

УДК 539.3

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОСКОЛКОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ЗАЩИТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2011 г.

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

НИИ прикладной математики и механики Томского госуниверситета

ger@mail.tomsknet.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Дан обзор различных способов, применяемых для защиты космических аппаратов от разрушения естественными и искусственными осколками. Проведено численное моделирование и экспериментальная проверка их эффективности.

Ключевые слова: высокоскоростное соударение, пластичность, разрушение, фрагментация, численное моделирование, трехмерные задачи, перспективные конструкционные материалы, баллистические установки.

Присутствие в околоземном пространстве техногенных и естественных осколков, образовавшихся в процессе разрушения спутников, последних ступеней ракет-носителей, разгонных блоков и других аппаратов и устройств, в первом случае, и приходящих из дальнего космоса, во втором, представляет значительную угрозу безопасности функционирования автоматических и пилотируемых космических объектов. Значительное время полета этих аппаратов повышает для них вероятность столкновения с осколками. При столкновении оболочек корпусов космических аппаратов и осколков с большими скоростями происходит нарушение нормального функционирования первых. Одним из способов защиты аппарата является размещение перед основным корпусом тонкой преграды или нескольких таких преград, которые дробят высокоскоростную частицу и рассеивают ее фрагменты по поверхности защищаемого объекта. Таким образом уменьшается скорость фрагментов, увеличивается область контакта и уменьшается вероятность пробития основной оболочки корпуса. Одним из перспективных способов защиты является замена сплошной тонкой преграды на сетку из высокопрочного материала. Это позволяет уменьшить вес защитной конструкции, что является немаловажным фактором при разработке космических объектов.

В лагранжевой 3D постановке рассматривается процесс высокоскоростного взаимодействия слоистых, разнесенных и сеточных пластин с компактными и удлинёнными осколками различной формы. Особенностью процессов столкновения осколков и космических аппаратов является вза-

имодействие объектов с высокими (космически) скоростями. Ранее решение подобных задач проводилось с использованием эйлерового подхода к описанию движения сплошной среды, так как фрагментация твердых тел не рассматривалась, а расчет очень больших деформаций можно было проводить только с использованием эйлеровых методик. Учет дробления материала твердых тел при интенсивных динамических нагрузениях позволил использовать лагранжев подход к задачам высокоскоростного соударения, имеющих общеизвестные достоинства при рассмотрении многоконтактных взаимодействий сталкивающихся тел, особенно при решении трехмерных задач. Естественная гетерогенность структуры материала пластин и техногенных осколков, влияющая на распределение физико-механических характеристик (ФМХ) материала, является одним из существенных факторов, определяющих характер разрушения реальных материалов. Учет данного фактора в уравнениях механики деформируемого твердого тела возможен при использовании случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения (моделирование начальных дефектных структур материала).

Для описания процессов деформирования и дробления твердых тел используется модель прочного сжимаемого идеально упругопластического тела. Основные соотношения, описывающие движение этой среды, базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии и замыкаются соотношениями Прандтля – Рейсса при условии текучести Мизеса. Уравнение состояния берется

в форме Тета и Ми – Грюнайзена. Известно, что пластические деформации, давление и температура оказывают влияние на предел текучести и модуль сдвига, поэтому модель дополнялась соотношениями, учитывающими эти факторы.

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. Разбиение трехмерной области на тетраэдры происходит последовательно с помощью подпрограмм автоматического построения сетки.

