

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАСТИН ИЗ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ДЕФЕКТАМИ ТИПА СКВОЗНОЕ ОТСЛОЕНИЕ\*

Канд. техн. наук, доц. Л.А. БОХОЕВА

*Исследуется нелинейное поведение элементов конструкций из слоистых материалов, которые имеют локализованные области межслоевых дефектов в виде сквозного прямоугольного отслоения. Задача устойчивости решена на основе энергетического подхода и метода возмущений. Решение задачи устойчивости использовано для определения интенсивности высвобождения энергии с целью анализа возможного роста дефекта. Численное моделирование проведено в системе ANSYS. Разработана методика обработки результатов статических испытаний.*

*In the paper is researched nonlinear behaviour element design from material, which have localized defect of the type delamination. The problem to stability is solved on base of the energy approach and method of the indignations. The decision of the problem to stability is used for determination of the intensities to energy for the reason analysis of the possible growing of the defect. The numerical modeling is organized in system ANSYS. The designed methods of the processing result steady-state test.*

Достаточно широкое использование слоистых материалов в промышленности при создании элементов конструкций требует углубленного исследования их поведения под нагрузкой.

Слоистые композиты, обладая высокой удельной прочностью и жесткостью, весьма чувствительны к дефектам типа отслоений. Их появление — следствие несовершенства технологии производства, воздействия эксплуатационных нагрузок, что может существенно влиять на прочность и жесткость элементов конструкции из таких материалов.

Одной из особенностей процесса отслоения является локальная потеря устойчивости и выпучивание отслоившегося слоя с последующим ростом дефекта. Это может стать причиной общего разрушения элемента конструкции при нагрузке, значительно меньшей расчетного уровня.

Объектом исследования были тонкостенные элементы конструкций, такие, как пластины. Элементы конструкций имеют локализованные области межслоевых дефектов в виде сквозного прямоугольного отслоения. Конструкция находится под действием внешних сил. Задача решена в нелинейной постановке на основе энергетического подхода [1], метода возмущений. Решение задачи устойчивости использовано для определения интенсивности высвобождения энергии с целью анализа возможного роста дефекта. Методика численного моделирования элементов конструкций из слоистых композиционных материалов апробирована на примере пластины со сквозным отслоением.

Пластина длиной  $L$ , высотой  $H$  и единичной ширины имеет единственное сквозное отслоение длиной  $l$ , расположенное на глубине  $h$ . В области дефекта пластина состоит из двух частей: отслоившаяся часть (верхний слой) и расположенный ниже отслоения слой толщины  $(H-h)$ . Пластина разбита на три участка (рис. 1) и введены следующие обозначения:  $P_1$ ,  $\epsilon_1$  — нагрузка и относительная деформация на первом участке,  $P_2$ ,  $\epsilon_2$  — нагрузка

\* Работа выполнена в рамках целевой программы МОиН РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 гг.)» (проект № РНП.2.1.2.8630)

и относительная деформация дефектного участка,  $P_3$ ,  $\varepsilon_3$  — нагрузка и относительная деформация отслоившейся части;  $\beta$  — отношение нормированной длины  $\bar{l}$  и толщины дефекта  $\bar{h}$

$$\beta = \frac{\bar{l}}{\bar{h}} = \frac{lH}{Lh},$$

где  $\bar{l} = l/L$ ,  $\bar{h} = h/H$ .

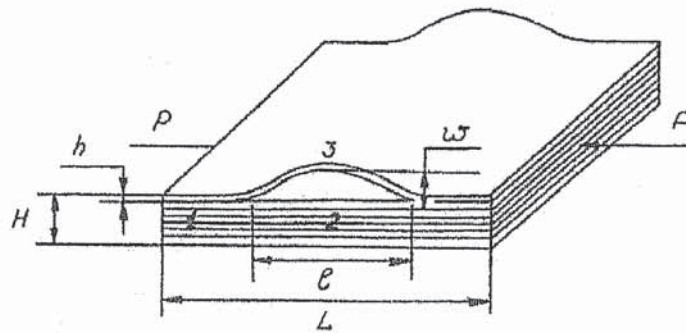


Рис. 1

При достижении критической нагрузки возможны три вида потери устойчивости. Первый вид потери устойчивости — глобальное выпучивание всей пластины как единого целого, которое наблюдается при дефектах малой длины. Второй вид — локальное выпучивание лишь отслоившейся верхней части, когда нижняя и основная части пластины остаются плоскими. Третий вид — возможно одновременно локальное и глобальное выпучивание, когда изгибаются верхняя, нижняя и основная части пластины. Такой вид потери устойчивости называется «смешанным». При  $\beta < 1$  будет существовать только глобальная форма, при  $\beta > 1$  — локальное выпучивание дефекта либо «смешанная» форма.

