



УДК 629.7.015.4.23

Ю. И. Дударьков, Е. А. Левченко, М. В. Лимонин

*ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н.Е. Жуковского» (ЦАГИ),
г. Жуковский, Московская область, Россия*

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПАКЕТА НА КРАЕВЫЕ ЭФФЕКТЫ В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТАХ

Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований по влиянию структуры композиционного пакета на краевые эффекты, возникающие на его свободных кромках. Расчеты проводились на трехмерных конечно-элементных моделях композита. Показано, что последовательность укладки монослоев в пакете существенным образом влияет на величину и распределение нормальных расслаивающих напряжений на его свободных кромках, что подтверждается экспериментальными данными.

Ключевые слова: краевой эффект, метод конечных элементов, слоистые композиты, расслаивающие напряжения.

Yu. I. Dudarkov, E. A. Levchenko, M. V. Linonin

*Central Aerohydrodynamic Institute named after professor N. E. Zhukovsky,
Zhukovsky, Moscow region, Russia*

THE INFLUENCE OF LAMINATE STACKING SEQUENCE ON LAYERED COMPOSITES EDGE EFFECTS

The numerical-experimental results of the investigation of influence of laminate stacking sequence on edge effects that occurs on structure free edges are presented. Three-dimensional models of composites have been used for calculations. It was shown and experimentally confirmed that laminate stacking sequence significantly effects on normal stress rate and distribution on laminate free edges.

Key words: edge effect, finite element method, layered composites, delamination stresses.

В настоящее время композиционные материалы начинают широко применяться в силовых конструкциях летательных аппаратов. Успешное использование композитов в конструкциях требует большого объема расчетных и экспериментальных работ в силу все еще малой степени исследования вопросов их применения как в теоретическом, так и практическом аспекте. Возникает необходимость проводить исследования поведения компози-

ционных структур в составе элементов и агрегатов конструкции, а также анализировать особенности деформирования слоистых композитов, которые могут влиять на его прочность. Весьма эффективным инструментом для проведения подобных исследований являются численные методы, в частности, метод конечных элементов (МКЭ).

В отличие от изотропных материалов, внутренняя структура композиционного пакета оказывает самое непосредственное влияние на характеристики его жесткости и прочности. Так, в конструкциях из слоистых ком-

позитов могут возникать краевые эффекты на ее свободных кромках. В данном случае под свободными кромками понимаются поверхности, нормальные к плоскости композита и не имеющие контакта с другими частями конструкции. Примером могут служить продольные кромки панелей или кромки стрингеров, не контактирующие с обшивкой. Основным источником образования краевых эффектов являются условия совместности деформаций монослоев, приводящие к возникновению объемного напряженного состояния на свободной кромке, с компонентами нормальных расслаивающих напряжений σ_z и напряжений поперечного сдвига τ_{yz} . Схема образования этого эффекта показана на рис. 1.

Вопросам изучения таких эффектов, в частности, посвящены работы [1–3]. Так, в работе [3] на основе конечно-элементного моделирования рассмотрены краевые эффекты, возникающие на свободных кромках композиционного пакета при его одноосном нагружении. Показано, что они могут быть причиной его преждевременного расслоения. Этот

факт подтверждается экспериментальными данными. Ниже на рис. 2 приведен характерный вид разрушения, полученный на образцах однострингерных и трехстрингерных композиционных панелей из одинакового материала при сжатии.

Среднее разрушающее напряжение по испытаниям 15 образцов составило 59,0 кгс/мм². Характерный тип разрушения большинства образцов – расслоение в зоне торца с последующим смятием. Также были проведены испытания на сжатие элементарных образцов материала данной структуры. Испытания проводились в захватах, которые препятствовали расслоению торцов образца. Было получено значение разрушающих напряжений сжатия 83,0 кгс/мм², что существенно отличается от напряжений разрушения образцов панели. Это дает основание сделать следующий вывод: причиной преждевременных разрушений экспериментальных образцов являются краевые эффекты, возникающие на свободных кромках и торцах панелей. Расчетные исследования прочности пакета на

