

ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ РАЗРУШЕНИЯ

В.А. Братов

Институт проблем машиноведения РАН, С.-Петербург, 199178, Россия

В работе подробно рассмотрены проблемы использования критерия инкубационного времени в качестве критерия хрупкого разрушения в конечно-элементных расчетах. Приведен ряд примеров численных расчетов задач динамики разрушения с использованием критерия инкубационного времени. Доказана применимость такого подхода для предсказания инициации, развития и остановки динамического разрушения.

NUMERICAL MODELS OF FRACTURE DYNAMICS

V.A. Bratov

Institute for Problems in Mechanical Engineering RAS, St.-Petersburg, 199178, Russia

This paper is concerned with the problems related to the embedment of an incubation time brittle fracture criterion into finite-element computational schemes. Several examples of how the incubation time fracture criterion can be used as a fracture condition in finite element computational schemes are given. Applicability of the approach for prediction of initiation, propagation and arrest of dynamic fracture is demonstrated.

1. Введение

В работах [1–3] предложен критерий инкубационного времени разрушения для предсказания условий иницирования 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, трансформируясь в классические критерии хрупкого разрушения (либо в критерий критического напряжения в случае разрушения изначально бездефектных сред, либо в критерий критического коэффициента интенсивности напряжений при разрушении тел с трещинами). Таким образом, нет потребности в использовании разных критериев для предсказания разрушения в «квазистатической» либо «динамической» ситуации. Отпадает и сама необходимость деления разрушения на «квазистатическое» и «динамическое», хотя именно идея инкубационного времени дает естественную возможность такого деления.

В широком ряде последующих работ (см., например, [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. При переходе к изучению эволюции (развития

и остановки) разрушения практическая возможность построения аналитических решений, вообще говоря, отсутствует, поэтому особую важность приобретают численные методы.

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 данного подхода проведено моделирование нескольких известных экспериментов по ударному разрушению [11, 12], которые показали, что по критерию инкубационного времени, внедренному в метод конечных элементов, можно с хорошей точностью предсказывать возникновение, распространение и остановку динамического разрушения.

2. 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.

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) классическому условию критического коэффициента интенсивности напряжений ($K_I \geq K_{IC}$ в случае статики ($t \rightarrow \infty$)).

Еще раз отметим тот факт, что для медленно прикладываемых нагрузок и, следовательно, времен до разрушения, значительно превосходящих τ , условие (3) вырождается в классический критерий Ирвина. При отсутствии сингулярности в поле напряжений в окрестности точки x (локально бездефектный материал) и медленно

меняющихся нагрузках критерий (1) вырождается в критерий критического напряжения и, следовательно, может применяться для предсказания разрушения бездефектных сред, что подтверждается в многочисленных работах (см., например, [4–7]). Выражение (1) в условиях статики равносильно критерию критического коэффициента в предположении справедливости корневой асимптотики полей в окрестности вершины трещины. Для сингулярных полей напряжений с асимптотиками, отличными от корневой (например, при наличии концентраторов в форме углового выреза и т.п.), когда использование критерия Гриффитса–Ирвина невозможно, критерий (1) может корректно применяться к оценке условий разрушения в окрестности такого рода особых точек [13].

Таким образом, применение критерия (1) автоматически обеспечивает корректный переход к статике в относительно широком круге задач хрупкого разрушения. Многими авторами доказано [1–7], что критерий (1), при правильно определенном инкубационном времени процесса хрупкого разрушения τ , корректно предсказывает условия возникновения хрупкого разрыва (в случае разрушения изначально бездефектных тел) и инициации макроскопических трещин в условиях ударного динамического нагружения.

В данной работе показывается, что критерий разрушения в виде (1) может применяться для предсказания развития хрупкого разрушения (разрушения и фрагментации изначально бездефектных тел, распространения макроскопических трещин и так далее).

3. Численная реализация

При переходе к численной реализации необходимо решить ряд вопросов.

- *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. При определении области, в которой необходимо проводить проверку выполнения условия разрушения, а также при правильном выборе конечно-элементного разбиения в этой области и шага интегрирования по времени вычисление левой части критерия (1) не вызывает затруднений. В примерах, приводимых далее, проверка критерия

разрушения производится при помощи отдельной программы после каждого шага вычислений по времени. Однако в дальнейшем планируется создание специальных конечных элементов для коммерческих конечно-элементных пакетов (например, ABAQUS, ANSYS), в формулировку которых в явном виде будет заложен критерий разрушения (1). Создание таких элементов значительно упростит задачу и позволит полностью автоматизировать численное моделирование динамики хрупкого разрушения.

