

Прецизионное моделирование откольного разрушения *

Д.А. ВАРФОЛОМЕЕВ

Российский Федеральный Ядерный Центр - ВНИИТФ им. академика Забабахина,

г. Снежинск, Россия

e-mail: d.a.varfolomeev@mail.ru

В.Ф.КУРОПАТЕНКО

e-mail: v.f.kuropatenko@vniitf.ru

Излагается новый алгоритм моделирования откольного разрушения вещества. Принципиальным отличием от других алгоритмов является прецизионный учет всех особенностей течения при разрушении. А именно, "точное" определение момента разрушения внутри шага интегрирования по времени и координаты образования трещины, образование ударных волн, фронты которых отслеживаются в последующем счете, возможное дробление вещества. На примере расчетов задач показано значительное превосходство нового алгоритма перед другими методами.

Любое конденсированное вещество, подвергнутое интенсивным динамическим нагрузкам, например ударному сжатию, рано или поздно разгрузится за счет конечности размеров образца, либо из-за условий нагружения. При этом вещество может перейти в метастабильную область отрицательных давлений. Необходимым условием такого перехода в материалах, подвергнутых ударному сжатию, является взаимодействие двух встречных волн разрежения [1]. При этом материал сопротивляется разрушению, но если интенсивность и длительность его нахождения в метастабильной области в каком-либо месте образца превысят некоторые предельные значения, определяемые свойствами материала, то в этом месте произойдет разрушение - материал перестанет сопротивляться. Разрушение с точки зрения термодинамики является необратимым процессом. Свойства и поведение сплошного и разрушенного конденсированного вещества принципиально разные. По этой причине при математическом моделировании требуется описывать течение до и после разрушения с максимальной точностью.

Существует достаточно большое количество критериев разрушения и моделей поведения вещества при разрушении. Представительный обзор критериев откольного разрушения приведен в [1]. Наиболее простым критерием разрушения является постоянное значение предела прочности материала, при достижении которого материал мгновенно переходит из сплошного состояния в разрушенное. Такой подход получил название "модель мгновенного откола". С его помощью можно лишь спрогнозировать факт полного откольного разрушения. Для более полного и детального описания процесса разрушения необходимо учитывать, что динамический предел прочности зависит от условий и длительности нагружения. Например, рассматривать процесс разрушения как непрерывный процесс зарождения и роста микроповреждений материала до тех пор, пока микроповреждения не достигнут некоторого критического значения, после чего наступает полное разрушение материала. Модели поведения вещества при разрушении условно можно разделить на два типа: мгновенные и кинетические. В первом

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №10-01-00032.

случае материал никак не чувствует наличие микроповреждений, т.е. ведет себя как сплошной до момента полного разрушения. Во втором случае материал чувствует наличие микроповреждений уже на стадии их непрерывного роста, происходит релаксация напряжений, меняются свойства вещества. Все типы критериев и моделей разрушения схожи в одном - существует катастрофическая стадия разрушения, которая развивается необратимо и очень быстро. Часто принимается, что эта стадия развивается мгновенно - вводятся различные критерии, по которым определяется способность-неспособность вещества сопротивляться разрушению. Учитывая это, можно рассмотреть течение в материале вблизи момента полного разрушения на примере наиболее простой модели мгновенного откола в гидродинамическом приближении. В этой модели присутствует только катастрофическая стадия разрушения.

Для моделирования откольного разрушения вещества широко применяются, так называемые, однородные численные методы, в которых ударные волны "размазываются" на несколько сеточных интервалов. Это приводит к большим погрешностям как в определении места образования первой трещины, так и в формировании ударных волн, возникающих в точке откольного разрушения. Необратимым следствием этих погрешностей являются значительное искажение картины течения в целом и образование энтропийных следов в профилях плотности и удельной внутренней энергии.