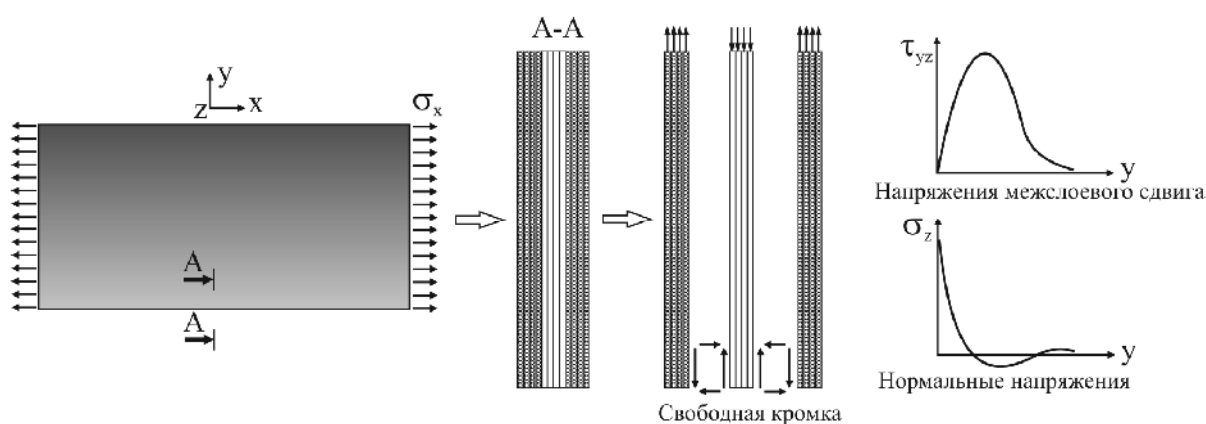


Рис. 1. Схема образования эффекта свободной кромки

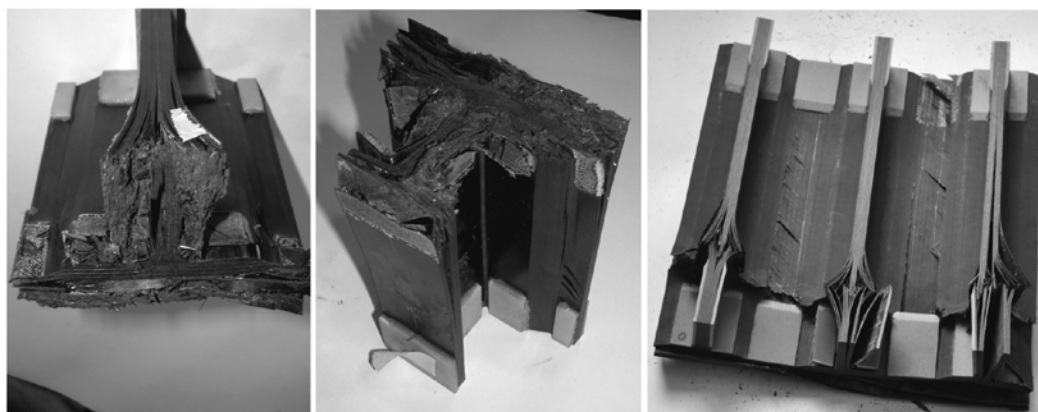


Рис. 2. Типовой вид разрушения экспериментальных образцов

трехмерных МКЭ-моделях показали напряжение расслоения $63,0 \text{ кгс/мм}^2$, что достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными.

В процессе этих исследований было отмечено, что на напряжения расслоения существенное влияние оказывает порядок укладки слоев по высоте пакета. В целях изучения влияния последовательности укладки монослоев в пакете на краевые эффекты были проведены соответствующие расчетные исследования. Моделировался пакет, содержащий восемь монослоев из материала, характеристики которого указаны в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики жесткости материала
монослоев

E_{11} , кгс/мм ²	$E_{22} = E_{33}$, кгс/мм ²	$G_{12} = G_{13}$, кгс/мм ²	G_{23} , кгс/мм ²	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	d
16 483	805	437	290	0,3	0,33	0,45	0,2

Конечно-элементная модель (КЭМ) в виде пластины строилась на основе 3-D ортотропных конечных элементов и нагружалась равномерным растягивающим усилием интенсивностью $\sigma_x = 84 \text{ кгс/мм}^2$. В зоне исследования краевого эффекта сетка имела сгущение для более подробного моделирования монослоев (рис. 3).

