

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАССЛОЕНИЯ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ПАНЕЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Переход к изготовлению высоконагруженных элементов ЛА из композиционных материалов требует тщательного решения вопросов регламентации возникающих дефектов. При этом особое внимание должно быть уделено расслоениям как одним из наиболее распространенных дефектов слоистых КМ.

Наличие расслоения в авиационной конструкции требует решения ряда взаимосвязанных задач:

- 1) Совершенствования методов обнаружения расслоений в типовых элементах ЛА;
- 2) Определения допустимых размеров дефекта, при которых возможна безопасная эксплуатация конструкции;
- 3) Прогнозирования роста расслоения и оценки момента превышения его допустимых значений;
- 4) Разработки методов ремонта для гарантированного восстановления прочности конструкции.

В настоящее время в отечественной и зарубежной литературе можно найти большое количество работ, посвященных исследованию вопросов локальной устойчивости и роста расслоений с использованием разнообразных аналитических, численных методов и конечно-элементного моделирования. Намного меньше авторов исследуют общую устойчивость дефектной конструкции при одноосном или двухосном сжатии, уделяя внимание оценке ее несущей способности. Среди них необходимо выделить работы [1–4] В.В. Болотина, Ю.М. Тарнопольского, Л.А. Бохоевой, В.Л. Благоняжина и др. В работе [5] систематизированы результаты исследований влияния различных геометрических параметров расслоений в пластине при сжатии, выполненных с помощью МКЭ. На данный момент не найдено работ, описывающих поведение композитных панелей, имеющих расслоение под действием давления, что является наиболее характерной нагрузкой для авиационных конструкций.

Отсутствие в литературе простых и эффективных методик расчета НДС панельных конструкций с дефектами типа расслоений является причиной полуэмпирического характера рекомендаций в технологических инструкциях украинских авиапредприятий по приему и ремонту композиционных конструкций.

Поэтому на первом этапе решения задачи о нормировании допустимых размеров расслоений необходимо оценить влияние размеров,

конфигурации и расположения локальных расслоений по толщине и площади элемента конструкции на его напряженно-деформированное состояние (НДС) при характерных условиях нагружения и закрепления авиационных панелей, что и является целью данной работы.

## 1. Постановка задачи

Определяя «расслоение» как локальное нарушение совместной работы отдельных слоев композиционного материала, в данной работе рассматривались только те дефекты, которые оказывают влияние на прочность конструкции. Это возможно в тех случаях, когда материал в области повреждения не способен воспринимать и передавать приложенные нагрузки, и может быть вызвано:

- неравномерной пропиткой армирующего материала и отсутствием в месте дефекта связующего, обеспечивающего перераспределение внешних нагрузок между отдельными волокнами;
- локальным растрескиванием и выкрашиванием связующего вследствие удара или вмятины;
- потерей расслоением устойчивости при расположении в сжатой зоне конструкции.

В этих случаях при построении математической модели определения НДС материал в зоне дефекта может быть исключен из расчета.

В рамках такого подхода для оценки степени влияния дефекта на несущую способность конструкции была использована расчетная схема пластины ступенчато-переменной толщины, предложенная в работе [6]. На основании этой методики было определено НДС пластины, содержащей дефект, и аналогичной бездефектной конструкции под действием равномерно-распределенной поперечной нагрузки и выполнено сравнение их несущих способностей.

## 2. Оценка прочности исследуемой дефектной конструкции

Для оценки прочности слоистой анизотропной пластины был выбран энергетический критерий Мизеса-Хилла. Математическая запись коэффициента запаса прочности, определяющего соотношение компонентов напряженного состояния и прочностных характеристик материала, имеет следующий вид:

$$f = \frac{1}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{F_1^2} - \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{F_1 \cdot F_2} + \frac{\sigma_2^2}{F_2^2} + \frac{\tau_{12}^2}{F_{12}^2} + \frac{\tau_{13}^2}{F_{13}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{F_{23}^2}}}. \quad (1)$$

При определении коэффициента запаса прочности  $f$  было принято, что пластина состоит из однородных, анизотропных слоев, связанных между собой. В такой постановке критерий прочности (1) должен быть записан отдельно для каждого слоя. Предельная несущая способность всей пластины будет определяться как начало разрушения любого из входящих в ее состав слоев.

