

## **АНАЛИЗ И НОРМИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ЛОКАЛЬНОГО НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Перманентный рост объемов применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в ответственных агрегатах авиакосмической техники (АКТ) [1–3], связанный с реализацией высоких потенциальных эксплуатационных характеристик этих материалов, обеспечивающих снижение массы конструкций при увеличении их несущей способности, требует обоснованной регламентации допустимого уровня дефектов, возникающих в производстве изделий АКТ из ПКМ [4–7].

В связи с этим нами последовательно проводятся исследования влияния типовых дефектов ПКМ на эксплуатационное качество изделий в рамках их многоуровневой классификации [8]. В [9–11] проведен анализ различных классов дефектов ПКМ, установлены и обоснованы допуски на отклонения соответствующих характеристик композитов от их регламентированных (паспортных) значений.

Настоящая статья посвящена анализу дефектов конструктивно-технологических решений (КТР) конструкций из ПКМ, составляющих шестой вид их классификатора [8] (рис. 1), направленному на установление полей допусков на рассматриваемый вид дефектов.

Как видно из рис. 1, данный вид дефектов включает в себя три класса:

- не реализуемая технологическими средствами локальная сплошность соединяемых конструктивных элементов (КЭ);
- не реализуемые технологической оснасткой перепады толщин соединяемых КЭ и других КТР;
- нерациональные сочетания КЭ из ПКМ и металла в интегральной конструкции.

Ниже дан анализ дефектов этих классов. Нетрудно установить, что все три класса дефектов этого вида непосредственно или опосредственно приводят к локальному нарушению сплошности КЭ из ПКМ или на их границе (рис. 2). Локальная зона непрочности в плане в общем случае может иметь форму неправильного эллипса с условными полуосями  $a$  и  $b$  (рис. 3). Непрочности произвольной и откорректированной формы опасны в процессе нагружения отформованного изделия из ПКМ в эксплуатации сжимающими усилиями и их комбинацией с усилиями сдвига, под воздействием которых зона отслоения может увеличиваться в размерах, в пределе вызвав разрушение изделия при нагрузках, существенно ниже регламентированных.

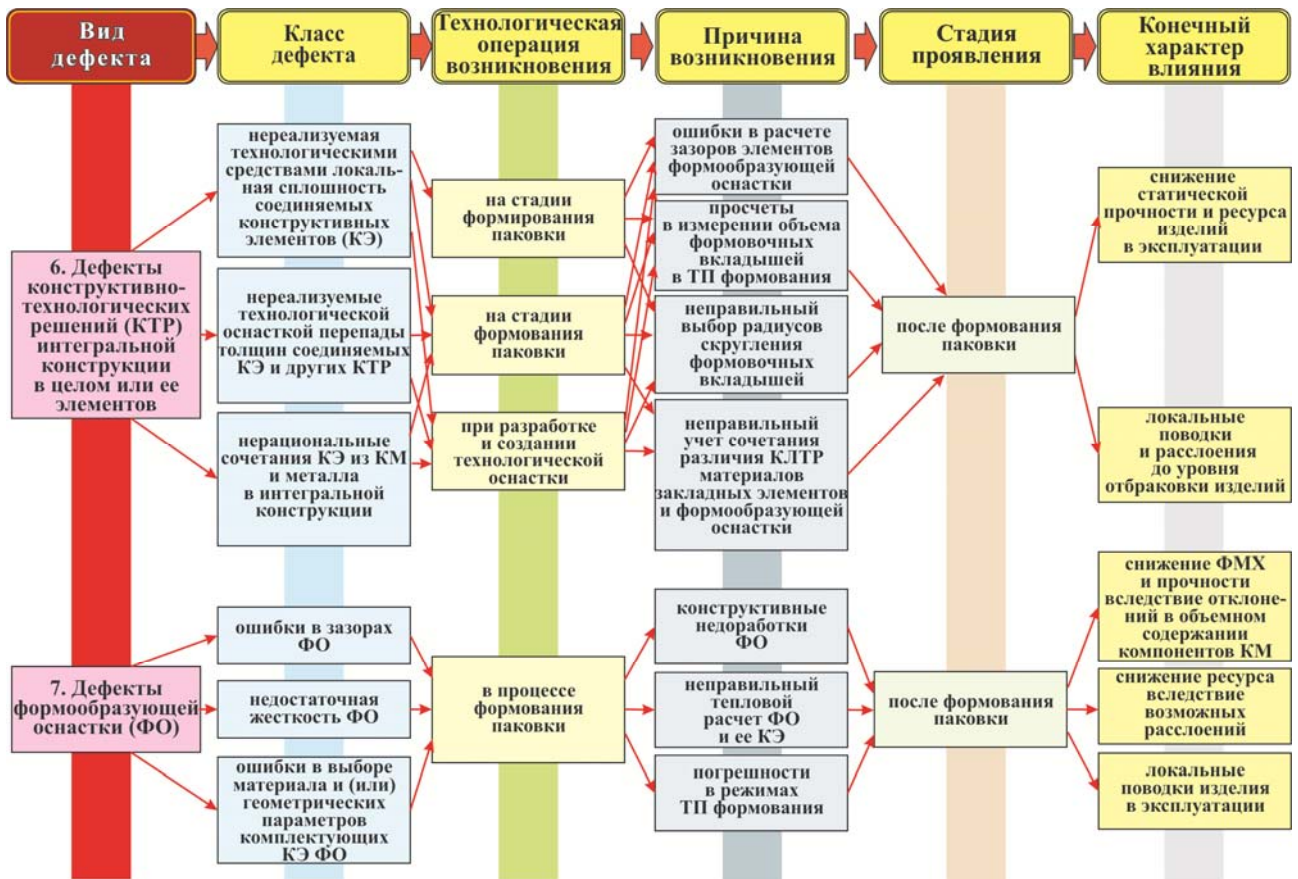
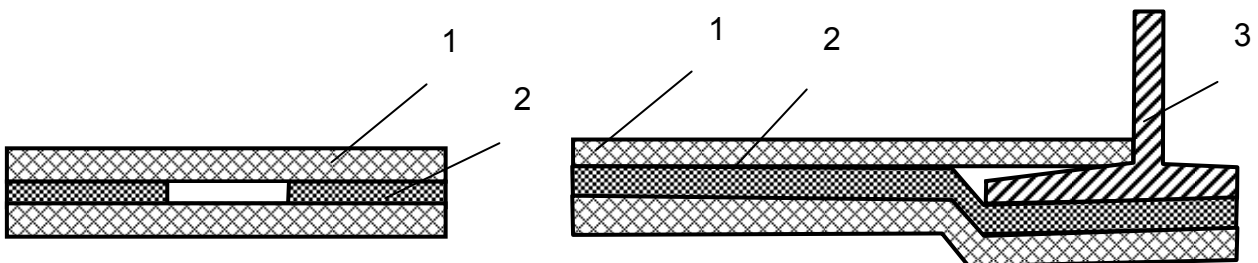


