

Уплотнение формируемых кумулятивными зарядами высокоскоростных металлических элементов посредством магнитно-импульсного воздействия

© С.В. Федоров, И.А. Болотина, В.И. Горелов, Ю.А. Струков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Для испытаний объектов ракетно-космической техники на стойкость к ударному воздействию метеороидов и осколков космического мусора можно использовать формируемые взрывом высокоскоростные металлические элементы. Накопление микроповреждений в результате интенсивного пластического деформирования приводит к снижению средней плотности высокоскоростных элементов, формирующихся при взрывном обжиге профилированных металлических облицовок. Для уплотнения таких элементов при испытаниях с их помощью стойкости противометеоритной защиты предлагается использовать воздействие на элементы магнитного поля, создаваемого на траектории движения перед взаимодействием с мишенью. На основе численного моделирования в рамках одномерной осесимметричной задачи механики и электродинамики сплошных сред исследованы физические процессы, происходящие в пористом проводящем упругопластическом цилиндре, помещенном в магнитное поле. С использованием данной модели определены параметры магнитно-импульсного воздействия, необходимые для уплотнения стальных и алюминиевых элементов.

Ключевые слова: космический мусор, противометеоритная защита, кумулятивный заряд, высокоскоростной элемент, пористый материал, уплотнение, магнитное поле, магнитно-импульсное воздействие, численное моделирование

Введение. Столкновения космических аппаратов (КА) с твердыми телами естественного и искусственного происхождения относятся к числу важнейших факторов, способных привести к повреждению и разрушению техники [1–3]. На начальных этапах освоения космоса рассматривалась возможность столкновения КА только с телами, входящими в состав метеорной материи. Однако уже к концу 1970-х годов стало очевидно, что в результате широкомасштабной космической деятельности [4–7] околоземное космическое пространство оказалось засоренным большим количеством объектов искусственного происхождения, не выполняющих каких-либо полезных функций (детали и фрагменты последних ступеней ракет-носителей, аварийных и отработавших свой срок КА) [8, 9]. Результаты исследований, проведенных в России, США, Франции, Германии и Японии, указывают на прогрессивный характер процесса засорения околоземного космического пространства.

По разным оценкам, на низких околоземных орбитах вплоть до высот 1,5–2,0 тыс. км к настоящему времени скопилось до 5000 т

техногенных объектов, причем общее количество фрагментов, имеющих поперечник более 1 см (фрагменты именно такого и большего размера представляют серьезнейшую опасность), не поддается точному подсчету и, вполне возможно, существенно превышает 100 тыс. [1]. Из них обнаружена и отслеживается наземными радиолокационными и оптическими средствами лишь малая доля (несколько процентов). В августе 2014 г. в Российском каталоге фрагментов космического мусора насчитывалось 15,8 тыс. объектов, а всего на околоземных орбитах находилось более 17,1 тыс. объектов, включая спутники. Около 6 % отслеживаемых объектов — действующие, около 22 % объектов прекратили функционирование, 17 % представляют собой отработанные верхние ступени и разгонные блоки ракет-носителей и около 55 % — отходы, технологические элементы, сопутствующие запускам, и обломки разрушившихся КА. Можно уменьшить ущерб от столкновений КА с фрагментами космического мусора и метеорной материи размером менее 1 см, усилив защиту наиболее важных узлов и конструктивных элементов [10–12].

Для моделирования метеоритного воздействия на защитные конструкции КА на этапе их отработки и испытаний необходимо получать высокоскоростные компактные металлические элементы (с учетом состава космического мусора противоударная стойкость защитных экранов определяется в основном по отношению к стальным и алюминиевым ударникам) [13–15]. Пути решения данной проблемы могут быть связаны с использованием различных метательных устройств — легкогазовых баллистических установок, электромагнитных ускорителей, взрывных устройств [16–18]. При выборе типа разгонного устройства помимо обеспечиваемых им параметров ударников большое значение также имеют его габаритные размеры («громоздкость»), сложность и трудоемкость проведения экспериментов с использованием устройств данного типа. В этом отношении преимуществом обладают взрывные метательные устройства, которые получили широкое распространение вследствие их высокой эффективности при относительной простоте, небольших габаритах и адаптируемости к лабораторным условиям, малой стоимости, способности легко изменять размеры ускоряемых тел. Конструкции взрывных метательных устройств, осуществляющих разгон материалов за счет энергии взрыва заряда химического взрывчатого вещества, в свою очередь, отличаются достаточно широким многообразием [18, 19]. Однако главенствующее положение среди них по достигаемым параметрам высокоскоростных ударников (их массе и скорости) занимают осесимметричные кумулятивные заряды, имеющие на одном из торцов выемку специальной формы, покрытую соответствующей ей профилированной металлической облицовкой [20–23]. К числу подобных кумулятивных зарядов относится заряд с облицовкой комбинированной формы полусфера-цилиндр (ПЦ-облицовкой) [24, 25]. Согласно данным, приведенным в [26], применение ПЦ-облицовки

позволило отработать систему геометрически подобных кумулятивных зарядов, устойчиво формирующих компактные стальные элементы массой от 17 до 100 г со скоростью около 6 км/с.

Взрывное формирование высокоскоростного компактного элемента с использованием ПЦ-облицовки на основании результатов численного моделирования [25] в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред проиллюстрировано на рис. 1 (диаметр кумулятивного заряда составлял 100 мм). Видно, что особенностью процесса формирования компактного элемента из ПЦ-облицовки является его двустадийный характер. На первой стадии при схлопывании полусферической части облицовки формируется струйное течение, от которого на второй стадии схлопывающейся цилиндрической частью отсекается головной участок, продолжающий после этого свое дальнейшее движение как высокоскоростное компактное тело. Осевая скорость v_z на отсеченном участке постоянна и составляет чуть более 6 км/с. Двигающаяся вслед за сформировавшимся элементом тонкая струя материала облицовки (см. рис. 1), по данным рентгенографирования [15, 26], разрушается на мелкие частицы вследствие существующего в ней градиента осевой скорости v_z и постепенно рассеивается в радиальном направлении.

Поскольку формирование высокоскоростных компактных элементов при использовании кумулятивных зарядов происходит в результате интенсивного пластического деформирования материала облицовки, в формирующемся элементе могут возникать и накапливаться многочисленные микрповреждения (микротрещины, микропоры и т. п.), в связи с чем уменьшается его средняя плотность по сравнению с плотностью исходного материала облицовки. При взрывном обжатии ПЦ-облицовки наиболее критичным в этом отношении является момент отсечки головного участка струйного течения схлопывающейся цилиндрической частью облицовки (см. рис. 1). Ударное воздействие на отсекаемый участок приводит к распространению по нему волны сжатия с последующей разгрузкой со свободной поверхности, в ходе которой в материале формирующегося высокоскоростного элемента возникает напряженное состояние всестороннего растяжения, создавая весомые предпосылки для «разрыхления» материала.

Согласно оценкам [15], плотность стальных элементов, формируемых в экспериментах кумулятивным зарядом с ПЦ-облицовкой и имеющих скорость 5,8 км/с, была ниже плотности материала облицовки (7,8 г/см³) и составляла 4,1...6,1 г/см³. При этом известно, что характер повреждения мишени при высокоскоростном воздействии в существенной степени зависит от плотности материала ударника [27, 28].