В соответствии с методом, предложенным в работе [6], нормальные напряжения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и касательное напряжение  $\tau_{12}$  изменяются в пределах слоя по линейному закону, а напряжения сдвига  $\tau_{13}$  и  $\tau_{23}$ , являясь постоянными в пределах слоя, по сечению аппроксимируются параболой. Поэтому коэффициент запаса прочности определялся на поверхностях раздела слоев.

Таким образом, для некоторой поверхности  $i$ , разделяющей слои  $i-1$  и  $i$ , коэффициент запаса прочности  $f_i$  в выбранной точке определяется формулой:

$$f_i = \min(f_{(i-1)}|_{z=Z_i}, f_{(i)}|_{z=Z_i}), \quad (2)$$

где  $Z_i = \sum_{j=1}^i \delta_j$  – координата  $z$   $i$ -й поверхности.

Коэффициент запаса прочности  $f$  для пластины в целом равен минимальному из коэффициентов запаса  $f_i$  ( $i = 1 \dots k + 1$ ), вычисленных в наиболее нагруженной точке  $i$ -й поверхности.

В качестве критерия, определяющего влияние дефекта на НДС конструкции, использовался коэффициент снижения прочности:

$$K = \frac{f_{\text{рас}}}{f_{\text{цел}}}, \quad (3)$$

где  $f_{\text{цел}}$  и  $f_{\text{рас}}$  – коэффициенты запаса прочности целой пластины и пластины с расслоением соответственно.

Согласно [7] допустимый коэффициент снижения прочности  $K$  существенно различается для высоко-, средне- и слабонагруженных конструкций и составляет 0,94; 0,78; 0,67 соответственно.

### 3. Исследование снижения прочности в конструкции с дефектом

Для разработки рекомендаций и методики определения допустимых параметров расслоений в композиционных панелях было выполнено исследование влияния размеров и положения дефекта. Полученные результаты кратко описаны в этом разделе.

### 3.1 Влияние размеров пластины

Для оценки влияния собственных размеров пластины на снижение несущей способности при наличии расслоения был выполнен расчет и сравнение коэффициентов снижения прочности  $K$  и увеличения прогиба  $w/w_0$  квадратной многослойной пластины, изготовленной из тканого стеклопластика со схемой укладки  $[0^\circ; 90^\circ]$ . Геометрические параметры, использованные при расчете, а именно: размер стороны  $a$  и площадь расслоения  $S_{\text{рас}}$ , толщина пластины  $\delta$  и глубина расслоения  $\bar{\delta}$  – приведены в табл. 1 вместе с полученными результатами.

Необходимо отметить, что для предотвращения выхода за рамки применимости принятой линейной теории при исследовании конструкций больших размеров было наложено ограничение на прогиб пластины в соответствии с допустимой волнистостью аэродинамических поверхностей летательных аппаратов:

$$[\omega] = 0,002 \cdot a,$$

где  $a$  – размер стороны пластины.

Таблица 1 – Результаты расчета коэффициента снижения прочности для пластин различных размеров

$\delta = 2,8 \text{ мм}; \bar{\delta} = 0,7 \text{ мм}; S_{\text{рас}} = 4\%$					
$a, \text{ мм}$	100	200	300	400	500
$K$	0,854	0,858	0,859	0,859	0,859
$w/w_0$	1,082	1,082	1,082	1,083	1,082
$a = 100 \text{ мм}; S_{\text{рас}} = 4\%$					
$\bar{\delta}, \%$	12,5	25	37,5	50	
$K(\delta = 2,8 \text{ мм})$	0,891	0,824	0,789	0,776	
$K(\delta = 5,6 \text{ мм})$	0,877	0,810	0,778	0,766	

Полученную незначительную разницу коэффициентов  $K$  можно объяснить снижением точности расчета напряженно-деформированного состояния для пластин больших размеров. Максимальное отклонение коэффициента снижения прочности составляет 0,6% для панелей разных размеров в плане и 1,6% для панелей, различающихся по толщине.

