

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА "ВЕГА" С ПОМОЩЬЮ СИЛЬНОТОЧНЫХ РЭП

*С.И.Анисимов, Б.А.Демидов, Л.И.Рудаков,
Р.З.Сагдеев, В.Е.Фортгов*

Проведены эксперименты по моделированию разрушения защитных экранов космического аппарата "Вега" с помощью сильноточного релятивистского электронного пучка. Выявлена роль откольных частиц в повреждении второго экрана.

Запущенные в декабре 1984 г. космические аппараты "Вега-1" и "Вега-2" в марте 1986 г. должны пройти через пылевое облако кометы Галлея. При этом на аппараты будет воздействовать поток пылевых частиц, имеющих относительную скорость около 80 км/с¹. Прямое экспериментальное изучение взаимодействия пылевых частиц с защитными экранами космических аппаратов в настоящее время невозможно из-за отсутствия лабораторных методов безнагревного ускорения твердых тел до столь высоких скоростей. В связи с этим особое значение приобретает моделирование высокоскоростных ударных явлений с помощью импульсных систем, позволяющих получать в конденсированном веществе необходимые плотности энергии. Возможность такого моделирования связана с тем, что при достаточно высокой скорости удара (практически — начиная с 10 км/с) масса и импульс разлетающегося вещества преграды много больше массы и импульса ударника. Существенными характеристиками удара являются в этом случае полная энергия ударника и время, в течение которого она передается преграде. Необходимые значения этих параметров, а также соответствующие

условия пространственной фокусировки могут быть достигнуты в экспериментах с лазерами и сильноточными релятивистскими электронными пучками (РЭП). На подобие между явлениями, вызванными высокоскоростным ударом и воздействием РЭП на металл, было указано в работе ².

Для космических аппаратов "Вега" наиболее опасным может быть удар микрометеорита с плотностью $\sim 1 \text{ г/см}^3$ и размером $\sim 1 \text{ мм}$. При столкновении такой частицы с экраном энергия $\sim 3 \text{ кДж}$ выделяется в течение $\sim 10 \text{ нс}$. В микрометеорите и экране образуются сильные ударные волны с начальным давлением в десятки мегабар. Конденсированное вещество экрана и метеорита испаряется в волнах разгрузки, а образующаяся плазменная струя задерживается вторым защитным экраном. Расчеты ^{3, 4} показывают, что для количественного моделирования разрушений, вызванных ударом такого микрометеорита, необходим РЭП с длительностью импульса $\sim 10 \text{ нс}$, диаметром $\sim 1 \text{ мм}$, глубиной торможения электронов $< 0,5 \text{ мм}$ и полной энергией $\geq 3 \text{ кДж}^1$). Современная техника сильноточных РЭП не позволяет пока получать электронные пучки с такими параметрами. В связи с этим эксперименты по воздействию РЭП на защитные экраны зонда "Вега" производились на пучках со следующими параметрами: длительность импульса 50 – 100 нс, диаметр фокального пятна 1 – 2 мм, глубина торможения электронов в экране 0,4 – 1,5 мм, полная энергия 1 – 5 кДж. Максимальная плотность потока энергии в таком пучке достигает 10^{13} Вт/см^2 , а соответствующее абляционное давление равно примерно 10 Мбар. Это давление значительно выше, чем при действии лазерного излучения с такой же плотностью потока энергии, поскольку энергия электронов выделяется в более плотном веществе. Это обстоятельство и большая величина полной энергии определяют преимущества электронного способа моделирования удара перед лазерным.

Давление около 10 Мбар возникает в момент контакта ледяной (H_2O) частицы, налетающей на алюминиевый экран со скоростью $\sim 40 \text{ км/с}$. Отметим, однако, что в модельном эксперименте энергия электронного пучка с самого начала сообщается несколько большей, чем при ударе частицы, массе вещества. Поэтому оценка скорости "эквивалентной" частицы из условия равенства абляционного давления начальному давлению на ударной волне совсем корректна и должна давать несколько заниженные значения скорости. Таким образом, следует ожидать, что эксперименты с РЭП, имеющим указанные выше параметры, достаточно хорошо воспроизводят общую картину взаимодействия пылевых частиц с защитными экранами зонда "Вега". Для установления количественных соотношений между параметрами микрометеорита и импульсного РЭП необходимы детальные численные расчеты.