При малых, но конечных прогибах в окрестности первой критической точки бифуркации, форму изогнутой оси отслоившейся части можно аппроксимировать первой собственной функцией [2]

$$\vartheta_1(x) = y'_3(x) = \sin(2\pi x/l).$$

Решение нелинейной задачи имеет вид

$$\vartheta(s) = \alpha \vartheta_1(s), \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент, зависящий от нагрузки.

Из условия стационарности  $\frac{\partial \Delta \mathcal{E}}{\partial \alpha} = 0$  можно определить зависимость нагрузки от амплитуды прогиба в центре дефекта при  $P_3 > P_{кр.3}$

$$\alpha = 2,83 \sqrt{\frac{P_3}{P_{кр.3}} - 1}.$$

Для определения необходимого условия существования решения при локальной форме выпучивания применяем уравнения равновесия сил, моментов и условие совместности второго и третьего участков, которые имеют вид (рис. 2),

$$P_1 = P_2 + P_3, \quad (2)$$

$$M_3 + P_3(H - h)/2 - P_2h/2 = 0, \quad (3)$$

$$(1 - \mu_{12}\mu_{21}) \frac{P_3 l}{Eh} + \frac{1}{2} \int_0^l \vartheta^2 dx = (1 - \mu_{12}\mu_{21}) \frac{P_2 l}{E(H - h)} + \frac{\vartheta(l)H}{2}, \quad (4)$$

где  $M_3 = D_3 \vartheta'(l)$ ;  $D_3 = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu_{12}\mu_{21})}$ ;  $\mu_{12}, \mu_{21}$  — коэффициенты Пуассона.

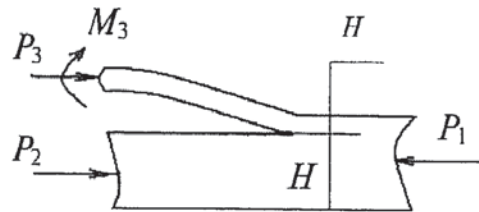


Рис. 2

Подставляя (1) в (3) и (4), получаем систему уравнений

$$\frac{4\alpha\pi\bar{h}^3}{Hl} D_1 + P_3(1 - \bar{h}) - P_2\bar{h} = 0,$$

$$\frac{\alpha^2 E H \bar{h} (1 - \bar{h})}{4(1 - \mu_{13}\mu_{31})} + P_3(1 - \bar{h}) - P_2\bar{h} = 0,$$

где  $D_1 = \frac{EH^3}{12(1 - \mu_{12}\mu_{21})}$ .

Решая систему с учетом (2), (3) и (4), находим зависимость  $P_2$  от  $P_3$

$$\frac{16\pi^2\bar{h}^5}{3l^2(1 - \bar{h})} D_1 + P_3 - P_3\bar{h} - P_2\bar{h} = 0.$$

Ввиду того, что  $P_1$  меньше, чем критическая нагрузка всей балки  $P_{1kp} = \frac{4\pi^2 D_1}{L^2}$ , сле-

довательно, необходимое условие существования локальной формы выпучивания имеет вид

$$4\left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \bar{h}^2 D_1 \left[1 + \frac{4\bar{h}^2}{3(1 - \bar{h})}\right] < \frac{4\pi^2 D_1}{L^2} \quad \text{или} \quad \bar{l} > \bar{h} \sqrt{1 + \frac{4\bar{h}^2}{3(1 - \bar{h})}}.$$

Зависимость длины отслоившейся части пластины от толщины показана на рис. 3 (отслоение длиной  $\bar{l} = 0,35$ , толщиной  $h = 0,32$ ). Если  $\beta < 1$ , при  $\bar{l} = \text{const}$  и  $\bar{h} > 0,32$  имеет

место глобальная форма выпучивания, при  $\bar{h} < 0,32$  ( $\beta > 1$ ) возможны либо локальное выпучивание отслоившегося слоя, либо одновременно локальная или глобальная (смешанная) форма деформации. Если  $\bar{h} = \text{const}$  ( $\beta > 1$ ) имеет место локальная или смешанная формы деформирования, при  $\bar{l} < 0,35$  ( $\beta < 1$ ) — глобальная форма деформирования. Расчетные данные хорошо согласуются с моделями, построенными в системе ANSYS.