Предлагается новый алгоритм моделирования откольного разрушения вещества. В его основе лежит неоднородный разностный метод В.Ф. Куропатенко [2], который позволяет выделять в решении особенности: "точные" фронты ударных и детонационных волн различной конфигурации, крайние характеристики веера волн разрежения, контактные границы, линии фазовых переходов. Эти особенности могут взаимодействовать друг с другом, порождая новые особенности, также выделяемые в дальнейшем счете. Принципиальным отличием нового алгоритма от других является прецизионный учет всех особенностей течения при разрушении.

Рассмотрим преимущества и недостатки однородного метода и предлагаемого алгоритма на примере расчета одномерной модельной задачи о выходе плоской ударной волны с треугольным профилем на свободную поверхность. Предполагается, что среда идеальная без учета теплопроводности. За основу задачи взята постановка [2], в которой изменены предел прочности для образования целой области разрушенного вещества вместо уединенного откола и правое граничное условие для обеспечения компактирования этой области.

Численное моделирование проводилось в рамках комплекса программ "ВОЛНА" [3]. В его основе лежит неоднородный разностный метод В.Ф. Куропатенко. Комплекс программ "ВОЛНА" предназначен для математического моделирования одномерных неустановившихся движений сжимаемых идеальных и неидеальных сред с широким спектром моделируемых свойств и процессов в постановках с плоской, цилиндрической и сферической симметрией. Позволяет выделять в решении, где это возможно, "точные" фронты ударных и детонационных волн различной конфигурации, крайние характеристики веера волн разрежения, контактные границы, линии фазовых переходов и все эти особенности могут взаимодействовать друг с другом, порождая новые особенности, также выделяемые в дальнейшем счете. Расчет проводился на равномерной сетке в 5000 интервалов в трех вариантах:

1. "мазанный" счет всех сильных и слабых разрывов;
2. выделение сильных разрывов, слабых разрывов до разрушения и с "размазыва-

нием" ударных волн, образующихся в момент разрушения;

3. выделение слабых разрывов и всех сильных разрывов, в том числе, образующихся в момент разрушения.

На рисунке 1 представлена (x, t) - диаграмма течения в целом для варианта 3 (наиболее точное решение). Здесь и далее на (x, t) - диаграммах: сплошные жирные линии - контактные границы, сплошные линии с ударные волны, пунктиры - крайние характеристики волн разрежения, штрихи - разрушенные счетные интервалы.

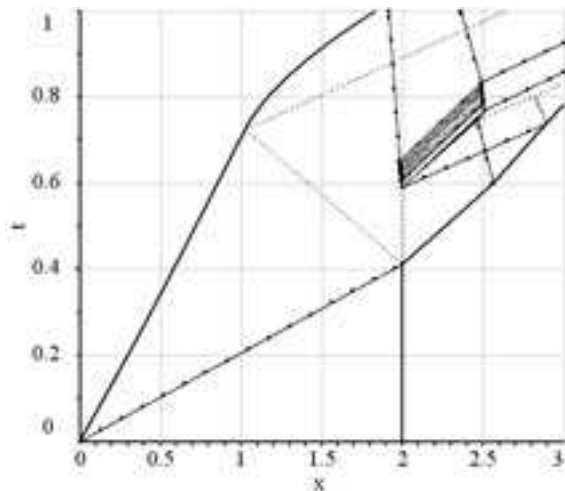


Рис. 1. (x, t) - диаграмма течения в целом для варианта 3.

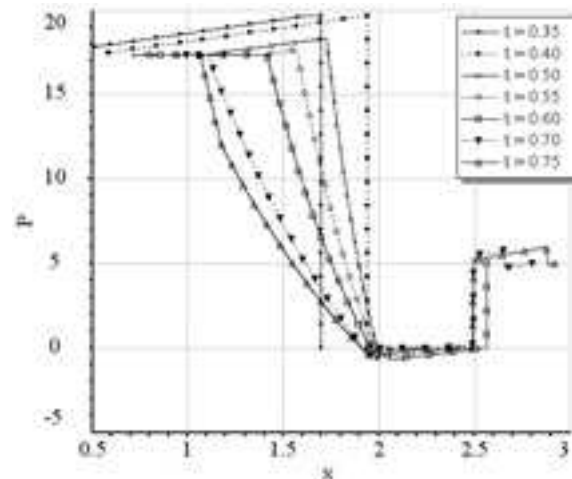


Рис. 2. Профили давления на некоторые моменты времени для варианта 3.

