

ОБРАЗОВАНИЕ КРАТЕРОВ В ПЛАСТИЧНЫХ МИШЕНЯХ ПРИ УМЕРЕННЫХ СКОРОСТЯХ УДАРА

И.К. Ермолаев, Л.С. Новиков, М.С. Самохина
Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ
E-mail: novikov@sinp.msu.ru

Одним из важнейших факторов, вызывающих повреждение материалов внешней оболочки космических аппаратов (КА), является воздействие твердых частиц, входящих в состав метеорной материи и так называемого «космического мусора» - частиц, попадающих в космическое пространство при запусках и эксплуатации КА. Скорости соударения частиц космического мусора с поверхностью КА лежат в диапазоне $\sim 0,1 - 15$ км/с, существенно ниже скоростей метеорных частиц. Однако на низких околоземных орбитах, в частности в области орбиты Международной космической станции (высота орбиты ~ 400 км) плотность потока техногенных частиц уже превышает плотность потока частиц естественного происхождения. В этой связи актуальной задачей является изучение закономерностей образования кратеров в материалах внешней оболочки КА при скоростях удара, лежащих в диапазоне скоростей техногенных частиц.

В настоящей работе экспериментальные исследования проводились на импульсной газодинамической установке [1], обеспечивавшей получение скоростей метаемых тел диаметром $0,5 - 2,0$ мм в диапазоне $\sim 0,05 - 5,0$ км/с. Измерение скоростей метаемых тел осуществлялось бесконтактным способом с помощью индукционных датчиков, принцип действия которых описан в [1].

Порядок проведения эксперимента следующий: на ускоряемый в разгонном канале поддон, представляющий собой полиэтиленовый цилиндр высотой 6 мм, устанавливалось метаемое тело – стальной шарик диаметром от 0,5 до 2 мм. Далее поддон с шариком помещался в разгонный канал. После установки на выходе разгонного канала бокса с мишенью активировалась система запуска газодинамического импульса, и образующийся газ разгонял поддон с шариком. При ударе об отбойник поддон останавливался, а шарик продолжал движение в канале трубки с установленными на ней индукционными кольцами. Заряд, образовавшийся на металлическом шарике при движении в разгонном канале, индуцировал на кольцах электрические импульсы, которые регистрировались запоминающим осциллографом Tektronix TDS2024B. При известном расстоянии между кольцами (11 мм) по временному сдвигу между сигналами с колец определялась скорость шарика. На рис. 1 представлен пример осциллограммы сигналов с колец. В данном случае измеренная скорость шарика составила 212 м/с.

Эксперименты проводились как при атмосферном давлении в разгонном канале, так и при его откачке форвакуумным насосом. В последнем случае удавалось достигать скоростей полета шарика $\sim 1 - 4$ км/с.