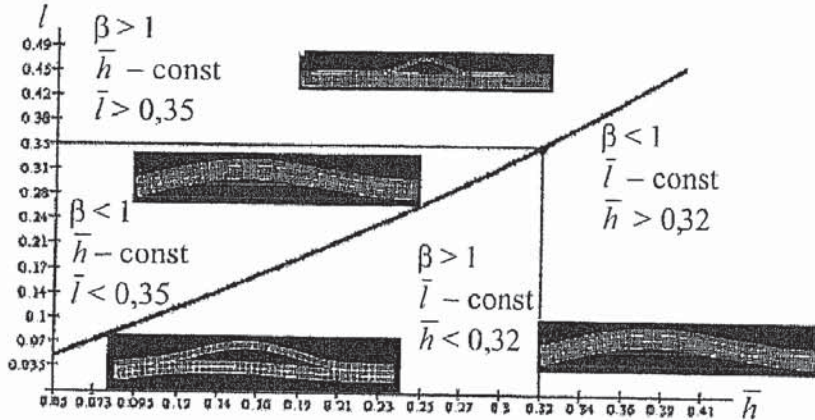


Рис. 3

Нагрузка в закритическом состоянии возрастает, критическое напряжение в отслоившемся слое является лишь первым приближением, поэтому необходимо рассмотреть изгибные деформации, возникающие и в остальных частях пластины (рис. 4).

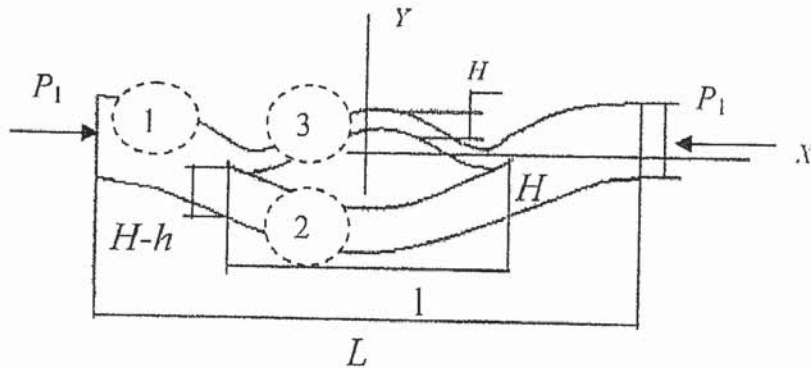


Рис. 4

Уравнение прогиба на первом участке имеет вид

$$y_1 = \frac{\theta}{k \sin[k(L/2 - l/2)]} (1 - \cos[k(L/2 - x)]) \quad (5)$$

и удовлетворяет граничным условиям:

$$\text{при } x = l/2 \quad y_1 = \delta = \frac{\theta \{1 - \cos[k(L/2 - l/2)]\}}{k \sin[k(L/2 - l/2)]},$$

$$\text{при } x = L/2 \quad y_1 = 0,$$

где  $\theta$  — угол поворота,  $\delta$  — прогиб,  $k^2 = P_1/D_1$ .

Уравнение прогиба на втором участке  $0 \leq x \leq l/2$  имеет вид

$$y_2 = \frac{\theta}{k \sin kb} \left\{ \frac{k \sin kb}{k_1 \sin k_1 l/2} (\cos k_1 x - \cos k_1 l/2) + 1 - \cos kb \right\}, \quad (6)$$

где  $b = L/2 - l/2$ ,  $k_1^2 = P_2 / D_2$ ,  $D_2 = (1 - \bar{h})^3 D_1$  и удовлетворяет граничным условиям: при  $x = a$   $y_2 = \delta$ .

Уравнение прогиба на третьем участке  $0 \leq x \leq l/2$  имеет вид

$$y_3 = \frac{\theta}{k \sin kb} \left\{ \frac{k \sin kb}{k_2 \sin k_2 l/2} (\cos k_2 x - \cos k_2 l/2) + 1 - \cos kb \right\} \quad (7)$$

и удовлетворяет граничным условиям при  $x = a$ ,  $y_3 = \delta$ ,

где  $k_2^2 = P_3 / D_3$ ,  $D_3 = \bar{h} D_1$ .