В качестве критерия разрушения при интенсивных сдвиговых деформациях используется достижение эквивалентной пластической деформации своего предельного значения. Начальные неоднородности структуры моделируются распределением предельной эквивалентной пластической деформации по ячейкам расчетной области с помощью модифицированного генератора случайных чисел, выдающего случайную величину, подчиняющуюся выбранному закону распределения. Плотности вероятности случайных величин принимаются в виде нормального гауссова распределения со средним арифметическим, равным табличному значению и варьируемой дисперсией. Используемые в современных работах по динамическому разрушению конструкций и материалов соотношения механики деформируемого твердого тела не учитывают данного фактора, что может исказить реальную картину ударного и взрывного разрушения рассматриваемых тел. Последнее особенно проявляется при решении осесимметричных задач, где все точки по окружной координате рассчитываемого элемента исходно равноправны в силу используемых при численном моделировании стандартных уравнений механики сплошных сред. На практике, однако, имеется широкий ряд задач, где фрагментация является преимущественно вероятностным процессом, например, взрывное разрушение осесимметричных оболочек, где характер дробления

заранее неизвестен, пробитие и разрушение тонких преград ударником по нормали к поверхности, так называемое «лепесткование» и т.д. Внесение случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения в ФМХ тела приводит к тому, что в этих случаях процесс разрушения приобретает вероятностный характер, что более соответствует экспериментальным данным.

Для экспериментального изучения особенностей высокоскоростного соударения твердых тел в лабораторных условиях при скоростях 2.5–5 км/с использовались легкогазовые установки. Общий вид одного из вариантов установки, легкогазовой двухступенчатой установки МПХ23/8, предназначенной для получения скоростей до 5 км/с, представлен на рис. 1.



Рис. 1

Экспериментальное изучение особенностей высокоскоростного столкновения осколков с различными типами защиты при скоростях (2.5–5) км/с проводилось на легкогазовых двухступенчатых установках, дооснащённых двумя видами отсекаелей поддона. Выносной отсекаель в виде многослойной преграды с отверстием для ударника, позволяет метать частицы-ударники диаметром до 0.5 мм, что само по себе представляет довольно сложную инженерную задачу. Полученные экспериментальные данные использовались для проверки адекватности предложенных математических моделей и численных методик. Было тео-

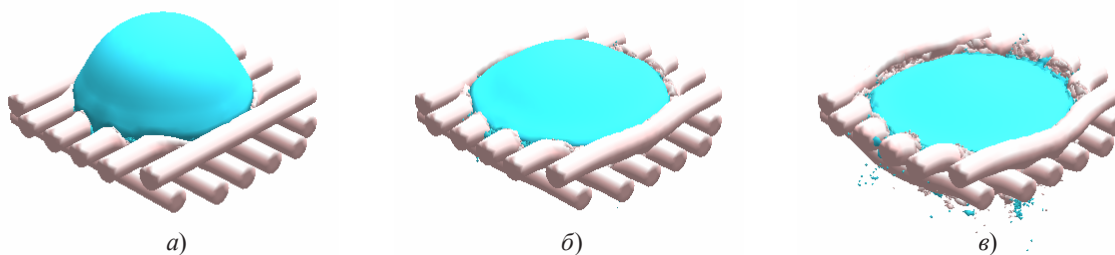


Рис. 2

ретически и экспериментально показано, что защита из двух стальных сеток является более эффективной, чем эквивалентная по массе однослойная преграда из дюралюминия. Полученные результаты использовались для оценки защиты реальной конструкции ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» космического аппарата «Фобос-Глоб». На рис. 2 показаны результаты соударения части-

цы с сеткой-преградой со скоростью 3 км/с. Конфигурация сетки и сферической частицы в 3D изображении: $a - 0.3330$ мкс; $b - 0.5000$ мкс; $c - 0.6700$ мкс.

Работа выполнена при частичном финансировании по программе Минобрнауки РФ (проект РНП 2.1.2. 2509) и частичной поддержке РФФИ (гранты №10-08-00633 и 09-08-00662а).

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE IMPACT INTERACTION OF DEBRIS WITH VARIOUS KINDS OF PROTECTION OF SPACE VEHICLES

A.V. Gerasimov, S.V. Pashkov, Yu.F. Khristenko

The review of the different ways used for the protection of space vehicles from destruction by natural and artificial debris is given. The numerical modeling and experimental validation of their efficiency carried out.

Keywords: high-velocity impact, plasticity, destruction, fragmentation, numerical modeling, three-dimensional problems, perspective structural materials, ballistic research facilities.