Рисунок 1 — Фрагмент классификатора дефектов, возникающих в производстве интегральных конструкций АКТ из ПКМ



1 – слой ПКМ; 2 – клеевая прослойка; 3 – металлический вкладыш

Рисунок 2 — Локальные несплошности (непроклеи):

а – в пределах конструктивного элемента;

б – на границе конструктивных элементов из ПКМ и металла;

Точная постановка задачи анализа в деталях из ПКМ чрезвычайно сложна и не имеет корректного решения в рамках аналитических моделей. Для конкретных задач этот недостаток может быть преодолен использованием конечноэлементных моделей.

Первые исследования поведения простейших элементов конструкций из ПКМ типа балки-полоски с дефектом в виде отслоения, по видимому, относятся к концу 70-х – началу 80-х годов прошлого столетия [12–19]. К последним работам анализа этой проблемы относится моно-

графия Бохоевой Л.А. [20], в которой даны основы расчета на устойчивость тонкостенных элементов конструкций с дефектами типа отслоений, находящихся под действием статических сжимающих нагрузок. Рассмотрены задачи устойчивости балки-полоски и круглой пластины. Монография содержит также обширный обзор исследований, посвященных данной проблеме, и соответствующую библиографию. Однако все цитируемые выше работы посвящены, несомненно, актуальной и весьма сложной проблеме развития отслоений простых КЭ из ПКМ в процессе их нагружения, выходящей за рамки задачи данной статьи.

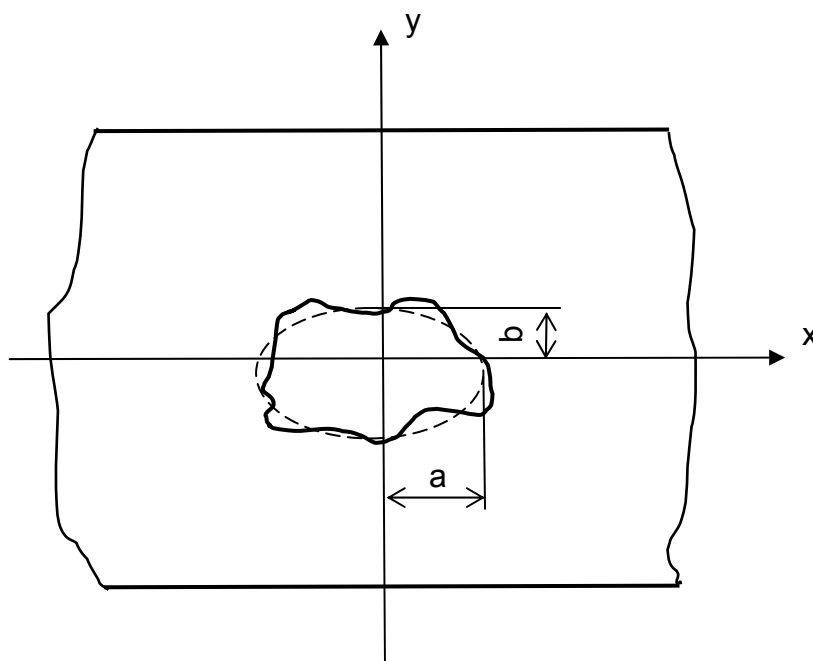


Рисунок 3 – Локальная зона непрочности в плане, откорректированная эллипсом

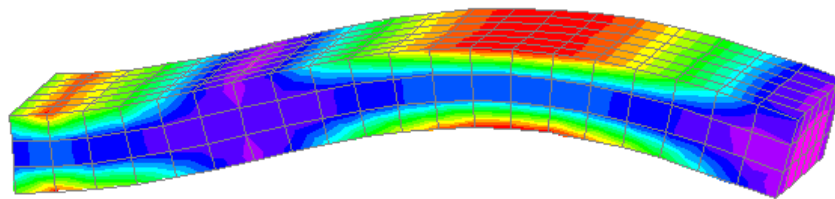
В связи с этим ниже рассматривается нагружение балки-полоски из ПКМ с расслоением при сжатии. В [20] выделено три формы потери устойчивости (рис. 4).

Первый этап – глобальное выпучивание всей балки как единого целого. Оно имеет место при дефектах малой протяженности (рис. 4, а).

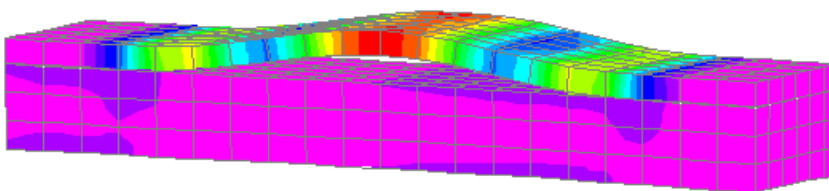
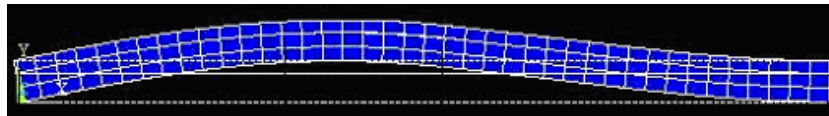
Второй вид потери устойчивости – локальное выпучивание лишь отслоившейся верхней части, когда нижняя и основная части балки остаются плоскими. Локальная потеря устойчивости является основным видом разрушения при сжатии слоистых композиционных материалов с дефектами типа тонких отслоений (рис. 4, б). Подобное выпучивание обусловлено высокой концентрацией межслойного напряжения на фронте дефекта (вершине трещины); далее при возрастании нагрузки область выпучивания увеличивается до критического размера.