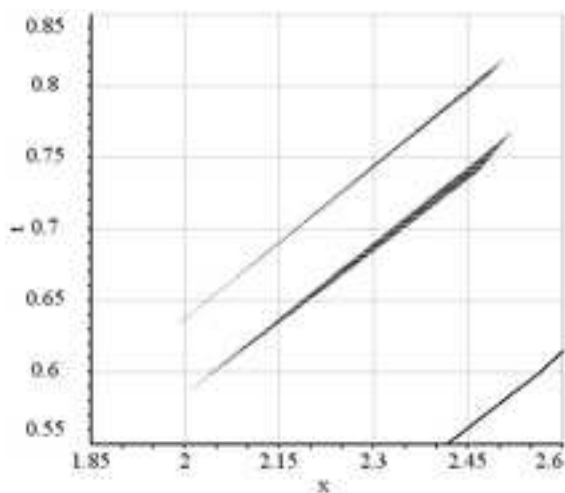


Рис. 3. (x, t) - диаграмма области разрушения для варианта 1.

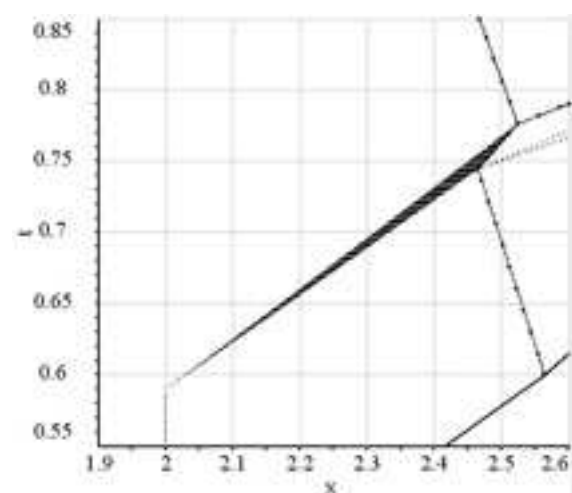


Рис. 4. (x, t) - диаграмма области разрушения для варианта 2.

На рисунке 2 приведены профили давления на некоторые моменты времени для варианта 3. На рисунках 3 - 5 представлены (x, t) - диаграммы области разрушения для

вариантов 1, 2 и 3, соответственно. Видно, что в варианте 1 первый откол образуется раньше по пространству и времени, вместо целой области разрушенного вещества присутствует только два разрушенных интервала. В варианте 2 момент образования первого откола соответствует наиболее точному решению - вариант 3, область разрушения также отсутствует, второй откол не образовался за счет "сноса" картины течения по времени. В варианте 3 область разрушения прописана с хорошей точностью и представлена совокупностью большого числа разрушенных интервалов.

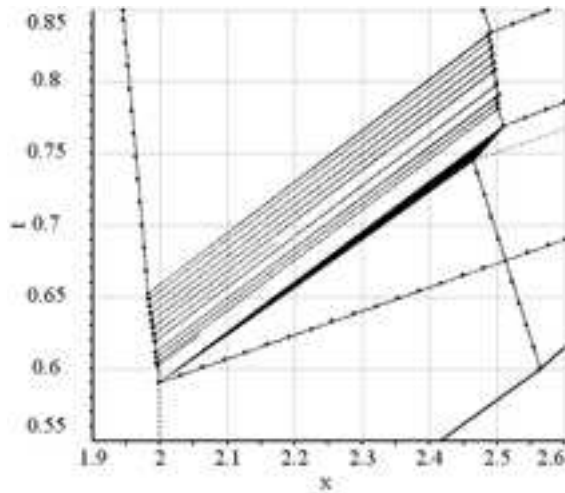


Рис. 5. (x, t) - диаграмма области разрушения для варианта 3.

