
ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ МЕТАНИЕ И СОУДАРЕНИЕ. ЯВЛЕНИЯ КУМУЛЯЦИИ. ВЗРЫВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

HIGH-VELOCITY LAUNCHING AND IMPACTS. CUMULATION PHENOMENA. EXPLOSIVE TECHNOLOGIES

МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ С ЭЛЕМЕНТАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А.В. Герасимов, С.В. Пашков, Ю.Ф. Христенко

НИИ прикладной математики и механики ТГУ, Томск, Россия

Введение

В данной работе проводится исследование высокоскоростного взаимодействия компактных ударников с преградами конечной толщины из стекла и асботекстолита. Данные материалы используются в качестве элементов конструкции космических аппаратов: иллюминаторов, стекол оптических приборов, теплозащитных экранов и т.д. Рассматривается соударение с алюминиевыми частицами, моделирующими космический мусор и с частицами льда и гранита, моделирующими естественные частицы космических тел.

Основные соотношения

Задача решается в 3-D постановке с учетом естественной гетерогенности структуры реальных материалов, влияющей на распределение физико-механических характеристик по объему элементов конструкций и являющейся одним из факторов, определяющих характер разрушения последних. Необходимость учета этого фактора в уравнениях механики деформируемого твердого тела требует применения вероятностных законов при распределении физико-механических характеристик по объему рассматриваемой конструкции.

Уравнения, описывающие пространственное адиабатное движение прочной сжимаемой среды, являются дифференциальными следствиями фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии [1-3].

К этим уравнениям необходимо добавить уравнения, учитывающие соответствующие термодинамические эффекты, связанные с адиабатным сжатием и прочностью среды. В общем случае при воздействии сил на твердое деформируемое тело происходит изменение, как объема (плотности), так и формы тела, причем по различным зависимостям. Поэтому тензор напряжений представляется в виде суммы шарового тензора и девиатора тензора напряжений.

Для описания сопротивления тела сдвигу, использовались соотношения Прандтля – Рейса, а также условие пластичности Мизеса [1]. Уравнение состояния твердого тела выбиралось в форме Ми-Грюнайзена [1]. В качестве критерия сдвигового разрушения использовался критерий предельной эквивалентной пластической деформации [1]. Процесс разрушения стекла, льда, гранита рассматривался, как процесс разрушения хрупкого материала, без участка пластического деформирования, характерного для деформирования металлов. Для расчета разрушения пластичных материалов (алюминий, сталь) также использовались соотношения Джонсона – Кука [4]. Для расчета разрушения хрупких материалов (стекло, лед, гранит) использовались соотношения Джонсона – Холмквиста (JH_2) [5].

Процесс разрушения реальных материалов в значительной степени 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. При решении задач в трехмерной постановке учитывается естественная неоднородность структуры реальных материалов, влияющая на распределение физико-механических характеристик по объему элементов конструкций и являющаяся одним из факторов, определяющих характер разрушения последних. Учет данного фактора в уравнениях механики деформируемого твердого тела возможен при применении вероятностных законов распределения физико-механических характеристик по объему рассматриваемой конструкции. Поэтому для соответствия численно моделируемого процесса экспериментальным данным необходимо внести возмущения в физико-механические характеристики разрушаемой среды, т.е. задать случайное распределение факторов, определяющих прочностные свойства материала. Естественная фрагментация ударников и преграды рассчитывается с помощью введения вероятностного механизма распределения начальных дефектов структуры материала для описания формирования трещин. Начальные неоднородности моделировались распределением предельной эквивалентной пластической деформации по ячейкам расчетной области с помощью модифицированного генератора случайных чисел, выдающего величину, подчиняющуюся выбранному закону распределения.

Для расчета упругопластических течений используется методика, реализованная на тетраэдрических ячейках и базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона для расчета контактных взаимодействий [2,7-8]. Разбиение трехмерной области на тетраэдры происходит последовательно с помощью подпрограмм автоматического построения сетки.

