

ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ РАЗРУШЕНИЯ

КОЗУБАЙ Искендер
izvestiya@ktu.aknet.kg

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Кыргызская Республика, г. Бишкек.

Развивается идея Н.Ф. Морозова о введении критерия инкубационного времени в качестве критерия хрупкого разрушения в конечно-элементных расчетах. Внедрение критерия позволяет управлять стартом, распространением и остановкой динамических трещин.

В работе подробно рассмотрены проблемы использования критерия инкубационного времени в качестве критерия хрупкого разрушения в конечно-элементных расчетах. В работах [1 – 3] предложен критерий инкубационного времени разрушения для предсказания условий инициирования хрупкого разрушения твердых тел под действием приложенных динамических ударных нагрузок. Важной особенностью критерия инкубационного времени является то, что он обеспечивает корректный переход к статической ситуации с медленно действующими нагрузками. Отпадает и сама необходимость разделения разрушения на «квазистатическое» и «динамическое», хотя именно идея инкубационного времени дает естественную возможность такого разделения.

В ряде следующих работ [4 – 7] авторы, моделируя условия различных экспериментов на динамическое разрушение, доказали применимость предложенного подхода для предсказания условий возникновения динамического разрушения хрупких тел. В этих же работах для широкого круга материалов определена введенная материальная константа — инкубационное время процесса разрушения, характеризующая временную прочность разрушаемой среды.

При рассмотрении динамических задач упругости в подавляющем большинстве случаев отсутствует возможность построения аналитического решения поставленной задачи. Так, в работе [8] проведен теоретический анализ нелинейных эффектов, возникающих в задачах динамики трещин.

В последнее время разработан подход, позволяющий интегрировать критерий инкубационного времени с численными схемами, основанными на методе конечных элементов (см., например, работы [9 – 11]). С использованием инкубационного времени, внедренного в метод конечных элементов, можно с хорошей точностью предсказывать возникновение, распространение и остановку динамического разрушения.

Критерий инкубационного времени для применения совместно с методом конечных элементов

Критерий оценки условия разрушения в точке x в момент времени t записывается в виде [1 – 3]:

$$\frac{1}{\tau} \frac{1}{d} \int_{x-d}^x \int_{t-\tau}^t \sigma(x', t') dx' dt' \geq \sigma_c, \quad (1)$$

где τ — инкубационное время разрушения, параметр, характеризующий отклик разрушаемого материала на динамически прикладываемые нагрузки (то есть τ является константой для выбранного материала и не зависит от геометрии образца, способа приложения нагрузки, временной формы и амплитуды импульса воздействия); параметр d имеет смысл характерного размера разрушения и зависит от выбранного материала и масштабного уровня, на котором проводится эксперимент; σ — напряжение в точке, меняющееся во времени, а σ_c — его критическое значение в условиях статики, характерное для исследуемого материала и выбранного масштабного уровня; x' и t' — локальные координата и время.

$$\text{Полагая, что } d = \frac{2}{\pi} \frac{K_{IC}^2}{\sigma_c^2}, \quad (2)$$

где K_{IC} — критический коэффициент интенсивности напряжений для трещин, нагружаемых по моде I, можно показать, что в рамках линейной механики разрушения выражение (1) в случае трещин, нагружаемых по моде I, становится эквивалентно следующему:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t K_I(t') dt' \geq K_{IC}. \quad (3)$$

Условие (2) возникает из требования соответствия критерия (3).

Численная реализация

- *Конечно-элементное разбиение.* Единственное дополнительное требование к конечно-элементному разбиению касается размера конечных элементов в окрестности точек, в которых возможно разрушение. Понятно, что размер элемента в этих зонах не должен превышать d (см. формулу (2)). В противном случае не будет возможности произвести достаточно точное интегрирование по пространственной координате в условии разрушения (1). Таким образом, свойства материала и класс решаемых задач определяют размер пространственной дискретизации. Также при выборе разбиения необходимо иметь в виду возможность деления материала в какой-либо его точке при выполнении условия разрушения. Это относится как к выбору начального разбиения в задачах без адаптивного разбиения (разбиение не меняется в течение всего времени моделирования), так и к выбору адаптивного разбиения, которое может зависеть от текущей геометрии разрушенной области и от других факторов.

- *Выбор шага интегрирования по времени.* Условием достаточно точного интегрирования по временной координате в критерии (1) является малая величина шага временного интегрирования по сравнению с инкубационным временем τ . Следовательно, ограничение на размер временного шага интегрирования, определяющееся требованием сходимости по времени, дополняется еще одним условием.

