

Регистрация параметров множественного откола и внутренней структуры облака частиц при ударно-волновом нагружении металлов

Приведены результаты экспериментов по исследованию откольного разрушения и выброса частиц с поверхности медных и свинцовых образцов. С помощью лазерного интерферометрического метода регистрировались скорость облака частиц и параметры множественного откола, с помощью угловых датчиков – дисперсия скорости облака частиц по всей глубине и структура откольного разрушения металлов.

**А. В. Фёдоров, А. Л. Михайлов,
С. А. Финюшин, Д. А. Калашников,
Е. А. Чудаков, Е. И. Бутусов,
И. С. Гнутов**

Введение

Цель работы – определение размера и скорости частиц при ударно-волновом пылении металлов. Лазерный интерферометрический метод PDV [1–3] позволяет непрерывно регистрировать спектр скоростей облака частиц и их торможение в газовой среде. В случае плотного облака частиц методом PDV регистрируется только небольшая часть облака, куда может проникнуть лазерное излучение. Для регистрации параметров облака по всей глубине была разработана конструкция приемника с использованием датчиков фронтального и углового расположения. В результате в экспериментах были зарегистрированы дисперсия скорости облака вылетевших частиц и параметры множественного откола. Для регистрации внутренней откольной структуры металлов на исследуемой поверхности создавались крупномасштабные возмущения. Зарегистрирована скорость до десяти откольных слоев в диапазоне от 0,2 до 1,7 км/с.

Постановка экспериментов

В экспериментах по исследованию параметров пыления металлов (рис. 1,а) применялась конструкция с тремя PDV-датчиками, два из которых располагались под углом, а один – фронтально к исследуемой поверхности.

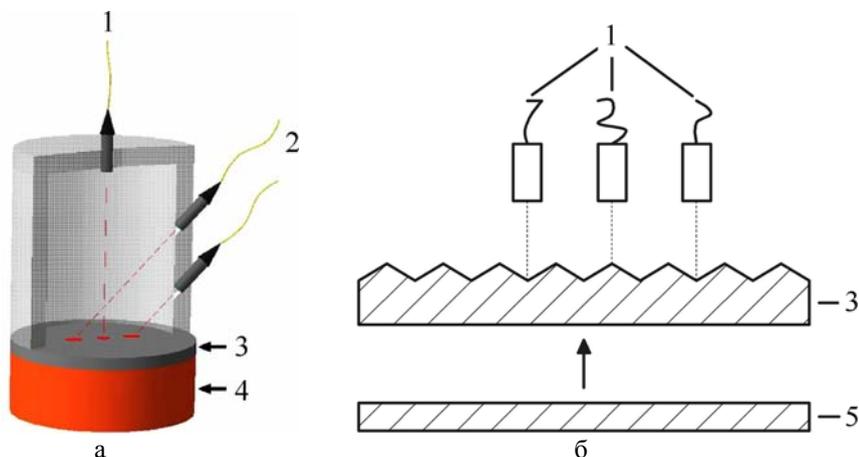


Рис. 1. Экспериментальная сборка (а) и схема расположения точек зондирования (б) на исследуемой поверхности: 1 – фронтальный PDV-датчик, 2 – угловые PDV-датчики, 3 – исследуемый материал, 4 – заряд ВВ, 5 – стальной лайнер

Свинцовый образец $\varnothing 30 \times 1,57$ мм нагружался в опыте № 1 до $P = 28$ ГПа (жидкое состояние), в опыте № 2 – до $P = 15$ ГПа (твердое состояние). Фронтальный коллиматор располагался в центре под углом 90° , угловые коллиматоры устанавливались на боковой стенке обоймы из оргстекла под углом 45° к поверхности исследуемого образца так, что регистрировали участки $\pm 2,5$ мм от центра образца.

В серии экспериментов по регистрации откольного дробления меди (рис. 1, б) на поверхности образца создавались трехмерные возмущения в виде пирамид с основанием 14 мм и высотой 2 мм. Медный образец $\varnothing 60 \times 7,5$ мм нагружался стальным лайнером $\varnothing 60 \times 2$ мм, который разгонялся через зазор продуктами взрыва шашки ВВ. В эксперименте использовались три PDV-датчика с расположением точек зондирования на вершине пирамидки, на впадине между двумя соседними пирамидками и на перекрестии между четырьмя соседними пирамидками (рис. 2, см. также цв. вкл.).