Наиболее полно идеология и методология применения вероятностного подхода к проблеме разрушения твердых тел приведена в монографии [9].

Для исследования процессов высокоскоростного взаимодействия разработан, изготовлен, смонтирован и запущен экспериментальный стенд, включающий универсальную станину, на которой может быть установлена любая из имеющихся в НИИ ПММ метательных установок (Т-29, ППХ 23/8, ППХ 34/8, ППХ 34/23/8, ГДИ 50/23, а также новая трехступенчатая легкогазовая установка по патенту РФ № 2490580) и вакуумируемую камеру. Стенд оснащен аппаратурой для измерения динамических давлений в стволах, а также датчиками дульной и траекторной скорости моделей и ударников, в том числе оригинальными датчиками по патенту РФ № 2193207. Стенд позволяет вести разнообразные исследования процессов высокоскоростного соударения при скоростях до 8 км/с и выше. Уникальность стенда состоит в том, что станина для метательной установки и вакуумируемая камера смонтированы на единой подвесной платформе. Это позволяет исключить негативное влияние выстрела на фундамент здания. В ходе выполнения исследования были разработаны математические модели процессов разгона в установке высокоскоростных частиц, их движения вне установки и соударения с преградой.

Результаты расчетов

Были проведены расчеты взаимодействия преграды из стекла с алюминиевой частицей (рисунок 1), подлетающей к преграде со скоростью 3000 м/с. Толщина преграды 0, 5 см, радиус преграды 0,55 см, радиус шарика-ударника 0,1 см.

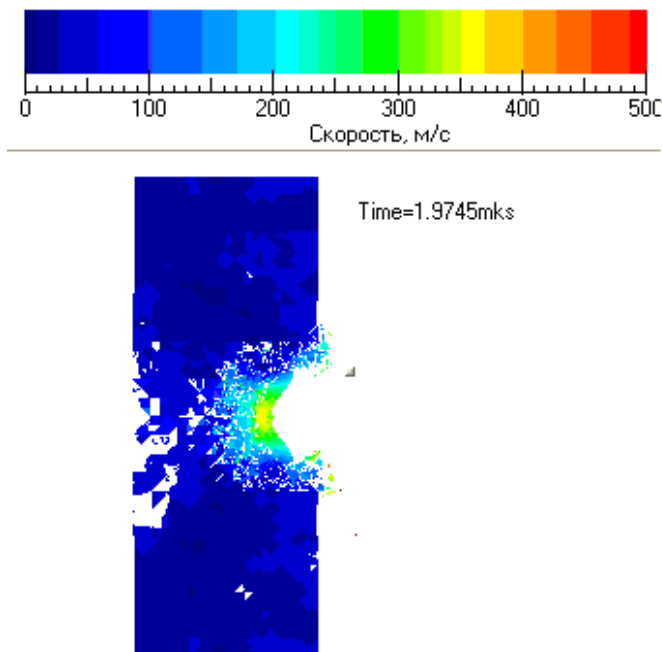


Рисунок 1. Соударение преграды из стекла с алюминиевым ударником:
 двумерный разрез расчетной области

На рисунке 1 показано состояние преграды из стекла в момент времени 1,97 мкс. С тыльной стороны преграды видно откольное разрушение материала и почти полное слияние с кратером от удара алюминиевой частицей, в дальнейшем происходит полное пробитие преграды.

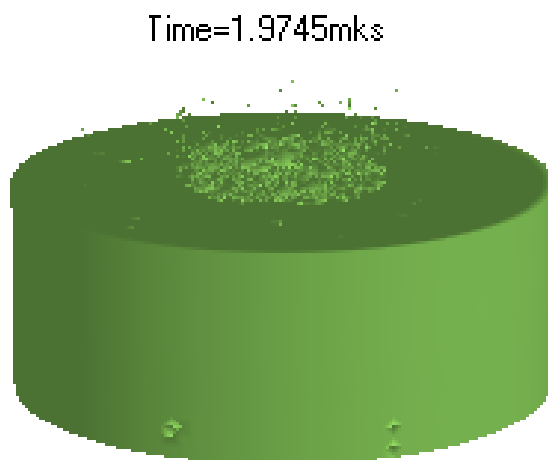


Рисунок 2. Соударение преграды из стекла с алюминиевым ударником:
 3-D картина соударения

Как видно из рисунка 2, воздействие ударника на хрупкую преграду приводит к дроблению материала преграды и частичному выбросу его с внешней поверхности.