Третий вид потери устойчивости называется «смешанным» (рис. 4, в), при котором возможно одновременно локальное и глобальное

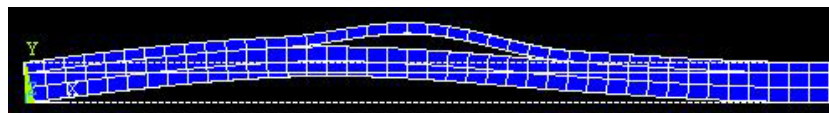
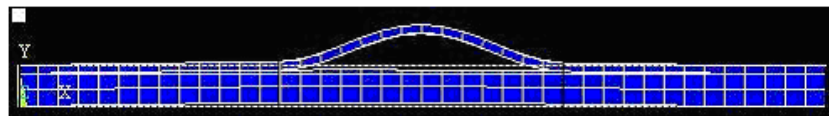
выпучивание, когда изгибается верхняя, нижняя и основная части пластины.



а



б



в

Рисунок 4 – Формы выпучивания непроклея в тонкостенной балке-полоске из ПКМ при сжатии:  
а – глобальная форма; б – локальная форма; в – смешанная форма

Ниже рассматривается локальная форма отслоения. В приведенной выше библиографии [12 – 19] и монографии [20] исследуется разви-

тие так называемого «допустимого» отслоения, под которым понимают дефект, форма и размеры которого позволяют эксплуатировать изделие под сжимающим усилием определенное время, в течение которого дефект развивается, увеличивая свои размеры вплоть до его разрушения.

В нашем же случае в качестве исчерпания несущей способности КЭ принято начало локального отслоения при регламентированной (эксплуатационной) сжимающей нагрузке. При этих условиях устанавливаются допуски на входящие параметры разрешающего неравенства.

Аналогично [20] рассматривается простейшая одномерная математическая модель балки-полоски под действием равномерной сжимающей нагрузки (рис. 5) с несплошностью шириной  $l$ , расположенной на глубине  $(H - h)$  пакета, отслаиваемая часть слоев которого толщиной  $h$  выпучивается при достижении сжимающей пакет нагрузкой  $P_{сж}$  критического значения  $P_{кр}$ .

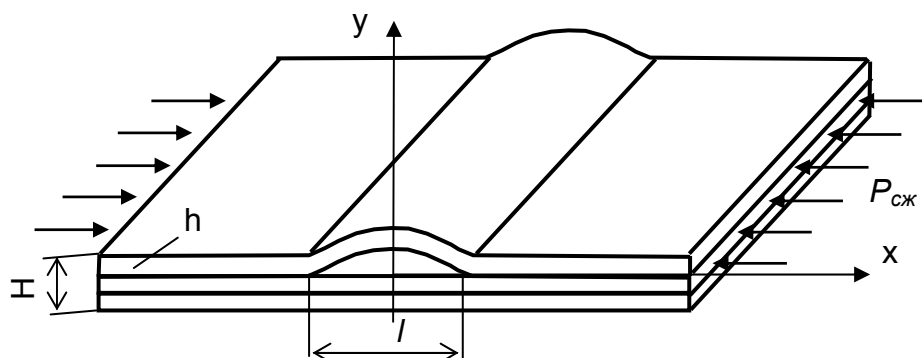


Рисунок 5 – Геометрическое представление одномерной математической модели несплошности ПКМ

Длина несплошности  $l$  принята равной удвоенной полуоси  $2a$  приведенного к эллиптической форме в плане реального непроклея, большая ось которого направлена вдоль действующей сжимающей нагрузки (рис. 3). При этом влияние конечного значения  $2b$  эллиптической несплошности в принятой одномерной модели, в которой ширина непроклея  $2b \rightarrow \infty$ , будет приближенно учитываться осредненным коэффициентом повышения устойчивости

$$\xi = \chi \left( 1 + \exp \left( - \frac{b}{l} \right) \right), \quad (1)$$

где  $\chi$  – коэффициент определяемый численными экспериментами на основе конечноэлементной двумерной модели несплошности эллиптической формы, учитывающий ФМХ отслоившейся части монослоев и всего пакета ПКМ и граничные условия опирания.

В одномерной модели принято, что монослои ПКМ имеют одинаковую толщину  $\delta$ , приведенный (осредненный) модуль упругости пакета

$E_1$ , отслаивающейся его части –  $E_1^0$ , а в сплошной части под отслоившейся –  $E_2$ . Соответственно действующие напряжения в отслоившейся части пакета  $\sigma_1^0$ , в сплошной части под отслоившейся –  $\sigma_2$ . Относительные деформации соответственно равны  $\varepsilon_1^0$ ,  $\varepsilon_2$ , а всего пакета ПКМ –  $\varepsilon$ .

Условие равновесия пакета

$$\sigma n \delta = \sigma_1 n_1 \delta + \sigma_2 (n - n_1) \delta, \quad (2)$$

где  $n_1$ ,  $n$  – число монослоев сплошной части и всего пакета;  $\sigma$  – средние (приведенные) напряжения в пакете от действующей нагрузки  $N_{сж}$ .