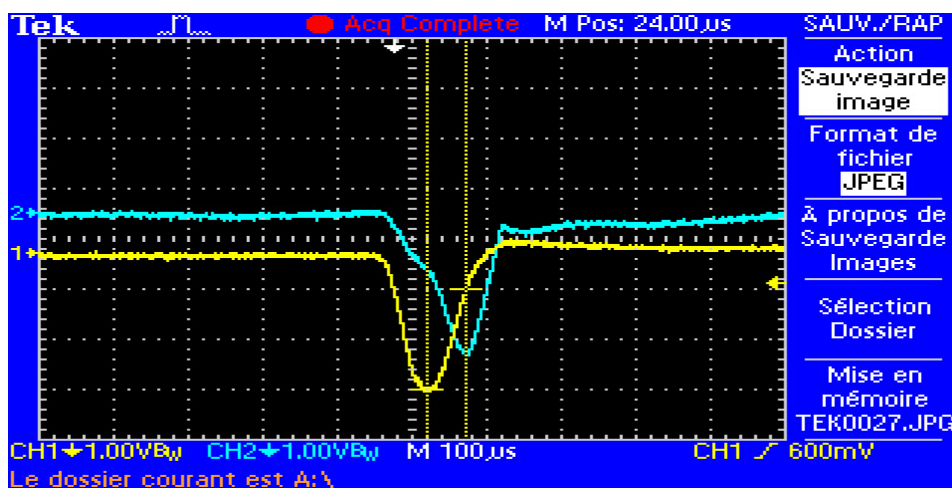


Рис. 1. Осциллограмма сигналов индукционных датчиков

В процессе исследования работы системы индукционных датчиков был обнаружен интересный эффект индукции сигналов ударной волной, распространяющейся в полиэтиленовой трубке, на которой устанавливались кольцевые датчики. Оказалось, что на фронте распространяющейся в полиэтилене ударной волны создается заряженный слой, который индуцирует сигналы на кольцах. Осциллограмма для этого случая приведена на рис. 2. Два импульса в левой части осциллограммы индуцированы прохождением ударной волны. Измеренная по временному сдвигу между ними скорость составляет 2400 м/с, что соответствует скорости звука в полиэтилене (2480 м/с). По импульсам в правой части осциллограммы была определена скорость шарика, составившая в данном случае 952 м/с. Импульсы в правой части осциллограммы искажены за счет наложения сигналов, создаваемых отраженной ударной волной.

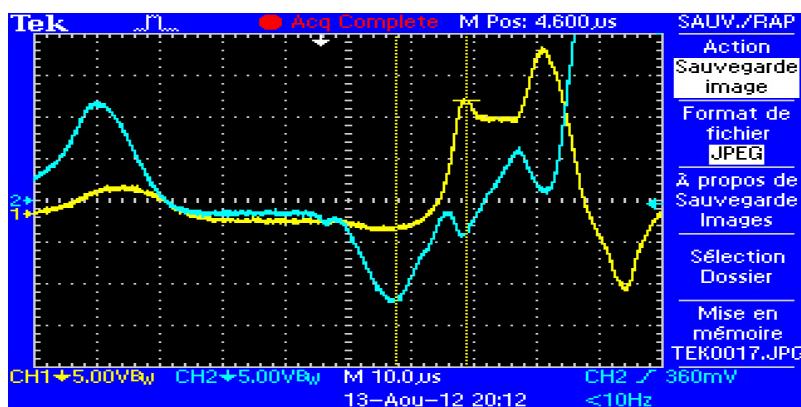


Рис. 2. Осциллограмма сигналов индукционных датчиков при наведении дополнительных импульсов ударной волной

Эффект наведения сигнала на индукционных кольцах распространяющейся в диэлектрике ударной волной был подтвержден специальным экспериментом, в котором трубка с осевым каналом была заменена сплошным цилиндрическим бруском.

На рис. 3 приведены примеры изображений кратеров, образованных на поверхности образца алюминиевого сплава ударами стальных шариков с различными скоростями. В левой части рисунка представлен поперечный шлиф кратера конической формы, образованного при скорости удара 2490 м/с. На дне кратера виден оставшийся там шарик. В правой части рисунка показана поверхность образца с несколькими мелкими кратерами, полученными при скоростях удара 200 – 425 м/с и одним более крупным кратером, который образовался при скорости удара 4250 м/с. Во всех случаях диаметр метаемого стального шарика составлял 1 мм.

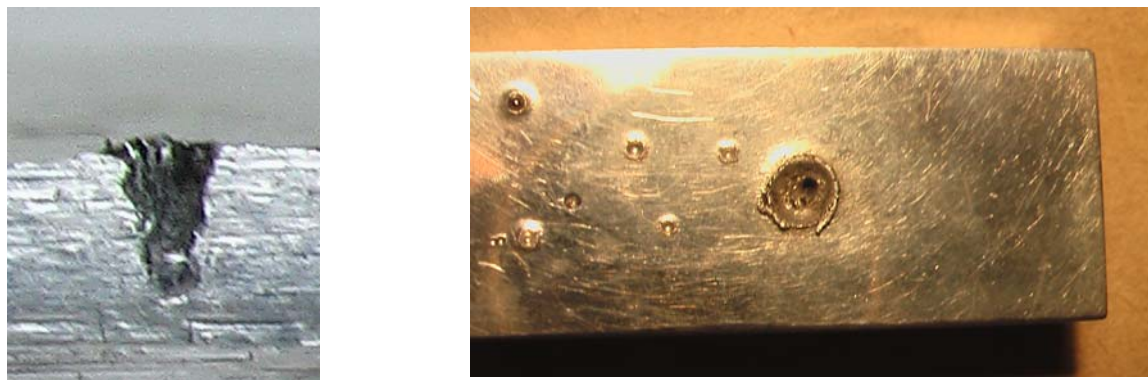


Рис. 3. Кратеры, образованные в образце алюминиевого сплава ударами стальных шариков диаметром 1 мм при скоростях от 200 до 4250 м/с

