

УДК 539.3

А.В. ГЕРАСИМОВ*, С.В. ПАШКОВ*, В.Г. СУРКОВ**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОБИТИЯ СЛОИСТОЙ ПРЕГРАДЫ
ПОД УГЛОМ К ПОВЕРХНОСТИ¹**

В настоящей работе в трехмерной постановке рассмотрена задача о пробитии двухслойной преграды (стеклотекстолит СТ-НТ + сплав Д16) шариком из стали ШХ-15 по нормали и под углом к поверхности преграды. Для численного моделирования использовались уравнения, описывающие движение сжимаемого упругопластического тела, и учитывался вероятностный характер процесса разрушения преграды и ударника. Было проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов и получено их удовлетворительное совпадение.

Введение

Проблема защиты элементов конструкций от интенсивных динамических нагрузок для современной техники имеет важное значение в виду постоянного совершенствования средств ударно-волнового воздействия на защищаемые объекты. Использование слоистых преград позволяет предотвратить разрушение и повреждение защищаемых конструкций и объектов. Поэтому численное моделирование процессов высокоскоростного взаимодействия ударников со слоистыми системами позволяет получить основные качественные и количественные характеристики указанного процесса и дать инженерам и конструкторам инструмент при проектировании их защитных систем.

Основные соотношения

Уравнения, описывающие пространственное адиабатное движение прочной сжимаемой среды, являются дифференциальными следствиями фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии. В общем случае они включают следующие уравнения [1–11]: уравнение неразрывности, уравнения движения, уравнение энергии.

К этим уравнениям необходимо добавить уравнения, учитывающие соответствующие термодинамические эффекты, связанные с адиабатным сжатием среды и прочность среды. Они необходимы также для того, чтобы замкнуть систему уравнений, описывающую движение прочной сжимаемой среды, которая является незамкнутой, поскольку индивидуальные физические свойства среды в этой системе не отражены, а число уравнений меньше числа неизвестных. Недостающие замыкающие систему уравнения, отражающие физические свойства исследуемой среды, называются определяющими.

В общем случае при воздействии сил на твердое деформируемое тело происходит изменение, как объема (плотности) тела, так и формы тела, причем по различным зависимостям. Поэтому тензор напряжений представляется в виде суммы шарового тензора и деватора тензора напряжений. Для описания сопротивления тела сдвигу используем соотношения Прандтля – Рейсса [7, 10], а также условие пластичности Мизеса. В численных расчетах обычно применяется процедура приведения напряжений к кругу текучести [3]. Уравнение состояния сплошного компонента выбиралось в форме Ми – Грюнайзена [5].

Также учитывалось, что при высокоскоростном взаимодействии могут реализовываться два механизма разрушения: сдвиговой и откольный. В качестве критерия сдвигового разрушения использовался критерий предельной эквивалентной пластической деформации [12]. В этом случае

¹ Работа выполнена при частичном финансировании по программе Минобрнауки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 годы)» (проект РНП 2.1.2. 2398) и частичной поддержке грантов РФФИ № 05-08-01196а, 06-08-00903а и 07-08-00623а.

при достижении эквивалентной пластической деформацией предельного значения расчетная ячейка считается разрушенной.

В реальных материалах процесс разрушения всегда определяется внутренней структурой среды, наличием неоднородностей, как правило, вызванных различной ориентацией зерен в поликристаллическом материале или неоднородностями в составе композиционных материалов, различием в микропрочности внутри зерна и на межзеренной или межфазной границе.

Поэтому для повышения адекватности численно моделируемого процесса экспериментальным данным необходимо внести возмущения в физико-механические характеристики разрушаемой среды, т.е. случайное распределение факторов, определяющих прочностные свойства материала. В работе физико-механические характеристики среды, отвечающие за прочность, считаются распределенными случайным образом по объему материала. Плотность вероятности распределения данных параметров берется в виде различных законов распределения, в общем случае зависящих от табличного (среднего) значения распределяемого параметра, варьированной дисперсии распределения данного параметра, и прочих характеристик среды. Такие параметры, как предел текучести, предел прочности, максимальные деформации и прочие константы, определяющие момент наступления разрушения в различных теориях прочности и критериях разрушения, напрямую зависят от числа и размера дефектов и должны быть распределены по объему случайным образом, с дисперсией, зависящей от однородности материала. Естественная фрагментация ударника и преграды рассчитывается с помощью введения вероятностного механизма распределения начальных дефектов структуры материала для описания отрывных и сдвиговых трещин. В качестве критерия разрушения при интенсивных сдвиговых деформациях в задачах используется достижение эквивалентной пластической деформацией или удельной величиной работы пластических деформаций своего предельного значения [1, 12]. Начальные неоднородности моделировались тем, что предельная эквивалентная пластическая деформация распределялась по ячейкам оболочки с помощью модифицированного генератора случайных чисел, выдающего случайную величину, подчиняющуюся выбранному закону распределения. Плотности вероятности случайных величин брались в виде нормального гауссовского распределения со средним арифметическим, равным табличному значению, и варьированной дисперсией.