Из условия совместности деформаций  $\varepsilon_1^0 = \varepsilon_2$  или  $\frac{\sigma_1^0}{E_1^0} = \frac{\sigma_2}{E_2}$ , откуда

куда

$$\sigma_1^0 = \sigma_2 \frac{E_1^0}{E_2}. \quad (3)$$

Подставив (3) в (2), получим действующие напряжения в отслоившейся части пакета и в его сплошной части:

$$\sigma_1^0 = \sigma \frac{n}{n_1 + (n - n_1) \frac{E_2}{E_1^0}}; \quad (4)$$

$$\sigma_2 = \sigma \frac{n}{n - n_1} \left( 1 - \frac{n_1}{n_1 + (n - n_1) \frac{E_2}{E_1^0}} \right).$$

Приняв условия закрепления отслаиваемой части пакета ПКМ вдоль действующих сжимающих усилий, соответствующие заземлению, запишем критические напряжения потери устойчивости отслоившейся части пакета ПКМ [21]

$$\sigma_{1кр}^0 = \frac{4\pi^2 E_1^0}{12(1 - \nu_{12}\nu_{21})} \frac{n_1^2 \delta^2}{l^2} \xi. \quad (5)$$

Действующие напряжения в дефектной зоне  $\sigma_1^0$  не должны превышать критических  $\sigma_{1кр}^0$ , то есть

$$\sigma \frac{n}{n_1 + (n - n_1) \frac{E_2}{E_1^0}} \leq \frac{4\pi^2 E_1^0}{12(1 - \nu_{12}\nu_{21})} \frac{n_1^2 \delta^2}{l^2} \xi. \quad (6)$$

Регламентируя средние напряжения в пакете от действующей нагрузки  $N_{сж}$  и вводя в (6) допуски на отклонения модулей упругости  $\pm \Delta E_1^0$ ,  $\pm \Delta E_2$ , коэффициенты Пуассона  $\pm \Delta \nu$ , размер дефекта  $\pm \Delta l$  и пренебрегая допуском на коэффициент повышения устойчивости  $\mp \Delta \xi$ , из (6) после преобразований получаем

$$l \pm \Delta l \leq \pi n_1 \delta \sqrt{\frac{\left( E_1^0 \pm \Delta E_1^0 \right) \left[ n_1 + (n - n_1) \frac{E_2 \pm \Delta E_2}{E_1^0 \pm \Delta E_1^0} \right] \xi}{3n(\sigma \pm \Delta \sigma) \left[ 1 - (\nu_{12}^0 \pm \Delta \nu) (\nu_{21}^0 \pm \Delta \nu) \right]}}. \quad (7)$$

Здесь приращения параметров  $\Delta E_1^0$ ,  $\Delta E_2$ ,  $\Delta \nu$  и  $\Delta \sigma$  определяются в соответствии с нашей работой [9] с учетом структуры (схемы армирования) отслаиваемой и лежащей под ней частей пакета ПКМ.

Как следует из формулы (7), одномерная модель для определения поля допуска на допустимый размер несплошности (непроклея), откорректированная введением коэффициента  $\xi$ , позволяет достаточно просто решить поставленную задачу. Однако степень приближенности этого решения в ряде случаев особо ответственных изделий может оказаться неудовлетворительной.

В связи с этим ниже использована двумерная математическая модель прямоугольной пластины, сжатой в одном направлении при граничных условиях свободного опирания по нагруженным сторонам и защемления по двум другим. Произвольная в общем случае форма несклея в отличие от эллипса (рис. 3) аппроксимируется прямоугольной пластиной, эквивалентной (равновеликой) по площади. Однозначность аппроксимации может быть достигнута использованием наименьшего квадратичного отклонения граничных линий прямоугольника от произвольных кривых в определенном количестве точек (рис. 6).

Действующие напряжения  $\sigma_1^0$  в отслаивающейся пластине определяются формулой (4), а критические напряжения, при которых она теряет устойчивость, соответственно равны [21]:

$$\sigma_{кр}^0 = \frac{\pi^2 \sqrt{D_1^0 D_2^0}}{n_1 \delta b^2} \left[ \sqrt{\frac{D_1^0}{D_2^0} \left( \frac{m}{c} \right)^2} + \frac{8}{3} \frac{D_3^0}{\sqrt{D_1^0 D_2^0}} + \frac{16}{3} \sqrt{\frac{D_2^0}{D_1^0} \left( \frac{c}{m} \right)^2} \right], \quad (8)$$

$$\text{где } D_1^0 = \frac{E_1^0 n_1^3 \delta^3}{12(1 - \nu_{12}^0 \nu_{21}^0)}; \quad D_2^0 = \frac{E_2^0 (n - n_1)^3 \delta^3}{12(1 - \nu_{12}^0 \nu_{21}^0)};$$

$$D_3^0 = D_1^0 \nu_{21}^0 + 2 \frac{G_{12}^0 n_1^3 \delta^3}{12} = \frac{E_1^0 n_1^3 \delta^3 \nu_{21}^0}{12(1 - \nu_{12}^0 \nu_{21}^0)} + \frac{G_{12}^0 n_1^3 \delta^3}{6}; \quad c = \frac{a}{b}; \quad m - \text{число}$$

полуволн в направлении оси  $x$ .

Здесь  $D_1^0, D_2^0, D_3^0$  – цилиндрические жесткости отслаивающейся части пакета ПКМ.

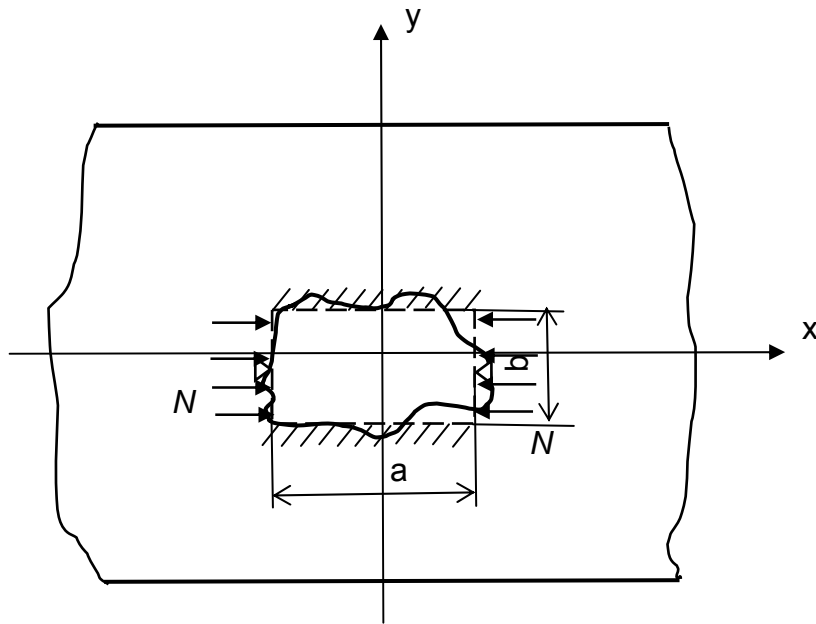


Рисунок 6 – Аппроксимация зоны непрочлея в плане прямоугольной пластиной

Минимальное число полуволн  $m$  определяется интервалом  $c$ :

