

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ КРАТЕРОВ В ПЛАСТИЧНЫХ МИШЕНЯХ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

С.А. Бедняков¹, Л.С. Новиков¹, И.К. Ермолаев², Г.Г. Бондаренко³, А.И.Гайдар³,
Е Ицун⁴, Ван Либо⁴

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ

²Научно-исследовательский институт механики МГУ

³Московский институт электроники и математики

⁴Университет Цинхуа, г. Пекин

E-mail: novikov@sinp.msu.ru

Удары метеорных частиц и твердых частиц искусственного происхождения, входящих в состав так называемого космического мусора, являются одним из важнейших факторов повреждения поверхности космических аппаратов (КА) и открытых элементов оборудования. При ударах таких частиц, средние скорости которых составляют соответственно $20 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ и $10 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$, на поверхности материалов образуются кратеры, а при множественных ударах происходит эрозия поверхности, в результате которой на ней образуется характерных рельеф и частично теряется масса материала.

В наибольшей степени страдают от такого воздействия различные оптические элементы: иллюминаторы космических кораблей, линзы приборов, зеркальные отражатели и т.п., а также элементы высоковольтного электротехнического и радиотехнического оборудования КА, в которых удары высокоскоростных частиц могут инициировать электрические пробой.

Для моделирования подобных эффектов в лабораторных условиях используются ускорители твердых частиц разных типов, в частности электростатические ускорители и легкогазовые пушки [1]. В работах [2,3] ранее были представлены данные о параметрах потоков твердых частиц, создаваемых с помощью указанных ускорителей, а также некоторые результаты лабораторных исследований воздействия ускоренных частиц на различные материалы.

В настоящем докладе приводятся предварительные результаты исследования на легкогазовой пушке при скоростях удара $1,5\text{--}7 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ воздействия стальных шариков диаметром $0,7\text{--}0,8 \text{ мм}$ на образцы алюминиевых сплавов.

На рис. 1а приведено для сопоставления с результатами ударного воздействия стальных ударников с указанными параметрами на алюминиевые сплавы изображение шарика, внедрившегося в стальную мишень при скорости удара $1,4 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ [2]. На рис. 1б представлена микрофотография кратера, образованного ударом шарика с близкой скоростью о поверхность образца алюминиевого сплава. В этом случае отчетливо виден характер пластических деформаций поверхности мишени, включая характерный бруствер, окаймляющий кратер, и деформацию поверхностного слоя, прослеживаемую

по искривлению следов исходной обработки поверхности. На рис. 2а приведены результаты исследования с помощью микрозонда сканирующего электронного микроскопа элементного состава материала мишени в точке, удаленной от кратера (спектр 1), и в двух точках, одна из которых расположена на бруствере (спектр 2), а другая – на склоне кратера (спектр 3). Указанные спектры являются зависимостью интенсивности характеристического рентгеновского излучения, возбуждаемого хорошо сфокусированным электронным пучком микрозонда, от энергии квантов излучения. Видно, что в точке, удаленной от кратера, присутствуют в основном элементы, содержащиеся в исходном сплаве (Al, Cu, Zn), а спектры, полученные для двух других точек, содержат еще целый ряд элементов (C, Ca, O, Fe, Si). Эти элементы могут как выделяться из материала ударника в условиях его сжатия и разогрева при взаимодействии с мишенью, так и образовываться в зоне взаимодействия.