### 3.2 Влияние площади расслоения

Изменение площади расслоения при постоянных размерах панели значительно влияет на коэффициент снижения прочности конструкции. На рис. 1–3 представлены полученные в результате расчетов зави-

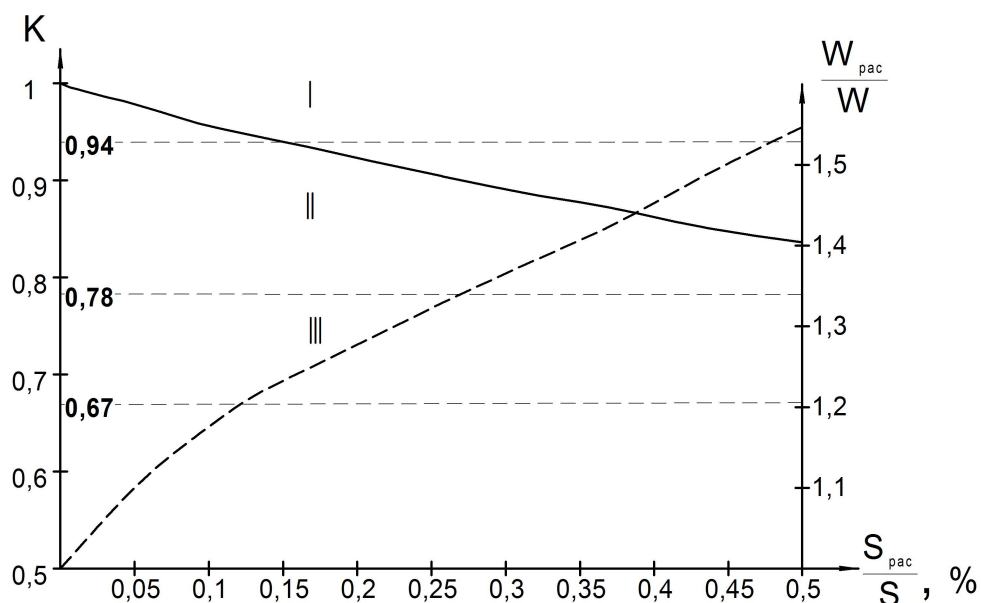


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента снижения прочности от площади расслоения для пластины на основе стеклоткани Т-10-14 и связующего ЭДТ-69Н

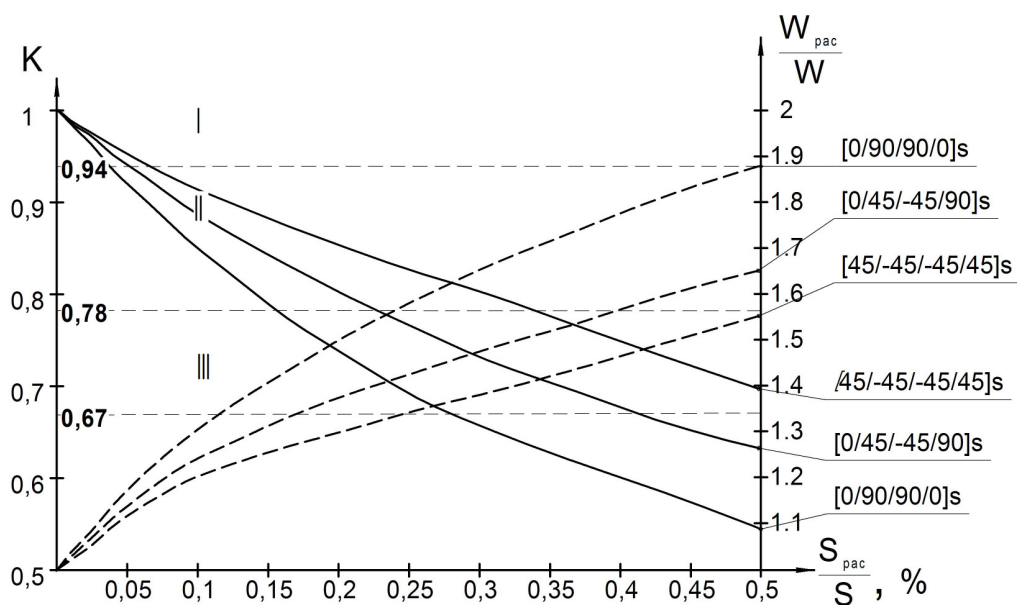


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента снижения прочности от площади расслоения для пластины на основе углеткани УТ-900-2.5 и связующего ЭДТ-69Н