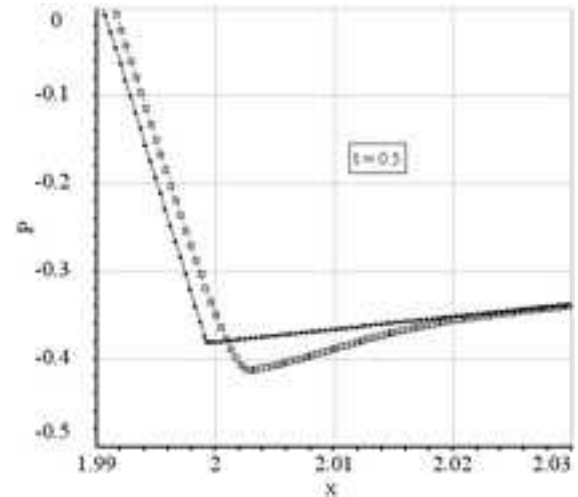


Рис. 6. Профили давления для варианта 1 (пунктирная линия) и для вариантов 2, 3 (сплошная линия) на момент времени $t = 0.5$.

В данной задаче реализуются условия, при которых скорость фронта разрушения вещества сопоставима со скоростью ударной волны, сформированной в момент первого откола, и на процесс дальнейшего разрушения вещества сильно влияет "размытие" этой ударной волны (рис. 3-5).

При моделировании течений с учетом откольного разрушения необходимо обратить внимание, что процесс формирования откольных поверхностей весьма чувствителен к точности описания профилей в волне разрежения. Для существенного повышения точности моделирования откольного разрушения необходимо явно выделять в решении крайние характеристики волн разрежения. В настоящей реализации комплекса "ВОЛНА" крайние характеристики центрированных волн разрежения, образующихся после выхода ударных волн на свободные границы, рассчитываются методом характеристик с помощью модуля, являющегося частью программы "МХС"[4].

На рисунке 6 представлены профили давления в области минимальных значений на момент времени для всех вариантов. Видно, что в решении без выделения слабых разрывов - вариант 1 - присутствует значительное искажение решения (профиль давления "проваливается" и отстает), что приводит в дальнейшем к более раннему образованию первого откола по пространству и времени (Рис. 3).

Для окончательного объяснения полученных результатов рассмотрим момент образования первого откола (разрушение интервала 2) в совокупности с соседними с ним интервалами (Рис. 7). Здесь маркерами обозначены середины сеточных интервалов; линия "а" соответствует распределению давления за один временной шаг до разрушения

интервала 2 ($t = 0.591301$) для вариантов 2 и 3; временной шаг ($t = 0.591934$), следующий за шагом разрушения интервала 2, для варианта 2 (линия "б") и варианта 3 (линия "в").

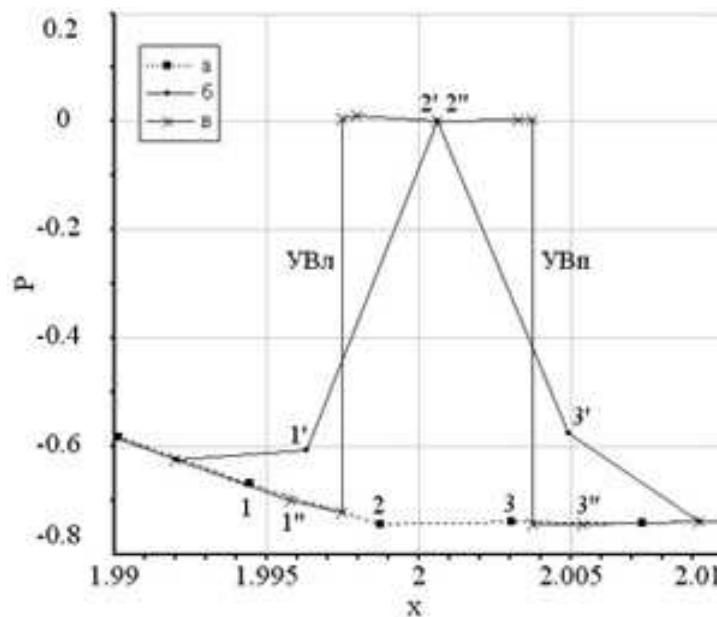


Рис. 7. Профили давления при формировании первого откола для вариантов 2 и 3.

