

МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫБРОСА ЧАСТИЦ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ УДАРНО-НАГРУЖЕННОГО СВИНЦА

Н. В. Невмержицкий, А. Л. Михайлов, В. А. Раевский, В. С. Сасик, Ю. М. Макаров, Е. А. Сотсков, С. А. Абакумов, А. В. Руднев, В. В. Бурцев, С. А. Лобастов, А. А. Никулин, Е. Д. Сеньковский, О. Л. Кривонос, А. А. Половников, О. Н. Априлков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, Россия, г. Саров Нижегородской обл.

E-mail: root@gdd.vniief.ru

Представлены результаты микроскопической электронно-оптической регистрации процесса выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженного свинца, имеющей разную степень шероховатости, после выхода на поверхность ударной волны с давлением ≈ 15 ГПа. Регистрация процесса осуществлялась видеосъемкой через систему с относительно большим коэффициентом оптического увеличения. Для подсветки процесса использовался короткий (4 нс) лазерный импульс. Зарегистрированы частицы свинца размером от 3 мкм и построен их спектр.

Введение

Известно, что при выходе достаточно сильной ударной волны на свободную поверхность конденсированного материала происходит выброс частиц материала с этой поверхности [1–3]. Этот процесс называют еще пылением материала. Размер частиц пыли составляет от единиц до сотен микрон, а их скорость – несколько километров в секунду. Причины выброса частиц связывают, в частности, с развитием неустойчивости Рихтмайера – Мешкова [4], процессами микрокумуляции, возникающими на неоднородной свободной поверхности материала под действием ударно-волновых процессов. Процесс пыления многогранный и достаточно сложный. Природа этого явления изучена недостаточно.

В России в 1950-е годы во ВНИИЭФ выброс частиц со свободной поверхности материалов впервые был обнаружен С. Б. Кормером, Ф. Б. Григорьевым и др. Часть результатов опубликована позднее в работе [2].

Для регистрации процесса пыления применяются различные экспериментальные методы: рентгенографический [5], голографический [3], оптический [2], метод индикаторных фольг [1] и т. д. Но отметим, что ни один из приведенных методов не позволяет напрямую отчетливо визуализировать размеры частиц пыли на уровне единиц микрон. Размер частиц пыли определяют, например, по точкам осредненной траектории их движения [2], или восстанавливают голографическим методом [3]. Расчетные методы исследования процесса пыления пока также далеки от совершенства. Перспектив-

ными в этом направлении являются, по-видимому, методы молекулярной и кластерной динамики [4]. Расчетные методы требуют экспериментальной проверки.

Основная цель экспериментальных исследований данной работы – регистрация частиц пыли металла и получение их спектра электронно-оптическим методом.

Техника эксперимента

Схема экспериментальной сборки, на которой проводились исследования, представлена на рис. 1. Сборка представляла собой стальной цилиндр с внутренним диаметром 45 мм. В левом торце цилиндра было выполнено отверстие диаметром 20 мм, правый торец цилиндра был свободным. Образец свинца приклеивался к торцу цилиндра по периферийной поверхности ($R > 30$ мм). На заднюю поверхность свинца приклеивалось кольцо из фторопласта, в центре которого устанавливалось пластическое взрывчатое вещество (ВВ).

На передней (свободной) поверхности свинца были нанесены 2D периодические возмущения: $a_0 = 80$ мкм, $\lambda \approx 500$ мкм; $a_0 = 20$ мкм, $\lambda \approx 300$ мкм; $a_0 = 5$ мкм, $\lambda \approx 20$ мкм (это примерно соответствует шероховатости поверхности $Rz80$, $Rz20$, $Rz5$).