- *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.

- *Образование новой поверхности.* В конечно-элементной формулировке существует несколько возможностей для создания новой поверхности при разрыве материала. В случае распространения трещины вдоль линии симметрии в задачах, обладающих симметрией, можно прибегнуть к технике высвобождения узлов [9, 14, 15]. В задачах, не предполагающих изменения разбиения при изменении геометрии дефекта, может использоваться как техника разделения узлов, так и техника, снимающая ограничения на степени свободы узлов [11, 14–17, 18–21]. В общей ситуации можно применять численные схемы с переразбиением моделируемой области при изменении геометрии дефекта (его приращении). Этот способ является самым универсальным, но при этом и самым сложным с точки зрения реализации (кроме изменения сетки в этом случае возникают проблемы, связанные с пересчетом значений перемещений, скоростей и ускорений на новые узлы). Вообще говоря, для каждой конкретной задачи необходимо выбирать подходящий способ создания поверхности, ориентируясь на затраты, связанные с реализацией задачи, и время, необходимое для проведения вычислений.

Для проверки применимости критерия (1) к описанию динамики распространения трещин решено несколько примеров.

3.1. Динамическое распространение трещины

Проведено моделирование условий классических для динамики разрушения экспериментов Рави-Чандара и Кнаусса [22], в которых прямоугольный образец с разрезом нагружается по берегам разреза динамическим импульсом воздействия, равномерно распределенным по длине трещины. Материал образца имеет следующие свойства: плотность $\rho = 1230 \text{ кг/м}^3$; модуль Юнга $E = 3900 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона $\nu = 0,35$; $K_{IC} = 0,48 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$; $\sigma_c = 35 \text{ МПа}$; инкубационное время разрушения $\tau = 9 \text{ мкс}$.

Временная зависимость давления $f(t)$ хорошо аппроксимируется двумя последовательными трапециями (Рис. 1).

Поведение системы описывается соотношениями линейной теории упругости:

$$\rho u_{i,t} = (\lambda + \mu) u_{j,ji} + \mu u_{i,jj}. \quad (4)$$

Здесь символ « \cdot » обозначает частную производную по соответствующей временной или пространственной координате; ρ — массовая плотность; индексы i и j принимают значения 1 и 2; u_i — перемещения, заданные в направлении x_i ; t — время; λ и μ — константы Ламе.

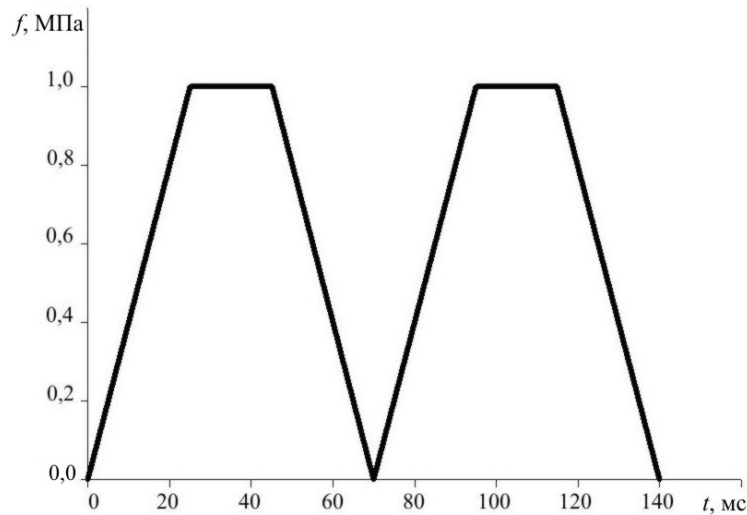


Рис. 1. Временной профиль нагрузки в опытах Равви–Чандара и Кнуса [22]

Напряжения связаны с перемещениями законом Гука:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} u_{k,k} + \mu (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (5)$$

где σ_{ij} — компоненты тензора напряжения; δ_{ij} — дельта-функция Кронекера; индекс k равняется 1 или 2. В момент времени $t = 0$ образец свободен от напряжений и скорости всех точек нулевые:

$$\sigma_{ij} \Big|_{t=0} = u_{,t} \Big|_{t=0} = 0. \quad (6)$$

Условия на разрезе:

$$\sigma_{21} \Big|_{x_1 < 0, x_2 = 0} = 0. \quad (7)$$

Воздействие на образец задается нормальным давлением на разрезе $f(t)$ (Рис. 1):

$$\sigma_{22} \Big|_{x_1 < 0, x_2 = 0} = A f(t), \quad (8)$$

где A — амплитуда прикладываемой нагрузки.