В сечении на границе отслоения должны выполняться условия равновесия сил (2) и моментов (рис. 5)

$$M_1 - M_2 - M_3 - P_3 \frac{H-h}{2} + P_2 \frac{h}{2} = 0. \quad (8)$$

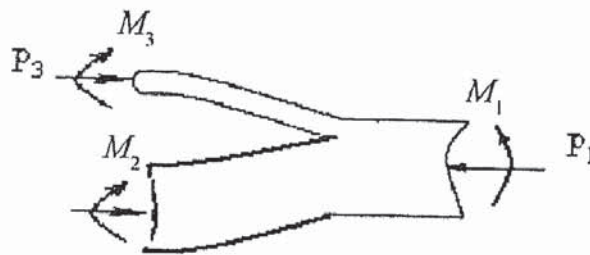


Рис. 5

При чистом сжатии тривиальное решение уравнений можно записать в виде

$$P_2 = P_1(1 - \bar{h}); \quad P_3 = P_1 \bar{h},$$

тогда  $k_1^2 = \frac{P_1}{(1 - \bar{h})^2 D_1}$ ;  $k_2^2 = \frac{P_1}{\bar{h}^2 D_1}$ ;  $k_1 = \frac{k}{1 - \bar{h}}$ ;  $k_2 = \frac{k}{\bar{h}}$ . (9)

Условие совместности сближения торцов отслоения и нижней, дефектной части за счет укорочения оси пластины и за счёт изгиба имеет вид

$$(1 - \mu_{12}\mu_{21}) \frac{P_3 l}{Eh} + \frac{1}{2} \int_{-l/2}^{l/2} (y_3')^2 dx = (1 - \mu_{12}\mu_{21}) \frac{P_2 l}{E(H-h)} + \frac{1}{2} \int_{-l/2}^{l/2} (y_2')^2 dx + y_3' \left( \frac{l}{2} \right) \frac{H}{2}.$$

Подставляя в это уравнение выражения для прогибов (5)—(7) и исключив величины высшего порядка малости  $\theta^2$ , получаем зависимость

$$P_3(H-h) - P_2 h \approx \frac{y_3'(l/2) H E}{(1 - \mu_{12}\mu_{21}) 2l}. \quad (10)$$

Решая совместно (8) и (10), приходим к характеристическому уравнению, наименьшее собственное значение которого дает значение критической нагрузки при «смешанной» форме потери устойчивости

$$k_{kp} \operatorname{ctg} k_{kp} b + (1 - \bar{h})^2 k_{kp} \operatorname{ctg} \left( \frac{k_{kp} l / 2}{1 - \bar{h}} \right) + \bar{h}^2 k_{kp} \operatorname{ctg} \left( \frac{k_{kp} l / 2}{\bar{h}} \right) + \frac{3\bar{h}(1 - \bar{h})}{l/2} = 0,$$

где  $k_{kp}^2 = P_{kp} / D_1$ .

Для определения форм изогнутой поверхности балки-пластины рассмотрим второй и третий дефектные участки. Критическая нагрузка на третьем участке равна  $P_{kp,3} = \frac{4\pi^2 D_3}{l^2}$  (края дефекта жестко закреплены). При свободно опертых краях значение  $P$  меньше, по-

этому справедливо неравенство  $k_{kp,3} \leq \frac{2\pi}{l}$ , которое можно представить в виде

$P_{kp,1} = k_{kp}^2 D_1 \leq \left( \frac{2\pi}{L\beta} \right)^2 D_1$ , где  $k_{kp} = k_{kp,3} \bar{h}$ . При увеличении нагрузки получаем следующие зависимости:  $kL \approx 2\pi/\beta$ ;  $k_1 l \approx \frac{\bar{h}}{1 - \bar{h}} k\beta L \approx \frac{\bar{h}}{1 - \bar{h}} 2\pi$ ;  $k_2 l \approx k\beta L \approx 2\pi$  или  $k_1 l / 2 \approx \frac{\bar{h}}{1 - \bar{h}} \pi < \pi$ ;

$k_2 l / 2 \approx \pi$  при  $\bar{h} < 0,5$ . Из уравнения прогибов в центре пластины на втором и третьем участках следует, что  $y_3(0) > y_2(0)$  ( $\sin(k_2 l / 2) = 0$ ), тогда основная пластина имеет выпуклость

