

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ*

*Н.А. КОВАЛЕНКО^{1,2}, аспирант, инженер
И.П. ОЛЕГИН¹, доктор техн. наук, профессор
Т.Б. ГОЦЕЛЮК^{1,2}, канд. техн. наук, доцент,
нач-к сектора
В.Н. ЧАПЛЫГИН², нач-к отдела
П.М. ПЕТРОВ²
(¹НГТУ, г. Новосибирск,
²ФГУП «СибНИИ им. С. А. Чаплыгина»,
г. Новосибирск)*

Поступила 12 ноября 2013

Рецензирование 15 января 2014

Принята к печати 17 января 2014

Коваленко Н.А. – 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: natasha_kovalenko@ngs.ru

Представлены результаты экспериментального исследования прочности образцов из слоистого углепластика с концентраторами напряжений типа цилиндрическое и зенкованное отверстие. Приведены фотографии испытанных образцов как с концентраторами напряжений, так и гладкого образца для типовой укладки слоев. Степень падения прочности, полученная экспериментальным путем, в зависимости от типа концентратора и материала образца представлена в виде таблицы. Наряду с экспериментом проведена численная оценка прочности исследуемых образцов с использованием градиентного критерия (случай сжатия) и критерия по напряжениям в точке Нуизмера (случай растяжения). Аналогично степень падения прочности образцов, полученная с помощью критериев, представлена в виде таблиц. Исходя из сравнения результатов, полученных численным и экспериментальным путем, предложены параметры критерия Нуизмера, соответствующие экспериментальным разрушающим напряжениям образцов. Приведены рекомендации по применению рассмотренных критериев оценки прочности к исследуемым типам слоистых композитов в зависимости от вида концентратора напряжений.

Ключевые слова: углепластик, критерии разрушения, концентратор напряжений, коэффициент падения прочности.

Введение

Большинство известных критериев разрушения слоистых композиционных материалов (СКМ) кроме паспортных данных монослоя опираются еще и на дополнительно определяемые экспериментальные параметры, будь то критерий

разрушения для гладкого образца или образца, содержащего концентратор напряжений (КН). Известно, что при оценке предела прочности гладких образцов из СКМ такие критерии, как критерий Аззи-Цая, Норриса и др. [1–4], показывают хорошее совпадение с экспериментально определенным пределом прочности, причем

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, по государственному заданию № 2014/138, проект № 435.

использование, в частности, критерия Аззи–Цая не предполагает знания экспериментально определяемых параметров кроме паспортных данных монослоя. Это существенно облегчает задачу расчетчика, поскольку зачастую известны паспортные данные монослоя.

Более сложной представляется ситуация с элементами конструкций, выполненных из СКМ, содержащих концентраторы напряжений, в особенности концентраторы, отличные от отверстий, не содержащих включений, например, цилиндрические или зенкованные отверстия, заполненные болтом. Для широкого круга конструктивных концентраторов напряжений в первую очередь встает вопрос, насколько тот или иной концентратор напряжений снижает несущую способность элемента конструкции.

В настоящей работе предложена численно-экспериментальная оценка прочности образцов с вышеуказанными концентраторами, основанная на результатах экспериментов и численном моделировании задачи определения несущей способности исследуемых образцов с использованием критериев разрушения. Численная реализация задачи осуществлялась методом конечных элементов (МКЭ). По итогам проведенного эксперимента составлена таблица коэффициентов падения прочности, свидетельствующая о зависимости несущей способности образцов от наличия КН. Аналогичная таблица составлена для результатов, полученных численным путем.

1. Методика и результаты исследования

Для испытания были представлены типовые многослойные образцы, выполненные из материалов, используемых в авиационных конструкциях, на основе углеволокна и эпоксидной смолы следующих укладок (механические свойства указаны в табл. 1):

типовая (51 слой): $0^\circ - 41,2\%$; $\pm 45^\circ - 39,2\%$; $90^\circ - 19,6\%$;

квазиизотропная (51 слой): $0^\circ - 27,5\%$; $\pm 45^\circ - 47,0\%$; $90^\circ - 25,5\%$;

сдвиговая (51 слой): $0^\circ - 11,8\%$; $\pm 45^\circ - 78,4\%$; $90^\circ - 9,8\%$.

Таблица 1

Механические характеристики материала монослоев

δ , мм	σ_{1B+} , МПа	E_{1+} , МПа	σ_{2B+} , МПа	E_{2+} , МПа	μ_{12}
0,14–0,15	1763	126530	51,02	8160	0,33
σ_{1B-} , МПа	E_{1B-} , МПа	σ_{2B-} , МПа	E_{2-} , МПа	τ_{B12} , МПа	G_{12} , МПа
1428,6	102040	295,9	8060	88	3877

Примечание: δ – толщина монослоя; μ – коэффициент Пуассона; σ_{B+} , σ_{B-} , τ_B – предел прочности на растяжение, сжатие, сдвиг; E_+ , E_- , G – модуль упругости на растяжение, сжатие, сдвиг; 1, 2, 3 – оси местной системы координат вдоль волокон, поперек волокон, по высоте.

В центральной части образцов размером 210×36 мм (группа образцов на растяжение) и 300×36 мм (на сжатие) содержится одиночный концентратор напряжений (цилиндрическое незаполненное (ЦН), цилиндрическое заполненное (ЦЗ), зенкованное незаполненное (ЗН) и зенкованное заполненное (ЗЗ) отверстия) с диаметром отверстия 6 мм (с цилиндрической стороны).

Испытания представленных образцов были проведены с целью определения величины падения прочности, обусловленного наличием конструктивных отверстий, в изделиях из ПКМ на универсальной электрогидравлической машине Biss UTM-100kN. Нагружение образцов выполнялось с применением гидрозахватов, при этом скорость перемещения штока составляла 6 мм/мин. Для определения модуля упругости гладких образцов (ГО) на рабочую часть образца устанавливался экстензометр с базой 25 мм. Фотографии образцов, иллюстрирующие характер разрушения после проведения испытаний, представлены на рис. 1.

В табл. 2 приведены коэффициенты потери (падения) прочности k образцов при наличии КН, которые представляют собой отношение разрушающего напряжения для образца с КН к прочности гладкого образца.

Сопоставление коэффициентов потери прочности для образцов с КН показывает, что отверстия существенно снизили прочность образцов по сравнению с прочностью гладких образцов. Степень снижения прочности зависит от вида нагружения (растяжение/сжатие), укладки слоев, типа отверстия (цилиндрическое/зенкованное) и наличия в отверстии болта.