Система основных уравнений дополняется начальными и граничными условиями. В начальный момент времени все точки ударника имеют осевую скорость с учетом ее знака, а состояние преграды предполагается невозмущенным. На границах, свободных от напряжений, выполняются условия. На участке контакта между телами ставится условие идеального скольжения одного материала относительно другого вдоль касательной и условие непротекания по нормали.

Для расчета упругопластических течений используется методика, реализованная на тетраэдрических ячейках и базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса [3, 4] для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона [13, 14] для расчета контактных взаимодействий.

Результаты расчетов

В трехмерной постановке рассматривалась задача о пробитии двухслойной преграды (стеклотекстолит СТ-НТ + сплав Д16) шариком из стали ШХ-15. Диаметр шарика 12,7 мм, вес – 8,4 г. Толщина преграды: СТ-НТ-10,5 мм, Д16-6,0 мм. На рис. 1 представлена расчетная схема и исходная сетка задачи.

Были проведены расчеты соударения шарика и преграды по нормали к поверхности последней. Скорость ударника равнялась 700 и 900 м/с. Картина процесса в сечении z - y представлена на рис. 2. Внедрение шарика сопровождается разрушением двухслойной преграды и образованием облака осколков при сквозном пробитии последней (рис. 2, δ).

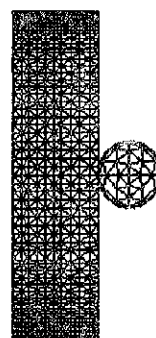


Рис. 1. Расчетная схема и исходная сетка

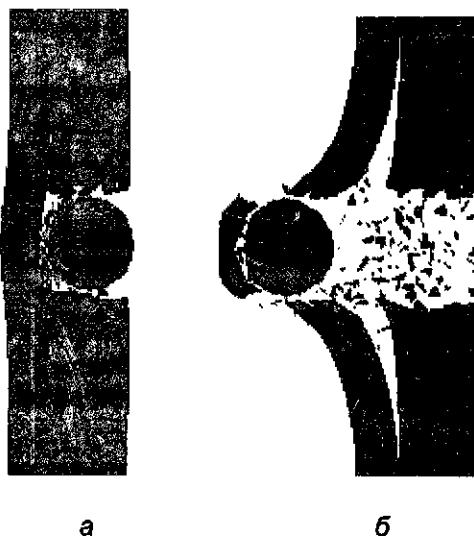


Рис. 2. Конфигурации системы ударник – преграда при соударении ($V_n = 900$ м/с) по нормали к поверхности (2-D разрез): а – 15 мкс; б – 54 мкс

С целью тестирования программы было проведено сравнение численных результатов с экспериментальными данными, полученными в НИИПММ под руководством В.П. Глазырина. Результаты сравнения приведены на рис. 3 и представляются вполне удовлетворительными. Здесь V_n – начальная скорость ударника, V_k – конечная скорость ударника после пробития преграды.

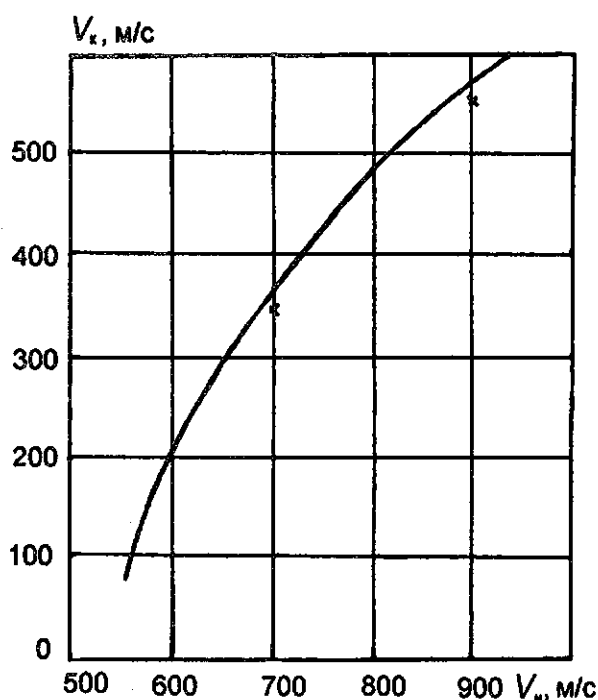


Рис. 3. Сравнение численных и экспериментальных результатов: сплошная линия – эксперимент, крестики – численные расчеты

Соударение преграды (СТ-НТ, толщина 8,0 мм + АМг6, толщина 5,0 мм) и ударника (ШХ15, диаметр 12,7 мм) под углом 30° от нормали исследовалось при скоростях 741 и 962 м/с. Полученные расчетные значения скоростей ударника после пробития преграды приведены в таблице, где они сравниваются с экспериментальными данными.