Каждый монослой моделировался 3 элементами по толщине. Варьировалось расположение различно ориентированных слоев в пакете при условии сохранения его толщины и сбалансированности слоев относительно срединной поверхности. Ниже на рис. 4 приведены результаты расчетов для различных

вариантов укладки слоев в виде распределения нормальных к плоскости пакета напряжений σ_z .

Видно, что краевые эффекты, возникающие на свободной кромке пакета, существенно зависят от его структуры как по месту расположения максимальных напряжений, так и по их величине. С точки зрения возможного расслоения пакета наиболее опасными являются нормальные напряжения растяжения σ_z . В этом плане укладки, представленные в левом столбце рисунков, являются наиболее неблагоприятными. Что касается напряжений поперечного сдвига τ_{xz} и τ_{yz} , то они слабо зависят от укладки пакета. Такие выводы можно найти и в ряде публикаций. Например, в [4] приведены данные по испытаниям композиционных пластин из материала T300/934 на растяжение. Пластины имели укладки, аналогичные рассмотренным выше. В табл. 2 приведены результаты обработки экспериментальных данных.

Таблица 2

Обработка результатов эксперимента

Укладка	Средние разрушающие напряжения, кгс/мм ²	Примечание
[0/45/-45/90]s	50,5	расслоение
[90/45/-45/0]s	61,6	нет расслоения
[0/90/45/-45]s	54,6	нет расслоения
[45/-45/0/90]s	44,1	расслоение

При сопоставлении экспериментальных данных с результатами моделирования становится очевидным, что разрушение с расслоением образца происходит в случаях, когда на