вниз ( $y_1''|_{x=\pm l/2} = \frac{\theta k}{\sin kb}$ ), а отслоение и нижняя дефектная часть — выпуклость вверх

$$(y_2''(0) = -\frac{\theta k_1}{\sin(k_1 l / 2)}, y_3''(0) = -\frac{\theta k_2}{\sin(k_2 l / 2)}).$$

Таким образом, при полученных условиях потеря устойчивости пластины с дефектом типа отслоение происходит по первой форме деформирования - отслоение и нижняя дефектная часть изгибаются в одном направлении. При дальнейшем увеличении нагрузки справедливы следующие приближения:

$$\pi > k_1 l / 2 > \frac{\bar{h}}{1 - \bar{h}} \pi, \quad k_2 l / 2 > \pi.$$

Прогибы  $\alpha_3$  на третьем дефектном участке и  $\alpha_2$  на втором участке равны

$$\alpha_3 = y_3(0) - \delta = \frac{2\theta(1 - \cos(k_2 l / 2))}{k_2 \sin(k_2 l / 2)};$$

$$\alpha_2 = y_2(0) - \delta = \frac{2\theta(1 - \cos(k_1 l / 2))}{k_1 \sin(k_1 l / 2)}.$$

Прогибы  $\alpha_3$  и  $\alpha_2$  при полученных условиях имеют разные знаки, поэтому потеря устойчивости пластины с дефектом типа отслоение происходит по второй форме — отслоение и нижняя дефектная часть деформируются в разные стороны от срединной поверхности. Аналитические зависимости существования первой и второй форм равновесия потери устойчивости пластины с дефектом подтверждаются моделями, полученными и рассчитанными методом конечных элементов в системе ANSYS.

Для исследования закритического деформирования решена система нелинейных уравнений при условии  $k_3 \cdot l/2 > \pi$ :

уравнение равновесия сил

$$\varepsilon_1 = \bar{h}\varepsilon_3 + (1 - \bar{h})\varepsilon_2;$$

уравнения равновесия моментов

$$D_1\theta k_1 \operatorname{ctg}(k_1 b) + D_2\theta k_2 \operatorname{ctg}(k_2 \frac{l}{2}) + D_3\theta k_3 \operatorname{ctg}(k_3 \frac{l}{2}) = \frac{Eh(H-h)}{2(1-\mu_{12}\mu_{21})}(\varepsilon_2 - \varepsilon_3);$$

уравнение совместности изменения длины верхней и нижней частей дефектного участка

$$\begin{aligned} \varepsilon_3 l - \frac{l\theta^2 [\cos(k_3 l/2)\sin(k_3 l/2) - k_3 l/2]}{4k_3 l/2 \cdot \sin^2(k_3 l/2)} = \\ = \varepsilon_2 l - \frac{l\theta^2 [\cos(k_2 l/2)\sin(k_2 l/2) - k_2 l/2]}{4k_2 l/2 \sin^2(k_2 l/2)} + H\theta; \end{aligned}$$

уравнение совместности изменения длины всей пластины

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 L = 2\varepsilon_1 b + \frac{\theta}{4k_1} \left[ -2\operatorname{ctg}(k_1 b/2) + \frac{1}{\sin(k_1 b/2)\cos(k_1 b/2)} + \right. \\ \left. \frac{k_1 b/2}{\sin^2(k_1 b/2)\cos^2(k_1 b/2)} \right] + \varepsilon_2 l - \frac{l\theta^2 [\cos(k_1 l/2)\sin(k_1 l/2) - k_1 l/2]}{4k_1 l/2 \cdot \sin^2(k_1 l/2)} + h\theta, \end{aligned}$$

где  $\varepsilon_0$  — сжимающие деформации на торцах пластины,  $k_3 l/2 = \pi + \eta$ ,  $0 < \eta < \pi$ .

