

УДК 539.3

## ФРАГМЕНТАЦИЯ ТОЛСТОСТЕННЫХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2002 г. А. В. Герасимов, С. В. Пашков

*Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
при Томском государственном университете*

Поступила в редакцию 20.12.2000

В работе проведено численное моделирование дробления толстостенной цилиндрической медной оболочки под действием продуктов детонации взрывчатых веществ. Задача рассматривалась в плоской двумерной постановке. При решении задачи учитывался вероятностный характер распределения начальных дефектов структуры материала.

В ряде задач характер разрушения предопределяется условиями нагружения и формой взаимодействующих тел (например, откол, разрушение тел с подрезами, выбивание пробки ударником и т.д.) и его можно предсказать достаточно точно априори. При взрывном дроблении характер фрагментации заранее неизвестен и поэтому при численном моделировании процесса разрушения важен учет случайного характера распределения начальных отклонений физико-механических характеристик материала, вызванных различными дефектами структуры.

Процессы высокоскоростного ударного и взрывного нагружения твердых тел занимают весьма важное место в технике, промышленности, военном деле. Частным случаем подобных задач являются задачи о взрывном разрушении толстостенных оболочек. На первых этапах исследований основное внимание уделялось кинематике оболочки, главным образом, определению ее конечной скорости. Рассмотрение проводилось в одномерной постановке, в рамках модели тонкой несжимаемой жидкой оболочки, что, однако, позволяло получить детальное описание газодинамических процессов в оболочке. Впоследствии, по мере развития ЭВМ и усложнения прикладных задач, численное моделирование стало проводиться в двух- и трехмерной постановках, с учетом волновых процессов, сжимаемости и прочности. Однако сложный характер процесса ограничивает используемые модельные представления, и разрушение описывается, как правило, в упрощенном виде, не позволяющем предсказать характер фрагментации. С этой точки зрения, разрушение осесимметричной цилиндрической оболочки под действием продуктов детонации ВВ, рассматриваемое в данной работе, методологически наиболее удобная модельная задача, на которой можно от-

рабатывать подходы, используемые при численном моделировании вероятностного разрушения.

Эксперименты показывают, что в стенке оболочки в процессе расширения формируется отколо-разрывная зона, где наблюдается рост поврежденностей и происходит образование еще двух типов трещин: отрывных, образующихся у внешней поверхности, и сдвиговых – у внутренней поверхности оболочки. Если образование отколо-разрывной зоны носит детерминированный характер, то формирование сдвиговых и отрывных трещин носит вероятностный характер. Это обусловлено наличием исходных неоднородностей в массиве материала оболочки и их влиянием на картину разрушения при действии на нее высокоинтенсивного динамического нагружения.

Целью данной работы было проведение анализа фрагментации толстостенной цилиндрической медной оболочки под действием продуктов детонации ВВ и исследование влияния параметров численного эксперимента на формирование осколочного спектра в более полной постановке, учитывающей вероятностный характер разрушения, образование контактных поверхностей при росте трещин и контактное взаимодействие образовавшихся осколков.

Система уравнений, описывающая поведение материала оболочки и продуктов детонации (ПД), базируется на фундаментальных законах сохранения массы, импульса и энергии. Материал оболочки подчиняется соотношениям Прандтля–Рейса при условии текучести Мизеса и уравнению состояния типа Тэта [1]. Накопление и рост поврежденности в материале описываются с помощью модели пористой среды [2].

Для ПД используется модель невязкого, нетеплопроводного газа с уравнением состояния в виде политропы Ландау–Станюковича [1]. В качестве

критерия разрушения был выбран критерий разрушения по максимальной эквивалентной пластической деформации. В качестве исходных брались невозмущенное состояние оболочки и автомодельное распределение параметров за фронтом расходящейся цилиндрической детонационной волны в газе, образующейся при осевом инициировании ВВ. На внешней поверхности оболочки ставились условия свободной поверхности. На внутренней поверхности ставились условия непротекания по нормали и идеального скольжения по касательной. По мере возникновения в процессе расчета трещин и, как следствие, новых контактных границ, на них также ставились условия идеального скольжения. Задача решалась с использованием лагранжевого подхода к описанию движения сплошной среды. Для расчета упругопластических течений использовалась методика, реализованная на трехугольных ячейках и базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса [3] для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона [4] для расчета контактных взаимодействий.

Для того чтобы численно моделируемый процесс разрушения отражал реальную картину, полученную в экспериментах, необходимо случайным образом внести определенные возмущения в физико-механические характеристики материала оболочки. В данной работе начальные неоднородности моделировались тем, что такая прочностная характеристика материала, как максимальная эквивалентная пластическая деформация, распределялась по ячейкам расчетной области с помощью модифицированного генератора случайных чисел. Плотности вероятности случайных величин брались в виде вейбулловского распределения, экспоненциального закона и нормального гауссовского распределения со средним арифметическим, равным табличному значению, и варьируемой дисперсией.

Для описания фрагментации использовались два подхода. Первый состоит в том, что узел сетки раздваивается при выполнении в его окрестности некоторого критерия разрушения и трещина распространяется по узлам разностной сетки. Вторым подходом заключается в том, что при выполнении в ячейке выбранного критерия разрушения происходит локальная перестройка разностной сетки. В этом случае параметры, характеризующие состояние среды, пересчитываются для новой ячейки как сумма по входящим в нее старым ячейкам, пропорционально их массовой доле.