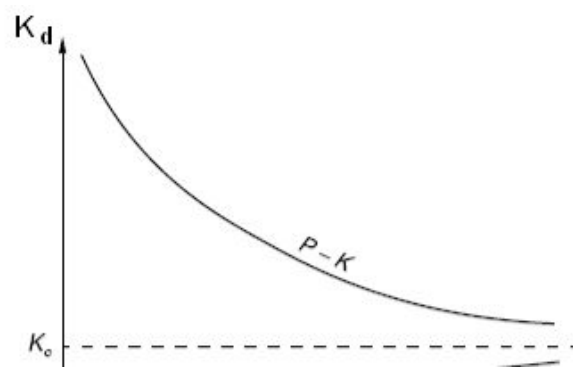
- *Контроль выполнения условия (1).* Реализация контроля выполнения условия разрушения (1) зависит от условий решаемой задачи. В некоторых случаях (например, в большинстве задач о движении макроскопической трещины в неограниченной области) разрушение возможно только в вершине имеющейся трещины. Здесь достаточно отслеживать выполнение условия (1) в одной или нескольких точках.

- В других случаях (например, при исследовании разрушения изначально бездефектных сред) необходимо проверять выполнение условия (1) в достаточно обширной области или даже во всем разрушаемом теле.

- *Определение линейного размера приращения дефекта (двумерная постановка).* В теории инкубационного времени хрупкого разрушения вводится линейный размер, представляющий собой элементарную ячейку разрушения на данном масштабном уровне. Этот размер, характеризующий масштабный уровень, на котором производится опыт, равен d и определяется по формуле (2). Логично считать, что при выполнении условия (1) в какой-либо точке тела поверхность разрушения должна увеличиться на размер элементарной ячейки разрушения.

Динамическое распространение трещины

Приведем основополагающие опыты Рави-Чандара и Кнаусса [12] из Калифорнийского технологического института (1984 год). Взяв пластину из Гомалита-100, экспериментаторы нагружали берега трещины и фиксировали нагрузку. В момент старта трещины t^* измеряли коэффициент интенсивности K_d (рис. 1). Верхняя кривая на рис. 1 убедительно демонстрирует, что K_d не есть постоянная материала, какой является K_c и лишь при большом времени до разрушения выходит на статическую асимптотику K_c .



Показано, что область применимости критерия разрушения на основе критерия инкубационного времени процесса разрушения достаточно обширна. Так как большинство прикладных задач динамической упругости не имеет явного аналитического решения, возникает необходимость в использовании численных схем расчета. В этой связи подход, основанный на инкубационном времени, имеет значительные преимущества — он применим для предсказания истории разрушения как в динамике, так и статике. Таким образом, нет необходимости введения различных критериев разрушения для разных скоростей приложения нагрузки. Показано, что внедрение критерия инкубационного времени в схему конечно-элементных расчетов позволяет корректно предсказывать старт, распространение и остановку динамических трещин, а также динамику разрушения изначально бездефектных сред.

Литература

1. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А. К расчету предельной интенсивности импульсных динамических нагрузок // Изв. АН СССР. МТТ. 1988. № 5. С. 180 – 182.
2. Petrov Y.V., Morozov N.F. On the modeling of fracture of brittle solids // ASME J. Appl. Mech. 1994. Т. 61. С. 710 – 712.
3. Петров Ю.В. О «квантовой» природе динамического разрушения твердых тел // Докл. АН СССР. 1991. Т. 321. № 1. С. 66 – 68.
4. Morozov N., Petrov Y. Dynamics of Fracture. – Berlin-Hidelberg-New York: Springer-Verlag. 2000. 170 с.
5. Petrov Y.V., Morozov N.F., Smirnov V.I. Structural Macromechanics Approach in Dynamics of Fracture // Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 2003. Т. 26. С. 363 – 372.
6. Петров Ю.В. Критерий инкубационного времени и импульсная прочность сплошных сред: разрушение, кавитация, электрический пробой // Докл. РАН. 2004. Т. 395. №5. С. 621 – 625.
7. Петров Ю.В., Ситникова Е.В. Прогнозирование динамической трещиностойкости конструкционных материалов на примере разрушения авиационного сплава при ударном воздействии // ЖТФ. 2004. Т. 74. вып. 1. С. 58 – 61.
8. Naimark O.B., Uvarov S.V. Nonlinear crack dynamics and scaling aspects of fracture (experimental and theoretical study) // Int. J. of Fracture. 2004. Т. 128. С. 285 – 292.
9. Bratov V., Petrov Y. Application of incubation time approach to simulate dynamic crack propagation // Int. J. of Fracture. 2007. Т. 146. С. 53 – 60.
10. Bratov V., Petrov Y. Optimizing energy input for fracture by analysis of the energy required to initiate dynamic mode I crack growth // Int. J. of Solids and Struc. 2007. Т. 44. С. 2371 – 2380.
11. Братов В.А., Петров Ю.В. Применение критерия инкубационного времени для описания распространения динамических трещин // Докл. РАН. 2007. Т. 416. № 5. С. 624 – 626.
12. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Иванов Б.А., Маров М.Я., Смирнов В.И. О прогнозировании пороговой энергии разрушения в механике ударного кратерообразования // Докл. РАН. 2007. Т. 412. № 1. С. 56 – 58.