В момент разрушения рассматриваемого интервала 2 давление в нем становится равным нулю (2 переходит в 2' и 2''), а, следовательно, в обе стороны от его границ начинают распространяться ударные волны: влево - УВл, направо - УВп. Обычно эти ударные волны не выделяются явным образом (как разрывы в решении), а рассчитываются как "мазаные" ударные волны (линия "б"). Поэтому разрушенный интервал 2 влияет на соседние интервалы 1 и 3 уже на следующем временном шаге при этом давление в них возрастает (1 переходит в 1', 3 - в 3'). Если эти ударные волны УВл и УВп выделять явным образом в решении (линия "в"), то разрушенный интервал 2 не влияет на соседние интервалы 1 и 3 при этом продолжается их разрежение и давление падает (1 переходит в 1'', 3 - в 3''). Требуется некоторое время для того, чтобы ударные волны УВл и УВп успели дойти до середин соседних интервалов и повлиять на них. Выделенные разрывы УВл и УВп четко разграничивают области влияния: сжатие происходит непосредственно на фронте, а перед фронтом движение таково, как будто рассматриваемый интервал 2 и не разрушался, т.е. при наличии растягивающих напряжений продолжается разрежение, тогда как при их "мазаном" счете происходит сжатие. Также необходимо учитывать, что для формирования "мазаной" ударной волны тоже требуется некоторое время (некоторое число счетных шагов), тогда как при явном выделении ударных волн их формирование происходит мгновенно в момент распада произвольного разрыва. Таким образом, при "мазаном" счете ударных волн происходит локальное искажение решения, что, в свою очередь, приводит к тому, что соседние и ближайшие с ними интервалы не разрушаются вовсе, либо разрушение происходит с заметным опозданием. Даже значительное увеличение числа сеточных интервалов приводит к незначительному увеличению разрушенных интервалов. Ситуация сильно усугубляется при малом числе пространственных интервалов и незначительном градиенте растягивающих напряжений. В реальных задачах растягивающие напряжения

существуют достаточно малое время, и в решении из-за локального искажения могут не успеть сформироваться условия для разрушения других интервалов (Рис. 4). Следовательно, для существенного повышения точности моделирования откольного разрушения необходимо явно выделять в решении образующиеся в момент разрушения фронты ударных волн.

Для получения сходимости расчетов при измельчении пространственной сетки необходимо "точно" определять момент разрушения внутри шага интегрирования по времени и координату образования трещины, т.е. отказаться от разрушения всего счетного интервала при превышении предела прочности, причем на произвольную величину.

Предлагаемый алгоритм моделирования откольного разрушения учитывает все перечисленные выше тонкости моделирования течения, поэтому значительно превосходит другие методы, что показано на примере расчетов задач.

Список литературы

- [1] Глушак Б.Л., Куропатенко В.Ф., Новиков С.А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. 295 с.
- [2] Куропатенко В.Ф., Макеева И.Р. О точности расчета откольного разрушения // Химическая физика. 2002. Том 21, № 9. С.72-78.
- [3] Куропатенко В.Ф., Коваленко Г.В., Кузнецова В.И. и др. Комплекс программ ВОЛНА и неоднородный разностный метод для расчета неустановившихся движений сжимаемых сред // ВАНТ, Сер. Методики и программы числ.решения задач матем. физики. 1989. Вып.2. С.9-17.
- [4] Боков Д.Н., Боков Н.Н. Многосеточный подход к численному решению уравнений газовой динамики методом характеристических направлений с выделением сильных и слабых разрывов для произвольного уравнения состояния // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2000. Вып. 2. С.10-20.