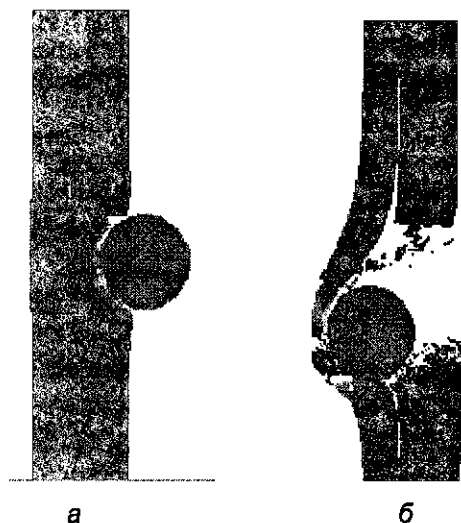


Рис. 4. Конфигурации системы ударник – преграда при соударении ($V_n = 900$ м/с) под углом 30° от нормали к поверхности (2-D разрез): а – 5 мкс; б – 28 мкс

Сравнение экспериментальных и расчетных значений скоростей ударника после пробития преграды

V_n , м/с	V_x , м/с, эксперимент	V_x , м/с, расчет
741	516	490
962	723	700

Заключение

Предложена 3-D-методика моделирования процессов высокоскоростного взаимодействия компактных ударников со слоистыми преградами при соударении по нормали и под углом к поверхности последних. Учитывается вероятностный характер фрагментации соударяющихся тел, что приводит к трехмерности задачи даже при ударе по нормали к поверхности преграды. Проведенное сравнение теоретических и экспериментальных данных показало удовлетворительное совпадение результатов, что позволяет использовать разработанную методику для расчета различных машиностроительных конструкций, подвергающихся ударным нагрузкам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика взрыва / Под ред. К.П. Станюковича. – М.: Наука, 1975.
2. Орленко Л.П. Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках. – М.: Машиностроение, 1964.
3. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. – С. 212–263.
4. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // Труды Междунар. коллоквиума по газодинамике взрыва. 19–23 августа 1969 г., Новосибирск. – М.: Изд-во ВЦ АН СССР, 1971. – Т. 1. – С. 408–517.
5. Johnson J.N. Dynamic fracture and spallation in ductile solids // J. Appl. Phys. – 1981. – V. 52. – No. 4. – P. 2812–2825.
6. Carroll M.M. and Holt A.C. Static and dynamic pore-collapse relations for ductile porous materials // J. Appl. Phys. – 1972. – V. 43. – No. 4. – P. 1626–1636.
7. Григорян С.С. Об основных представлениях динамики грунтов // ПММ. – 1960. – Т. 24. – Вып. 6. – С. 1057–1072.
8. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966.
9. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды. – М.: Наука, 1971.
10. Новацкий В.К. Волновые задачи теории пластичности. – М.: Мир, 1978.

11. Wilkins M.L. Modeling the behavior of materials // Proc. of the Intern. conf. «Structural impact and crashworthiness». 16–20 July, London. – London; New York, 1984. – V. 2. – P. 243–277.
12. Крейнхаген К.Н., Вагнер М.Х., Пьечочки Дж.Дж., Бьорк Р.Л. Нахождение баллистического предела при соударении с многослойными мишенями // Ракет. техника и космонавтика. – 1970. – Т. 8. – № 12. – С. 42–47.
13. Johnson G.R., Colby D.D., and Vavrick D.J. Three-dimensional computer code for dynamic response of solids to intense impulsive loads // Int. J. Numer. Methods Engng. – 1979. – V. 14. – No. 12. – P. 1865–1871.
14. Johnson G.R. Dynamic analysis of explosive-metal interaction in three dimensions // Trans. ASME. J. of Appl. Mech. – 1981. – V. 48. – No. 1. – P. 30–34.

*НИИ прикладной математики и механики Томского госуниверситета

**Институт химии нефти СО РАН

E-mail:ger@mail.tomsknet.ru