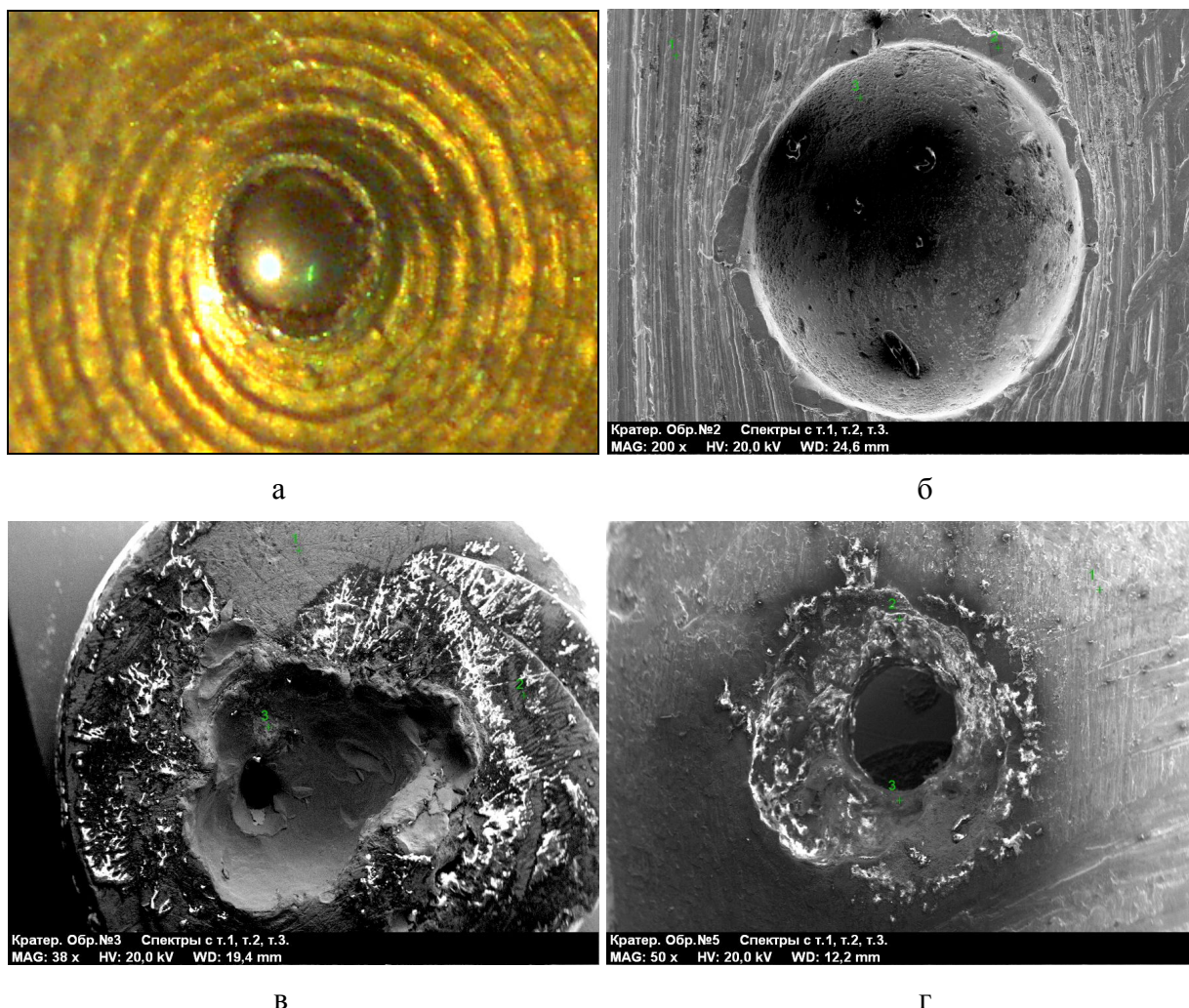


Рис. 1. Изображения кратеров в пластичных мишенях

На рис. 1в приведены аналогичные результаты для скорости удара $4,5 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$. В данном случае удар произошел под некоторым углом к поверхности мишени, следствием чего является асимметричная форма образовавшегося кратера. Спектры характеристического излучения (рис. 2б) здесь снимались также для неповрежденного участка поверхности (спектр 1), для области,

