

ВОЗДЕЙСТВИЕ УСКОРЕННЫХ МАКРОЧАСТИЦ НА КОСМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

А. И. Акишин¹, Л. И. Иванов², О. Н. Никитушкина²

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцина МГУ (НИИЯФ МГУ), ² Институт металлургии и материаловедения РАН им. А. А. Байкова (ИМЕТ РАН).

Charged macroparticles are accelerated in an electrostatic accelerators. An experimental facility has been built to simulate orbital debris impacts using the laser driven flyer plate. The size of damaged zone on specimen surface is established to be vastly larger than of the main crater owing to shock wave energy dissipation on surface heterogeneities. Experimental results on electron and ion emission which is induced by impacts on metal targets of macroparticles with velocities 0,1-15 km/s are presented.

Как показали эксперименты, выполненные, например, на станции «Мир», образующиеся на поверхности кратеры от микрометеоритных частиц за счет возникающих ударных волн, вызывают изменение поверхностных свойств материалов на площади существенно превышающую видимый размер кратера. Кроме того, наиболее чувствительными к микрометеоритным ударам и воздействию частиц космического «мусора» являются элементы солнечных батарей (СБ), оптические элементы систем астроориентации и другие устройства и приборы [1,2].

В зависимости от целей и задач проводимых исследований выбирается ускоритель того или иного типа, при этом главными критериями являются диапазоны масс и скоростей ускоряемых макрочастиц. Применение электростатических ускорителей обеспечивает достижение достаточно высоких скоростей макрочастиц. Кроме того, метод ускорения заряженных макрочастиц на электростатических ускорителях позволяет проводить исследования в чистых вакуумных условиях. Недостатком данных ускорителей при работе с твердыми частицами являются малые массы ускоряемых частиц. При ускоряющем потенциале на электростатическом ускорителе Ван де Граафа $U=1,5-2$ МВ ускоряются частицы с массами $10^{-10}-10^{-16}$ г до десятков км/с. Давление в точке удара сверхвысокоскоростной частицы о мишень достигает десятков ГПа при температуре 10^3-10^5 К [3].

Вторым перспективным методом ускорения макрочастиц до скоростей 50 км/с и больше являются лазерные системы ускорения. Физическая основа метода — реактивное ускорение за счет импульсного испарения макрочастиц, независимо от их химического состава. Одним из недостатков этого метода является разброс по скоростям, ускоряемых частиц, связанный с импульсным характером лазерного воздействия и потерей их веса.

В Институте металлургии и материаловедения РАН был разработан новый метод лазерного ускорения частиц, в котором сочеталось два механизма ускорения — метательный и реактивный [4]. Метательное ускорение осуществлялось за счет взрывного расширения образующейся плазмы из прозрачной диэлектрической, как правило жидкой пленки, помещенной между окном ввода лазерного импульса и метаемым образцом. Реактивный механизм

ускорения за счет «испарения» материала метаемой частицы, вступает в действие при относительно значительном удалении метаемой частицы от окна ввода лазерного импульсного излучения.

Метаемые частицы, как правило, изготавливались в виде дисков толщиной 10-20 мкм и диаметром до 2 мм. Использовался рубиновый лазер, генерирующий световой пучок в режиме свободной генерации с энергией ~200 Дж и длительностью импульса ~1 мс и в режиме модулированной добротности с энергией 1 Дж и длительностью ~50 нс. Максимальные скорости ускоряемых частиц достигали ~50 км/с.

На рис. 1 показан кратер в медной мишени при ударе алюминиевой частицы, $v \sim 47$ км/с. Зона нарушенной структуры в ~20 раз больше кратера.

Например, при воздействии гигантского импульса на поверхности металла было открыто образование микрократерных полей около зоны удара за счет диссипации энергии ударных волн на поверхности мишени.

Подобная структура поверхности была обнаружена при ударном воздействии ускоренных частиц на различные материалы, а также на образцах, экспонировавшихся на космической орбитальной станции «Мир». На расстоянии существенно больше диаметра видимого кратера видны небольшие лунки, образующие микрократерные поля вокруг ударного кратера. Их возникновение происходило в поверхностном слое, покрытого осажденной пленкой из собственной атмосферы станции и возможно выбросами при ударе микрометеорита о поверхность меди.

