УДК 620.172/178.2

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ*

Н.А. КОВАЛЕНКО*[1,2]*, аспирант, инженер
И.П. ОЛЕГИН*[1]*, доктор техн. наук, профессор
Т.Б. ГОЦЕЛЮК*[1,2]*, канд. техн. наук, доцент, нач-к сектора
В.Н.ЧАПЛЫГИН*[2]*, нач-к отдела
***П.М. ПЕТРОВ*[2]**
(*[1]НГТУ, г. Новосибирск,*
***[2]ФГУП «СибНИА 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.

Таблица 1

Механические характеристики материала монослоев

δ, мм	$\sigma_{1в+}$, МПа	E_{1+}, МПа	$\sigma_{2в+}$, МПа	E_{2+}, МПа	μ_{12}
0,14–0,15	1763	126530	51,02	8160	0,33
$\sigma_{1в–}$, МПа	$E_{1в–}$, МПа	$\sigma_{2в–}$, МПа	$E_{2–}$, МПа	$\tau_{в12}$, МПа	G_{12}, МПа
1428,6	102040	295,9	8060	88	3877

Примечание: δ – толщина монослоя; μ – коэффициент Пуассона; $\sigma_{в+}$, $\sigma_{в–}$, $\tau_{в}$ – 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.

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° – 41,2 %; ±45° – 39,2 %; 90° – 19,6 %;

квазиизотропная (51 слой): 0° – 27,5 %; ±45° – 47,0 %; 90° – 25,5 %;

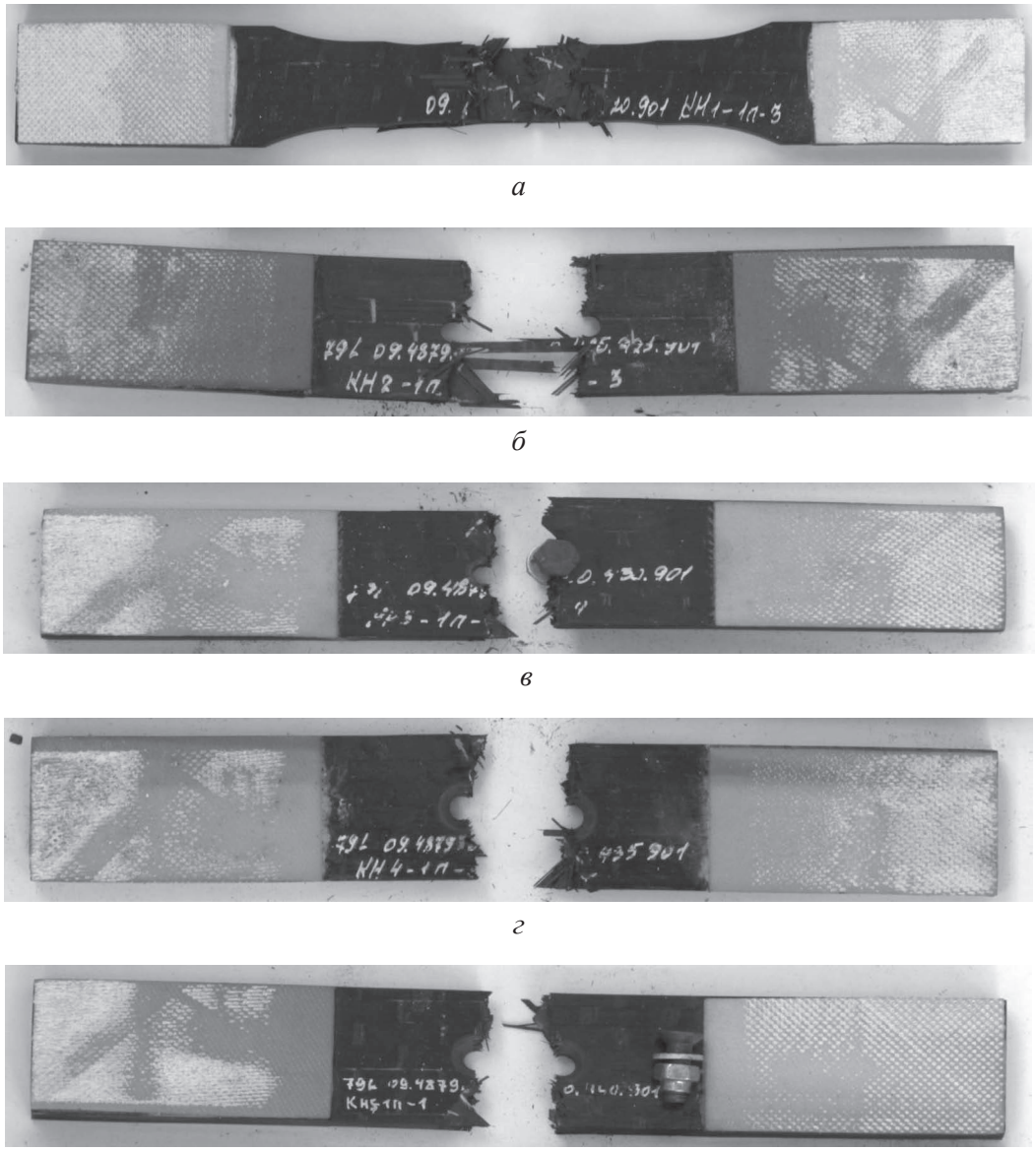
сдвиговая (51 слой): 0° – 11,8 %; ±45° – 78,4 %; 90° – 9,8 %.