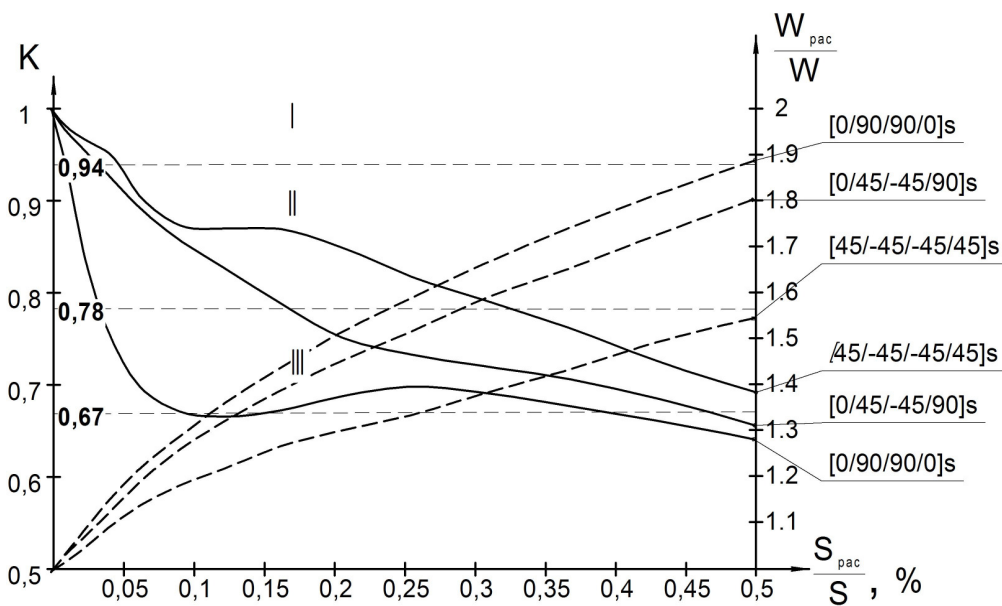


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента снижения прочности от площади расслоения для пластины на основе углерента ЛУ-П-0.1 и связующего ЭНФБ

симости для пластин, изготовленных из тканого стеклопластика (Т-10-14+ЭДТ-69Н), тканого (УТ-900-2,5+ЭДТ-69Н) и однонаправленного (КМУ-4Л+ЭНФБ) углепластика, широко применяемых при производстве самолетов АН. Схемы укладки исследуемых панелей приведены на графиках. Исключение составляет панель, изготовленная из стеклоткани Т-10-14, ФМХ которой, а следовательно, и исследуемые характеристики, мало зависят от углов укладки слоев в пакете КМ. Расчетная нагрузка в каждом из случаев соответствует равномерно распределенному давлению интенсивностью  $p$ , при котором запас прочности целой пластины  $f_{\text{цел}} = 1$ .

В соответствии с допустимыми нормами снижения прочности, описанными в разд. 2, на графиках отмечены границы зон допустимых размеров расслоения для высоконагруженных (I), средненагруженных (II) и слабнонагруженных (III) конструкций.

### 3.3 Влияние глубины расслоения

Расслоения, возникающие в конструкциях, как на стадии изготовления, так и в процессе эксплуатации, могут иметь различную толщину. Вследствие принятого допущения об исключении материала в зоне дефекта из работы приложенная внешняя нагрузка перераспределяется между целыми слоями конструкции. Поэтому при исследовании влияния глубины расслоения на несущую способность конструкции максимальная глубина расслоения принималась равной половине толщины целой пластины.

Результаты расчетов выполнены для пластин, аналогичных рассматриваемым в разд. 3.2, представлены на рис. 4 в виде зависимостей коэффициента снижения прочности от глубины расслоения при постоянной его площади.