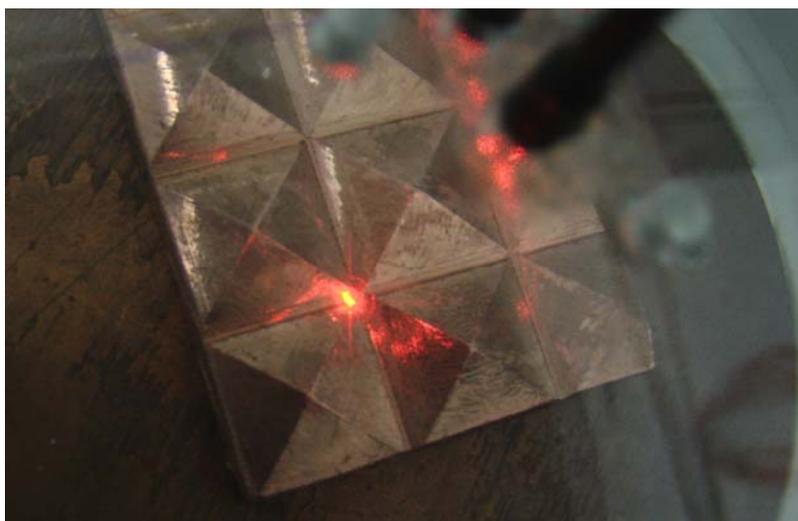


Рис. 2. Настройка датчиков PDV на вершину пирамиды, на впадину и перекрестие

Экспериментальные результаты

Экспериментальные спектрограммы, полученные в опытах с образцами из свинца с использованием фронтальных (90°) и угловых (45°) датчиков, приведены на рис. 3 (см. также цв. вкл.).

