Министерство образования и науки Республики Казахстан Национальная инженерная академия Республики Казахстан Павлодарский государственный университет им. Торайгырова Казахстанский национальный университет им. аль-Фараби НИИ математики и механики КазНУ Институт вычислительных технологий СО РАН Технопарк «Новосибирск» Новосибирский государственный университет Новосибирский государственный технический университет

ТРУДЫ

международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании»

I том

20-22 сентября 2006 г. г. Павлодар

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ СЛОИСТЫХ ПРЕГРАД

А.В. Герасимов, В.Г. Сурков ^{*} Томск (НИИ прикладной математики и механики) Томск (^{*}Институт химии нефти СО РАН)

Как показывают исследования слоистые комбинированные преграды обпадают более высокими защитными свойствами, чем монолитные. В составе таких преград, помимо монолитных металлических материалов, используют керамику, металлокерамику, металлокомпозиты, пористые материалы, функщонально градиентные материалы. Перечисленные выше материалы оказывают лишь механическое воздействие, если же комбинированная преграда в качестве отдельных слоев содержит смесь экзотермически реагирующих веществ, то в этом случае возможно и термохимическое воздействие этого слоя на материал ударника.

Представленное исследование, базируется на численном моделировании троцессов ударного деформирования и разрушения слоистых систем, исследования волновых процессов протекающих в них, варьирования в расчетах физико-механических характеристик и геометрических параметров слоев с целью повышения защитных свойств композитной преграды.

Для описания поведения материалов слоев используется модель пористото идеально упругопластического материала с непрерывным распределением физико-механических свойств по пространственной координате. Эта модель позволяет описывать поведение изотропных, слоистых, пористых, смесевых, функционально-градиентных материалов, использование которых предполагается в перспективной композитной преграде. Учитывая в уравнении энергии теплоту химической реакции возможно, с помощью указанной выше модели, моделировать процессы в химически реагирующих материалах.

Для описания разрушения материалов при интенсивных динамических нагрузках используется модель повреждаемой (пористой) среды [1, 2], компонентами которой являются сплошной материал (матрица) и поры. Если удельный объем материала матрицы V_s , удельный объем пор V_p , то удельный объем пористой среды равен $V = V_s + V_p$. Для описания поведения пористой среды вводят понятия пористости $\Phi = V_p/V$ и параметра пористости $\alpha = V/V_s$, которые связаны соотношением $\Phi = (\alpha - 1)/\alpha$. Предполагаются изотропность и однородность материала матрицы и сферичность пор, начальное распределение которых по объему может быть определено некоторым средним значенисм параметра пористости α_0 .

Уравнения, описывающие пространственное адиабатное движение прочвой пористой сжимаемой среды, являются дифференциальными следствиями фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии [3-10]. К этим уравнениям необходимо добавить уравнения, учитывающие соответствующие термодинамические эффекты, связанные с адиабатным сжатием среды и прочность среды. Для описания сопротивления тела сдвигу, следуя [7,10], используем соотношения Прандтля-Рейса, а также условие пластичности Мизеса.

Основные соотношения дополняются кинетическим уравнением, описывающим рост и сжатие пор [1]. Прочностные характеристики пористого материала рассчитывались по соотношениям [1].

Давление в пористой среде определяется уравнением состояния для сплошного компонента [1]. Уравнение состояния сплошного компонента выбиралось в форме Ми-Грюнайзена [1,3,11].

Кроме того, учитывалось, что при высокоскоростном взаимодействия могут реализовываться два механизма разрушения: сдвиговой и откольный. В качестве критериев сдвигового разрушения использовались критерий предельной эквивалентной пластической деформации [12] $\varepsilon^p = \varepsilon_*^p$ и критерий предельной удельной работы пластических деформаций [13] $A_p = A_p^*$. При достижении ε^p и A_p предельных значений ε_*^p и A_p^* расчетная ячейка считается разрушенной. При моделировании разрушения откольного типа использовалось кинетическое уравнение, учитывающее вязкий характер роста и слияния микропор. При достижении пористостью предельного значения ϕ^* (обычю $\phi^* = 0, 30 \div 0, 33$) материал в ячейке полагался разрушенным и не сопротивляющимся растягивающим усилиям.

В настоящее время существует ряд технологических процессов, позволяющих получать материалы с заданными свойствами. С использованием этих технологий возможно создание многокомпонентных материалов с плавным или плавно-дискретным изменением свойств в определенных направлениях. Такие материалы принято называть функционально градиентными (ФГМ).

Исследованию распространения и трансформации ударных волн в градиентных материалах, концентрация компонентов которых плавно изменяется по толщине, посвящен ряд работ [14-16]. В данной статье используется модель деформирования и разрушения функционально градиентного пористого упругопластического тела при интенсивных динамических нагрузках (взрыв, удар и т.д.), предложенная в [17, 18].

