

УДК 539.375

М.А. Леган

**Применение метода граничных элементов
и модифицированного интегрального критерия
разрушения для анализа экспериментальных данных***

M.A. Legan

**Application of the Boundary Element Method
and the Modified Integral Fracture Criterion
for the Analysis of Experimental Data**

Модифицирован критерий средних напряжений. Проведено сравнение результатов расчета по этому критерию с опытными данными по разрушению образцов с отверстиями.

Ключевые слова: интегральный критерий разрушения, концентрация напряжений, экспериментальные данные.

Введение. При использовании классических локальных критериев прочности обычно предполагается, что разрушение начинается при достижении максимальным эквивалентным напряжением предельного значения хотя бы в одной точке тела. Однако в условиях концентрации напряжений и резкой неравномерности их распределения локальные критерии дают заниженные оценки предельных нагрузок по сравнению с экспериментальными данными. В этом случае целесообразно применять нелокальные условия прочности, среди которых наиболее широко известен интегральный критерий разрушения типа Нейбера-Новожилова или критерий средних напряжений. По сравнению с локальными этот критерий дает более высокие оценки предельных нагрузок, которые тем не менее бывают ниже экспериментальных значений. Поэтому предлагается модификация критерия средних напряжений с введением дополнительного параметра.

Статья посвящена сравнению локальных и интегральных условий начала разрушения при неоднородном напряженном состоянии как между собой, так и с экспериментальными данными по разрушению плоских образцов с отверстиями [1, с. 207; 2, с. 223]. Так как некоторые эксперименты были проведены на образцах, ширина которых сопоставима с размерами отверстий, то для определения напряженно-деформированного состояния использовался один из численных методов, а именно метод граничных элементов, так как он нуждается в построении только гранично-элементного контура и не требует дискретизации области с резким изменением напряженно-деформированного состояния.

The researcher modifies criterion of mean stresses and compares the results of calculation by this criterion with the experimental data on the fracture of specimens with holes.

Key words: integral fracture criterion, stress concentration, experimental data.

Двухпараметрический интегральный критерий разрушения. В известном интегральном критерии типа Нейбера-Новожилова с пределом прочности материала σ_b сравнивается не максимальное значение первого главного напряжения σ_1 , а среднее нормальное напряжение

$$\langle \sigma_v \rangle = \frac{1}{L_*} \int_a^{a+L_*} \sigma_v dx \quad (1)$$

на площадке размером L_* , включающей бесконечно малую площадку σ_1 в рассматриваемой точке тела $x = a$, где обе площадки имеют общую нормаль v . Напряжение вдоль другой стороны площадки предполагается постоянным. В момент начала разрушения

$$\langle \sigma_v \rangle = \sigma_b. \quad (2)$$

Если размер площадки осреднения L_* находится из уравнения

$$L_* = \frac{2}{\pi} K_{Ic}^2 / \sigma_b^2, \quad (3)$$

где K_{Ic} – критический коэффициент интенсивности напряжений, то при использовании асимптотических выражений для напряжений в окрестности вершин трещин интегральный критерий дает те же самые результаты, что и условие нормального отрыва в линейной механике разрушения.

Таким образом, интегральный критерий типа Нейбера-Новожилова содержит два параметра материала: предел прочности σ_b и характерный размер L_* , который находится по стандартным характеристикам материала σ_b и K_{Ic} . Параметр L_* равен известному в механике разрушения критическому

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №11-01-00522).

размеру дефекта в виде трещины Гриффитса, т.е. такому максимально допустимому размеру дефекта, при котором еще не происходит снижение прочности материала при одноосном растяжении. Следовательно, параметр L^* характеризует неоднородность материала, связанную с наличием дефектов.

Однако с помощью двухпараметрического интегрального критерия не всегда удается хорошо описать экспериментальные данные по разрушению образцов с отверстиями [1, с. 207; 2, с. 223]. Поэтому предлагается формулировка трехпараметрического интегрального критерия разрушения. Наличие дополнительного третьего параметра позволяет лучше описать имеющиеся экспериментальные данные по разрушению образцов с отверстиями.

Формулировка трехпараметрического интегрального критерия. Для определения разрушающей нагрузки сравнивать с пределом прочности материала σ_b нужно не среднее нормальное напряжение $\langle \sigma_v \rangle$, а эффективное напряжения σ_e , которое вычисляется так

$$\sigma_e = \sigma_v^{\max} / \left(1 - \eta + \sqrt{\eta^2 - 1 + \sigma_v^{\max} / \langle \sigma_v \rangle} \right)^2, \quad (4)$$

где η – безразмерный параметр аппроксимации ($0 \leq \eta \leq 1$).