Решение системы нелинейных уравнений имеет место при  $l > l_{кр}$  и  $P > P_{кр}$ , где

$$l_{кр} = \frac{hL}{H} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_L}}, \quad \varepsilon_L = \frac{\pi^2}{3(1-\mu^2)} \left( \frac{h}{L} \right)^2 \quad \text{— критическая «нагрузка» пластины без дефекта.}$$

Для оценки возможного роста дефекта типа отслоение в слоистых элементах конструкций рассмотрен  $J$ -интегральный метод. При этом используется принцип суперпозиции линейной теории упругости, позволяющий сложную систему нагрузок представить в виде суммы более простых. Моменты и осевые и поперечные силы на трех участках, действующие в различных направлениях, примыкающих к вершине отслоения, можно представить в виде суммы двух составляющих

$$M_i = M_i' + M_i''; \quad P_i = P_i' + P_i'', \quad (i = 1, 2, 3)$$

где  $M_1' = 0$ ;  $M_1'' = M_1$ ;

$$M_2' = M_2 - M_1(1-h/H)^3; \quad M_2'' = (1-h/H)^3 M_1;$$

$$M_3' = M_3 - M_1(h/H)^3; \quad M_3'' = (h/H)^3 M_1;$$

$$P_1' = 0; \quad P_1'' = P_1;$$

$$\begin{aligned}
 P_2' &= h/H \{P_1 + 6(1-h/H)M_1/H\} - P_3; \\
 P_2'' &= (1-h/H)P_1 + 6(h/H)(1-h/H)M_1/H; \\
 P_3' &= -h/H \{P_1 + 6(1-h/H)M_1/H\} - P_3; \\
 P_3'' &= (h/H)P_1 + 6(h/H)(1-h/H)M_1/H.
 \end{aligned}$$

Анализ напряженного состояния у вершины дефекта показал, что составляющие  $M_i''$ ,  $P_i''$  равны нулю, следовательно, напряженное состояние у вершины отсложия зависит только от  $M_i'$  и  $P_i'$ . Введем следующие обозначения (рис.6)

$$\begin{aligned}
 P^* &= h/H \{P_1 + 6(1-h/H)M_1/H\} - P_3 \\
 M^* &= M_3 - M_1(h/H)^3; \\
 M_2' &= M_2 - M_1(1-h/H)^3 = P^*h/2 - M^*;
 \end{aligned}$$

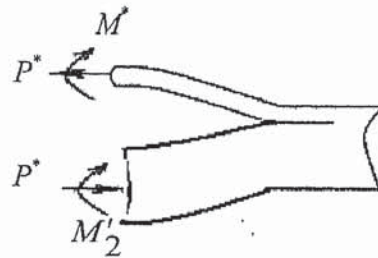


Рис. 6

Зона раздела дефекта образуется между вторым и третьим участками, тогда  $J$ -интеграл равен сумме  $J$ -интегралов на втором и третьем участках

$$J = \int_{-h/2}^{h/2} dJ_1 + \int_{-(H-h)/2}^{(H-h)/2} dJ_2,$$

$$\begin{aligned}
 \text{где } dJ_1 &= \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dy - \sigma_{ij} n_j \frac{\partial u_i}{\partial x_i} ds = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_z \varepsilon_z) dy + \sigma_x \varepsilon_x ds = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x - \sigma_z \varepsilon_z) ds = \\
 &= \frac{1-\mu^2}{2E} \sigma_x^2 dz = \frac{1-\mu^2}{2E} (P^*/h - 12M^*z/h^3)^2, \quad -(h/2) \leq z \leq h/2; \\
 dJ_2 &= \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dy - \sigma_{ij} n_j \frac{\partial u_i}{\partial x_i} ds = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_z \varepsilon_z) dy + \sigma_x \varepsilon_x ds = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x - \sigma_z \varepsilon_z) ds = \\
 &= \frac{1-\mu^2}{2E} \sigma_x^2 dz = \frac{1-\mu^2}{2E} [P^*/(H-h) - 12M_2'z/(H-h)^3]^2, \\
 &\quad -(H-h)/2 \leq z \leq (H-h)/2.
 \end{aligned}$$



Скорость высвобождения энергии равна

$$G = J = \frac{1-\mu^2}{2EH} \left\{ \frac{(HP^*)}{\bar{h}(1-\bar{h})} + 12 \frac{(M^*)^2}{\bar{h}^3} + 12 \frac{(P^*H/2 - M^*)^2}{(1-\bar{h})^3} \right\}.$$

Зависимости безразмерной скорости высвобождения энергии деформации  $\bar{G} = G / (EH^5 / L^4)$  от величины действующей нагрузки, нормированной так, чтобы она не зависела от длины отслоения  $\bar{P} = P / [4\pi^2 EH^3 / 12(1-\mu_{12}\mu_{21})L^2]$ , графически представлены на рис. 7 (вторая форма деформирования) и рис. 8 (первая форма деформирования).