На следующих рисунках 3-4 приведены картины взаимодействия преграды из текстолита с алюминиевым шариком-ударником. Геометрические размеры взаимодействующих тел аналогичны размерам, приведенным для преграды из стекла и алюминия. Скорость соударения=3000 м/с.

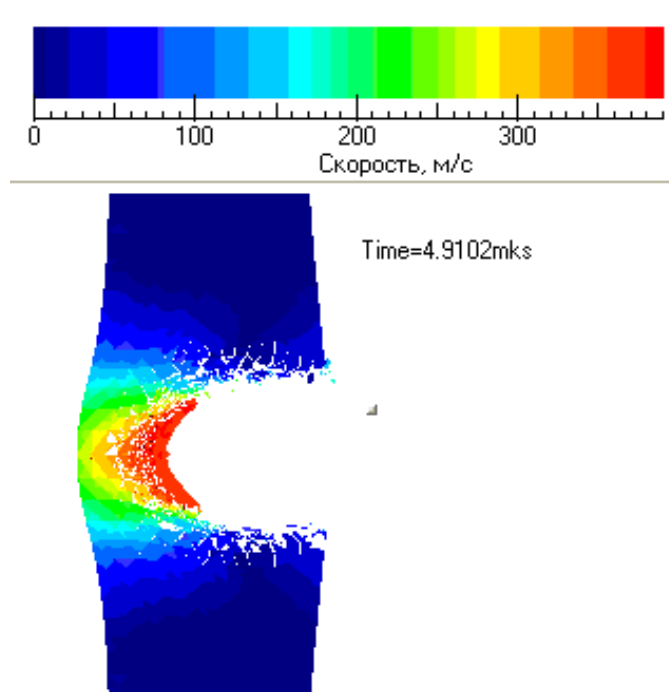


Рисунок 3. Соударение преграды из текстолита с алюминиевым ударником:
двумерный разрез расчетной области

На рисунке 3 показан двумерный разрез расчетной области для преграды из текстолита и алюминиевого ударника в момент времени 4, 91 мкс. С тыльной стороны преграды откольное разрушение материала не наблюдается, а происходит выбивание «пробки». Заметный выброс материала с лицевой поверхности преграды представлен на рисунке 4. Характер поведения материалов преград (хрупкий и упруго-пластичный материалы) ярко проявляется на приведенных рисунках 1-4.



Рисунок 4. Соударение преграды текстолита с алюминиевым ударником:
3-D картина соударения

Взаимодействие преграды из текстолита со стальным шариком представлено на рисунках 5 и 6 для момента времени 1, 598 мкс. Размеры преграды и ударника и скорость соударения аналогичны приведенным выше.

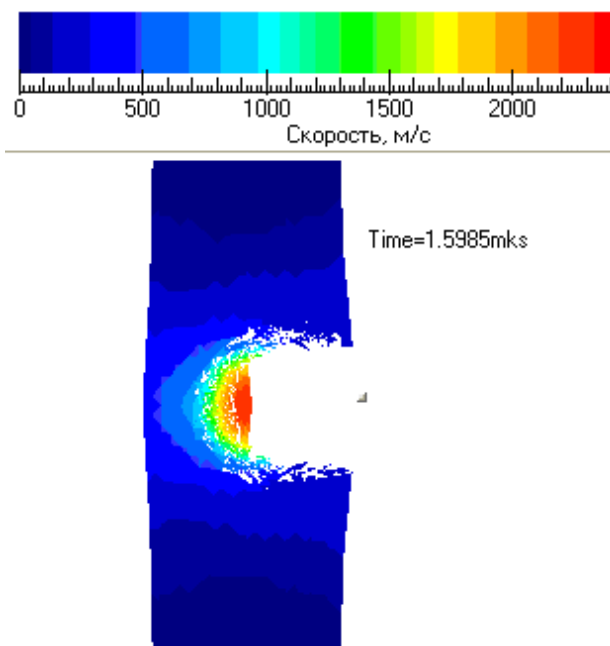


Рисунок 5. Соударение преграды из текстолита с ударником из стали:
двумерный разрез расчетной области