В модели ФГМ рассматриваются градиентные сплавы, характерной особенностью которых является очень слабое химическое взаимодействие компонентов в процессе динамического нагружения. Отсутствие химических превращений позволяет рассчитать начальный удельный объем сплава в заданной точке по модели смеси и использовать уравнение состояния ГС, предложенное в [19]. Для расчета металлокерамик (умеренные давления до ~ 300 Кбар) используется упрощенный вариант уравнения состояния, предложенный в работе [20]. Для описания процессов энерговыделения при твердофазных химических реакциях в смесях, реагирующих при интенсивных динамических нагрузках, используются соотношения, предложенные в [21, 22].

Поэтому предложенная математическая модель позволяет рассчитывать сложные композитные преграды включающие пористые, градиентные, керамические, металлокерамические слои и слои, в которых происходят термохимические реакции в ходе ударного нагружения. Для численного решения задач, использовался метод Уилкинса [6].

С помощью предложенной модели был рассчитан ряд многослойных преград, приведенных ниже.



Рис. 5.

Преграда и ударник – стальные. Толщина преграды равнялась 0,3 см, ударника - 1,2 см. Общая толщина защитного слоя – 2, 7 см. В том случае, ко-

гда вводится слой металлокерамики, то его толщина равнялась 1, 2 см. Для расчета металлокерамики использовалось уравнение состояния из работы [20]. Основные физико-механические характеристики материалов, необходимые для проведения численных расчетов взяты из [17-18, 20-22]. Скорость ударника - 1000 м/с.

На рис. 6 приведены распределения давления в слоистой системе для защитного слоя из сплошного титана в характерные моменты времени: при распаде разрыва, выходе ударной волны на контактную границу преграда защитный слой и в момент откольного разрушения слоистой системы. Сплошная линия соответствует 1 мкс, штриховая – 6 мкс и штрих – пунктирная - моменту разрушения (9, 4 мкс). Аналогичных обозначений будем придерживаться и далее. Как видно на рис. 7 откольное разрушение произошло в защитном титановом слое в момент времени t=9, 4 мкс. В преграде возникла умеренная поврежденность материала $\alpha=1,15$.



В следующем варианте слоистой системы использовался пористый тигановый защитный слой.



На рис. 8. приведена картина распространения ударной волны по слоистой системе с пористым защитным слоем. Введение пористого слоя привело к смещению зоны разрушения в ударник и увеличению момента времени разрушения ударника до 23, 5 мкс (рис.9).

На следующем этапе исследования в слоистую систему была введена пластина металлокерамики между слоем сплошного титана и ударником. Состав металлокерамики: 20% $Al_2O_3 + 80\%$ Al. Распределения давления в системе для указанных выше трех моментов времени приведены на рис. 10. Откольное разрушение преграды произошло в момент времени t=9, 7 мкс (рис. 11). Здесь также наблюдаются повреждения титановом слое, достигающие уровня $\alpha=1,25$.



Далее рассматривался случай, аналогичный предыдущему, но слой титана брался - пористым. Характер изменения давления в ударной волне для трех моментов времени показан на рис. 12. На рис. 13 сплошной линией приведено начальное распределение пористости в слоистой системе. Штриховая линия дает распределение пористости в момент времени t=6 мкс. Наблюдается участок не полностью сжатого пористого титана. В момент времени t=11, 2 мкс, соответствующий откольному разрушению преграды, наблюдаются заметные повреждения в слое титана ($\alpha=1,27$) и в ударнике ($\alpha=1,31$).



305

В заключение исследования рассматривался вариант слоистой системы состоящей из стальной преграды, реагирующего слоя, состоящего из стехиометрической смеси титана и углерода, пластины металлокерамики и стального ударника. При давлении в ударной волне равном 0,07 Мбар [21] в смеси поддерживается экзотермическая реакция превращения Ti и C в TiC, сопровождающаяся выделением энергии. На рис. 14 приведены распределения давления в слоистой системе для трех моментов времени. Штриховая линия соответствует моменту времени t=6 мкс. Здесь наблюдается существенный рост давления, который обусловлен энерговыделением за фронтом ударной волны в процессе взаимодействия Ti и C. Взаимодействие волны разрежения от тыльной поверхности ударника с волной разрежения от тыльной поверхности преграды привели к интенсивным растягивающим напряжениям в преграде и откольному разрушению в ней (рис. 15). Высокий уровень поврежденностей наблюдается в прилегающей к преграде части слоя TiC.

Предложенная в работе физико-математическая модель позволяет описать поведение широкого круга современных и перспективных материалов, используемых в защите различных объектов. Проведенные исследования показали, что использование в качестве защитных слоев различных перспективных материалов и их комбинаций дает возможность, в определенной степени, воздействовать на амплитудные значения ударных волн распространяющихся в слоистых системах, а также изменять местоположение и время появления откольных трещин.