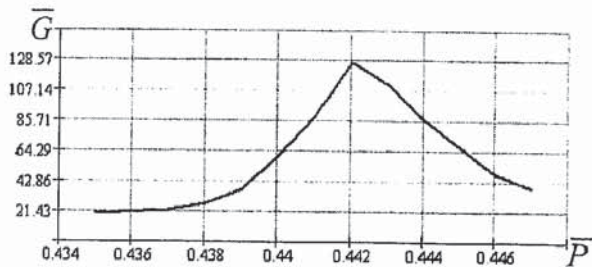


Рис. 7

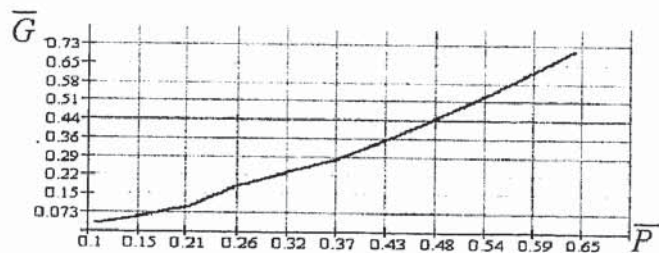


Рис. 8

Для подтверждения полученных аналитических зависимостей и компьютерного моделирования были проведены испытания образцов с дефектами типа отслоений, разработана методика проведения и обработки результатов статических испытаний, написана программа.

Образцы были изготовлены из двадцатислойного препрега (стеклопластик, углепластик), промышленная марка стеклоткани — Т-25 (ВМ) ТУ 6-11-380-76, углепластика — ЛУ-П/0,2-А. Для исследования поперечного перемещения и роста отслоения впервые была применена система технического зрения (СТЗ), которая позволяет автоматизировать обмер, распознавание дефектов, получать скорость роста дефекта от приложенной нагрузки. Видеозапись эксперимента отслеживает скорость разрушения образца с точностью до 1/25 с (точность зависит от качества видеокамеры). Видеозапись разбивается на отдельные кадры (рис. 9). Информация о цвете отбрасывается — изображение кадров переводится в градации серого — с целью уменьшения сетевого трафика при работе приложения в локальной сети. Таким образом, после обработки всей видеозаписи имеется информация обо всех найденных трещинах и динамике изменения их габаритов. Эта информация визуально отображается графиком (рис. 10). На рис. 11 представлена зависимость осевого перемещения дефекта от приложенной нагрузки по обработанным результатам испытаний на сжатие образцов с дефектами; теоретическая кривая, построенная с учетом закритических деформаций; численная кривая, построенная в системе.

Получено в явном виде характеристическое уравнение для определения критической нагрузки пластины с дефектами типа отслоений в элементах конструкций из слоистых материалов при одновременно локальной и глобальной потерях устойчивости. Определены первая и вторая формы изогнутой поверхности пластины с дефектами и получены необходимые условия их существования. Моделирование в системе ANSYS позволило подтвердить правильность форм изогнутой поверхности пластины с дефектами. Разработана методика обработки результатов статических испытаний. Наблюдается сходство экспериментальных кривых с теоретическими и численными кривыми. Из-за наличия начальных несовершенств экспериментальные значения нагрузки для образцов с дефектами вдвое меньше теоретических.

