$$

$$L_4 = \frac{G_c \pi^2}{2hb^2} \left( h + \frac{t}{2} \right) \int_0^R \int_0^{\sqrt{R^2-x^2}} \left[ \cos^4 \left( \frac{\pi x}{a} \right) \cos^4 \left( \frac{\pi y}{b} \right) \right] dx dy \quad (22)$$

Далее получим решение поставленной задачи на основе энергетического критерия Брайена.

Энергетический критерий потери устойчивости пластины в форме Брайена имеет вид (2):

$$\Delta \mathcal{E} = V + \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \left[ N_{x0} \frac{w_x^2}{2} + S_0 w_x w_y + N_{y0} \frac{w_y^2}{2} \right] dx dy \quad (23)$$

В случае, если рассматривается трехслойная сотовая пластина, сжатая в одном направлении, уравнение (20) примет вид

$$\Delta \mathcal{E} = V + \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} N_{y0} \frac{w_y^2}{2} dx dy + A_c \quad (24)$$

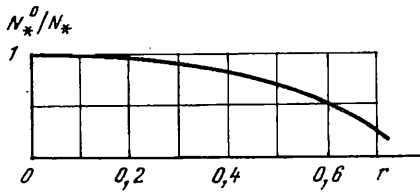
где  $A_c$  – работа внешних сил на сдвиг заполнителя, определяемая по выражению (6).

Исходя из того, что строится приближенное решение рассматриваемой задачи в уравнении (24) будем считать, что усилие  $N_{y0}$  заранее известно, т.е. не зависимо от наличия отверстия в пластине.

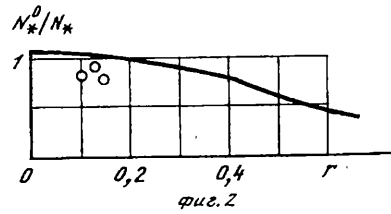
Задавая  $w(x, y)$  по (8) для шарнирно опертой пластины и по (19) для защемленной, и приравняв  $\delta(\Delta \mathcal{E}) = 0$ , получим окончательное выражение для критической нагрузки шарнирно опертой и защемленной, трехслойной пластины, сжатой в одном направлении и имеющей центральное отверстие радиуса  $R$ :

для шарнирно-опертой трехслойной пластины

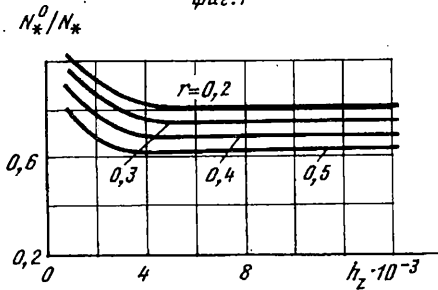
$$N_{y*} = \left[ \frac{\pi^4 Dab}{16} \left( 0,5 \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 - \frac{1-\mu}{a^2b^2} \right) - L_1 + \frac{G_c \pi^2}{32hb} \left( h + \frac{t}{2} \right) - L_2 \right] / \left[ \frac{\pi^2 a}{16b} - \frac{2hb^2 L_2}{G_c \pi^2 (h + \frac{1}{2}t)} \right] \quad (25)$$



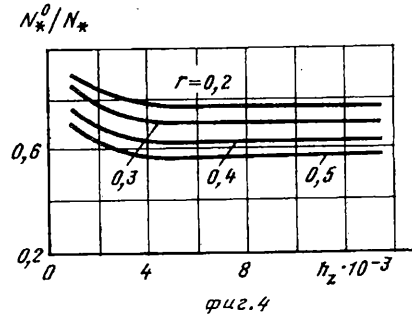
фиг. 1



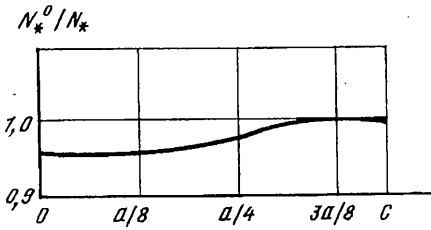
фиг. 2



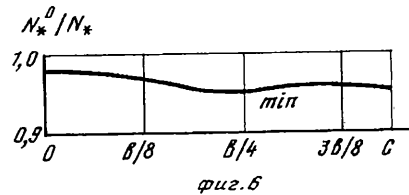
фиг. 3



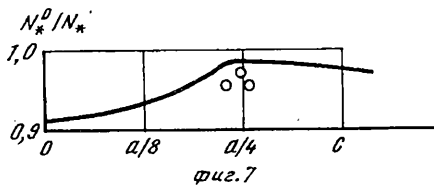
фиг. 4



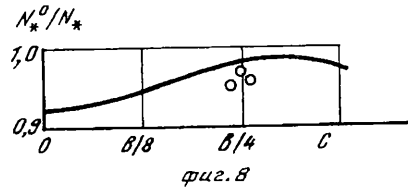
фиг. 5



фиг. 6



фиг. 7



фиг. 8

для защемленной пластины

$$N_{y*} = \left[ 2D\pi^4 \left( \frac{1-\mu}{32ab} + \frac{3ab}{64} \left( \frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} + \frac{1}{6a^2b^2} \right) \right) - L_3 + \right. \\ \left. + \frac{3G_c t \pi^2}{128hb} \left( h + \frac{t}{2} \right) - L_4 \right] / \left[ \frac{3\pi^2 a}{64b} - \frac{2hb^2 L_4}{G_c t \pi^2 (h + \frac{1}{2}t)} \right] \quad (26)$$

где  $L_1, L_2, L_3, L_4$  — определяются по (13), (14), (21), (22) соответственно.