$$\text{при } 0 < c < 0,9314 \sqrt{\frac{E_1^0}{E_2^0}} \quad m=1;$$

$$\text{при } 0,9314 \sqrt{\frac{E_1^0}{E_2^0}} < c < 1,614 \sqrt{\frac{E_1^0}{E_2^0}} \quad m=2; \quad (10)$$

$$\text{при } 1,614 \sqrt{\frac{E_1^0}{E_2^0}} < c < 2,284 \sqrt{\frac{E_1^0}{E_2^0}} \quad m=3.$$



При  $c > 2,284 \sqrt{\frac{E_1^0}{E_2^0}}$  вместо формулы (8) можно использовать упрощенную зависимость [21]

$$\sigma_{кр}^0 = \frac{\pi^2 \sqrt{D_1^0 D_2^0}}{n_1 \delta b^2} 2,67 \left( 1,73 + \frac{D_3^0}{\sqrt{D_1^0 D_2^0}} \right). \quad (11)$$

Как и в случае одномерной модели, действующие напряжения в дефектной зоне не должны превышать критических  $\sigma_{кр}^0$ , то есть

$$\sigma \frac{n}{n_1 + (n - n_1) \frac{E_2^0}{E_1^0}} \leq \frac{\pi^2 \sqrt{D_1^0 D_2^0}}{n_1 \delta b^2} \left[ \sqrt{\frac{D_1^0}{D_2^0}} \left( \frac{m}{c} \right)^2 + \frac{8}{3} \frac{D_3^0}{\sqrt{D_1^0 D_2^0}} + \frac{16}{3} \sqrt{\frac{D_2^0}{D_1^0}} \left( \frac{c}{m} \right)^2 \right] \quad (12)$$

при  $m \leq 3$  и

$$\sigma \frac{n}{n_1 + (n - n_1) \frac{E_2^0}{E_1^0}} \leq \frac{\pi^2 \sqrt{D_1^0 D_2^0}}{n_1 \delta b^2} 2,67 \left( 1,73 + \frac{D_3^0}{\sqrt{D_1^0 D_2^0}} \right). \quad (13)$$

Введя соответствующие поля допусков, вместо (12) и (13) получим соответственно:

при  $m \leq 3$

$$\begin{aligned} \frac{(\sigma \pm \Delta\sigma)n}{n_1 + (n - n_1) \frac{(E_2^0 \pm \Delta E_2^0)}{(E_1^0 \pm \Delta E_1^0)}} &\leq \frac{\pi^2 \sqrt{(E_1^0 \pm \Delta E_1^0)(E_2^0 \pm \Delta E_2^0)} n_1^3 (n - n_1)^3 \delta^2}{n_1 b^2} \times \\ &\times \left\{ \sqrt{\frac{(E_1^0 \pm \Delta E_1^0) n_1^3}{(E_2^0 \pm \Delta E_2^0) (n - n_1)^3}} \left( \frac{m}{c} \right)^2 + \frac{8}{3} \frac{[(E_1^0 \pm \Delta E_1^0)(v_{21}^0 \pm \Delta v)] n_1^3}{\sqrt{(E_1^0 \pm \Delta E_1^0) n_1^3 (E_2^0 \pm \Delta E_2^0) (n - n_1)^3}} + \right. \\ &\left. + \frac{8}{3} \frac{[2(G_{12}^0 \pm \Delta G_{12}^0)] [1 - (v_{12}^0 \pm v)(v_{21}^0 \pm \Delta v)] n_1^3}{\sqrt{(E_1^0 \pm \Delta E_1^0) n_1^3 (E_2^0 \pm \Delta E_2^0) (n - n_1)^3}} + \frac{16}{3} \sqrt{\frac{(E_2^0 \pm \Delta E_2^0) (n - n_1)^3}{(E_1^0 \pm \Delta E_1^0) n_1^3}} \left( \frac{c}{m} \right)^2 \right\}; \quad (14) \end{aligned}$$

при  $m > 3$

$$\frac{(\sigma \pm \Delta\sigma)n}{n_1 + (n - n_1) \frac{(E_2 \pm \Delta E_2)}{(E_1^0 \pm \Delta E_1^0)}} \leq \frac{2,67\pi^2 \delta^2}{n_1 b^2} \frac{\sqrt{(E_1^0 \pm \Delta E_1^0)(E_2^0 \pm \Delta E_2^0)n_1^3(n - n_1)^3}}{12[1 - (v_{12}^0 \pm \nu)(v_{21}^0 \pm \Delta\nu)]} \times$$

$$\times \left[ 1,73 + \frac{[(E_1^0 \pm \Delta E_1^0)(v_{21}^0 \pm \Delta\nu) + 2(G_{12}^0 \pm \Delta G_{12}^0)[1 - (v_{12}^0 \pm \nu)(v_{21}^0 \pm \Delta\nu)]]n_1^3}{\sqrt{(E_1^0 \pm \Delta E_1^0)n_1^3(E_2^0 \pm \Delta E_2^0)(n - n_1)^3}} \right]. \quad (15)$$

Входящие в (14) и (15) допуски, как и ранее, определяются в соответствии с [9] с учетом конкретной схемы армирования отслаиваемой и лежащей под ней частей пакета ПКМ.

