

УДК 620.179

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОБОИН В ПЛАСТИНАХ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

О.А. ШЕВЧЕНКО, А.Г. ДЖОРДЖИШВИЛИ

*Национальный авиационный университет, г. Киев,
Украина*

Рассмотрена проблема моделирования сквозных пробоин, вызванных действием баллистических объектов (пуль, снарядов, осколков) в пластинах из композиционного материала (КМ) при одноосном растяжении. Пробоина моделируется сквозным отверстием с двумя зонами повреждения, расположенными в местах наибольшей концентрации растягивающих напряжений в направлении наиболее вероятного развития разрушения.

Для решения задач разрушения КМ с различными концентраторами напряжений (вырезами, отверстиями, трещинами) наибольшее распространение получили макроскопические методы, в которых КМ представляется как квазиоднородный материал с осредненными упругими характеристиками. Подробный обзор и анализ применимости данных методов дан в работах [1; 2; 3]. В работе [4] рассматривается модель разрушения пластин из КМ с отверстием, по которой зона повреждения моделируется эквивалентной трещиной. Предельный размер зоны повреждения был найден равным 1,9 мм из сопоставления кривых, полученных расчетным методом, и результатов экспериментов, которые были представлены в работе [5]. В одной из предыдущих работ первого автора [6] было предложено зону предельного состояния заменить эквивалентной трещиной, причем предельная длина этой зоны предполагалась переменной (зависящей от распределения напряжения у концентратора). Эта длина находится вместе с предельным напряжением из пересечения двух кривых. Одна из кривых представляет собой график зависимости длины эквивалентной трещины от растягивающего напряжения σ ($l = F(\sigma)$) или относительного напряжения σ/σ_B в пластине ($l = F_1(\sigma/\sigma_B)$). Вторая кривая представляет зависимость критического напряжения от критической длины трещины (с позиций механики разрушения).

Построение данных зависимостей представляет основную сложность при реализации метода, особенно в случае анизотропного материала, отверстия или вырезов сложной формы и близости края пластины. В работе [6] для квазиизотропного КМ с круглыми отверстиями различного диаметра было получено, что величина зоны предельного состояния уменьшалась с 1,74 мм до 1,6 мм при увеличении радиуса отверстия до 12 мм, а далее оставалась примерно постоянной. Учитывая незначительную разницу в длине зоны предельного состояния, предлагается при анализе пробоин в выбранном подходе считать ее постоянной, что существенно облегчит расчеты и позволит сделать метод оценки прочности более универсальным.

Если в элементе из КМ имеется отверстие или сквозной пробой, то окончательное разрушение обычно происходит в результате мгновенного развития трещиноподобного дефекта от имеющегося концентратора напряжения. В подходе, на котором базируется предложенная модель, полагается, что в материале в месте наибольшей концентрации напряжений возникает и с ростом нагрузки увеличивается зона повреждения S , и что разрушение наступает, когда данная зона достигает своей крити-

ческой длины C_C . Данная зона может быть представлена эквивалентной (фиктивной) трещиной, которая при предельной нагрузке достигает своей критической длины. Предельная величина данной зоны повреждения определяется на основе испытаний стандартных образцов на прочность и трещиностойкость.

В предложенной модели считаем, что предельное состояние наступает, когда среднее значение нормальных напряжений на предельной длине зоны повреждения становится равным пределу прочности σ_B . Таким образом, критерий разрушения, соответствующий предложенной модели, математически может быть записан так:

$$\frac{1}{c_c} \int_a^{a+c} \sigma_y(x,0) dx = \sigma_B. \quad (1)$$

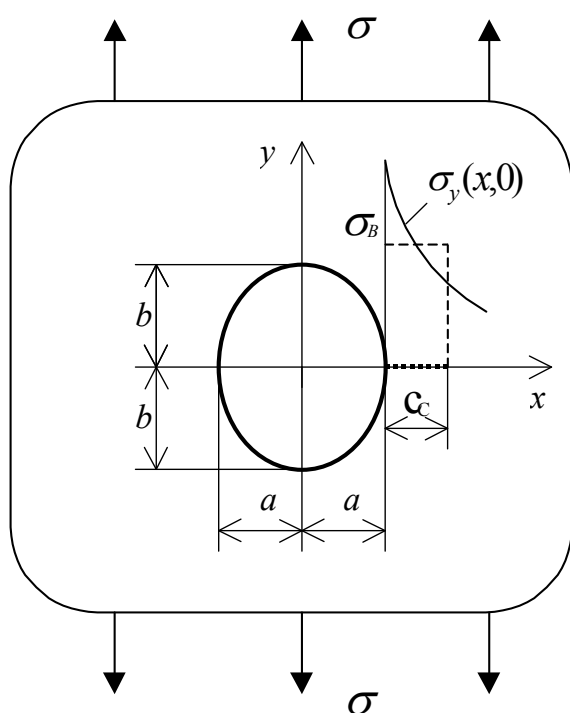


Рис. 1

Здесь a – полуразмер отверстия или пробоины, а $\sigma_y(x, 0)$ – распределение напряжения у отверстия в направлении разрушения (рис. 1).