Эксперименты по разрушению защитных экранов производились на сильноточных ускорителях "Кальмар" ⁵ (энергия электронов 0,35 МэВ) и "Мираж" ⁶ (энергия электронов 0,8 МэВ). Воздействию РЭП подвергались однослойные и многослойные экраны и системы экранов разной толщины из металлов и сплавов различного состава. Эксперименты показали, что наиболее подходящим материалом первого экрана является пластичный металл, в частности алюминий и некоторые его сплавы. Такие материалы дают менее интенсивный поток откольных частиц, чем, например, стали. В согласии с расчетами ^{3, 4}, второй экран должен быть расположен на расстоянии не менее 5 см от первого. Диаметр отверстий в первом экране (рис. 1) оказался несколько большим, чем следует из расчетов по модели, предложенной в работе ³. Возможно, это связано с движением фокального пятна по поверхности мишени в течение импульса.

В экспериментах установлена весьма существенная роль откольных фрагментов первого экрана, образующих на втором экране кольцевую зону поражений и пробивающихся в некоторых случаях второй экран из алюминия толщиной 0,6 мм, расположенный на расстоянии

1) Следует иметь в виду существенное различие в механизмах взаимодействия электронного пучка и конденсированной частицы с веществом экрана. Энергия пучка передается электронам и лишь частично идет на создание реактивного импульса.

10 см. Из анализа кратеров и отверстий во втором экране можно оценить массы и импульсы откольных частиц. Наиболее крупные частицы имеют массу $\sim (2-5) \cdot 10^{-4}$ г и скорость около 2 км/с, что согласуется с расчетами ^{3, 4}. Откольные частицы очень малых масс ускоряются в плазменной струе до скоростей $\sim 7-9$ км/с (рис. 2). При нанесении на второй экран слоя композитного материала толщиной 0,5 мм сквозного пробивания обычно не происходит.



Рис. 1

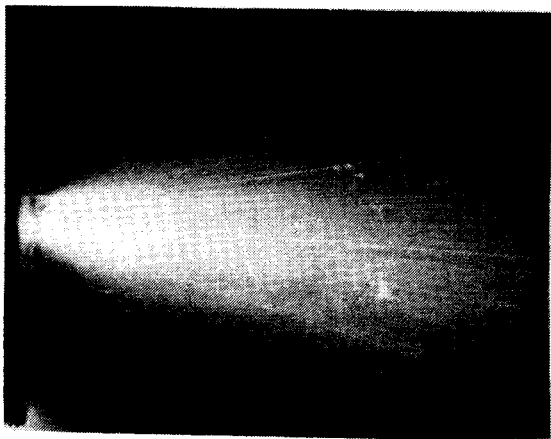


Рис. 2

Рис. 1. Фотографии сечения первого экрана из сплава АМГ6М толщиной 0,8 мм, пробитого РЭП с энергией в фокальном пятне 1 кДж

Рис. 2. Фотография откольных частиц, летящих со скоростью 7 км/с, образующихся при воздействии РЭП с энергией 1 кДж на первый экран из сплава АМГ6М толщиной 0,8 мм

Эксперименты по воздействию РЭП на защитные экраны и параллельно проведенное численное моделирование этого воздействия позволили уточнить физическую модель высокоскоростного пробивания, предложенную в ³, и дать рекомбинации по повышению надежности системы защиты в целом. Оптимизация параметров защитных экранов с помощью РЭП показала, что хорошие результаты удается получить, используя первый экран из сплава АМГ6М толщиной 0,4 – 0,6 мм и расположенный на расстоянии 10 см от него второй экран из того же материала толщиной 1 мм, покрытый миллиметровым слоем композита. В наиболее ответственных местах целесообразна установка трех защитных экранов из сплава АМГ6М.

Литература

1. Blamont J., Sagdeev R.Z. Naturwiss., 1984, Bd. 71, 295.
2. Демидов Б.А., Мартынов А.И. ЖЭТФ, 1981, 80, 738.
3. Анисимов С.И., Бушман А.В., Канель Г.И., Константинов А.Б., Сагдеев Р.З., Сулак С.Г., Фортгов В.Е. Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, 9.
4. Агурейкин В.А., Анисимов С.И., Бушман А.В. и др. Тепл. выс. темп. 1984, 22, 964.
5. Демидов Б.А., Ивкин М.В., Петров В.А., Фанченко С.Д. АЭ, 1979, 46, 100.
6. Горбулин Ю.М., Злотников Д.М., Калинин Ю.Г., Скорюпин В.А. Вопросы атомной техники, сер. Термоядерный синтез, 1979, вып. 2 (4), с. 84.