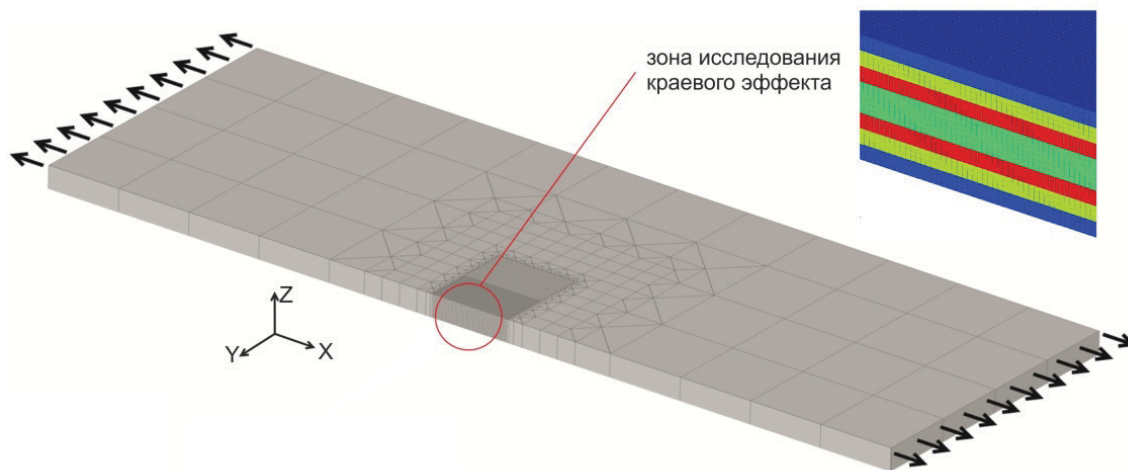


Рис. 3. КЭМ пластины, нагруженной растяжением

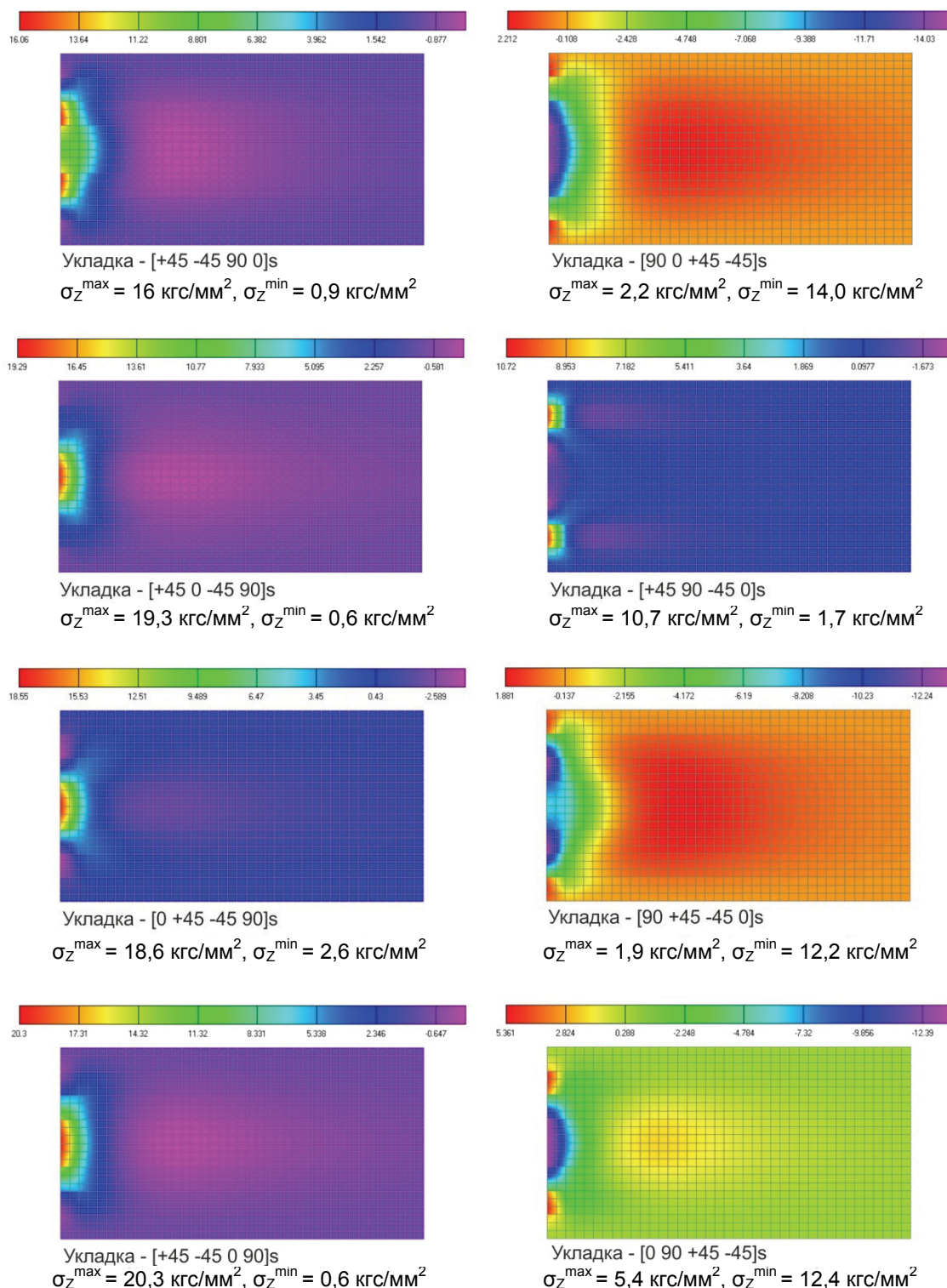


Рис. 4. Нормальные напряжения σ_z при различных вариантах укладки монослоев пакета

свободной кромке действуют положительные (расслаивающие) нормальные напряжения σ_z . Рассматривая значения разрушающих напряжений, можно заключить, что последовательность укладки монослоев в пакете оказывает весьма значительное влияние на его прочность.