Для проверки работоспособности численной модели фрагментации при сдвиговом разрушении и сравнения результатов, полученных с использованием различных подходов к описанию трещин, в плоской двумерной постановке был проведен анализ разрушения срезом толстого медного бруска на равномерной сетке, полученной с исполь-

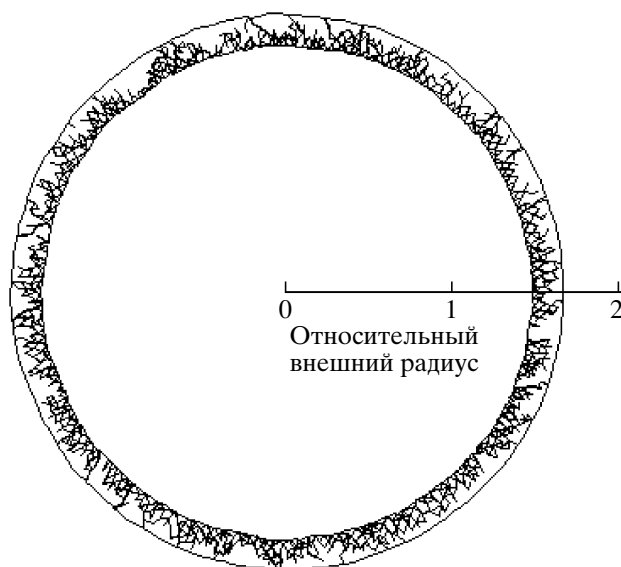


Рис. 1. Формирование трещин. Время  $t = 27$  мкс.

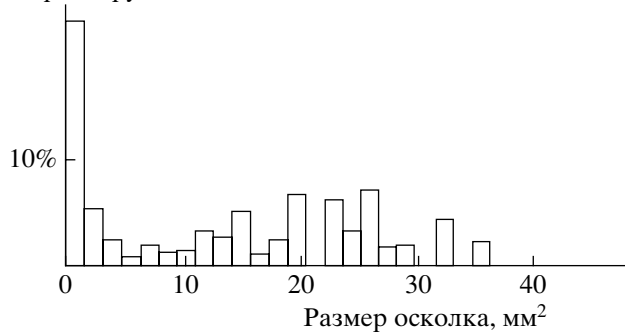
зованием автоматической триангуляции, и на адаптированной сетке, на которой ориентация ячеек вблизи линии ожидаемого разрушения была изменена. Расчеты показали, что при одном и том же критерии разрушения метод локальной перестройки проявляет гораздо меньшую чувствительность к начальному построению сетки, чем метод раздвоения узлов, поэтому в дальнейшем для описания фрагментации использовался метод локальной перестройки сетки.

В качестве тестовых расчетов были проведены сравнения распада разрыва при нормальном падении детонационной волны на внутреннюю поверхность оболочки. Также проводилось сравнение численных результатов с экспериментально определенными значениями радиуса разрушения, взятыми из работы [5], и с экспериментами [6] по торможению очень толстых оболочек.

Для исследования динамики разрушения оболочки и процесса формирования осколочного спектра был проведен ряд расчетов для пары медь – гексоген. Размеры оболочки брались следующими: внутренний радиус – 2 см, внешний радиус – 3 см. В численных расчетах принимались следующие характеристики материала оболочки: плотность  $\rho_0 = 8900$  кг/м<sup>3</sup>, модуль сдвига  $\mu = 46$  ГПа, предел текучести  $\sigma_T = 200$  МПа, давление  $p = A[(\rho/\rho_0)^{4.8} - 1]$ , где  $A = 30.2$  ГПа, и параметры ВВ:  $\rho_{ВВ} = 1650$  кг/м<sup>3</sup>, скорость детонации  $D = 8310$  м/с.

Для определения момента образования трещины использовался критерий разрушения по максимальным эквивалентным пластическим деформациям. Критические значения  $\epsilon_{max}^p$  распределялись по ячейкам расчетной области по нормальному закону распределения с дисперсией десятипроцентно-

Распределение массы оболочки по размеру осколков



**Рис. 2.** Осколочный спектр (число осколков равно 650). Распределение  $\varepsilon_{\max}^p$  по нормальному закону в интервале  $\pm 10\%x_0$  ( $x_0$  – табличное значение). Время  $t = 32$  мкс.

го отклонения. Ниже представлены результаты расчетов для описания разрушения, в которых использовалась локальная перестройка разностной сетки. Дисбаланс энергии к моменту начала разрушения составил около 5%, а к моменту окончательного формирования осколочного спектра – около 8%.

Как видно из рис. 1, разрушение начинается с внутренней поверхности путем зарождения мно-

гочисленных трещин сдвига, затем зона дробления распространяется в глубь оболочки, и на заключительном этапе происходит разрушение слоя, прилегающего к внешней поверхности, путем образования радиальных трещин отрыва. На рис. 2 представлен окончательно сформировавшийся осколочный спектр, который качественно подтверждает экспериментальные данные о бимодальности (в координатах “масса по массе”) распределения фрагментов оболочки. К моменту  $t = 40$  мкс разгон осколков практически завершен (оставшаяся потенциальная энергия составляет около 1.5%). Окончательная скорость осколков составляет порядка 900–1000 м/с.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баум А.Ф., Орленко Л.П., Станюкович К.П., Чельшиев В.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
2. Johnson J.N. // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. № 4. P. 2812.
3. Уилкинс М.Л. // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212.
4. Johnson G.R. // AIAA J. 1979. V. 17. № 9. P. 975.
5. Селиванов В.В. // ЖПМТФ. 1985. № 3. С. 118.
6. Райнхарт Д., Пирсон Д. Поведение материалов при импульсных нагрузках. М.: Изд-во иностр. лит., 1958.