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.



а

б

в

г

д

Рис. 1. Изображение образцов укладки типовая после испытаний:

а – гладкий образец; *б* – с цилиндрическим незаполненным отверстием; *в* – с цилиндрическим заполненным отверстием; *г* – с зенкованным незаполненным отверстием; *д* – с зенкованным заполненным отверстием

Таблица 2

Коэффициенты потери прочности (эксперимент)

Вид нагружения	Растяжение					Сжатие				
Укладка	ГО	ЦН	ЦЗ	ЗН	ЗЗ	ГО	ЦН	ЦЗ	ЗН	ЗЗ
Типовая	1	0,527	0,497	0,508	0,476	1	0,528	0,856	0,520	0,754
Квазиизотропная	1	0,517	0,525	0,490	0,493	1	0,732	1,244	0,703	0,941
Сдвиговая	1	0,730	0,787	0,787	0,671	1	0,723	1,080	0,698	1,039

Если говорить о зависимости прочности от *вида нагружения*, то в целом можно отметить, что отверстия снижают прочность образцов на растяжение больше, чем на сжатие. И хотя в ряде случаев это отличие находится в пределах погрешности эксперимента, однако k у растягиваемых образцов оказывается меньше, чем у сжимаемых (кроме цилиндрического незаполненного отверстия при сдвиговой укладке).

Говоря о *типе отверстия* и *заполнении*, можно отметить, что у образцов с зенкованным отверстием прочность оказалась ожидаемо ниже,

чем у образцов с цилиндрическим отверстием в силу более высокой концентрации напряжений. Заполнение отверстия болтом слабо изменило прочность образцов при растяжении. Наблюдается отличие k в пределах погрешности эксперимента (до 10 %) как в сторону увеличения, так и в сторону снижения прочности. При сжатии заполнение отверстия болтом увеличивает прочность для всех видов образцов. В ряде случаев она оказалась несколько выше (в пределах погрешности эксперимента), чем прочность гладких образцов.

По данным проведенного эксперимента среди всех *укладок* сдвиговая оказалась наименее чувствительна к концентраторам напряжений в виде отверстий.

2. Критерии прочности

Для оценки прочности образцов с концентраторами напряжений было решено использовать критерий по напряжению в точке – критерий Нуизмера [7] и градиентный критерий [5–6]. Как известно из сравнения с экспериментом, для образцов с отверстием, подвергнутых растяжению, наиболее точным и, кроме того, удобным в использовании является критерий по напряжениям в точке, поэтому при оценке прочности на растяжение использовался этот критерий.

Применение данного критерия сводится к определению концентрации напряжений на некотором расстоянии l_0 от точки максимального напряжения. Это расстояние l_0 является характерным параметром, зависящим от материала образца [7]. Можно представить характеристический размер как функцию радиуса отверстия в виде

$$l_0 = k\sqrt{d}, \qquad (1)$$

где k – коэффициент, подбираемый на основе нескольких экспериментов с разными радиусами отверстия; d – диаметр отверстия. Искомое разрушающее напряжение по критерию Нуизмера определяется следующим образом:

$$\sigma_{\text{разр}} = \frac{\sigma_b}{K_t}, \qquad (2)$$

где $\sigma_{\text{разр}}$ – разрушающее напряжение по Нуизмеру; σ_b – предел прочности гладкого образца; K_t – коэффициент концентрации напряжений на характерном расстоянии l_0 от точки максимума. У зенкованного отверстия концентрация возникает в зоне сопряжения конической и цилиндрической областей. Как для цилиндрического, так и для зенкованного отверстий величина характерного расстояния выбиралась равной 1 мм.