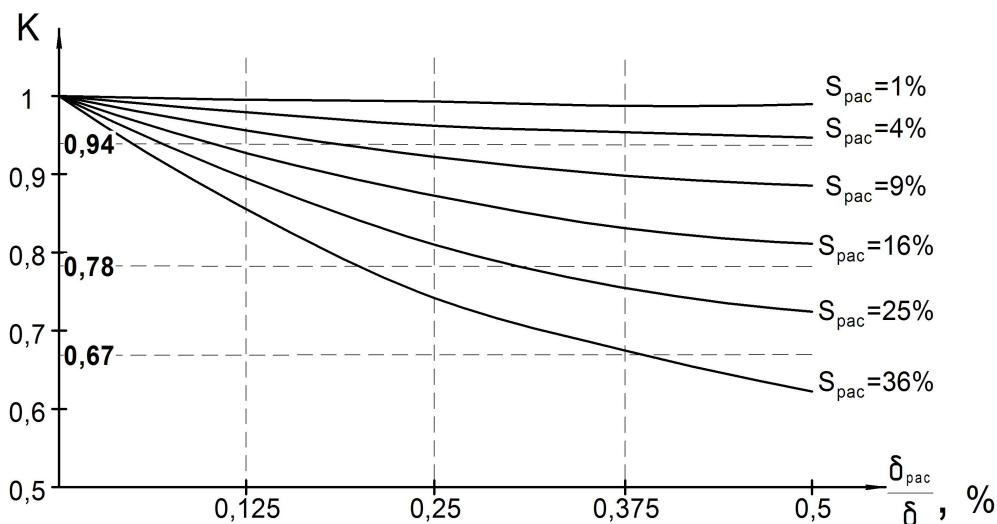


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента снижения прочности от глубины расслоения для пластины на основе стеклоткани Т-10-14 и связующего ЭДТ-69Н

### 3.4 Влияние положения расслоения

Положение расслоения так же, как и площадь, является одним из важных параметров дефекта. Для определения степени его влияния, была исследована несущая способность двух квадратных пластин одинаковых размеров, ослабленных расслоением ( $S_{рас} = 4\%$ ). Моделируемые панели изготовлены из углепластика на основе ткани УТ-900-2.5 и ленты ЛУ-П-0.1.

Для учета влияния положения расслоения на несущую способность пластины с дефектом был введен поправочный коэффициент

$$\gamma = \frac{K_{(0,0)}}{K_{max}}, \quad (4)$$

где  $K_{max}$  – максимальный из коэффициентов снижения прочности, полученных при изменении положения центра расслоения;

$K_{(0,0)}$  – коэффициент снижения прочности при расположении расслоения в центре пластины.

Численные результаты расчетов приведены на рис. 5 и 6 в виде зависимости коэффициента  $\gamma$  от положения центра расслоения.

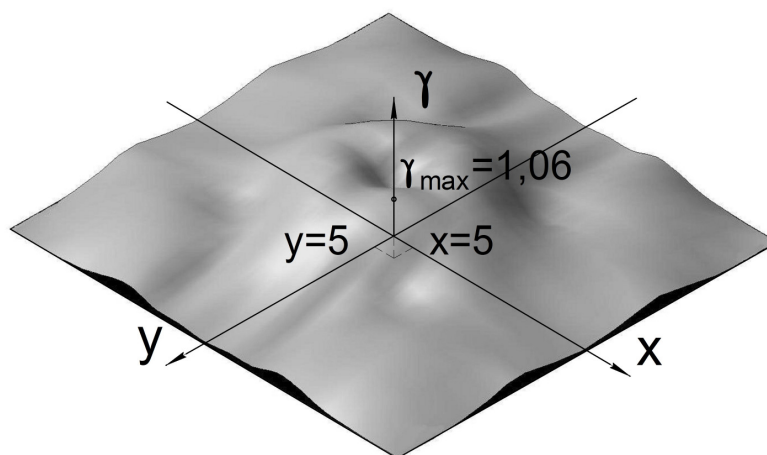


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента  $\gamma$  от координат положения центра расслоения в пластине на основе углеткани УТ-900-2.5 и связующего ЭДТ-69Н

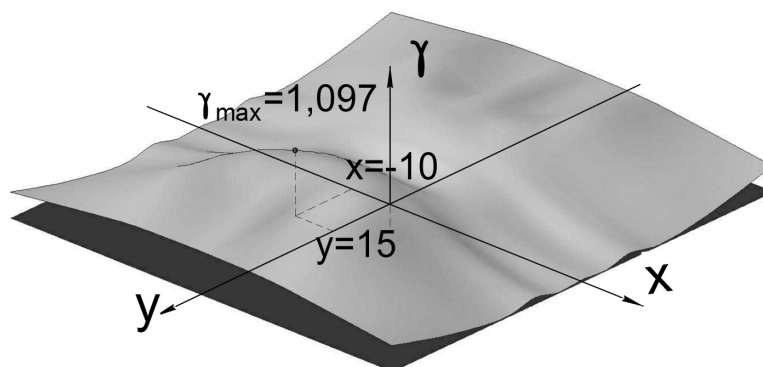


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента  $\gamma$  от координат положения центра расслоения для пластины на основе углеленты ЛУ-П-0.1 и связующего ЭНФБ

Для пластины, изготовленной на основе ткани УТ-900-2.5, ортотропной в осях  $(x, y)$ , поправочный коэффициент  $\gamma$  равен 1,06. Для пластины на основе ленты ЛУ-П-0.1, имеющей высокую степень анизотропии физико-механических характеристик, поправочный коэффициент  $\gamma$  достигает 1,097.