Экспериментальная сборка устанавливалась под оптическую систему согласно схеме рис. 2. Оптическое увеличение составляло десятки раз, размеры регистрируемой области – от 1,2 до 50 мм², глубина резкости 0,5–2 мм (в зависимости от используемых объективов). Фокус оптической системы настраивался на центр об-

разца. Регистрация процесса производилась видеокамерой, имеющей ПЗС матрицу 2000×1200 пикселей. Подсветка процесса производилась коротким (4 нс) лазерным излучением с длиной волны 532 нм и энергией 180 мДж. Для более точного проведения обмеров перед

каждым опытом проводилась предварительная видеорегистрация изображения поля с репером.

Разрешающая способность применяемой методики проверялась в статических и динамических тестовых экспериментах.

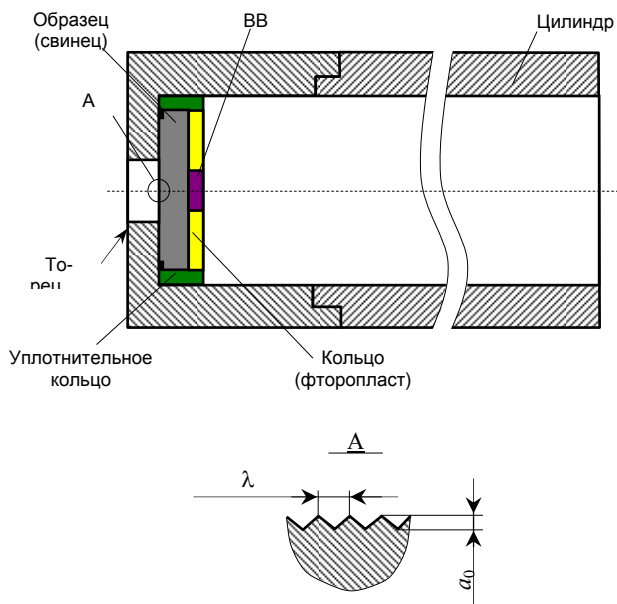


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки

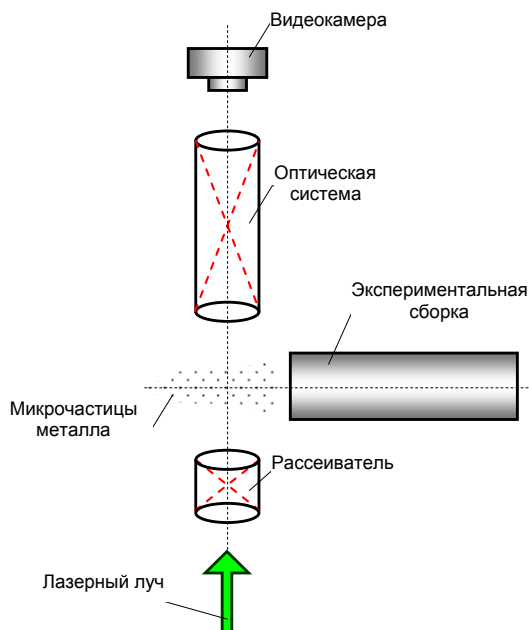


Рис. 2. Схема регистрации

Результаты экспериментов и их обсуждение

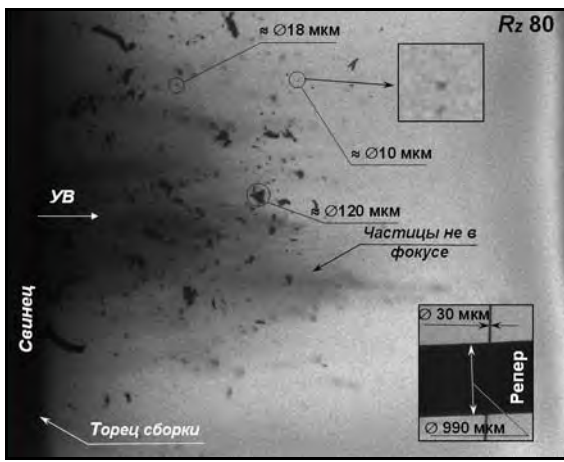
На рис. 3 представлены видеокадры некоторых экспериментов. На видеокадрах хорошо видны частицы пыли свинца. На рис. 3,в наблюдаются отколы.

