РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ РАКЕТНЫХ И АРТИЛЛЕРИЙСКИХ НАУК
СИБИРСКИЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР

ЦЕНТР ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
РАКЕТНО-АРТИЛЛЕРИЙСКИХ НАУК ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО БАЛЛИСТИКЕ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ МЕХАНИКИ

Сборник научных статей
Выпуск 3

Под общей редакцией академика РАРАН,
доктора технических наук, профессора
И.Б. Богоряда

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

1999

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯДОВ В ОБОЛОЧКЕ С ОДНОРОДНЫМИ И НЕОДНОРОДНЫМИ ПЛИТАМИ

Герасимов А.В., Пашков С.В.

ЦИОРАН Томского университета

Исследование взаимодействия зарядов взрывчатого вещества (ВВ), помещенных в оболочку, с деформируемыми преградами представляет определенный интерес с точки зрения создания перспективных технологий обработки материалов взрывом для оценки последствий аварийных ситуаций (падение зарядов ВВ), а также для изучения процессов разрушения преград, преодоления динамической защиты и т.д. Ранее экспериментально и теоретически исследовалось взаимодействие неподвижных зарядов в оболочке и без нее с монолитными плитами [1-4]. В [5] изучалось влияние оболочки и скорости падения заряда на напряженно-деформированное состояние (НДС) и разрушение толстых однородных упругопластических плит при взрывном нагружении. Было показано существование оптимального (с точки зрения максимального откольного эффекта в плите) размера контактного пятна в момент подхода к плите детонационной волны (ДВ) для движущегося заряда с оживальным дном.

Представляет практический интерес исследование процесса взаимодействия движущегося заряда в оболочке с неоднородной деформируемой преградой и сравнение полученных результатов с результатами расчета деформирования однородной плиты. Неоднородная преграда состоит из двух металлических пластин с расположенным между ними слоем высокопластичного материала. Взаимодействие с преградой заряда ВВ, заключенного в сплющивающуюся оболочку и движущегося со скоростью V, - сложный многостадийный процесс. Он включает следующие этапы: движение и соударение системы (оболочка - ВВ) как инертного деформируемого тела с деформируемой преградой, инициирование детонации, распространение ДВ по заряду ВВ, взаимодействие ДВ с оболочкой, разлет и разрушение оболочки, формирование ударной волны (УВ) в плите, деформирование плиты и ее возможное разрушение в интенсивных волнах разгрузки. На рис.1 приведена расчетная схема для задачи взаимодействия движущегося заряда в оболочке с неоднородной преградой. Схема взаимодействия заряда с однородной плитой аналогична схеме, приведенной на рис.1. Днище заряда имеет форму сегмента эллипса. Основные соотношения, описывающие пространственное осесимметричное движение пористой прочной сжимаемой упругопластической среды, базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии [2,6]. Физические соотношения для идеально-упругопластического тела брались в форме Прандтля-Рейса при условии текучести Мизеса. Уравнение состояния использовалось в форме Ми-Грюнайзена [6]. Полученная система уравнений дополнялась кинетическим уравнением, описывающим рост и сжатие сферических пор [7]. При достижении пористостью своего предельного значения материал в данной точке полагался разрушенным и все силовые параметры занулялись. Система уравнений, описывающая движение продуктов детонации (ПД) как невязкого нетеплопроводного газа, может быть получена из соотношений для упругопластической среды, если положить равными нулю параметры, определяющие прочностные свойства. При моделировании процесса детонации заряда ВВ применялся подход, предложенный в работе [8]. При сжатии ВВ в счетной ячейке до критического значения уравнение состояния, описывающее поведение твердого тела, заменяется уравнением состояния продуктов детонации (уравнение Ландау-Станюковича). Для детонации основного заряда ВВ необходимо срабатывание детонатора, который моделируется несколькими ячейками с повышенной плотностью ВВ, а следовательно, и повышенным давлением ПД.