Допустимость дефекта в виде непроклея устанавливается выполнением неравенства (14) или (15) после определения его размеров и глубины залегания современными неразрушающими методами контроля [22].

Агрегаты ракетной техники из ПКМ, как правило, не эксплуатируются в условиях действия многократных повторно-переменных нагрузок. Поэтому для этого класса конструкций при анализе допустимости размеров дефекта в виде отслоения следует использовать средние приведенные напряжения  $\sigma$  от действующей регламентированной сжимающей нагрузки  $N_{сж}$ .

Для авиационных агрегатов из ПКМ, работающих в условиях усталости, средние приведенные напряжения  $\sigma$  следует умножить на коэффициент снижения статической прочности при исчерпании ресурса в соответствии с рекомендациями, приведенными в [10].

Рассмотрим численный пример. Отслоение исследовалось на структуре ПКМ, приведенной на рис. 7. Предполагалось, что отслоение лежит ниже двух верхних монослоев со структурой (+45°, -45°).

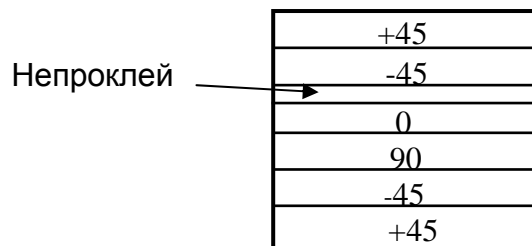


Рисунок 7 – Рассматриваемая структура пакета ПКМ

ФМХ углепластика приведены в таблице.

ФМХ двух слоев отслаиваемой части пакета (+45, -45) равны:  
 $E_1^0 = E_2^0 = 19,96$  ГПа;  $G_{12}^0 = 26,07$  ГПа;  $\nu_{12}^0 = \nu_{21}^0 = 0,663$ .

ФМХ четырех слоев сплошной части пакета со структурой (0, 90, -45, +45) в соответствии с формулами теории армирования ны:  $E_2 = 83,22$  ГПа;  $G_{12} = 32,07$  ГПа;  $\nu_{12} = \nu_{21} = 0,3$ .

## Принятые ФМХ углепластика

ФМХ монослоя	Углепластик однонаправленный
Модуль упругости вдоль волокон $E_1$ , ГПа	100
Модуль упругости поперек волокон $E_2$ , ГПа	10
Модуль сдвига $G_{12}$ , ГПа	6
Коэффициент Пуассона $\mu_{12}$	0,35
Толщина монослоя $\delta$ , мм	0,1

При использовании одномерной модели действующие напряжения в дефектной зоне равны  $\sigma_1^0 = 0,321\sigma$ . Критическая длина несплошности при  $\xi=1$   $l_{кр} = \frac{116,7}{\sqrt{\sigma}}$ , что соответствует действующему по толщине пакета напряжению в зоне изделия, удаленной от несплошности  $\sigma = 500$  МПа  $l_{кр} = 5,22$  мм.

При рассмотрении двумерной модели цилиндрические жесткости структуры из двух монослоев отслоившейся части пакета, моделируемой пластиной с граничными условиями, показанными на рис. 6, оказались равными  $D_1^0 = D_2^0 = 23,72$  Н·мм;  $D_3^0 = 50,49$  Н·мм.

При  $c = \frac{a}{b} = 2$ , при котором  $m=3$ ,  $a=5,22$  мм;  $b=2,6$  мм. Размер  $a$  принят равным полученному в одномерной модели.

Критические напряжения потери устойчивости соответственно равны  $\sigma_{кр}^0 = 1796$  МПа, то есть превышают действующие в 3,6 раза. Расчеты соответствуют вполне ожидаемому результату, что одномерная модель, реализуемая при свободных гранях балки-полоски, дает чрезмерно большой запас устойчивости.

Этот же пример был просчитан в программном комплексе, реализующем метод конечных элементов. Отслоившаяся часть моделировалась многослойным оболочечным конечным элементом со схемой армирования  $\pm 45^\circ$  типа Shell4L. Остальная часть пакета ПКМ моделировалась многослойными трехмерными объемными элементами типа SOLIDL.

Рассмотрено две возможные формы отслоения (рис. 8). В первом случае (рис. 8, а) отслоившаяся часть соединена с основной только по двум коротким кромкам. Во втором случае (рис. 8, б) отслоившаяся часть соединена с основной по всем четырем кромкам. Схема нагруже-

ния и закрепления\*) рассматриваемого участка приведена на этом же рисунке.