Для оценки прочности образцов при сжатии использовались два критерия: критерий Нуизмера и градиентный критерий. Согласно градиентному критерию параметром, отвечающим за разрушение, является параметр подобия L/G^{o}, где L – характеристический размер, пропорциональный объему материала, находящегося в зоне высоких напряжений, а G^{o} – относительный градиент напряжений:

$$G^{\text{o}} = G/\sigma_{\max}, \qquad (3)$$

где $G = d\sigma/dx$ – градиент напряжений у контура отверстия; $\sigma_{\max}$ – максимальное напряжение на контуре отверстия.

Условие разрушения образца с отверстием диаметра d можно записать в виде

$$f(d/G^{\text{o}})\sigma_{\max} = \sigma_{\text{в}}, \qquad (4)$$

где $f(d/G^{\text{o}})$ — некоторая функция параметра d/G^{o}, определяемая из эксперимента:

$$f(d/G^{\text{o}}) = 0{,}4107 + 0{,}022\,(d/G^{\text{o}}) - 0{,}0002\,(d/G^{\text{o}})^2.$$

Результаты численной оценки падения прочности образцов представлены в табл. 3.

3. Обсуждение результатов

Проведенное расчетное исследование прочности испытанных образцов позволяет судить об обоснованности применения рассмотренных критериев разрушения для той или иной группы образцов. Так, критерий Нуизмера для случая растяжения в предположении, что характеристическое расстояние равно 1 мм, дает приемлемые результаты для случая зенкованного заполненного отверстия для всех видов укладки и для цилиндрического незаполненного отверстия в случае типовой и сдвиговой укладки (см. табл. 3). Удовлетворительное совпадение можно отметить для случая сдвиговой укладки при наличии заполненного цилиндрического отверстия и для типовой и квазиизотропной укладки при наличии зенкованного незаполненного отверстия.

Таблица 3

Коэффициенты потери прочности (по критериям)

Вид нагружения	Растяжение				Сжатие							
Критерий	Нуизмера				Нуизмера				Градиентный			
	ЦН	ЦЗ	ЗН	ЗЗ	ЦН	ЦЗ	ЗН	ЗЗ	ЦН	ЦЗ	ЗН	ЗЗ
Тип	0,562	0,633	0,445	0,513	0,561	0,709	0,441	0,592	0,635	1,150	0,492	0,827
Квази-изотропная	0,555	0,653	0,439	0,496	0,555	0,689	0,435	0,614	0,701	1,120	0,549	0,852
Сдвиговая	0,591	0,732	0,459	0,671	0,561	0,650	0,514	0,625	0,797	1,023	0,670	0,841

Ожидать хорошего совпадения оценки прочности с помощью критерия Нуизмера в предположении одинакового для всех укладок характеристического расстояния нельзя, так как первоначально характеристическое расстояние введено как характеристика материала, а следовательно, должна быть получена для той или иной укладки экспериментально. В связи с этим можно рекомендовать уточненные в ходе экспериментального исследования значения характеристического расстояния для пакетов на основе указанного монослоя (табл. 4).

Таблица 4

Характеристическое расстояние l_0 по критерию Нуизмера, соответствующее эксперименту, для случая растяжения, мм

Укладка	ЦН	ЦЗ	ЗН	ЗЗ
Типовая	0,82	0,42	1,39	0,77
Квазиизотропная	0,80	0,39	1,32	0,98
Сдвиговая	3,16	1,55	3,3	1,32

Поскольку критерий Нуизмера при сжатии не всегда показывает согласующиеся с экспериментом результаты и в практике используется достаточно редко, определять значения характерного расстояния для случая сжатия нецелесообразно.

Оценка прочности образцов при сжатии на основе градиентного критерия в целом показывает приемлемые результаты (см. табл. 3). Исключение составляет случай зенкованного заполненного отверстия для сдвиговой укладки (погрешность ≈19 %), незаполненного и заполненного цилиндрического отверстия для типовой укладки (погрешность ≈20 и 34 % соответственно) и зенкованного незаполненного отверстия в случае квазиизотропной укладки (погрешность ≈ 21 %).

Выводы

1. Результаты расчетной оценки прочности образцов при сжатии на основе критерия Нуизмера показывают, что использование данного критерия в большинстве случаев дает значительно заниженную прочность образцов и этот критерий не может быть рекомендован к использованию для данного вида нагружения (см. табл. 3).

2. Для оценки прочности образцов с концентратором напряжений среди исследованных критериев разрушения наиболее удачным является градиентный критерий, в особенности для концентраторов цилиндрического типа как с заполненным, так и незаполненным отверстием. Это имеет место для материалов с меньшим содержанием слоев 0° (квазиизотропная и сдвиговая укладки), а также для зенкованных отверстий для укладки типовая.