Полученная система уравнений дополняется начальными и граничными условиями. В начальный момент времени все точки оболочки и заряда ВВ имеют осевую скорость V с учетом ее знака, а состояние плиты полагается невозмущенным. Граничные условия (задача взаимодействия заряда ВВ с неоднородной плитой) ставятся следующим образом (рис.1):

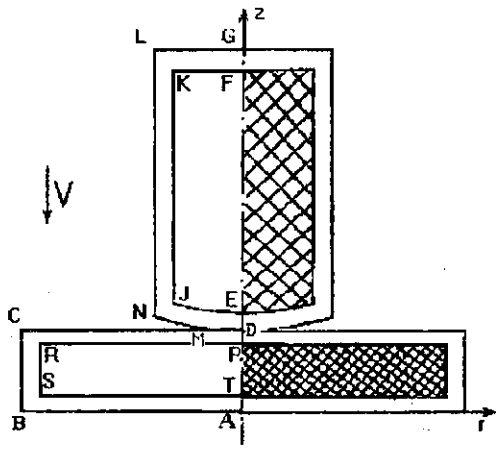

Рис. 1

Граница ABCMNLG предполагается свободной от напряжений $\sigma_n=\tau_n=0$.

На оси симметрии ATPDEFG ставится условие скольжения вдоль жесткой стенки: $\tau_n=0$, $v_n=0$. На переменном контактном участке DM между плитой и оболочкой ставятся условие идеального скольжения одного материала по другому по касательной и условие непротекания по нормали к поверхности контакта:

$$\sigma_{n1}=\sigma_{n2},\ v_{n1}=v_{n2},\ \tau_{n1}=\tau_{n2}=0.$$

Так как контактное пятно DM изменяется в процессе взаимодействия заряда и преграды, необходимо определять его текущие размеры в ходе решения задачи для каждого момента времени.

На поверхности контакта ВВ с оболочкой EJKF ставятся условия, аналогичные предыдущим. На поверхности TSRP ставилось условие прилипания. На линии AB ставится условие скольжения вдоль жесткой стенки.

На поверхностях контакта ПД с оболочкой используются следующие условия:

$$\sigma_{n1}=-P,\ v_{n1}=v_{n2},\ \tau_{n1}=\tau_{n2}=0,$$

где σ_n, τ_n - нормальная и касательная компоненты вектора напряжений в точке контакта; v_n - нормальная компонента вектора скорости; P - давление; индексы 1 и 2 относятся к контактирующим средам. Постановка граничных условий для задачи взаимодействия заряда ВВ в оболочке с однородной плитой проводится аналогично, но здесь отсутствует заполнитель, поэтому соответствующие ему граничные условия не ставятся. Поверхность AB полагается свободной от напряжений. Смещения в точке A считаются равными нулю. Для решения использовалась конечно-разностная схема, подробно изложенная в работе [2]. Она позволяет в полной мере реализовывать удобство лагранжевого способа описания движения сплошной среды, а именно приемлемую точность определения УВ, контактных и свободных границ, а также возможность варьировать геометрию расчетных областей и проводить расчеты неоднородных тел вращения.

Для подавления нефизических осцилляций за фронтом УВ в численную схему вводится комбинированная искусственная вязкость. Для исключения неустойчивости типа "песочные часы" введена тензорная вязкость, реализуемая на треугольных ячейках, прилегающих к рассчитываемому узлу [2]. Для расчета контактных границ используется специальная процедура [5], которая позволяет рассчитывать скольжение сеток различных областей (металл-металл, металл-ВВ, металл - ПД) относительно друг друга при граничных условиях со скольжением.