Подход, основанный на выбранной для анализа модели разрушения, описываемой формулой (1), подобен D – критерию Чена [7], который, в свою очередь, был разработан как вариант критерия средних напряжений Уитни – Ньюмера [8]. Отличие предложенного критерия от известных состоит в определении критической длины зоны повреждения. Поскольку перед самым моментом разрушения зона повреждения достигает критической длины и в данном подходе моделируется эквивалентной трещиной, поэтому предлагается определить критический коэффициент интенсивности напряжений (КИН) K_{IC} из испытаний на растяжение плоских образцов с боковым пропилом, моделирующим трещину,

а критическую длину эквивалентной трещины l_c , которая по принятому условию равна C_C , определяем из равенства

$$K_{IC} = \sigma_B \sqrt{\pi \cdot l_c}.$$

Предложенная модель пробоины применима, когда направление разрушения является перпендикулярным приложенному напряжению и происходит в наиболее ослабленном сечении пластины. Основная сложность применения критерия (1) для моделирования пробоин в КМ состоит в определении напряжений у концентратора. Сквозные пробоины в хрупких КМ, вызванные действием высокоскоростных (более 300 м/с) объектов, имеют достаточно выраженный контур без видимой зоны повреждения и расслоений возле него. Контур данных повреждений, имеет форму близ-

кую к эллипсу и зависит от жесткости пластины в различных направлениях, а также от условий закрепления пластины.

Большинство конструкционных КМ, применяемых в силовых элементах конструкций, могут быть отнесены к хрупким материалам. Рассмотрим применение предложенного критерия (1) для КМ данного типа.

Рассмотрим тонкую пластину конечной, но достаточно большой ширины $\{x = \pm W\}$ из хрупкого анизотропного (ортотропного) материала. Пластина имеет центральное эллиптическое отверстие (вырез) с радиусами a и b в направлении осей x и y , соответственно, и под действием напряжения на бесконечности, равном σ и действующем вдоль оси y , находится в условиях плоского напряженного состояния. Полагаем, что пластина ортотропная и направление главных осей ортотропии совпадает с осями x и y . Определим предельное напряжение для пластины с эллиптическим вырезом с помощью предложенного критерия (1).

Для пластины большой ширины ($a/W \rightarrow 0$) распределение напряжения около эллиптического отверстия принимаем как для бесконечной пластины [9]. На оси x (линии вероятного развития повреждения) имеем

$$\sigma_y(x,0) = \sigma \left[1 + \frac{1}{\beta_1 - \beta_2} \sum_{i=1}^2 (-1)^{i-1} \frac{\beta_i^2}{B - \beta_i} \left(1 - \frac{X}{\sqrt{X^2 + (B^2/\beta_i^2 - 1)}} \right) \right]. \quad (2)$$

Здесь $B = b/a$, $X = x/a$, а β_1 и β_2 – корни характеристического уравнения, которые выражаются через упругие константы ортотропного материала, a_{ij} следующим образом:

$$\beta_{1,2}^2 = \frac{2a_{12} + a_{66}}{2a_{11}} \pm \sqrt{\left(\frac{2a_{12} + a_{66}}{2a_{11}} \right)^2 - \frac{a_{22}}{a_{11}}}. \quad (3)$$

При увеличении растягивающего напряжения σ напряжение $\sigma_y(x,0)$ в точках $(\pm \alpha, 0)$ растет и достигает предела прочности в данном направлении. При дальнейшем увеличении σ возникает и увеличивается зона повреждения, которая комплексно учитывает различные виды разрушений в КМ.

Упругое распределение напряжений у эллиптического отверстия на линии $y = 0$ ($\alpha \leq x \leq W$) представлено на рис. 1, когда его максимальное значение превышает σ_B .