Для проверки применимости критерия (1) к описанию динамики распространения трещин условия экспериментов, представленных в работе [22], моделируются при помощи метода конечных элементов.

Замкнутое описание распространения трещины в исследуемой задаче включает уравнения (4)–(8) и условие разрушения (1). В силу симметрии задачи трещина может распространяться только вдоль оси x_1 . При выполнении критерия (1) в какой-либо точке на оси x_1 предполагается образование новой поверхности в этой точке

Задача (1), (4)–(8) решается численно. Конечно-элементный пакет ANSYS [23] применяется для решения задачи (4)–(8), а выполнение условия (1) проверяется внешней программой после каждого временного шага расчетов.

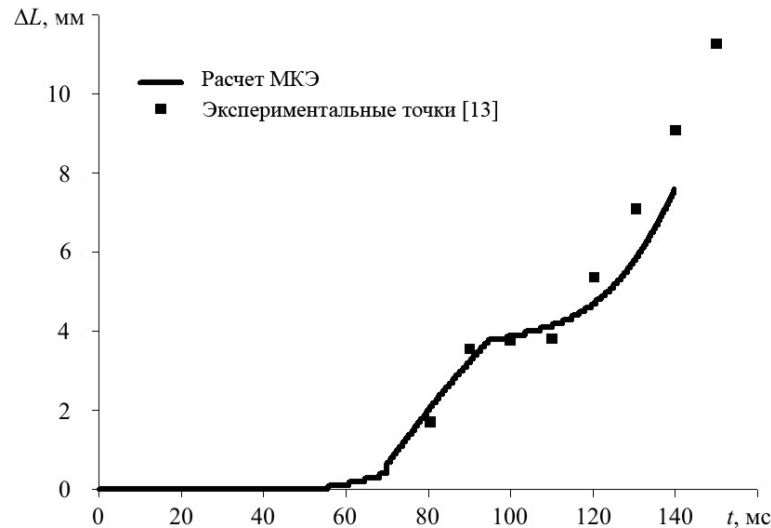


Рис. 2. Расчетная и экспериментальная истории продвижения трещины

При разбиении используются прямоугольные четырехузловые элементы. В окрестности продолжения трещины размер элементов в точности равняется характерному размеру разрушения d (см. формулу (2)) $d = \frac{2 K_{IC}^2}{\pi \sigma_c^2}$. Вследствие симметрии задача

решается только для верхней половины образца. Размеры образца соответствуют размерам опытных образцов. В узлах на продолжении трещины выполняются симметричные краевые условия вплоть до момента, когда в соответствующем узле начинает выполняться условие (1). В этот момент ограничения на перемещения соответствующего узла снимаются и происходит образование новой свободной поверхности (разрушение).

После решения поставленной задачи при помощи конечно-элементного пакета ANSYS и внешней программы, контролирующей распространение трещины, данные о временной зависимости K_I и история приращения длины трещины предоставляются для дальнейшего анализа.

При переборе значений амплитуды импульса давления A обнаружено, что для амплитуд, близких к 5 МПа, истории приращения трещины подобны историям, экспериментально наблюдаемым Рави-Чандаром и Кнауссом [22]. На рисунке 2 результат вычислений продвижения трещины для импульса с амплитудой $A = 5,1$ МПа сравнивается с экспериментально наблюдаемым.

Показано, что использование для решения динамической задачи линейной теории упругости МКЭ совместно с критерием (1) дает возможность корректного описания распространения динамически нагружаемых трещин. Видно, что критерий (1) с характерным размером разрушения d , выбранным из условия соответствия критерия (1) критерию разрушения Ирвина в условиях квазистатики, может быть использован для описания динамического старта, распространения и остановки трещин. Такой подход может быть также применен для описания распространения трещин с заранее неизвестной траекторией (трещин, имеющих возможность изменять направление распространения и даже ветвиться). В этом случае контроль выполнения условия (1) должен осуществляться на всех площадках, проходящих через вершину распространяющейся трещины.