3. При использовании критерия Нуизмера при растяжении для обеспечения более точного результата (для предложенных материалов) следует опираться на характерные расстояния, указанные в табл. 4.

Список литературы

1. *Tsai S.W., Wu E.M.* A general theory of strength for anisotropic material // Journal of Composite Materials. – 1971. – Vol.5, pp.58–80.

2. *Azzi V.D., Tsai S.W.* Anisotropic strength of composites // Experimental mechanics. – 1965. – Vol.5, pp.283–288.

3. *Norris C.B.* Strength of orthotropic materials subjected to combined stresses // Forest products laboratory report. – 1962. – Report no.1816, pp.1–40.

4. *Максименко В.Н., Олегин И.П.* Теоретические основы методов расчета прочности конструкций из композитов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 239 с.

5. *Сироткин О.С., Гришин В.И, Литвинов В.Б.* Проектирование. Расчет и технология соединений авиационной техники. – М.: Машиностроение, 2006. – 331 с.

6. *Беспалов В.А., Гоцелюк Т.Б.* Исследование критериев разрушения элементов из КМ в зонах концентрации напряжений при сжатии: отчет по НИР №14–12. – Новосибирск: СибНИА, 2012. – 104 с.

7. *Witney J.M., Nuismer R.J.* Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations // Journal of Composite Materials. – 1974. – Vol. 8, pp.253–265.

OBRABOTKA METALLOV
(METAL WORKING • MATERIAL SCIENCE)
N 1(62), January – March 2014, Pages 69–75

Numerical-experimental study of the strength of constructional elements, made of carbon laminate

Kovalenko N.A.[1,2], Post-graduate Student, Engineer, e-mail: natasha_kovalenko@ngs.ru
Olegin I.P.[1], D.Sc. (Engineering), Professor
Gotseluk T.B.[1,2], Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of Sector
Chaplygin V.N.[2], Head of Department
Petrov P.M.[2], Mechanic

[1]Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
[2]Siberian Aeronautical Research Institute named after S.A. Chaplygin, 21 Polzunov st., Novosibirsk, Russian Federation

Received 12 November 2013
Revised 15 January 2014
Accepted 17 January 2014

Abstract

Experimental results on the strength of laminate samples with stress concentrators of cylindrical hole- and counterformed hole-type are presented. Photographs of the samples after testing either with stress concentrators or smooth specimen with typical laminate stacking are showed. The rate of the strength reduction, obtained by means of experiments, and depending on the concentrators' type and the material of a sample, is presented in a tabular form. Along with the experiment, a numerical evaluation of the samples' strength with the usage of a gradient criterion (the case of compression) and Nuizmer criterion for stress in a point (the case of stretching) is conducted. Similarly, the rate of the strength reduction, obtained with the usage of criteria, are presented in a tabular form. Based on the comparison of the results obtained by numerical and experimental way, the parameters of the Nuizmer criterion corresponding to the experimental samples' rupture stresses are offered. Guidance on the application of the considered criteria of the strength assessment to the layered composites under examination, depending on the type of stress concentrator is provided.

Keywords: carbon laminate, fracture criterion, stress concentrator, degradation strength factor, strength reduction index.

References

1. Tsai S.W., Wu E.M. A general theory of strength for anisotropic material. Journal of Composite Materials. 1971, Vol.5, pp. 58–80.

2. Azzi V.D., Tsai S.W. Anisotropic strength of composites. Experimental mechanics. 1965, Vol.5, pp. 283–288.

3. Norris C.B. Strength of orthotropic materials subjected to combined stresses. Forest products laboratory report. 1962, Report no.1816, pp.1–40.

4. Maksimenko V.N., Olegin I.P. *Teoreticheskie osnovy metodov rascheta prochnosti konstrukcij iz kompozitov* [Theoretical basis of the calculation of the structural strength of composites]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2006. 239 p.

5. Sirotkin O.S., Grishin V.I, Litvinov V.B. *Proektirovanie. Raschet i tehnologija soedinenij aviacionnoj tehniki* [Designing. Calculation and connection technology aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 331 p.

6. Bespalov V.A., Goceljuk T.B. *Issledovanie kriteriev razrushenija jelementov iz KM v zonah koncentracii naprjazhenij pri szhatii: otchjot po NIR №14–12* [Report on research work no. 14-12 “Investigation of fracture criteria elements of composite materials in the areas of stress concentration under compression”]. Novosibirsk, SibNIA, 2012. 104 p.

7. Witney J.M., Nuismer R.J. Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations. Journal of Composite Materials. 1974, Vol. 8, pp.253–265.