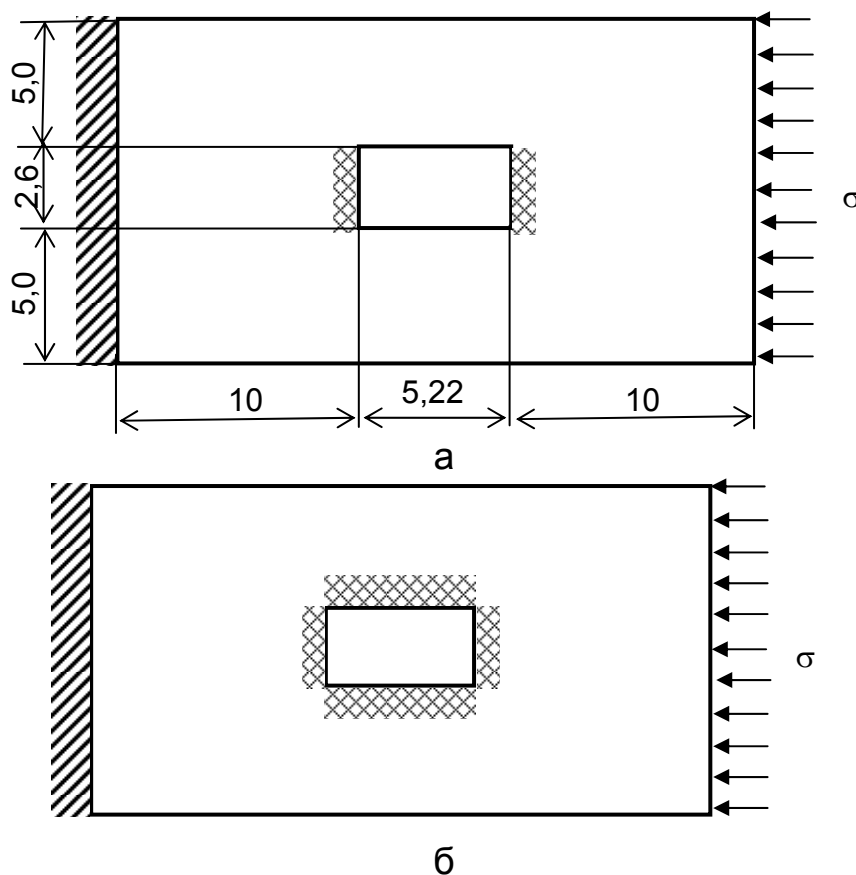


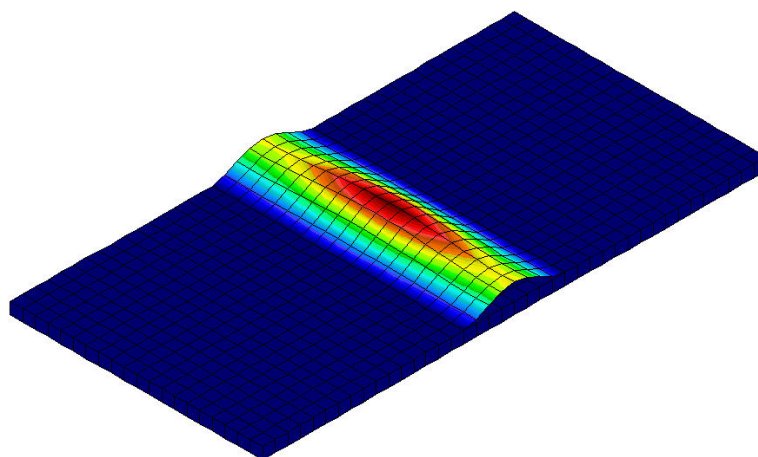
Рисунок 8 – Рассмотренные возможные формы отслоения  
 а – отслоившаяся часть соединена с основной только по двум коротким  
 кромкам; б – отслоившаяся часть соединена с основной по всем  
 четырем кромкам

В результате расчетов была определена максимальная величина среднего по пакету напряжения, приложенного по его торцу, при котором отслоившаяся часть теряет устойчивость (рис. 9).

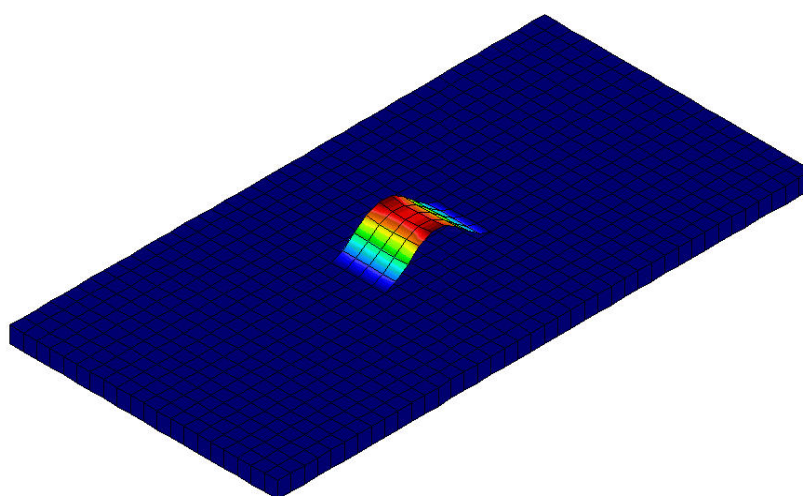
Как видно из приведенных результатов, конечноэлементные модели показали, что одномерная модель прогнозирует потерю устойчивости отслоения при средних напряжениях в пакете почти в 3 раза выше, чем определяемое МКЭ. В то же время результаты, полученные по двумерной модели и МКЭ, отличаются всего в 1,5 раза.

Таким образом, при назначении допусков на дефекты в форме локальных отслоений следует исходить из двумерной аналитической модели.

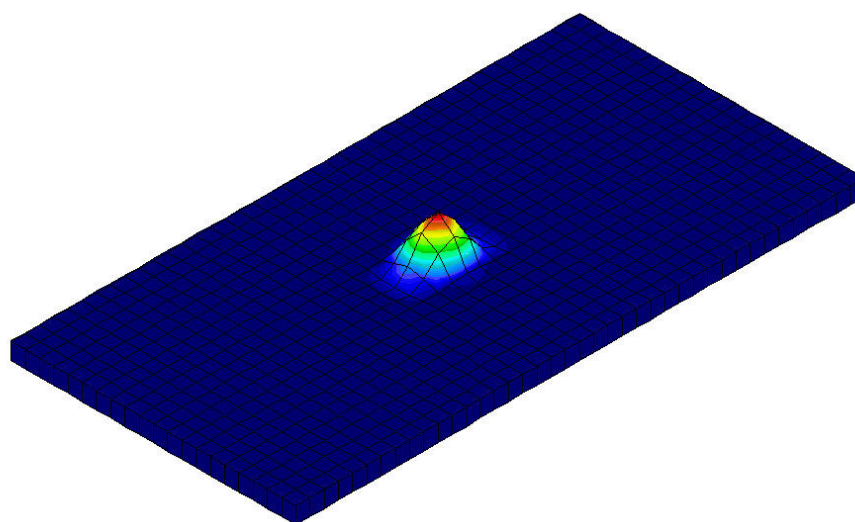
\*) В отличие от классических условий закрепления здесь приняты реальные.