3.2. Ударное кратерообразование (разрушение изначально бездефектной среды)

3 сентября 2006 года спутник Европейского космического агентства (ЕКА) SMART1 произвел жесткую посадку на поверхность Луны [24–26]. Контакт с лунной поверхностью спутника, имеющего форму, близкую к кубической, с характерным размером порядка одного метра и массу 366 килограмм, произошел на скорости порядка 2000 м/с. Наблюдались следующие размеры дефекта (кратера), образовавшегося на поверхности Луны в результате контакта: диаметр 6–10 м, глубина 3 м. Сравним реальные размеры кратера с получаемыми при моделировании процесса разрушения методом КЭ с введением критерия инкубационного времени.

Традиционный способ создания новой поверхности в МКЭ связан с разделением узлов. Этот наиболее удобный в большинстве случаев подход, тем не менее, сопрягается с достаточно длительными процедурами переразбиения и пересчета перемещений, деформаций и скоростей на новые узлы. Для того чтобы гарантировать корректное интегрирование в выражении (1), необходимо делать маленькие шаги по времени. В этих условиях разделение узлов представляется не лучшим решением. В используемом подходе конечные элементы, моделирующие поверхность Луны, изначально не имеют общих узлов. До момента разрушения степени свободы узлов, находящиеся в одной точке, жестко связаны (Рис. 3). Решение в этом случае совпадает с решением задачи для элементов с общим узлом. Размер каждого элемента в точности равняется d (см. формулу (2)). При выполнении условия разрушения снимаются ограничения на степени свободы соответствующих узлов, так как образуется новая поверхность.

На рисунке 3 дано схематичное представление внутренних точек разрушаемого тела. Изначально степени свободы узлов, находящихся в одной точке, связаны. Условие разрушения (1) для такой точки записывается в виде:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \sigma_{ii}(t') dt' \geq \sigma_c, \quad (9)$$

где i принимает значения 1 и 2. Пространственное интегрирование теряет смысл, поскольку в МКЭ напряжения в данном узле и так имеют усредненное по расстоянию порядка размера элемента значение.

Решается задача с осевой симметрией для полупространства $y < 0$. Поведение материала описывается уравнениями линейной теории упругости. В начальный момент времени напряжения в моделирующем Луну материале отсутствуют и все точки находятся в покое. Свойства материала соответствуют средним для земного базальта значениям: $\sigma_c = 10,5$ МПа; $K_{IC} = 2,94$ МПа·м^{1/2}; $\tau = 80$ мкс; $E = 60 \cdot 10^3$ МПа; $\rho = 2850$ кг/м³; $\nu = 0,25$. В этом случае $d = 0,05$ м. Цилиндр диаметром и высотой в 1 м. падает на полупространство со скоростью 2000 м/сек. Плотность материала цилиндра подобрана таким образом, чтобы его общая масса равнялась 366 кг.

Рисунок 4 дает представление об используемой конечно-элементной модели. Её размеры выбраны таким образом, чтобы волны, отраженные от границ образца, не возвращались в разрушаемую область в течение эксперимента.

Для решения задачи линейной теории упругости используется конечно-элементный пакет ANSYS [23]. Выполнение условия (9) во всех узлах образца контролируется при помощи отдельной подпрограммы на языке ANSYS ADPL.

На рисунке 5 изображено состояние образца после завершения эксперимента. Разрушение в нижней части образца возникает вследствие откола материала в результате отражения волн от его нижней границы. Уместно еще раз отметить, что волны, порожденные отражениями от нижней границы моделируемой области и образующихся