В качестве тестовых задач рассматривались задачи о распаде разрыва на контактной поверхности (КП) [6] и о разрушении толстой плиты [1]. Расчет распада разрыва на КП плита-ПД для меди и ТГ 36/64 дал следующие значения давления и массовой скорости: P = 42,01 ГПа, u=920 м/с (аналитическое решение [6]: P=44,9 ГПа, u=933 м/с). Для задачи о подрыве заряда ВВ без оболочки на поверхности толстой плиты имеются обширные экспериментальные данные в работе [1]. Сравнение расчета с экспериментом проводилось для систем со следующими геометрическими размерами: толщина медной плиты 3,8 см, диаметр 15,2 см, высота заряда 5,1 см, диаметр 2,54 см. Картина разрушения плиты в конце процесса взаимодействия (см. также [5]) хорошо согласуется с экспериментальными данными работы [1]. Расчеты взаимодействия движущегося заряда с однородной плитой проводились для плиты, оболочки и ВВ со следующими размерами: длина оболочки 14 см, внешний радиус 3,5 см, внутренний радиус 2,5 см, длина заряда 11,6 см, толщина нижнего днища 0,4 см, верхнего днища 2 см; радиус плиты 11 см, толщина 2 см. Материал оболочки - медь со следующими физико-механическими характеристиками (ФМХ): ρ_0=8,9 г/см, μ=46 ГПа, σ=0,2ГПа. Материал плиты - сталь: ρ_0=7,86, μ=81,4, σ=0,64 ГПа. Характеристики ВВ: ρ_0=1,6, D=6000 м/с. Здесь ρ_0- начальная плотность, μ- модуль сдвига, σ - предел текучести , D - скорость детонации. Скорость падения заряда в оболочке равнялась 200 м/с. Параметры кинетического уравнения изменения пористости брались для меди из работы [7], для стали - из работы [3]. При постановке задачи предполагалось, что ВВ основного заряда и заполнителя неоднородной плиты не детонируют от удара по плите. Процесс детонации обусловлен только срабатыванием детонатора.

На рис.2 приведены текущие конфигурации и расчетные сетки для плиты, оболочки и продуктов детонации для момента времени 32 мкс. В силу осевой симметрии задачи показана только половина системы плита - ВВ. Заштрихованы зоны возникновения поврежденностей, черным цветом выделены участки, где материал плиты разрушен.

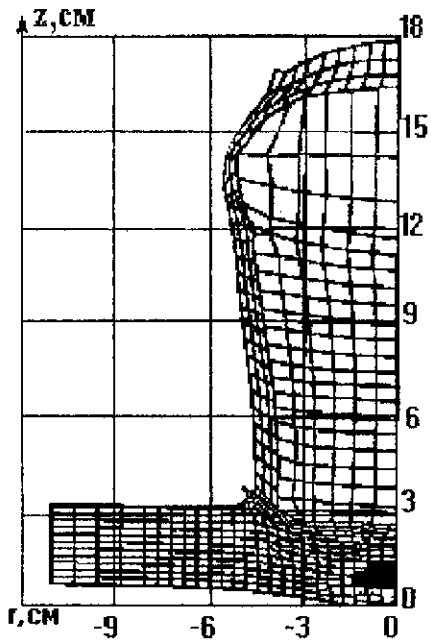

Рис. 2

Как видно из рис.2, наиболее интенсивно деформируется материал оболочки. Большие деформации плиты наблюдаются в районе края кратера. Основные результаты взаимодействия движущегося заряда в оболочке с неоднородной плитой получены для оболочки длиной 14 см. Толщина заднего днища равняется 2 см, боковой стенки - 1 см и оживального днища - 0,5 см. Максимальный радиус преграды равняется 11 см, толщина боковой стенки, нижнего днища, верхнего днища 0,4 см, полная толщина плиты 2,5 см. Скорость соударения конструкции с преградой равняется 200 м/с. Материал преграды - сталь, для сплющивающегося корпуса бралась медь. Физико-механические характеристики ВВ заряда аналогичны приведенным выше. Параметры заполнителя неоднородной плиты следующие: ρ_0=1,68 г/см, μ=36,47 ГПа, σ=0,1 ГПа.