Исследования изменений морфологии поверхности различных материалов, а так же их физико-химических свойств под воздействием ударов микрометеоритов, частиц космического «мусора», выполненные как на возвращаемых элементах ИСЗ «LDEF» (Long Duration Exposure Facility); космических станциях «Мир», «МКС» космического телескопа «Hubble», а также различного рода имитационных исследований позволили разработать физические модели взаимодействия частиц с высокими скоростями с разными мишенями. Так на материалах, которые экспонировались на ИСЗ «LDEF» [5-7] в течение 5,77 лет на орбите высотой 470 км, было изучено 600 кратеров. Эти исследования показали, что глубина P и диаметр D кратера соотносятся как $P/D \sim 0,56-0,6$. Зависимость $D(v)$ [6].

$$D = Am^{\alpha} v^{\beta},$$

где m — масса частицы, г; v — скорость, км/с; α , β — коэффициенты, равные 1,02 и 0,7 соответственно. Также была получена эмпирическая формула проникновения ускоренной частицы в материалы.

$$P = km^{0,352} P_t^{1,667} v^{0,875},$$

где P — глубина проникновения частицы, см; P_t — плотность мишени, г/см³; k — константа материала.



Рис. 1. Кратер в медной мишени при ударе алюминиевой частицы

Из лабораторных экспериментов по взаимодействию ускоренных металлических макрочастиц (микрометеоритов) с алюминиевой мишенью была получена формула по выходу импульсной электронной эмиссии [1,8,9]

$$Y_e = 10^{-0,88} m^{1,02} (v/5)^{3,48}.$$

При этом было установлено, что в интервале скоростей 15-70 км/с наблюдается выход импульсной электронной эмиссии $Y_e > Y_i$, где Y_i — выход импульсной ионной эмиссии.

Этот факт создает условия для возможности возникновения в момент удара микрометеора кратковременного скачка потенциала в локальной зоне на поверхности радиационно-заряженного диэлектрика внешней поверхности ИСЗ. Этот скачок потенциала не должен превышать 10 В. Выход импульсной, ионной эмиссии Y_i описывается формулой [1]:

$$Y_i = cm^\alpha v^\beta,$$

где c , α , β — константы; $\beta = 3,5-4,74$; $\alpha \sim 1$. Энергия имитируемых ионов при ударе ускоренных частиц лежит в пределах 5-40 эВ [1].

Удар микрометеорита может спровоцировать вакуумный пробой высоковольтного оборудования, размещенного в открытом космосе на внешней поверхности ИСЗ [10-11]. Возникновение в момент столкновения ударных волн в зоне высоковольтного оборудования может способствовать развитию электрического пробоя. При этом, если скорость микрометеорита $v \sim 3$ км/с, то максимальная температура на поверхности блока с оборудованием — $T \sim 3000$ К, а при $v \sim 40$ км/с — более $T \sim 10000$ К [1].

Если микрометеоритный удар произошел на фронтальной поверхности солнечной батареи (СБ) космического объекта, то возможен импульсный вакуумный пробой элемента СБ за счет распространения электронной лавины в приповерхностном облаке десорбированного с поверхности СБ газа с образованием плазмы, поверхностных и объемных ударных волн, давление на фронте которых может достигать значений 1-10 ГПа. Вероятность пробоя наибольшая для высоковольтных СБ ($U > 120$ В). На рис.2 представлен микрократер на СБ станции «Мир» [12,13].

Распространение возникших при ударе микрометеоритов ударных волн в слоистой структуре СБ является одним из факторов, приводящим к короткому замыканию элементов СБ, особенно, если $U > 120$ В. Это связано с тем, что при высоких давлениях на фронте ударных волн у диэлектрических и полупроводниковых материалов резко снижается их удельное сопротивление.

Наличие, например на борту геостационарных ИСЗ заряженного слоя в диэлектрических поверхностных

материалах, образуемого электронами окружающей магнитосферной плазмы с энергией выше 1 МэВ и потоком менее энергичных ионов, создает угрозу электрического пробоя внутри такого слоя при микрометеоритном ударе, а



Рис. 2. Ударный кратер на поверхности медного образца, экспонировавшегося на станции

также разрушения этих материалов. Так, есть основание предполагать, что телекоммуникационный ИСЗ — OLYMPUS (ESA) в ночь с 11 на 12 августа 1993 г. потерял ориентацию на геостационарной орбите и прекратил свое существование.