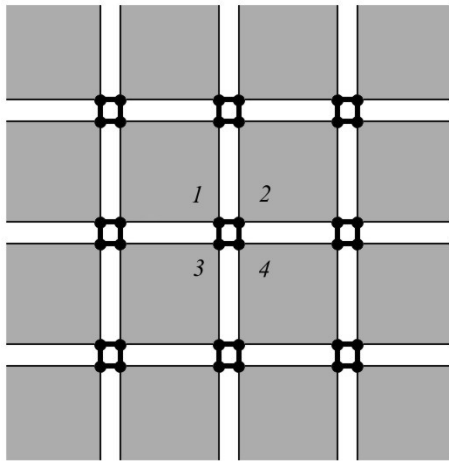


Рис. 3. Модель с конечными элементами без общих узлов

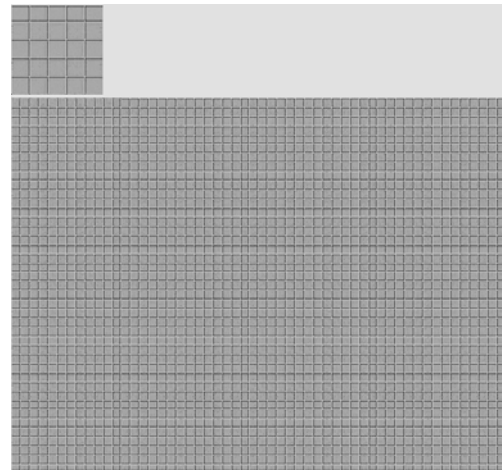


Рис. 4. Общий вид конечно-элементной модели

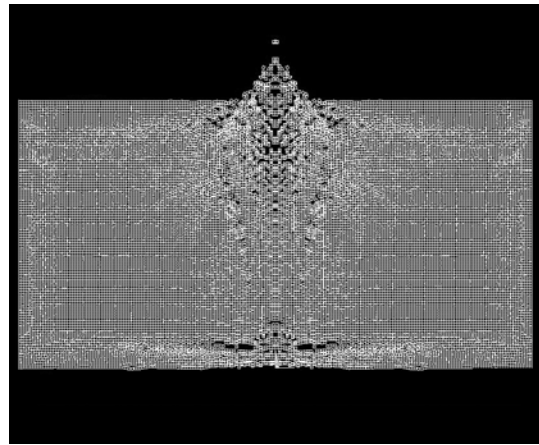


Рис. 5. Образец после ударного воздействия спутника

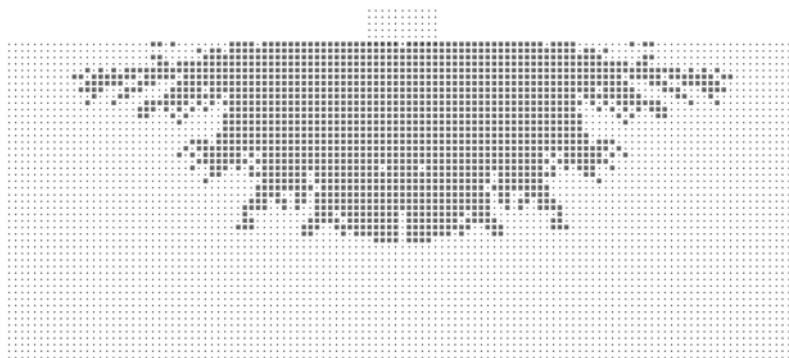


Рис. 6. Узлы, в которых происходит разрушение

откольных трещин, не достигают области формирования кратера до окончания моделирования. Следовательно, в зоне формирования кратера задача разрушения для полупространства идентична задаче для бесконечной области. На недеформированной сетке (Рис. 6) отмечены узлы, в которых происходит разделение материала и по которым можно оценить размер отпечатка (кратера), образовавшегося в результате удара спутника о поверхность Луны. Поврежденная зона имеет диаметр порядка 10 м и распространена вглубь примерно на 3 м. Зону, где материал полностью фрагментирован, можно оценить как имеющую диаметр 7–10 м и глубину 3 м. Эти результаты совпадают с оценками размера образовавшегося кратера, полученными ЕКА [24, 25].

3.3. Откол в пластине

Рассматривается пример откола в круглой пластине. К одной из поверхностей пластины прикладывается кратковременный (по сравнению со временем пробега волны по толщине пластины) импульс давления прямоугольного временного профиля. Отражаясь от противоположной поверхности пластины, импульс превращается в растягивающий и вызывает окольное разрушение пластины. Такая схема характерна для многих экспериментов по динамическому разрушению. На рисунке 7 представлены результаты моделирования одного из таких экспериментов. В данном примере пластина не закреплена. Влияние массовых сил (земное притяжение) не учитывается.