По данной модели разрушение происходит, когда C становится равным предельному повреждению C_C , которое, как предполагается, является характеристикой материала, независимой от нагрузки и геометрии. Если величина C_C найдена, то используя выражения (2) для $\sigma_y(x,0)$, и критерий (1) после интегрирования получаем следующую формулу для определения предельного напряжения:

$$\sigma_c = \frac{\sigma_B}{1 + T_a(b/a, \beta_i, c)/c_c}, \quad (4)$$

где

$$T_a(b/a, \beta_i, c) = \frac{a}{\beta_1 - \beta_2} \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} \frac{\beta_i^2}{b - \beta_i a} \left[\left(c + \frac{b}{\beta_i} \right) - \sqrt{(a + c)^2 + \left(\frac{b^2}{\beta_i^2} - a^2 \right)} \right]. \quad (5)$$

Таким образом, предельное (критическое) напряжение для пластины с отверстием или пробойной является функцией ряда параметров, в том числе и предельного размера зоны повреждения C_c :

$$\sigma_c = f(\sigma_B, C_c, b/a, \beta_1, \beta_2).$$

Для выбранного КМ величины $\sigma_c, \beta_1, \beta_2$ являются известными. Таким образом, задаваясь размерами пробоины a и b и подставляя найденное значение C_c , находим σ_c , при котором происходит разрушение пластины с пробойной или вырезом.

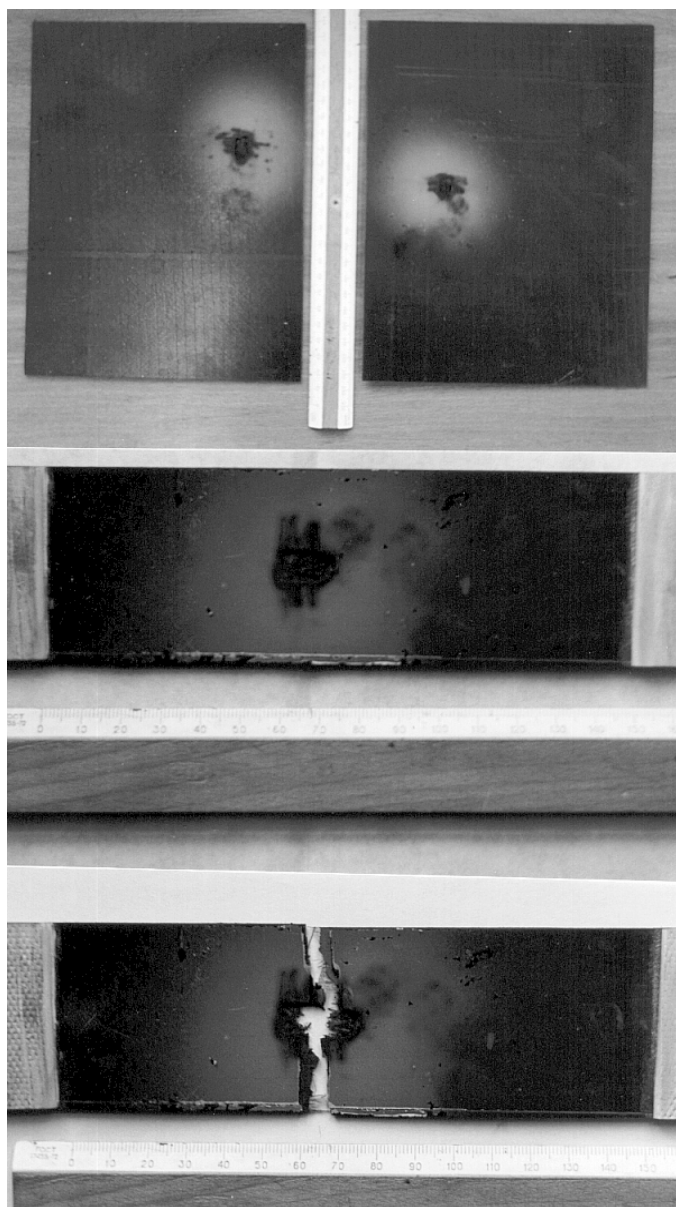


Рис. 2

Для проверки предложенной модели и полученной формулы (4) были проведены экспериментальные исследования. Для испытаний был выбран композиционный материал – слоистый углепластик, отформованный из 8-ми однонаправленных слоев углеленты с одинаковым числом слоев под 0° и 90° и с одним наружным слоем из органоволокнистой ткани. Опертые по контуру прямоугольные пластины из данного материала были пробиты высокоскоростными баллистическими объектами со стороны противоположной органоволокнистому слою. В результате образовались сквозные пробоины в форме вытянутого в направлении меньшей изгибной жесткости материала эллипса (с отношением радиусов 1:1,5) и с рядом несквозных трещин в направлении армирования наружного слоя, перпендикулярного к данному направлению. На рисунке 2 представлены фотографии пластин с пробоинами и образцов до и после испытаний.