При исследовании кометы «Галлея» в 1986 г. КА Вега-1 (СССР) подвергался интенсивному воздействию потоков кометной пыли с $v_{\max} \sim 78$ км/с. Незащищенные СБ этих аппаратов потеряли более 50% электрической мощности.

В условиях пребывания на поверхности Марса спускаемого модуля в период марсианской пылевой бури, воздействующий на аппарат поток пыли ($\text{SiO}_2 \sim 70\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 15-20\%$) имеет скорость десятки м/с, а масса частиц лежит в интервале $10^{-3}-10^{-8}$ г и выше. В процессе облучения на имитационном стенде ускоренными частицами при $v \sim 10-100$ м/с коэффициент спектрального пропускания стекла понижается, а коэффициент яркости может повыситься [14].

Основная часть кинетической энергии микрометеорита тратится на образование кратера, испарение и ионизацию вещества мишени и микрометеорита, приводящая к образованию плазмы. Струток плазмы, возникший в момент удара, может быть источником импульсной электронной и ионной эмиссии, светового и высокочастотного излучения. Это может создавать помехи оптическим и электронным приборам, расположенных на внешней поверхности космических объектов.

1. Shu T.L., Murad E., MacNeil W.J. Hazards of Hypervelocity Impacts on Spacecraft // J. of Spacecraft and Rockets, v.39, 2002, p.106-114.
2. Никитушкина О.Н., Иванов Л.И., Петров А.Н. и др. Структура микрократеров на поверхности металлических образцов, экспонировавшихся в открытом космосе // ФХОМ, 2002, №2, с.21-25.
3. Акишин А.И., Блюдов Е.В., Кирюхин В.П., Черняк Ю.Б. Некоторые вопросы моделирования микрометеорной эрозии. В сб.: Модель околоземного космического пространства. Ред. С.Н. Вернов. М.: Изд-во МГУ, 1968, т.2, ч.1, с.178-209.
4. Обухов Л.В., Янушкевич В.А. Метание макрочастиц с помощью гигантских импульсов ОКГ // ЖТФ, 1978, т.48, №12, с.2559-2565.
5. Никитушкина О.Н., Иванов Л.И., Бедняков С.А., Новиков Л.С. Изменение морфологии поверхности металлов при сверхзвуковых соударениях // ФХОМ, 2001, №1, с.48-51.
6. Bernhard R.P., Christiansen E.L., Hyde J., Crews J.L. Hypervelocity Impact Damage into Space Shuttle Surfaces // Int. J. Impact Engng, 1995, v.17, p.57-68.
7. Stanley G.L. Donald E.B., Nichole L., Horz K.F. Morphology of Meteoroid and Debris Impact Craters Formed in Soft Metal Targets on the LDEF Satellite // Int. J. Impact Engng. 1995, v.16, N3, p. 405-418.
8. Акишин А.И. Плазменные явления при микрометеорной бомбардировке ИСЗ // ФХОМ, 2004, №2, с.35-38.
9. Акишин А.И., Кирюхин В.П., Марьин Б.В., Новиков Л.С. Электронная и ионная эмиссия при соударении микронных металлических частиц со скоростями 1-5 км/с с поверхностью твердого тела // ЖТФ, 1981, т.51, в.4, с.823-827.
10. Акишин А.И., Кирюхин В.П., Новиков Л.С., Сливков И.Н. К вопросу инициирования пробоя в вакууме ударами быстролетающих микрочастиц // ЖТФ, 1984, т. 54, с.179-181.
11. Акишин А.И., Кирюхин В.П., Новиков Л.С., Тютрин Ю.И. Воздействие микрометеорного удара на электрическое разрушение стекол // ФХОМ, 1989, №1, с.50-53.

12. Никитушкина О.Н., Иванов Л.И., Новиков Л.С. Повреждение поверхности элементов солнечных батарей в условиях космического полета // ФХОМ, 2006, №6, с.23-25
13. Никитушкина О.Н. Исследование разрушения образца меди, экспонировавшегося в открытом космосе // Перспект/ матер/, 2007, №3, с.21-27
14. Акишин А.И., Баранов В.К., Каракулев Д.А. и др. Изменение параметров оптических деталей при имитации марсианской пылевой бури // Оптико-механическая промышленность, 1980, №6, с.10-12.