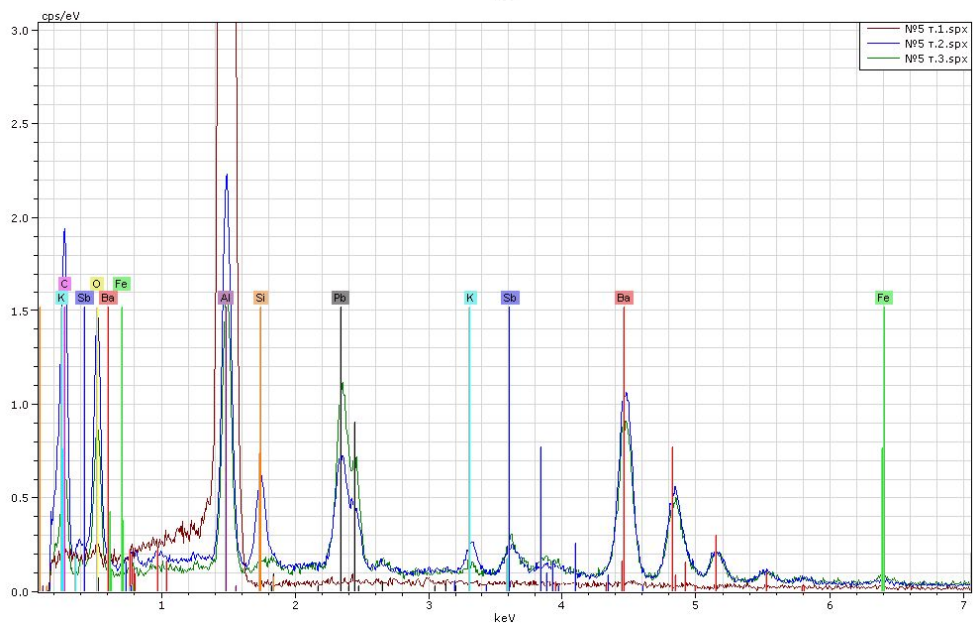
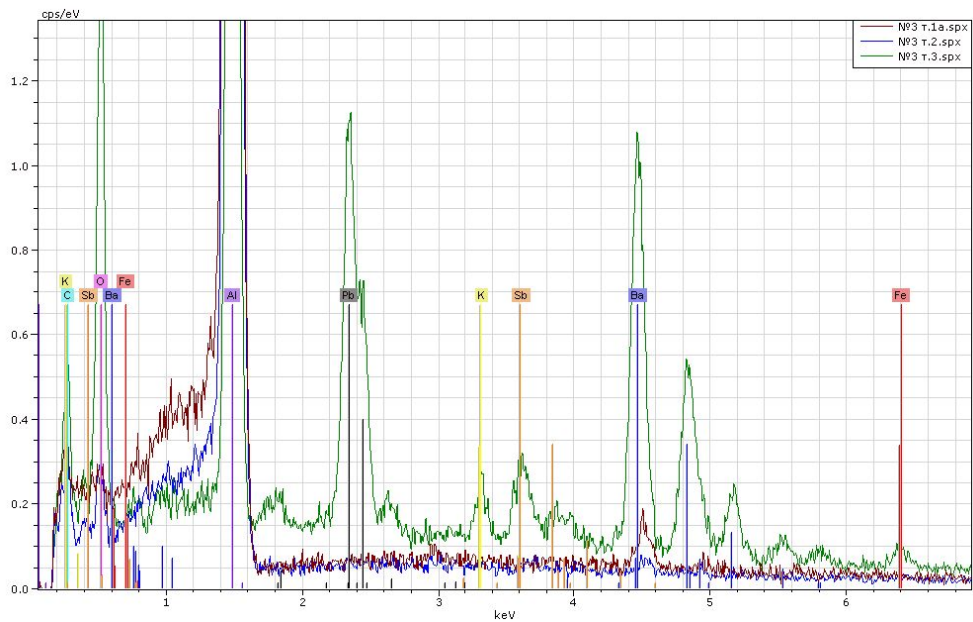
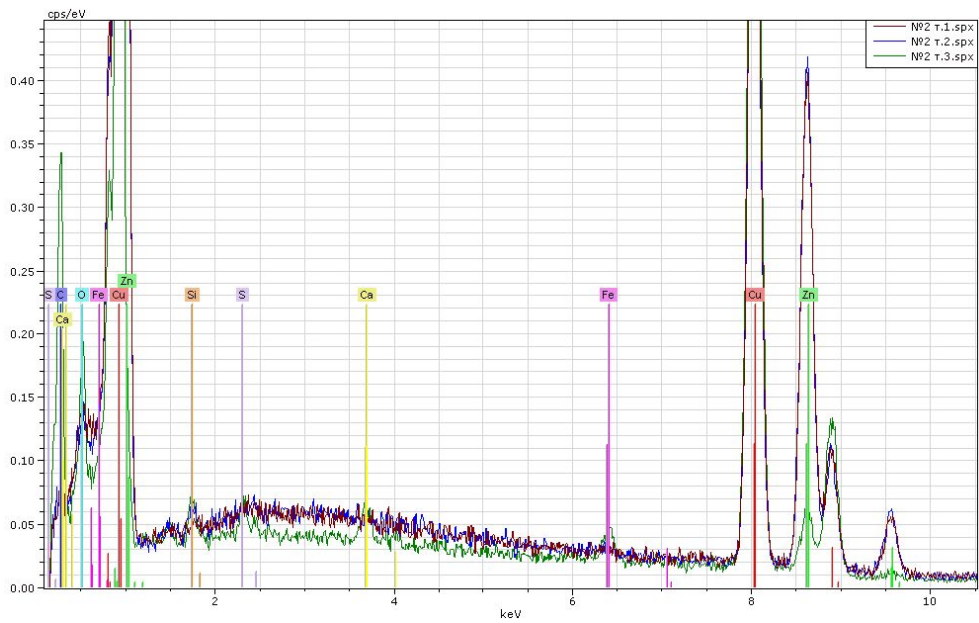