Работа выполнена при частичном финансировании по программе Минобразования РФ "Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 годы)" (проект РНП 2.1.2. 2398) и частичной поддержке грантов РФФИ № 05-08-01196а и №06-08-00903а

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Johnson J.N. Dynamic fracture and spallation in ductile solids//J. Appl. Phys., v.52, № 4, 1981, pp. 2812-2825.1. Физика взрыва /Под ред. К. П. Станюковича. М., Наука, 1975, 704 с.
- 2. Carroll M. M., Holt A. C. Static and dynamic pore-collapse relations for ductile porous materials//J. Appl. Phys., v. 43, № 4, 1972, pp. 1626-1636
- 3. Физика взрыва /Под ред. К. П. Станюковича. М., Наука, 1975, 704 с.
- 4. Орленко Л.П. Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках. М., Машиностроение, 1964, 168 с.
- 5. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений/В кн.: Вычислительные методы в гидродинамике, М., Мир, 1967, с. 212 – 263.
- Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений/Труды Междунар. коллоквиума по газодинамике взрыва, 19-23 августа 1969, Новосибирск, М., Изд-во ВЦ АН СССР, 1971, т. 1, с. 408-517.
- 7. Григорян С.С. Об основных представлениях динамики грунтов//ПММ, том 24, вып.6, 1960,с. 1057-1072.
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., Наука, 1966, 688 с.
- 9. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды. М., Наука, 1971, 856 с.
- 10. Новацкий В.К. Волновые задачи теории пластичности. М., Мир, 1978, 312 с.
- 11. Райни Т.Д., Халда Е. Дж. Эффективность метеорной защиты, состоящей из двух слоев различных материалов//Ракет. техника и космонавтика, том 6, №2, 1968, с. 177-185.
- Крейнхаген К. Н., Вагнер М. Х., Пьечоцки Дж. Дж., Бьорк Р. Л. Нахождение баллистического предела при соударении с многослойными мишенями//Ракет. техника и космонавтика, том 8, № 12, 1970, с. 42 - 47.
- 13. Майнчен Дж., Сак С. Метод расчета "Тензор"/ В кн.: Вычислительные методы в гидродинамике, М., Мир, 1967, с. 185 211.
- 14. Герасимов А.В., Кректулева Р.А. Некоторые результаты численных экспериментов по распространению пространственных ударных волн в материалах с градиентным распределением физико-механических свойств/ Тез. докл. Х Симп. по горению и взрыву. Детонация, сент. 1992, Черноголовка, изд-во Ин-та хим. физики, 1992, с. 137-138.
- 15. Кректулева Р. А. Закономерности трансформации плоских ударных волн в градиентных средах/В кн.: Механика деформируемого твердого тела, Томск, Изд-во Том. ун-та, 1992, с. 35 40.
- 16. Кректулева Р. А., Герасимов А. В. Пространственное распространение ударного импульса в конденсированных градиентных средах/ Труды XIII Межресп. конф. "Численные методы решения задач теории упруго-

сти и пластичности", 22-24 июня 1993, Новосибирск, изд-во ИТПМ СО РАН, 1995, с. 104 - 108.

- 17. Герасимов А.В., Кректулева Р.А. Математическая модель поведения многокомпонентного пористого упругопластического тела при динамическом нагружении//Пробл. прочности, № 2, 1999, с. 139-150.
- 18. Герасимов А.В., Кректулева Р.А. Численное моделирование деформирования и разрушения функционально градиентных пористых материалов при взрывном и ударном нагружении//Механика композиционных материалов и конструкций, том 5, № 3, 1999, с. 94-106.
- Кректулева Р.А., Платова Т.М. Моделирование поведения многокомпонентных материалов в ударной волне/Материалы II Всесоюз. совещ, по детонации, 20-22 октября 1981, Черноголовка, изд-во Отделения Инта хим. физики, 1981, вып. 2, с. 98-101.
- 20. Кректулева Р.А., Платова Т.М., Югов Н.Т. Особенности распространения пространственных ударных волн средней интенсивности в конденсированных градиентных средах/Труды Межд. конф. "Новые методы в физике и механике деформируемого твердого тела", 26-31 мая 1990, Терскол, Томск, изд. ТГУ, 1990, ч. I, с. 265-272.
- Горельский В.А., Зелепутин С.А., Ким В.В., Смолин А.Ю. Компьютерное моделирование ударно-волновых процессов в системах Ті-С в трехмерной постановке// Хим. физика, том 19, №2, 2000,с. 27-31.
- Зелепугин С.А., Никуличев В.Б. Численное моделирование взаимодействия серы и алюминия при ударно-волновом нагружении// ФГВ, том 36, №6, 2000, с.186-191.