Частицы измерялись на ПЭВМ в двух взаимно-перпендикулярных направлениях, результаты измерений усреднялись, этот размер назван номинальным (d_n) и $d_c = \sum_{i=1}^N d_{ni} / N$ назван средним размером частиц (где N – количество частиц). Погрешность измерения частиц оценивается в $\leq 30\%$.

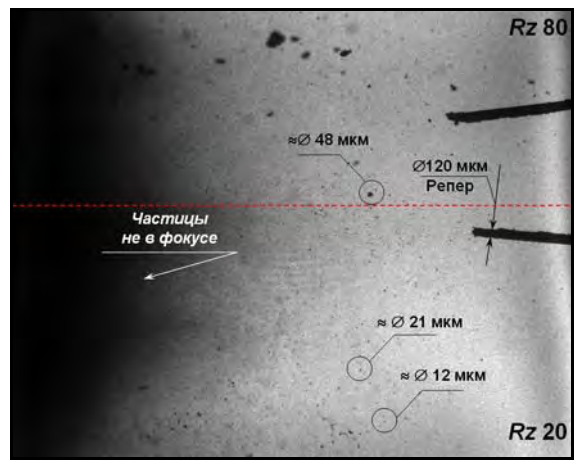
На рис. 4 представлено распределение частиц пыли свинца по размерам $R(d_n)$ в экспериментах и характер изменения среднего размера частиц (d_c) от шероховатости поверхности, где $R = \frac{N - N(d_n < d_{ni})}{N}$, $N(d_n < d_{ni})$ – количество частиц определенного размера в данной серии опытов.

По приведенным результатам экспериментов можно отметить следующее:

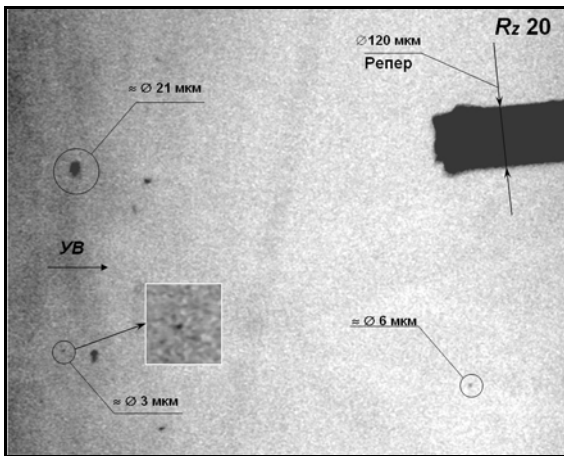
- скорость свободной поверхности свинца, определенная по видеокадрам на различные времена регистрации, оценивается в 0,7–1 мм/мкс, скорость частиц $\approx 1,5$ мм/мкс;
- с уменьшением шероховатости свободной поверхности свинца от 80 до 5 мкм средний размер частиц уменьшается от 30 до 15 мкм;
- в экспериментах с шероховатостью поверхности ≈ 5 мкм наблюдаются откольные явления, частицы находятся и между откольными фрагментами.