Рис. 2. Спектры характеристического рентгеновского излучения

близкой к брустверу кратера (спектр 2), и для участка на склоне кратера (спектр 3). Сопоставляя результаты анализа состава материала для данного случая с данными, приведенными на рис. 2а, можно констатировать, что при увеличении скорости удара спектры 2 и 3 оказались в большей степени насыщенными линиями элементов, не обнаруженных для невозмущенного участка поверхности мишени. Кроме того, наблюдается появление элементов, отсутствовавших в предыдущем рассмотренном спектре (Pb, Sb, Ba).

Рис. 1г демонстрирует случай сквозного пробоя мишени при скорости удара $6,8 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$. Видно, что отверстие окаймлено характерным бруствером, ширина которого существенно больше, чем в двух предыдущих рассмотренных случаях. Результаты элементного анализа материала мишени в данном случае (рис. 2в) в целом подобны результатам, приведенным на рис. 2б. Следует, однако, отметить, что точка 3 на рассматриваемом рисунке расположена, как и точка 2, на бруствере, поэтому для спектра 3 можно усмотреть некоторое уменьшение насыщенности по сравнению со случаем, показанным рис. 2б.

Проведенные исследования показали, что полученные картины образования кратеров в пластичных материалах при высокоскоростном ударе в целом согласуются с существующими модельными представлениями и данными других экспериментальных исследований. В то же время параметры и конфигурация кратеров существенно зависят от свойств материалов ударника и мишени. Данные произведенного элементного анализа состава мишени после ударного воздействия свидетельствуют о возможности эффективного использования описанного метода для идентификации происхождения бомбардирующих частиц при проведении космических экспериментов.

Список литературы

1. Новиков Л.С. Высокоскоростные соударения в космосе. Учебное пособие. – М.: Издательство УНЦ ДО, 2003. – 72 с.
2. L.S. Novikov, S.A. Bednyakov, G.G. Soloviev, I.K. Ermolaev & N.N. Pilyugin. Laboratory Modelling Of Space Particles Impact On Materials And Structures. Proceedings of the 4th European Conference on Space Debris, 18-20 April 2005, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, p. 697–700.
3. Ye Yicong, Wang Libo, S.A. Bednyakov, S.V. Zaytsev, L.S. Novikov. Methods of Impact Experiment with Al_2O_3 and Fe Microparticles. В кн.: Труды IX Межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». М.: МГУ, 2008, с. 25–41.