Нужно отметить, что если в (25) и (26) положить  $L_1 = L_2 = 0$  и  $L_3 = L_4 = 0$ , то получим известное выражение для критической нагрузки целой трехслойной сотовой пластины, сжатой в одном направлении, представленной в [5] и совпадающее с уравнением (16).

Анализируя результаты решения поставленной задачи, полученные на основе энергетических критериев Тимошенко и Брайена, приходим к выводу, что реализация критерия Тимошенко в поставленной задаче дает несколько заниженный результат по критической нагрузке в отличие от результата, полученного на основе критерия Брайена. Поэтому, за основу приведенного ниже примера расчета критической нагрузки трехслойной пластины взято решение, полученное при реализации энергетического критерия Тимошенко.

В качестве примера для определения критической нагрузки рассмотрена трехслойная сотовая пластина со следующими геометрическими и физико-механическими характеристиками: длина пластины (размер в направлении сжатия)  $b = 0,473$  м; ширина пластины  $a = 0,281$  м; толщина несущего слоя  $t = 0,3 \cdot 10^{-3}$  м; модуль упругости несущего слоя  $E = 6,9 \cdot 10^{10}$  Па; высота сотового заполнителя  $2h = 0,34 \cdot 10^{-2}$  м; толщина фольги заполнителя  $\delta_c = 0,3 \cdot 10^{-4}$  м; модуль сдвига фольги заполнителя  $G_c = 2,7 \cdot 10^{10}$  Па; радиус описанной окружности шестигранной ячейки сотового заполнителя  $r_c = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м. Принимается, что отношение диаметра отверстия к ширине пластины изменяется в пределах от 0,1 до 0,5.

Расчеты проведены в соответствии с разработанной методикой на ПЭВМ. На фиг. 1–4 представлена зависимость  $N^0/N_*$  от параметра  $r = 2R_0/a$ , высоты сотового заполнителя, координаты расположения центра отверстия для шарнирного опирания и защемления. Здесь введены обозначения:  $N^0$  – критическая нагрузка пластины с отверстием,  $N_*$  – критическая нагрузка неповрежденной пластины.

Анализ результатов показывает следующее: отверстие оказывает большое влияние на несущую способность в случае защемления пластины (фиг. 2); с увеличением высоты сотового заполнителя увеличивается влияние отверстия на несущую способность пластины. Причем это влияние более сильно сказывается при защемлении кромок пластины (фиг. 4); наиболее опасным местом расположения центра отверстия является  $1/4$  длины пластины в направлении сжатия при шарнирном опирании (фиг. 5, 6). В случае защемления наиболее опасной зоной расположения центра отверстия является центр пластины (фиг. 7, 8).

В [8] приведены результаты эксперимента по исследованию несущей способности равномерно сжатой в одном направлении, защемленной по всем кромкам трехслойной пластины с геометрическими и физико-механическими характеристиками, соответствующими рассмотренным в теории. Диаметр отверстия принимался  $d = 0,048$  м. Было испытано 78 панелей, среди которых 30 целых, 30 – поврежденных с отверстием в центре и 18 панелей со смещенным центром отверстия на одну четвертую длину и ширины панели. Для испытаний панелей было сконструировано специальное приспособление.

За момент потери устойчивости в эксперименте принимался момент резкого снижения нагрузки в зависимости от величины сближения кромок, что сопровождалось ярко выраженным хлопком с появлением характерной складки. Как показывают расчеты, разница между экспериментальными и теоретическими результатами по определению критической нагрузки трехслойной панели с отверстием, полученным на основе энергетического критерия Тимошенко, составляет 10–15%, что говорит о состоятельности принятой математической модели определения критической нагрузки панели с вырезом. На фиг. 2, 7, 8 приведены экспериментальные точки, полученные в [8].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ендогур А.И., Вайнберг М.В., Иерусалимский К.М.* Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование. М.: Машиностроение, 1986. 199 с.
2. *Алфутов Н.А., Балабух Л.И.* О возможности решения задач устойчивости пластин без предварительного определения начального напряженного состояния // ПММ. 1967. Т. 31. Вып. 4.
3. *Алфутов Н.А., Балабух Л.И.* Энергетический критерий устойчивости упругих тел, не требующий определения начального напряженно-деформированного состояния // ПММ. 1968. Т. 32, Вып. 4. С. 703–707.
4. *Болотин В.В.* О вариационных принципах теории упругой устойчивости. Проблемы механики твердого деформированного тела. Л.: Судостроение, 1970. 984 с.
5. *Вольмир А.С.* Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967. 984 с.
6. *Романенко Ф.А.* Устойчивость плоской формы равновесия неодносвязных пластин при действии дискретных нагрузок // Прикл. механика. 1966. Т. 2. Вып. 1. С. 78–82.
7. *Курант Р., Гильберт А.* Методы математической физики. Т. 1. М.: Гостехиздат, 1951. 476 с.
8. *Чепурин А.Н., Туркин И.К., Сафронов В.С. и др.* Экспериментально-теоретическое исследование влияния методов ремонта поврежденных сотовых панелей на несущую способность // Междунар. научно-техн. конф. "Наука и техника гражданской авиации на современном этапе". М.: Мос. гос. техн. ун-т гражд. авиации, 1994. С. 90.

Москва

Поступила в редакцию  
10.IV.1996