В этой же работе приведены результаты обследования свободных кромок в виде фотографий после воздействия 95 % разрушающей нагрузки на разных образцах. Ниже на рис. 5 и 6 дано сопоставление расчетных и экспериментальных данных по зонам возможного расслоения.

На рис. 5 видно расслоение образца $[0/+45/-45/90]_s$ по слою с ориентацией 90° , где по результатам моделирования и действуют наибольшие нормальные расслаивающие напряжения.

На рис. 6 в образце с укладкой $[90/+45/-45/0]_s$ расслоение не наблюдается, поскольку напряжение σ_z является сжимающим. Но, в свою очередь, появилось растрескивание матрицы монослоев с укладкой $\pm 45^\circ$, что соответствует критерию разрушения Хилла.

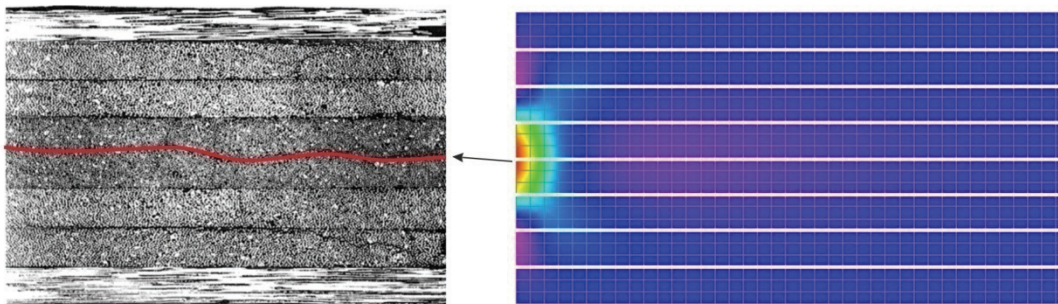
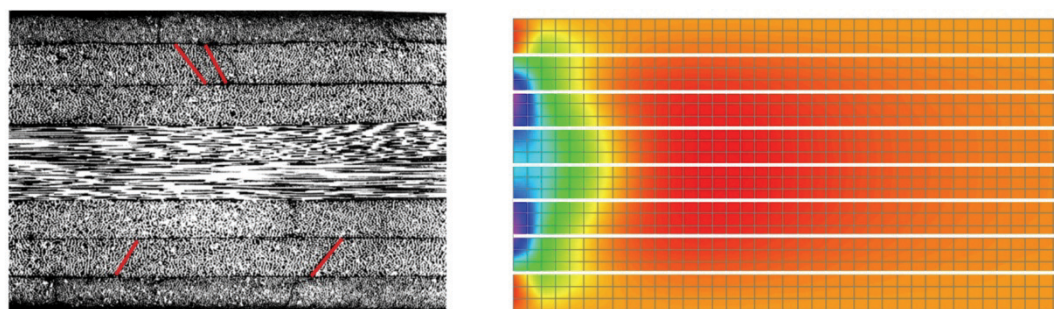
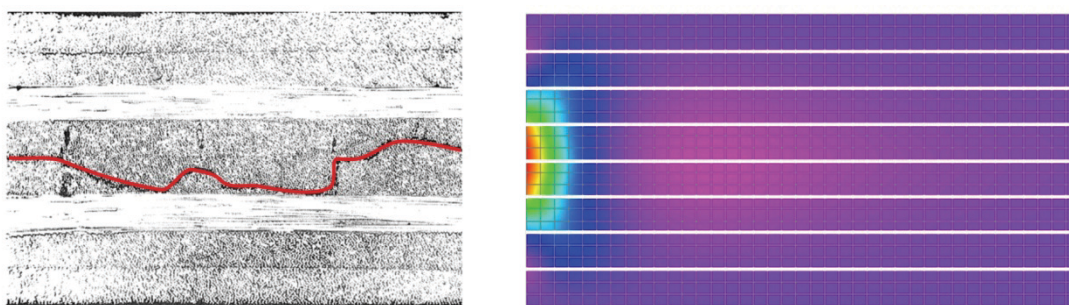
На рис. 7 представлена фотография испытываемого образца с укладкой $[+45/-45/0/90]_s$ по срезу в плоскости симметрии образца. На данном изображении видно, что растрескивание на свободной кромке развивается на всю глубину образца.