#### 4. Анализ результатов

Анализируя полученные в разд. 3 результаты, необходимо отметить некоторые тенденции относительно снижения прочности в плоских прямоугольных панелях с дефектом типа расслоения под действием равномерно-распределенной поперечной нагрузки:

1. Коэффициент снижения прочности не зависит от размеров пластины в плане и ее толщины при постоянной относительной площади и глубине расслоения. Это позволит нормировать относительные допустимые параметры дефекта для широкого класса конструкций с пропорциональными геометрическими размерами.

2. Конструкции со схемой укладки  $[\pm 45^\circ]$ , хотя и обладают более низкой несущей способностью, гораздо менее чувствительны к наличию расслоений. Учет этого эффекта при проектировании элементов ЛА (створки шасси, двери грузового люка, и.т.д.), подверженных внешним воздействиям, приводящим к образованию расслоений, позволит повысить их надежность.

3. Характер зависимости коэффициента снижения несущей способности от площади расслоения определяется соотношением упругих и прочностных свойств материала панели.

4. Влияние глубины расслоения на несущую способность панели с дефектом усиливается с увеличением его площади и должно быть обязательно учтено при нормировании допустимых параметров.

5. Положение расслоения оказывает незначительное влияние на несущую способность конструкции с дефектом под действием поперечной нагрузки и может не учитываться при нормировании допустимых дефектов в средне- и слабонагруженных конструкциях.

#### Выводы

Представленные в работе результаты подтверждают необходимость разработки методики определения допустимых параметров расслоений в авиационных конструкциях, которая учитывала бы:

- геометрию исследуемой конструкции;
- ФМХ материала и схему укладки;
- параметры расслоения, а именно: площадь, глубину и расположение;
- вид действующих нагрузок и степень ответственности конструкции.

Наличие такой методики позволило бы не только разрабатывать рекомендации по нормам допустимых дефектов, необходимые для приемки и текущего контроля композиционных изделий, но и обоснованно продлевать ресурс дефектных конструкций, что особенно важно для авиационной техники.

## Список использованных источников

1. Благонядежин В.Л. Технологические задачи конструкций из композитных материалов / В.Л. Благонядежин, А.Н. Воронцов, Г.Х. Мурзаханов // Механика композитных материалов. – 1987. – № 5. – С. 859 – 877.
2. Болотин В.В. Дефекты типа расслоений в конструкциях из композиционного материала / В.В. Болотин // Механика композитных материалов. – 1984. – № 2. – С. 239 – 255.
3. Bolotin V.V. Delamination in composite structures: its origin, buckling, growth and stability / V.V. Bolotin // Composites. – 1996. – Part B 27B – С. 129 – 145.
4. Бохоева Л.А. Влияние дефектов типа отслоений в слоистых пластинах на величину критической нагрузки / Л.А. Бохоева // Вестник БГУ. – 2008. – Вып. 5. – С. 243 – 264.
5. Naganarayana B.P. Strength reduction and delamination growth in thin and thick composite plates under compressive loading / B.P. Naganarayana, S.N. Atluri // Computational Mechanics. – 1995. – № 16. – С. 170 – 189.
6. Шашкова Л.В. Определение напряженно-деформированного состояния анизотропной пластины переменной толщины / Л.В. Шашкова, М.А. Шевцова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 5. – С. 5 – 12
7. Гайдачук В.Е. О допустимом уровне напряженности деталей авиаконструкций, возникающей при их производстве или ремонте упругим деформированием / В.Е. Гайдачук // Самолетостроение. Техника воздушного флота: Сб. науч. тр. – Х.: Высш. шк. при ХГУ. Вып. 54. – 1987. – С.79 – 83.

*Поступила в редакцию 05.03.10.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. С. А. Бычков,  
АНТК «Антонов», г. Киев*