Существует достаточно много эмпирических выражений, описывающих зависимости параметров кратеров (диаметра, глубины, объема) от параметров бомбардирующей частицы (диаметра, скорости, массы) [1]. В работе [2] для описания связи объема образующегося кратера с энергией частицы было использовано понятие удельной энергии e_0 , равной отношению кинетической энергии бомбардирующей частицы к объему образованного ею мишени кратера: $e_0 = 0,5 mv^2/V$, где m – масса частицы, v – скорость частицы, V – объем кратера. На основании экспериментальных данных, полученных при относительно низких скоростях ($\sim 20 - 200$ м/с) соударения стальных шариков с пластичными мишенями (алюминиевый сплав, медь), в [2] сделан вывод о постоянстве удельной энергии e_0 в указанном диапазоне скоростей удара и выдвигается гипотеза о сохранении этого параметра неизменным при более высоких скоростях.

Полученные нами данные позволяют проверить эти выводы. Можно полагать, что при указанных низких скоростях удара лунки, образующиеся в пластичных мишенях, близки по форме к сферическому сегменту, объем которого описывается выражением: $V = \pi H^2(D/2 - H/3)$ где H и D – глубина и диаметр лунки соответственно. Поскольку при низких скоростях удара кратер (лунка) образуется в мишени за счет пластической деформации материала мишени, можно полагать, что поверхность лунки соответствует поверхности шарика, проникающего в мишень на глубину менее половины его диаметра.

На рис. 4 показана зависимость параметра e_0 , построенная по нашим экспериментальным данным, полученным при бомбардировке образца алюминиевого сплава стальными шариками диаметром от 0,5 до 2 мм.

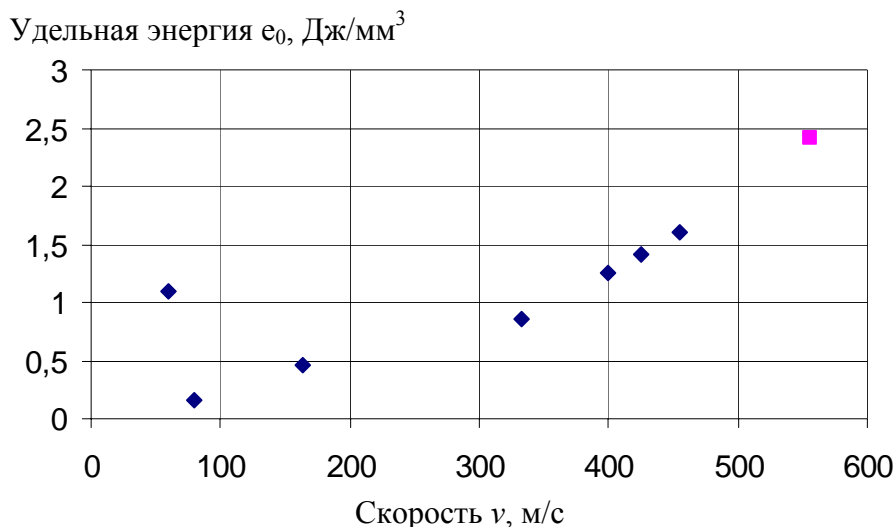


Рис. 4. Зависимость удельной энергии e_0 от скорости v

Эти данные наглядно демонстрируют рост параметра e_0 с увеличением скорости частиц, что полностью согласуется с приведенным выше простым модельным описанием формы кратеров. При таком описании, как нетрудно видеть из приведенных выше формул, функция зависимости удельной энергии e_0 от скорости v должна идти несколько менее круто по сравнению с квадратичной зависимостью, что и подтверждается экспериментальными данными. Особо следует отметить увеличение параметра e_0 в области низких скоростей. Проведенные дополнительные исследования показали, что в пороговой области скоростей, предшествующей началу пластической деформации металла, объем лунки уменьшается, что и вызывает рост параметра e_0 , а в предельном случае при упругом отскоке шарика от поверхности значение параметра e_0 стремится к бесконечности.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили эффективность использования рассмотренной методики для исследования процессов образования кратеров при умеренных скоростях удара и позволили установить связь параметров кратера с величиной кинетической энергии бомбардирующих частиц.

1. Л.С.Новиков, Н.Д.Семкин, И.К.Ермолаев и др. Повреждение космических аппаратов ударами твердых частиц естественного и искусственного происхождения. В кн. Модель космоса. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Под ред. Л.С. Новикова, М.: КДУ, 2007, с. 519-560.
2. I. Kleis, P. Kulu Solid Particle Erosion: Occurrence, prediction and control. Springer, 2008, 206 p.