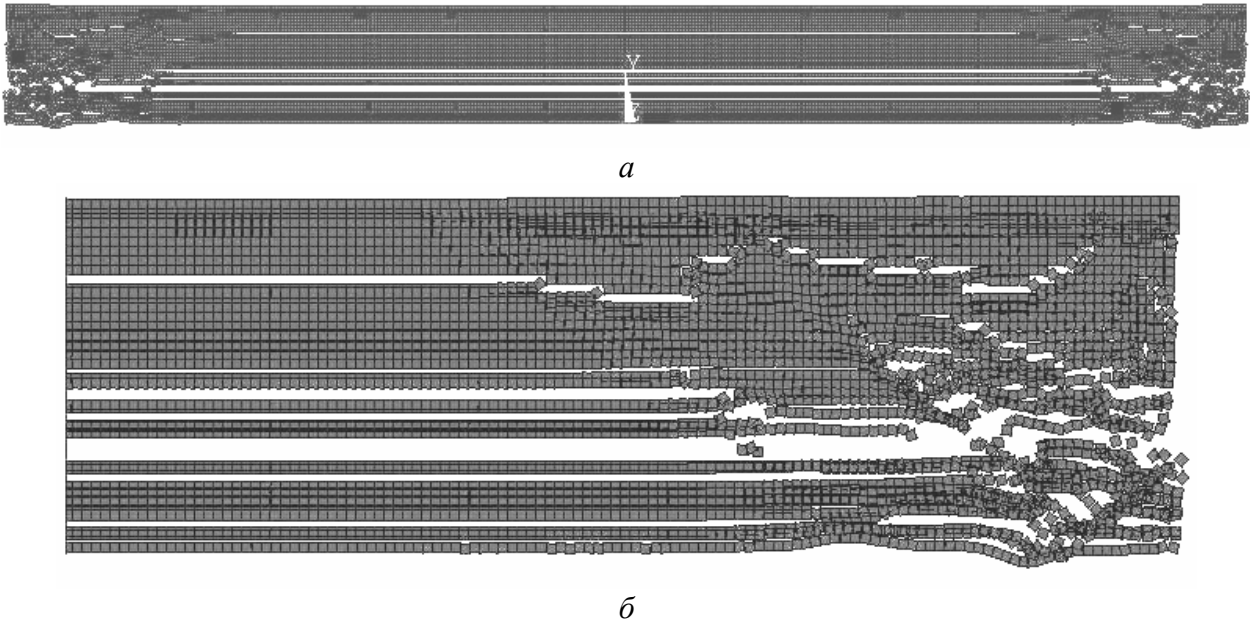


Рис. 7. Общий вид пластины с откольным разрушением (а) и увеличенная область у края пластины (б)

3.4. Распространение магистральной трещины в трубопроводе

В приведенном примере моделируется распространение трещины в магистральном трубопроводе. Предполагается, что разрушение может распространяться вдоль линии, параллельной оси трубопровода Z . Используемое конечно-элементное разбиение представлено на рисунке 8. При этом вычисления производятся для четверти представленной модели (вследствие ее симметрии относительно плоскостей ZX и XY).

Модель построена для участка трубопровода длиной 18 м. Диаметр моделируемого трубопровода 1,22 м. В данной модели используется 36600 узлов, составляющих 17940 конечных элементов. Используется один элемент по толщине трубопровода. Расчеты показывают, что ошибки, связанные с такой аппроксимацией, для данного класса задач не очень велики. Применение большего количества элементов по толщине стенки трубы не оказывает значительного влияния на историю продвижения трещины.

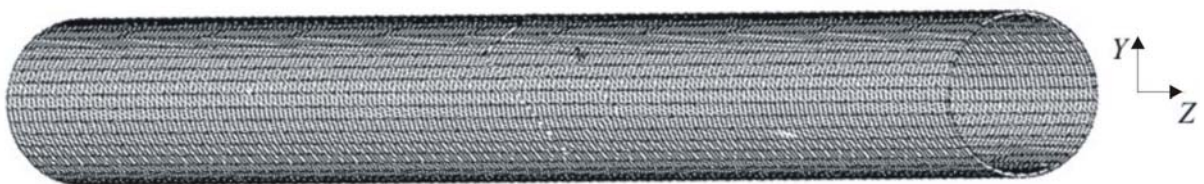


Рис. 8. Конечно-элементная модель трубопровода с учетом симметрии рассматриваемой задачи