На рис.3 для момента времени 49 мкс представлена картина взаимодействия сплющивающегося элемента с неоднородной плитой. В этом случае полагалось, что плита лежит на достаточно жестком

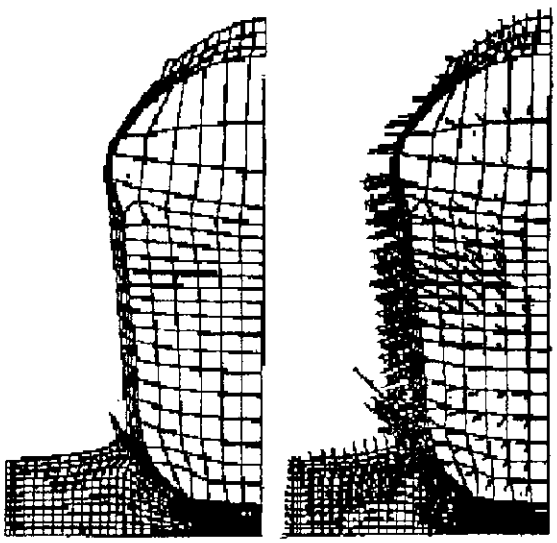

Рис.3

основании, и пренебрегалось деформированием нижнего днища. Днище считалось недеформируемым, и на нем ставилось условие скольжения заполнителя неоднородной плиты вдоль жесткой стенки. Рис.3 позволяет отчетливо наблюдать интенсивное вытеснение заполнителя плиты в радиальном направлении и уменьшении его толщины вдоль оси симметрии. Одновременно можно видеть, что формирующееся в заполнителе поле скоростей приобретает и осевую компоненту, направленную против движения оболочки с зарядом. Это обусловлено в определенной степени жесткостью нижней границы плиты и невысокими прочностными характеристиками заполнителя. Уменьшение толщины заполнителя на оси симметрии приводит в итоге к его вытеснению и образованию на этом месте участка со значительно уменьшенным слоем заполнителя.

Как видно из рис.3, оболочка разлетается в направлении к оси r. Скорости частиц верхнего днища невелики по сравнению со скоростями боковой стенки оболочки с зарядом и направлены вдоль оси z.

Проведенные исследования показали также, что заполнитель может быть полностью вытеснен из области действия заряда, что является необходимым требованием при работе некоторых технических устройств.

Предложенная физико-математическая модель процесса взаимодействия движущегося заряда, заполненного ВВ, с однородными и неоднородными плитами позволяет варьировать физико-механические параметры оболочки и заряда ВВ, скорость подхода к плите, момент инициирования ВВ с целью создания оптимальных и эффективных систем, позволяющих получать наиболее широкие зоны откола или наиболее интенсивное вытеснение заполнителя для однородных и неоднородных плит соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райнхарт Дж., Пирсон Дж. Поведение материалов при импульсных нагрузках. М.: Изд-во иностр. лит., 1958.
2. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С.212-263.
3. Белов Н.Н., Корнеев А.И., Николаев А.П. Численный анализ разрушения в плитах при действии импульсных нагрузок // ПМТФ. 1985. N 3. С.132-136.
4. Сугак С.Г., Канель Г.И., Фортов В.Е. и др. Численное моделирование действия взрыва на железную плиту // Физика горения и взрыва. 1983. Т.19, N 2. С.121-128.
5. Герасимов А.В. Численное моделирование разрушения плит зарядами ВВ, заключенными в оболочку // Физика горения и взрыва. 1996. Т.32, N 3. С.126-133.
6. Физика взрыва / Под ред. К.П.Станюковича. М.: Наука, 1975.
7. Johnson J.N. Dynamic fracture and spallation in ductile solids // J.Appl.Phys.1981. Vol.52, N 4. P.2812-2825.
8. Гольдин В.Я, Калиткин Н.Н., Левитан Ю.Л., Рождественский Б.Л. Расчет двухмерных течений с детонацией // Журн. вычислит. математики и мат. физики. 1972. Т.12, N 6. С.1606-1611.

Аннотации
изданий авторов Томского государственного университета в 1999 году

Павлов С.Л. **Расчет конструкций на срез и смятие:** Учебно-методическое пособие. Томск: Томский госуниверситет, 1999. 29 с.

Рассмотрены принципы расчета конструкций на срез и смятие с учетом различных критериев прочности. Приведены примеры расчета конкретных деталей и различных соединений конструкций.

Для студентов, обучающихся по курсу «Сопротивление материалов» по направлению «Прикладная механика».