

УДК 539.3

В.А.Ястребов (5 курс, каф. МПУ), А.С.Семенов, к.ф.-м.н., доц.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ КВАЗИ-ХРУПКОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СВЯЗАННЫХ УРАВНЕНИЙ УПРУГО-ПОВРЕЖДЕННОСТИ

Исследование процессов разрушения квазихрупких материалов представляет значительный интерес для практики. Процесс разрушения имеет эволюционный характер и в значительной степени определяется процессами, проходящими на микроуровне, демонстрируя чувствительность к микроструктуре материала. Одним из наиболее интенсивно развивающихся современных подходов к решению данной проблемы является использование континуальных моделей упруго-поврежденности, учитывающих взаимное влияние процессов деформирования и разрушения материала. Данный подход приводит к необходимости применения методов континуальной механики повреждений и использованию связанных уравнений упруго-поврежденности.

Целью работы являлось решение краевых задач, требующих прямого математического моделирования процесса зарождения и роста трещин в квазихрупком материале. Для этого была выполнена программная реализация ряда законов связанной упруго-поврежденности в конечно-элементном пакете PANTOCRATOR [1]. Для контроля правильности численного решения были проведены так же экспериментальные исследования.

Уравнение, описывающее связь между напряжениями и деформациями для упругого материала с учетом повреждений имеет вид:

$$\sigma = (1 - D)^4 C \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где D – поврежденность рассматриваемой точки среды, 4C – тензор четвертого ранга упругих модулей. Типичная диаграмма деформирования квазихрупкого материала показана на рис. 1. Задачи решались в изотермической постановке в предположении изотропии материала, где параметр D определяется только эквивалентной мерой деформированного состояния – $\tilde{\varepsilon}$. В программном модуле реализовано два критерия определения D через $\tilde{\varepsilon}$ (обобщенный степенной закон Гирса, экспоненциальный закон Мазара) и три критерия определения $\tilde{\varepsilon}$ (энергетический, модифицированный Мизеса, Мазара). Один из вариантов вычисления D (поврежденность – по Гирсу, энергетическая мера) представлен ниже [2]

$$D = \begin{cases} 1 - \left(\frac{k_0}{k}\right)^\beta \left(\frac{k_c - k}{k_c - k_0}\right)^\alpha, & k < k_c \\ 1, & k \geq k_c \end{cases} \quad (2)$$

$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{\frac{1}{E} \varepsilon \cdot {}^4C \cdot \varepsilon}, \quad f(\tilde{\varepsilon}, k) = \tilde{\varepsilon} - k, \quad f\dot{k} = 0, \quad f \leq 0, \quad \dot{k} \geq 0. \quad (3)$$

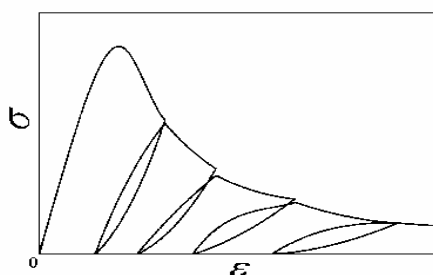


Рис. 1. Типичная диаграмма деформирования с 4 промежуточными разгрузками для квазихрупкого материала



Рис. 2. Внешний вид пластины с отверстием, для которой выполнялся эксперимент на сжатие

Результаты численного расчета и эксперимента для одноосного сжатия пластины (см. рис. 2), ослабленной отверстием, представлены на рис. 3 и 4. Численное решение получено в трехмерной постановке с геометрическими и механическими параметрами, взятыми из опыта. Результат численного эксперимента – это картина распределения повреждений в материале, по которой можно достаточно точно построить траекторию распространения трещины (в силу симметрии рассматривалась четверть пластины). Опыт выполнен в лаборатории кафедры «Сопротивление материалов». Материал для изготовления образцов – гипс медицинский. Было изготовлено 4 образца цилиндрической формы – для определения свойств материала и 4 пластины с отверстиями для анализа траектории роста трещины. Параллельность сдавливаемых граней образцов была достигнута с применением станочного оборудования.

В ходе численного эксперимента на каждом шаге решалась квазистатическая задача, прикладывалась нагрузка определенного уровня, вычислялось поле повреждений, затем прикладывалась большая нагрузка, и по полученному на предыдущем этапе полю распределения повреждений вычислялось новое поле. На первых шагах рассчитанное распределение поля поврежденности соответствует горизонтальному росту трещины, но при дальнейшем нагружении характер распределения поврежденности меняется, обеспечивая наклонный рост трещины (см. рис. 3), что также наблюдается и в опытах (рис. 4).

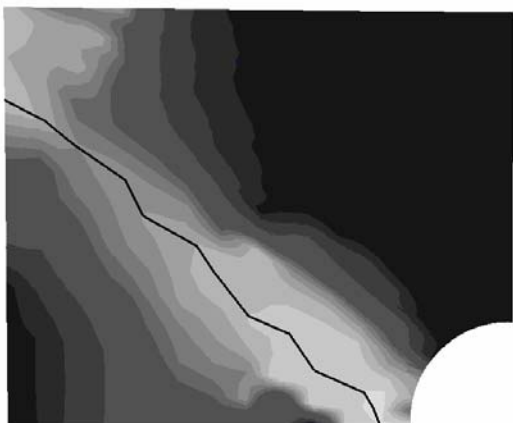


Рис. 3. Поле поврежденности и предполагаемый ход трещины в численном эксперименте

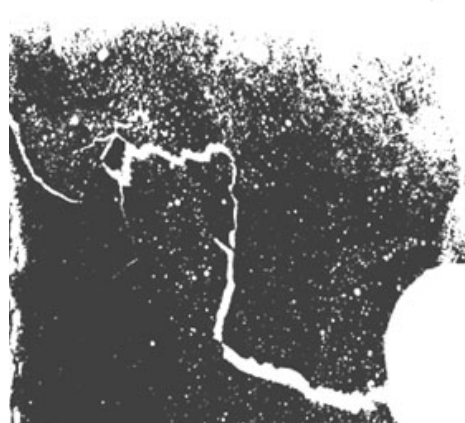


Рис. 4. Экспериментально наблюдаемая траектория трещины.

Сопоставление эксперимента и численного расчета на основе (1)–(3) показало качественное совпадение результатов, относящихся к траектории распространения магистральной трещины в рассматриваемой задаче (ср. рис. 3 и 4). Расчеты по теории, не учитывающей влияние поврежденности на свойства материала, приводят к совершенно другому результату – прямолинейному горизонтальному распространению трещины, что не подтверждается проведенными экспериментами.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Семенов А.С. Труды Межд. конф. «Научно-технич. пробл. прогнозир. и долговечн. констр. и методы их решения» С.-Петербург. 2003. С. 466-480.
2. Peerlings R.H.J. Enhanced damage modeling for fracture and fatigue, 1999.