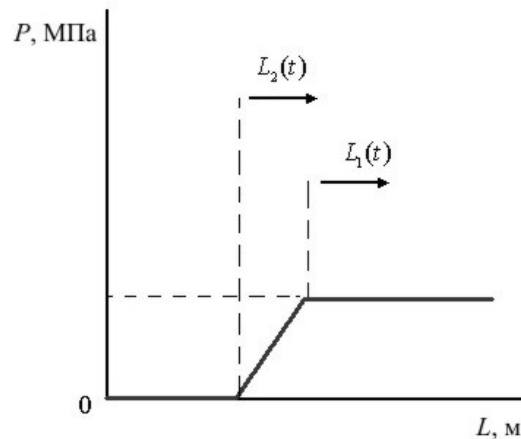


Рис. 9. Моделируемое падение давления в трубопроводе вследствие распространения магистральной трещины

Падение давления в трубопроводе вследствие распространения трещины задается как распространение двух волновых фронтов: фронта передней волны спада давления (скорость распространения 400 м/с) и заднего фронта, после прохождения которого давление в трубопроводе и давление в окружающем пространстве выравниваются. Между двумя фронтами зависимость давления от координаты определяется линейным законом (Рис. 9).

Модель нагружается квазистатическим внутренним давлением, близким к рабочим давлениям внутри газового трубопровода. Учитывается сброс давления внутри трубопровода при росте трещины (и, соответственно, при выходе газа). В нагруженную трубу в какой-то момент времени вводится дефект в виде небольшой трещины. Такое условие имитирует процесс зарождения трещины; при достаточном размере вводимого дефекта начинается рост трещины, обусловленный возникающими в окрестности введенного концентратора напряжениями.

На рисунке 10 представлен вид моделируемого участка трубопровода в различные моменты времени.

Оказывается, что в моделируемых условиях скорость роста трещины не сильно отличается от скорости распространения акустического сигнала в газе, определяющей скорость движения переднего фронта сброса давления (400 м/с). Отсюда можно сделать вывод о нестабильности данного поведения трещины: при достаточно небольшом изменении свойств материала, из которого изготовлен трубопровод, возможно кардинальное изменение характера распространения трещины. Незначительное

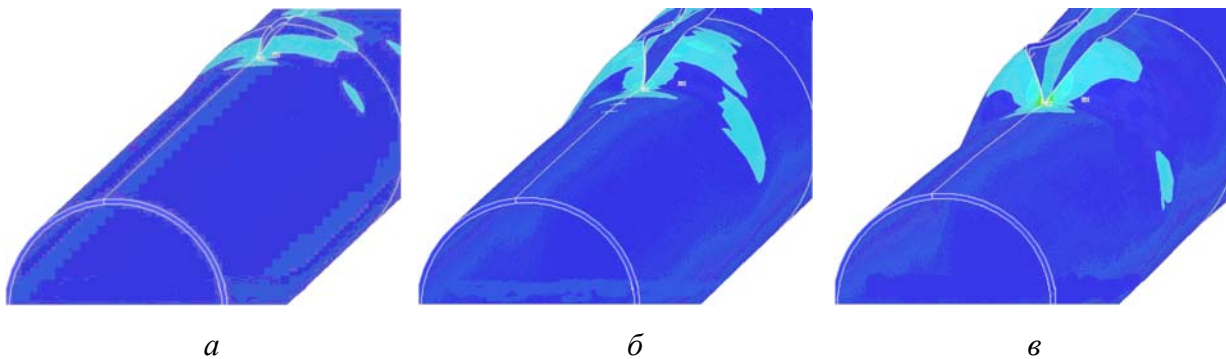


Рис. 10. Вид трубопровода с распространяющейся трещиной в различные моменты времени (мс):
а – 4; б – 7; в – 11

изменение свойств материала может вызвать небольшое изменение скорости распространения трещины, но при этом данная скорость может стать меньше скорости переднего фронта волны падения давления, что кардинальным образом повлияет на характер распространения трещины — трещина будет тормозиться и останавливаться.