В данном случае приведены расчетные и экспериментальные результаты при растяжении образцов. Следует иметь в виду, что при сжатии эффекты на свободной кромке будут носить противоположный характер, так как знаки нормальных напряжений σ_z поменяются, и расслоение композита будет наблюдаться уже в других зонах.

Оценим степень влияния краевого эффекта на прочность композита. Для этого воспользуемся критерием Хашина – Ротема [5]. В данном критерии прочность волокна и матрицы оцениваются отдельно.

Прочность волокна определяется следующими соотношениями:

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 = 1 \quad \text{при } \sigma_1 > 0;$$

Рис. 5. Укладка $[0/+45/-45/90]_s$ Рис. 6. Укладка $[90/+45/-45/0]_s$ Рис. 7. Укладка $[+45/-45/0/90]_s$

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 = 1 \text{ при } \sigma_1 < 0.$$

Прочность матрицы определяется соотношениями:

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 = 1 \text{ при } \sigma_2 > 0;$$

$$\left(\frac{\sigma_2}{2S_{23}}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_{23}}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_2}{Y_c} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 = 1 \text{ при } \sigma_2 < 0.$$

Здесь X_T , X_c , Y_T , Y_c , S_{12} – прочность монослоя на растяжение, сжатие и сдвиг.

Условия межслойного расслоения определяются соотношением

$$\left(\frac{\sigma_3}{Z_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{31}}{S_{31}}\right)^2 = 1,$$

где Z_T , S_{23} , S_{31} определяют прочность композита на отрыв и поперечный сдвиг.

Оценка прочности данной структуры по этому критерию на основе плосконапряженного состояния композита дает разрушающее напряжение при растяжении пакета $\sigma_x = 72,0$ кгс/мм², при этом оно не зависит от порядка укладки монослоев. Расчет 3-D модели композита с наиболее неблагоприятной укладкой $[+45/-45/0/90]_s$ дает значение расслаивающих напряжений $\sigma_3 = 20,3$ кгс/мм² при действующем напряжении растяжения пакета $\sigma_x = 84,1$ кгс/мм². Принимая за разрушающие напряжения пакета на отрыв $Z_T = 8,0$ кгс/мм², получим напряжение начала процесса расслоения композита на свободной кромке $\sigma_x = 33,1$ кгс/мм². Рассматривая эту величину, следует иметь в виду, что краевой эффект на свободной кромке реализуется в весьма ограниченной области. Поэтому разрушения

пакета сразу не произойдет. По мере нарастания нагрузки зона расслоения будет увеличиваться до некоторого критического значения, при котором произойдет полное исчерпание несущей способности пакета. Однако напряжения разрушения будут ниже ожидаемых, что подтверждается расчетными и экспериментальными данными. Моделирование процесса роста трещины в композите в настоящее время является весьма сложной и до конца не решенной задачей. Тем не менее эффекты свободной кромки следует учитывать при проектировании конструкций из слоистых композитов и по возможности предотвращать их негативное влияние.

Библиографические ссылки

1. Alan Baker, Stuart Dutton, Donald Kelly. Composite Materials for Aircraft Structures. Second Edition Published by American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. Virginia, 2004.
2. Гришин В. И., Дзюба А. С., Дударьков Ю. И. Прочность и устойчивость элементов и соединений авиационных конструкций из композитов. М.: Физматлит, 2013.
3. Дударьков Ю. И., Левченко Е. А., Лимонин М. В. Эффект свободной кромки в слоистых композитах // Авиационная промышленность. 2012. № 4. С. 48–53.
4. Bjeletich J. G., Crossman F. W., Warren W. J. The Influence of Stacking Sequence on Failure Modes in Quasi-Isotropic Graphite-Epoxy Laminate. // Failure Modes in Composites IV, AIME. 1977. P. 118.
5. Hashin Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites // Journal of Applied Mechanics. 1980. 47. P. 329–334.

Статья поступила в редакцию
11.06.2014 г.