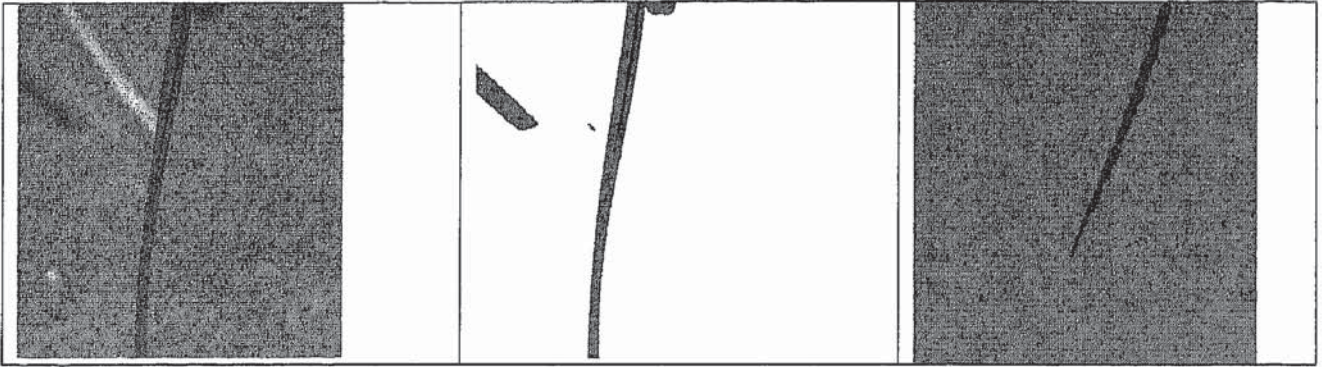


Рис. 9

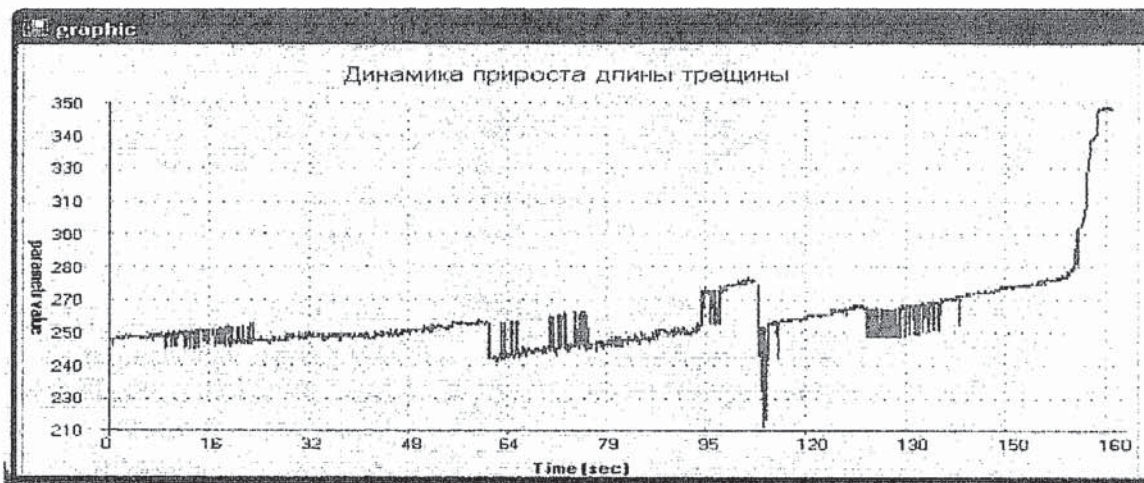


Рис. 10

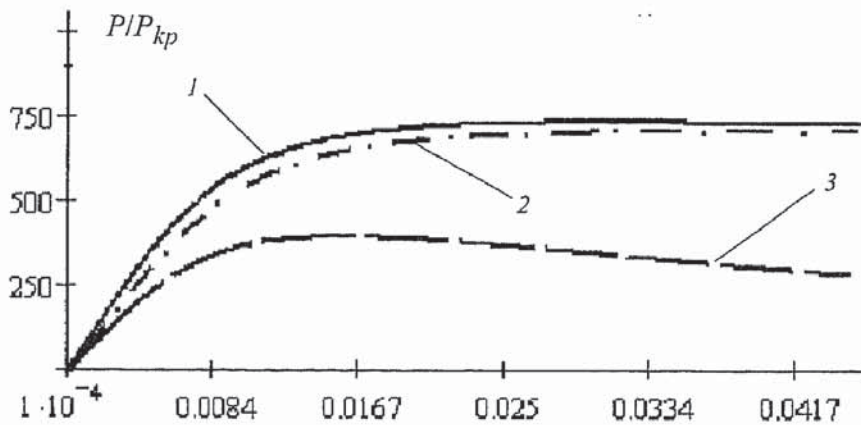


Рис. 11: 1 — теоретическая кривая, построенная с учетом закритических деформаций; 2 — расчет в системе ANSYS; 3 — экспериментальные данные

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алфутов Н. А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. — М.: Машиностроение, 1978. — 311 с.
2. Бохоева Л. А., Антохонов В. Б., Зангеев Б. И. Теоретическая оценка максимальных размеров безопасных дефектов типа отслоений // Материалы Международной научной конференции «Проблемы механики современных машин». — Улан-Удэ, 2000. — С. 14—15.