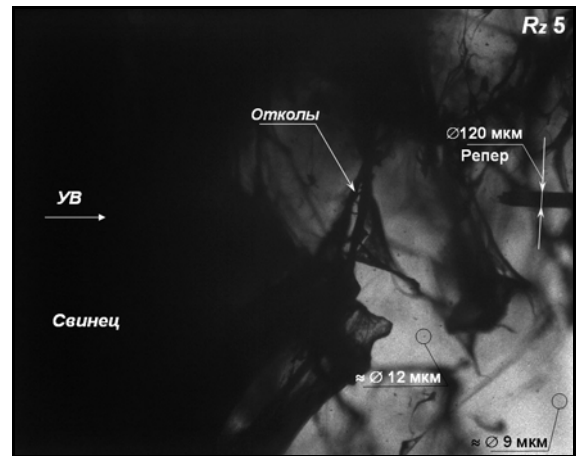
а



б

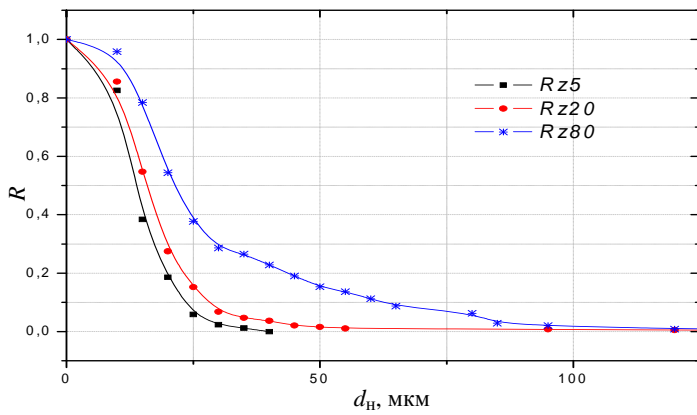


в

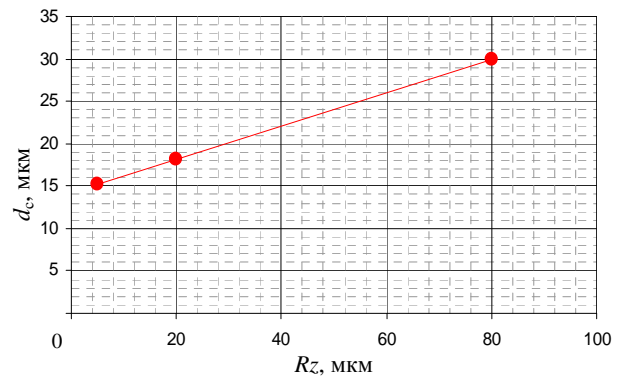


г

Рис. 3. Видеокадры процесса выброса частиц



а



б

Рис. 4. Результаты обработки экспериментов: а – распределение частиц по размерам; б – зависимость среднего диаметра частиц от шероховатости поверхности

Выводы

Микроскопической электронно-оптической видеосъемкой напрямую зарегистрированы частицы пыли свинца размером от 3 мкм, построено распределение частиц по размерам.

Авторы выражают благодарность *В. А. Устиненко, В. Н. Пискунову, И. А. Давыдову* – за полезное обсуждение результатов работ; *С. В. Ерунову, Б. П. Дегтяреву, А. Н. Подурцу, М. И. Ткаченко, В. Д. Поверинову* – за помощь в подготовке экспериментов.

Список литературы

1. Asay J. R., Mix L. P., Perry F. C. Ejection of material from shocked surfaces // *Appl. Phys. Lett.* 1976. Vol. 29, N 5. P. 284–287.

2. Огородников В. А., Иванов А. Г., Михайлов А. Л., Крюков Н. И., Толочко А. П., Голубев В. А. О выбросе частиц со свободной поверхности металлов при выходе на нее ударной волны и методах диагностики этих частиц // *ФГВ.* 1998. Т. 34, № 6. С. 103–107.

3. Sorenson D. S., Minich R. W., Romero J. L. et al. Ejecta particle size distributions for shock loaded Sn and Al metals // *J. Appl. Phys.* 2002. Vol. 92, N 10. P. 5830.

4. German T. C., Hammerberg J. E., Dimonte G. Billion-atom simulation of shock-induced particulate ejection and Richtmyer-Meshkov instability development in copper. New models and hydrocodes for shock wave processes in condensed matter. 7th Bilnual International Conference. Portugal, 18–23 May, 2008.

5. Лебедев А. И., Игонин В. В., Низовцев П. Н., Равевский В. А., Соловьёв В. П. Исследования неустойчивости свободной поверхности твердых тел при ударно-волновом воздействии // *Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ.* 2001. Вып. 1. С. 590–597.

Статья поступила в редакцию 23.07.2010.