Разрушение в окрестности рассматриваемой точки начинается при достижении эффективным напряжением предела прочности материала

$$\sigma_e = \sigma_b \quad (5)$$

и первоначально распространяется по площадке осреднения.

При $\eta = 1$ критерий (4)–(5) совпадает с известным критерием (1)–(2). Однако при других значениях η с помощью (4)–(5) можно получить лучшее по сравнению с (1)–(2) соответствие экспериментальным данным по разрушению образцов с концентраторами напряжений. Например, при $\eta = 0,15$ критерий (4)–(5) хорошо описывает экспериментальные данные [1, с. 207] по разрушению растягиваемых пластин из полиметилметакрилата с центральным круглым отверстием (рис. 1). Ширина пластин составляла 30 мм, а диаметр отверстия d был 0,6; 1,2; 2; 3 и 6 мм. Для определения напряженного состояния в растягиваемых пластинах использовался метод граничных элементов в варианте метода фиктивных нагрузок. Показано, что при 760 граничных элементах полученные численно значения максимальных и средних напряжений (при 400 шагах интегрирования) для конечных пластин с отверстием диаметром до 3 мм практически не отличаются от теоретических значений, найденных на основе решения Кирша для бесконечной пластины.

Предлагаемый критерий (4)–(5) применен также для описания экспериментальных результатов [2, с. 223] по разрушению при растяжении пластин

из пенополистирола марки ПСБ-25 с центральными отверстиями различной формы. Параметр $L^* = 17,321$ мм вычислен по формуле (3) по значениям $\sigma_b = 105,21$ кПа и $K_{Ic} = 17,354$ кПа · м^{1/2} для этого материала. Эксперименты были проведены на плоских образцах с круглыми (вид испытаний 1), эллиптическими (виды испытаний 2–4) и криволинейными отверстиями типа квадрата с закругленными углами (вид испытаний 5). Отверстия имели максимальный размер от 200 до 400 мм. Ширина пластин составляла 1 м, т.е. была сопоставима с размерами отверстий. Поэтому для описания указанных экспериментальных результатов потребовалось применить численный алгоритм совместного использования метода фиктивных нагрузок и интегральных критериев разрушения. На рисунке 2 по видам испытаний показано сравнение опытных и расчетных данных при 760 граничных элементах.

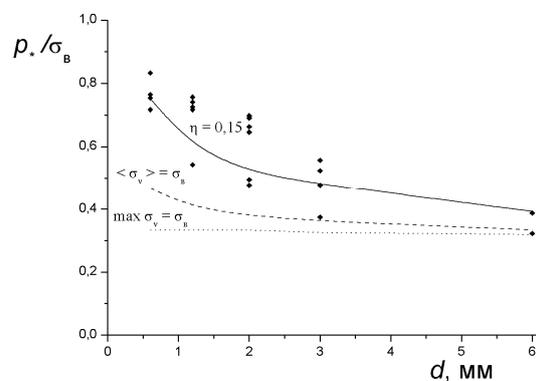


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные значения предельного номинального напряжения p^* по рассматриваемым критериям

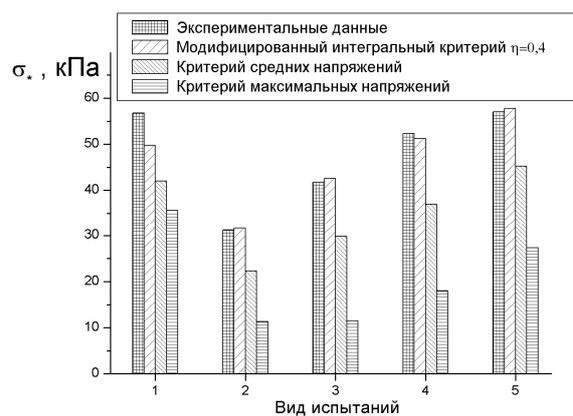


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные значения предельного среднего напряжения σ_s в поперечном сечении у края пластины

Заключение. Для элементов конструкций с концентраторами напряжений предлагаемый трехпара-

метрический интегральный критерий разрушения дает более высокие и близкие к экспериментальным данным значения предельных нагрузок по сравне-

нию с известными локальными условиями прочности и двухпараметрическим критерием средних напряжений.

Библиографический список

1. Li J., Zhang X.B. A criterion study for non-singular stress concentrations with size effect // Strength, Fracture and Complexity. – 2005. – Vol. 3.

2. Legan M.A., Kolodezev V.E., Sheremet A.S. Quasi-brittle fracture of foam-polystyrene plates with hole // Strength, Fracture and Complexity. – 2005. – Vol. 3.