Далее были проведены статические испытания по определению характеристики прочности и трещиностойкости. Все образцы испытывались на разрывной испытательной машине

FP-10 фирмы «Heckert» с построением диаграмм нагрузка – деформация. Полученные диаграммы были практически линейными до момента разрушения, что свидетельствовало о хрупких свойствах выбранного КМ. В результате испытаний трех об-

разцов стандартной ширины было получено среднее значение предела прочности $\sigma_B = 313,8$ МПа. Значение критического коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} было найдено после испытаний трех образцов шириной $W = 20$ мм с боковым пропилом длиной $l = 5$ мм с использованием формулы из справочника [10]:

$$K_{IC} = \sigma_B \sqrt{\pi \cdot l} \cdot F_l \cdot (l/W),$$

причем для отношения $l/W = 0,25$ имеем $F_l(l/W) = 1,494$.

Было найдено значение $K_{IC} = 613,5$ Н/мм^{3/2}.

По результатам испытаний стандартных образцов, изготовленных из данного КМ, был найден предел прочности при растяжении, а по образцам с боковыми пропилами – значение критического КИН. Для испытываемого материала расчетный критический размер зоны повреждения составил 1,22 мм. С использованием предложенной модели была вычислена предельная нагрузка для пластины из выбранного композиционного материала с эллиптическим отверстием (моделирующим пробоину) и зонами повреждения.

Поскольку материал пластин из КМ квазиизотропный, то для такого материала можно принять $\beta_1 \approx \beta_2 = 1$. Таким образом, функция $T_u(v/a, \beta_i, c_c)$ из формулы (5) становится равной

$$T_u(v/a, c_c) = \frac{2}{B-1} \left[(c_c + b) - \sqrt{(a + c_c)^2 + a^2(B^2 - 1)} \right].$$

Окончательно значение предельного напряжения, вычисленное с использованием критерия (1) и формул (4) и (5), для пластины со сквозной пробоиной в форме эллипса с размерами $a = 4$ мм, $b = 6$ мм оказалось равным: $\sigma_c = 148,4$ МПа.

Результаты испытаний образцов шириной 50 мм с пробоинами показали, что полученная разрушающая нагрузка $\sigma_c = 141,7$ МПа отличается от рассчитанной не более, чем на 5 %. Кроме того, можно сделать вывод, что начальные несквозные трещины идущие от пробоин, практически не оказывают влияния на предельную нагрузку, а лишь несколько изменяют траекторию разделения пластины с пробоиной на части по сравнению с отверстием в пластине. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенной модели при определении предельных напряжений в пластине с пробоиной близкой по форме к эллипсу или круглому отверстию. В дальнейшем планируется исследовать применимость метода для анализа пробоин и вырезов более сложной формы, а также взаимовлияние двух и более расположенных рядом пробоин и вырезов.

Литература

1. Цай С., Хан Х. Анализ разрушения композитов // Неупругие свойства композитных материалов. Механика / Под ред. К. Гераковича. – М.: Мир, 1978. – № 16. – С. 104-139.
2. Смит К. Ограничения в применении подходов механики разрушения к композитам // Неупругие свойства композитных материалов. Механика / Под ред. К. Гераковича – М.: Мир, 1978. – № 16. – С. 221-248.
3. Ву Э. Прочность и разрушение композитов // Композиционные материалы: В 7 т. – Т. 2: Разрушение и усталость / Под ред. Л. Браутмана. – М.: Мир, 1978. – С. 206-266.

4. Аннин Б.Д., Максименко В.Н. Оценка разрушения пластин из композитных материалов с отверстиями //Механика композитных материалов. – Зинатне. – 1989. – С. 284-290.
5. Backlund I., Aronson C.G. Tensile fracture of laminates with holes //J. of Composite Materials. – 1986. – 20, № 3. – P. 259-285.
6. Бородачев Н.М., Шевченко О.А. Метод оценки прочности композиционных материалов с повреждениями и вырезами //Вісн. КМУЦА. – 1998. – № 1. – С. 43-48.
7. Zhen S. The D Criterion in Notched Composite Containing Materials //J. of Reinforced Plastics and Composites. – 1983. – 8, 2. – P. 98-110.
8. Whitney J.V., Nuismer R.J. Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Concentrations //J. of composite Materials. – 1974. – 8, № 3. – С. 253-265.
9. Савин Г.Н. Распределение напряжений около отверстий. – Киев: Наук. думка, 1968. – 887 с.
10. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2 т. /Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – Т. 1. – 448 с.

Получено 11.10.2002 г.