а



б



в

Рисунок 9 – Характер выпучивания отслоения:  
а – при цилиндрическом продольном изгибе ( $\sigma_{max}=140$  МПа);  
б – при реализации формы рис. 6, а ( $\sigma_{max}=155$  МПа);  
в – при реализации формы рис. 6, б ( $\sigma_{max}=1167$  МПа)

## Список использованных источников

1. Коваленко, В.А. Применение полимерных композиционных материалов в изделиях ракетно-космической техники как резерв повышения ее массовой и функциональной эффективности. Аналитический обзор [Текст] / В.А. Коваленко, А.В. Кондратьев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 5(82). – С. 14 – 20.

2. Кондратьев, А.В. Обзор и анализ мировых тенденций и проблем расширения применения в агрегатах ракетно-космической техники полимерных композиционных материалов [Текст] / А.В. Кондратьев, В.А. Коваленко // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»* – Вып. 3(67). – Х.: ХАИ, 2011. – С. 7 – 18.

3. Дегтярев, А.В. Применение композиционных материалов при создании перспективных образцов ракетной техники [Текст] / А.В. Дегтярев, В.А. Коваленко, А.В. Потапов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 2(89). – С. 34 – 38.

4. Кондратьев, А.В. Состояние проблемы научного обеспечения эффективной технологии производства агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов [Текст] / А.В. Кондратьев, В.А. Коваленко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 6(83). – С. 17 – 25.

5. Коваленко, В.А. Показатели качества этапов жизненного цикла конструкций ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов [Текст] / В.А. Коваленко // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 50. – Х.: ХАИ, 2011. – С. 128 – 140.

6. Коваленко, В.А. Фундаментальные характеристики полимерных композиционных материалов и их влияние на показатели качества конструкций ракетно-космической техники [Текст] / В.А. Коваленко // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 51. – Х.: ХАИ, 2011. – С. 66 – 74.

7. Коваленко, В.А. Анализ и модификация математических моделей показателей качества и методов их определения [Текст] // В.А. Коваленко // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 4 (68). – Х.: ХАИ, 2011. – С. 7 – 22.

8. Гайдачук, А.В. Анализ технологических дефектов, возникающих в серийном производстве интегральных авиаконструкций из полимерных композиционных материалов [Текст] / А.В. Гайдачук, А.В. Кондратьев, Е.В. Омельченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – Вып. 3(70). – С. 40 – 49.

9. Коваленко, В.А. Исследование технологических дефектов, возникающих в производстве агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов. Сообщение 1. Допуски на отклонения толщины формуемого изделия от проектного значения [Текст] / В.А. Коваленко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 3(90). – С. 10 – 21.

10. Коваленко, В.А. Исследование технологических дефектов, возникающих в производстве агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов. Сообщение 2. Допуски на нарушения сплошности материалов и локальные поводки изделия [Текст] / В.А. Коваленко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 4(91). – С. 5 – 15.

11. Кириченко, В.В. Исследование влияния складки в полимерном композиционном материале на его упругие свойства и характер изменения локального напряженно-деформированного состояния [Текст] / В.В. Кириченко, В.А. Коваленко // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 55. – Х.: ХАИ, 2011. – С. 127 – 132.

12. Сборовский, А.К. Механизмы разрушения ориентированных стеклопластиков при сжатии [Текст] / А.К. Сборовский, Н.Ф. Савельев // *Вопросы судостроения. Технология судостроения*. – 1976. – Вып. 12. – С. 12 – 18.

13. Тарнопольский, Ю.М. Расслоение сжимающих стержней из композитов [Текст] / Ю.М. Тарнопольский // *Разрушение композиционных материалов*. – Рига, 1979. – С. 160 – 166.

14. Болотин, В.В. Устойчивость сжатых элементов с дефектами типа расслоений [Текст] / В.В. Болотин, З.Х. Зебельян, Л.А. Курзин // *Проблемы прочности*. – 1980. – № 7. – С. 3 – 8.

15. Викторов, Е.Г. Подрастание и излом отслоений в композитах при сжатии [Текст] / Е.Г. Викторов // *Механика материалов и конструкций*. – М.: Изд-во МЭИ, 1982. – С. 36 – 40.

16. Серенсен, С.В. Несущая способность тонкостенных конструкций из армированных пластиков с дефектами [Текст] / С.В. Серенсен, Г.П. Зайцев. – К.: Наукова думка, 1982. – 295 с.

17. Болотин, В.В. Дефекты типа расслоений в конструкциях из композиционных материалов [Текст] / В.В. Болотин // *Механика композиционных материалов*. – 1984. – № 2. – С. 239 – 256.

18. Chai, H. One dimensional modeling of failure in laminated plates by delamination buckling [Text] / H. Chai, C.D. Babcock, W.G. Knous // *International Journal of Solids and Structures*. – 1981. – Vol. 14. – N 11. – P. 1069 – 1083.

19. Chai, H. Two-dimensional modeling of Compressive Failure in Delaminated Laminates [Text] / H. Chai, C.D. Babcock // *Journal of Composite materials*. – 1985. – Vol. 19. – N 1. – P. 67 – 91.

20. Бохоева, Л.А. Особенности расчета на прочность элементов конструкций из изотропных и композиционных материалов с допустимыми дефектами [Текст]: моногр. / Л.А. Бохоева. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2007. – 192 с.

21. Лехницкий, С.Г. Анизотропные пластинки [Текст] / С.Г. Лехницкий. – М.-Л.: ОГИЗ Гос. издат. техн.-теор. лит., 1947. – 355 с.

22. Потапов, А.И. Неразрушающий контроль конструкций из композиционных материалов [Текст] / А.И. Потапов, Ф.П. Пеккер. – Л.: Машиностроение, 1977. – 190 с.

23. Технологія виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів: підруч. [Текст] / С.А. Бичков, О.В. Гайдачук, В.Є. Гайдачук та інш. – К.: ІСДО, 1995. – 376 с.

24. Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов [Текст] / И.М. Буланов, В.В. Воробей. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.

25. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении / под ред. А.Г. Братухина, В.С. Боголюбова, О.С. Сироткина. – М.: Готика, 2003. – 516 с.

*Поступила в редакцию 30.08.2012.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Е. Гайдачук,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*