Рисунок 6. Соударение преграды текстолита с ударником из стали:
3-D картина соударения

Выводы

Результаты расчетов, приведенные в работе, показали особенности деформирования и разрушения элементов космических аппаратов и ударников из различных материалов при высокоскоростном соударении. Эти результаты могут быть использованы для разработки защитных устройств.

Эта работа была поддержана Российским научным фондом (РНФ) в рамках проекта №. 16-19-10264.

Список литературы

1. Физика взрыва /Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975, 704 с.
2. М.Л. Уилкинс Расчет упругопластических течений//Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967, с. 212 – 263.
3. M.L. Wilkins Computer simulation of dynamic phenomena// Berlin-Heidelberg-New-York: Springer, 1999, 246 p.
4. В. А. Кузькин, Д. С. Михалюк Применение численного моделирования для идентификации параметров модели Джонсона-Кука при высокоскоростном деформировании алюминия // Вычислительная механика сплошных сред, 2010, т. 3, №1, с. 32–43.
5. М.С. Егорова, А. Н. Паршиков Численное моделирование разрушения хрупких материалов методом SPH//Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2015, Т.16, Вып. 4, с. 1-8.
6. К.Н. Крейнхаген, М. Х. Вагнер, Дж. Дж. Пьечоцки, Р. Л. Бьорк Нахождение баллистического предела при соударении с многослойными мишенями//Ракет. техника и космонавтика, 1970, Т. 8, № 12, с. 42 - 47.
7. G.R. Johnson, D.D. Colby, D.J. Vavrick. Tree-dimensional computer code for dynamic response of solids to intense impulsive loads // Int. J. Numer. Methods Engng., 1979, V. 14, № 12, p. 1865-1871.
8. G.R. Johnson. Dynamic analysis of explosive-metal interaction in three dimensions // Trans. ASME. J. of Appl. Mech., 1981, V. 48, № 1, p. 30-34.
9. Высокоскоростной удар. Моделирование и эксперимент / Под ред. А.В. Герасимова. Томск: Изд-во НТЛ, 2016, 568 с.

ГЕНЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ПРОШИВКЕ АЛЮМИНИЯ СУСТКАМИ ЧАСТИЦ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Ю.С. Ушеренко¹, С.М. Ушеренко², В.Г. Шарифзянов³

¹Институт повышения квалификации и переподготовки кадров
по новым направлениям развития техники, технологии и экономики БНТУ,

²БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь

³ООО “ЛОТ-холдинг”, Ижевск, Россия

Аннотация

Процесс сверхглубокого проникания (СПП) позволяет скачкообразно увеличить относительную глубину проникания ударников до 100 – 10000 калибров. При прошивке металлов и сплавов в режиме СПП порошковые частицы формируют и легируют канальные зоны, формируя композиционный материал. Легирование локализовано в армирующих зонах и происходит как за счет заноса материала микрочастиц порошка, а также за счет синтеза химических элементов в закрытой зоне. Рассматривается возможность генерации дополнительной энергии за счет многочисленных микровзрывов вдоль траектории проникания частиц, которая обеспечивает аномальные глубины проникания.

Введение. Микрометеориты теряют свою энергию при попадании в атмосферу планеты еще до воспламенения в атмосфере Земли. Космическая пыль с размерами 1-100 мкм падает на нашу планету как дождь мельчайших пылевых частиц.

В диапазоне скоростей 300 – 15000 м/с возможны соударения с космической пылью оболочек космических аппаратов (КА) в околоземном пространстве [1]. Отмечалось, что частицы