Полученная нестабильность режимов распространения трещины хорошо согласуется с результатами натуральных экспериментов. В этих экспериментах тестировались трубопроводы из нескольких различных сталей. На участке трубопровода создавалась ослабляющая выточка, в которую закладывалось взрывчатое вещество. При подрыве взрывчатого вещества начиналось динамическое распространение трещины в изучаемом трубопроводе. В этих экспериментах обнаружен значительный разброс длин образующихся в трубопроводе трещин

4. Численные модели динамики вязкого разрушения

Дальнейшее развитие модели предполагает учет пластической деформации материала. Закон, предсказывающий переход материала в пластическое состояние, берется в виде критерия инкубационного времени [6]. Совместное использование критерия хрупкого разрушения, правильно предсказывающего разрушение в широком диапазоне скоростей нагружения, совместно с критерием пластического течения, также применимым в широком диапазоне скоростей нагружения, позволит правильно предсказывать поведение большинства стандартных конструкционных материалов во всем диапазоне возможных в настоящее время скоростей нагружения.

5. Заключение

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.

Стоит отметить тот факт, что в предложенных примерах в качестве параметров используются свойства разрушаемого материала, которые можно найти в справочнике. Инкубационное время процесса разрушения также является константой материала и определяется в независимом эксперименте с материалом. Модели не содержат каких бы то ни было подгоночных параметров, выбираемых из соответствия численных результатов экспериментально наблюдаемым эффектам. На этом основании целесообразным является включение модели разрушения, учитывающей инкубационное время, в качестве стандартной в коммерческие и исследовательские конечно-элементные пакеты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 08-01-12009-офи, № 08-01-00646-а) и Программы Президиума РАН «Фундаментальные проблемы механики взаимодействий в технических и природных системах, материалах и средах».

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. – 170с.
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. Братов В.А., Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. Моделирование контакта спутника SMART1 с поверхностью Луны // Докл. РАН. – 2008. – Т. 419, № 1. – С. 54-57
13. Кауштанов А.В., Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. Фрактальная модель разрушения упругой плоскости с угловыми вырезами // Докл. РАН. – 1999. – Т. 367, № 2. – С. 194-197.
14. Xu X-P, Needleman A. Numerical simulation of fast crackgrowth in brittle solids // J Mech. Phys. Solids. – 1994. – Т. 42. – С. 1397-1434.
15. Camacho G, Ortiz M. Computational modelling of impact damage in brittle materials // Int J. Solids and Struct. – 1996. – Т. 33. – С. 2899-2938.
16. Ortiz M, Pandolfi A. A class of cohesive elements for the simulation of three-dimensional crack propagation // Int J Numer. Meth. Eng. – 1999. – Т. 44. – С. 1267-1282.
17. Song J., Wang H., Belytschko T. A comparative study on finite element methods for dynamic fracture // Comput. Mech. – 2008. – Т. 42. – С. 239-250.
18. Бураго Н.Г. Моделирование разрушения упругопластических тел // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2008. – Т. 1. – № 4. – С. 5-20.
19. Высокоскоростное взаимодействие тел / В.М. Фомин, А.И. Гулидов, Г.А. Сапожников и др. – Новосибирск: Изд. СО РАН. – 1999. – 600с.
20. Садырин А.И. Алгоритм нерегулярной перестройки плоских треугольных сеток в МКЭ // Прикл. пробл. прочн. и пласт. Алгоритмизация и автоматизация решения задач упругости пластичности / Межвуз. сб. научн. тр. – Горький: Горьк. ун-т. – 1985. – С. 8-13.
21. Фонарев А.В. Применение произвольных треугольных разностных сеток к решению задач импульсного деформирования упругопластических тел // Модели деформирования и разрушения композиционных материалов. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1988. – С. 84-89.
22. Ravi-Chandar, K., Knauss, W.G. An experimental investigation into dynamic fracture: I. Crack initiation and arrest // Int. J. of Fracture. – 1984. – Т. 25. – С. 247-262.
23. ANSYS. User's Guide, Release 11.0. – Pennsylvania, USA: ANSYS Inc. – 2006. – 530с.
24. ESA. Press Release // http://www.esa.int/esaCP/SEM7A76LARE_index_0.html (дата обращения 8 сентября 2009 г.).
25. ESA. Press Release // http://www.esa.int/esaCP/SEMV386LARE_index_0.html (дата обращения 8 сентября 2009 г.).
26. 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.