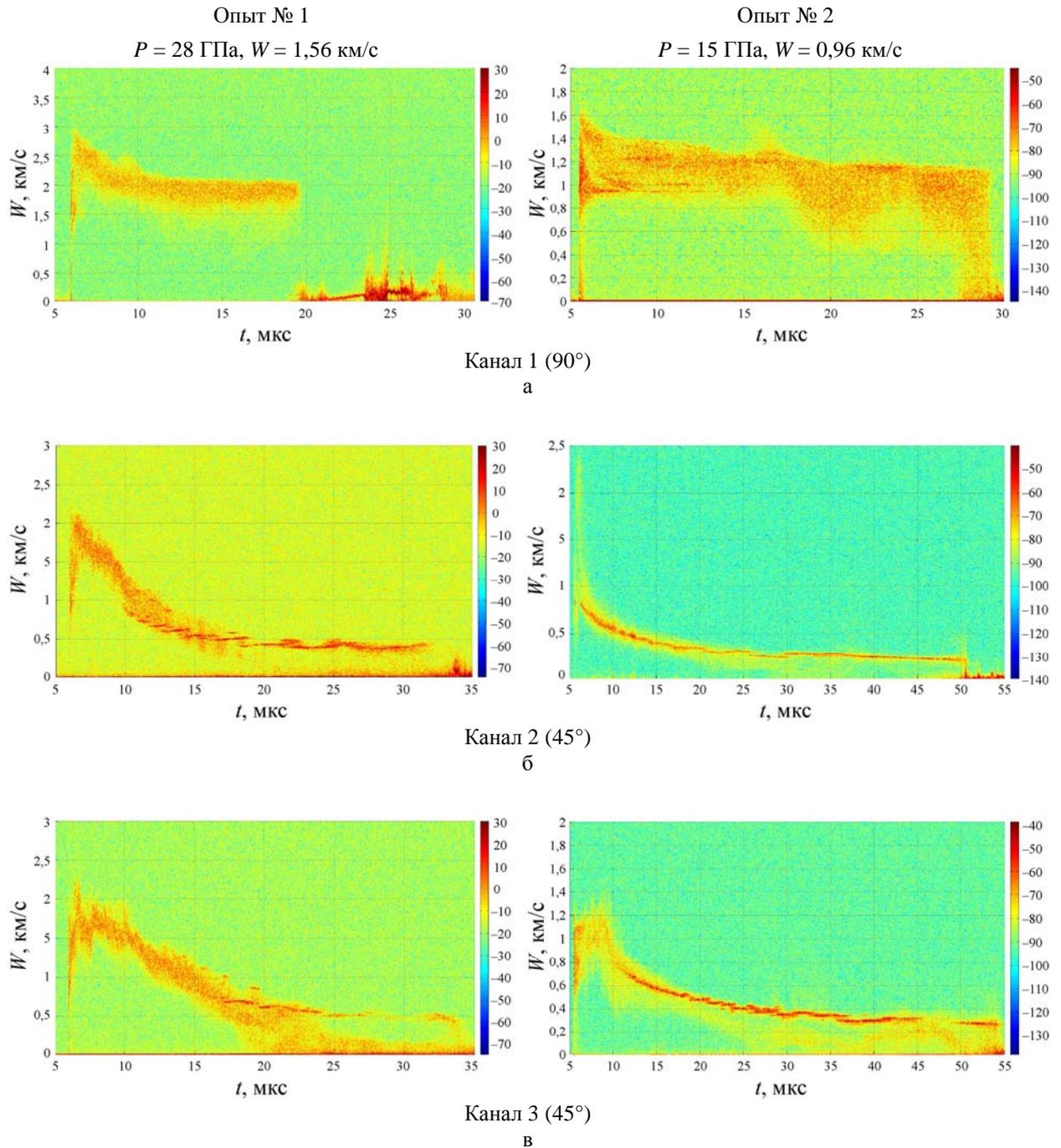


Рис. 3. Экспериментальные спектрограммы

Максимальная скорость пыли в опыте № 1 составила $W_{\max} = 3,0$ км/с, в опыте № 2 – $W_{\max} = 1,7$ км/с, далее зарегистрировано торможение частиц в среде воздуха. По датчикам углового обзора (45°) в опыте № 1 скорость пыли достигает $W_{\max}^{\text{угл}} = 2,15$ км/с, что в пересчете на нормальную составляющую дает $W_{\max} = 3,0$ км/с; в опыте № 2 аналогично $W_{\max}^{\text{угл}} = 1,3$ км/с и $W_{\max} = 1,8$ км/с. (Далее по тексту для угловых датчиков приводится лишь нормальная составляющая скорости.) С учетом того, что угловые датчики регистрируют скорость в разных точках, ее максимальные значения хорошо коррелируют с данными датчиков нормального обзора. В опыте № 1 фронтальный датчик просвечивает пылевое облако частиц, имеющих скорости от 3,0 до 1,7 км/с. С помощью угловой регистрации получены скорости для всего слоя пыли от 3,0 до 0,7 км/с. Таким образом, угловой датчик регистрирует скорость частиц по всей глубине пылевого облака. Кроме того, в области скоростей 0,56–1,05 км/с регистрируется семь записей скорости пролетающих мимо него жидких откольных слоев. Аналогично для опыта № 2 сначала регистрируется скорость пылевых частиц, а затем – скорость откольных слоев. Таким образом, датчики углового обзора позволяют определить скорость частиц и откольных слоев по всей глубине пылевого облака и откольно раздробленного материала.

В эксперименте № 3 с медными образцами получены три разные записи (рис. 4, см. также цв. вкл.). На спектрограмме, соответствующей точке зондирования на вершине пирамидки (рис. 4,а), зарегистрированы скорости полета более десяти откольных слоев. После выхода ударной волны на свободную поверхность происходит множественный откол образца и последующее дробление откольных слоев на фрагменты за счет действия растягивающих тангенциальных напряжений. Тангенциальное движение в четырех направлениях от вершины пирамиды возникает при выходе ударной волны и развороте свободной поверхности, которая в дальнейшем движется под небольшим углом к нормали. Это приводит к поперечному дроблению откольных слоев и позволяет методу «видеть» распределенную по времени картину скорости полета ряда откольных фрагментов (см. рис. 4,а). Таким образом, благодаря тангенциальному движению слоев от вершины пирамид к периферии для лазерного луча последовательно открываются все более глубокие откольные слои для регистрации. В случае отсутствия крупномасштабных возмущений лазерный метод обычно регистрирует скорость лишь первого откольного слоя. Зарегистрированные на спектрограмме скорости откольных слоев изменяются от $\approx 1,7$ км/с в начале записи до $\approx 0,2$ км/с в конце, т. е. различные откольные слои в течении 14 мкс (времени регистрации) пролетают от 2,8 мм до 23 мм. В случае, когда в апертуру луча попадают фрагменты из двух и более откольных слоев, метод регистрирует их скорости одновременно.

Для перекрестия (рис. 4,б) зарегистрирована такая же скорость свободной поверхности образца, как и для вершины (1,7 км/с). При выходе ударной волны на свободную границу зарегистрирована слабая запись скорости пылевого облака в виде пика с максимальной скоростью частиц $\approx 3,5$ км/с и последующим торможением частиц в газе.

На спектрограмме, полученной для области впадины между двумя пирамидками (рис. 4,в), зарегистрированы пыление и спектр скоростей выброшенных частиц. Максимальная скорость частиц при выходе ударной волны достигает $\approx 3,5$ км/с. Скорость свободной поверхности составляет $\approx 1,8$ км/с. Размер частиц с учетом закона их торможения на воздухе составляет 5 мкм и менее, метод оценки размеров частиц описан в работе [3].

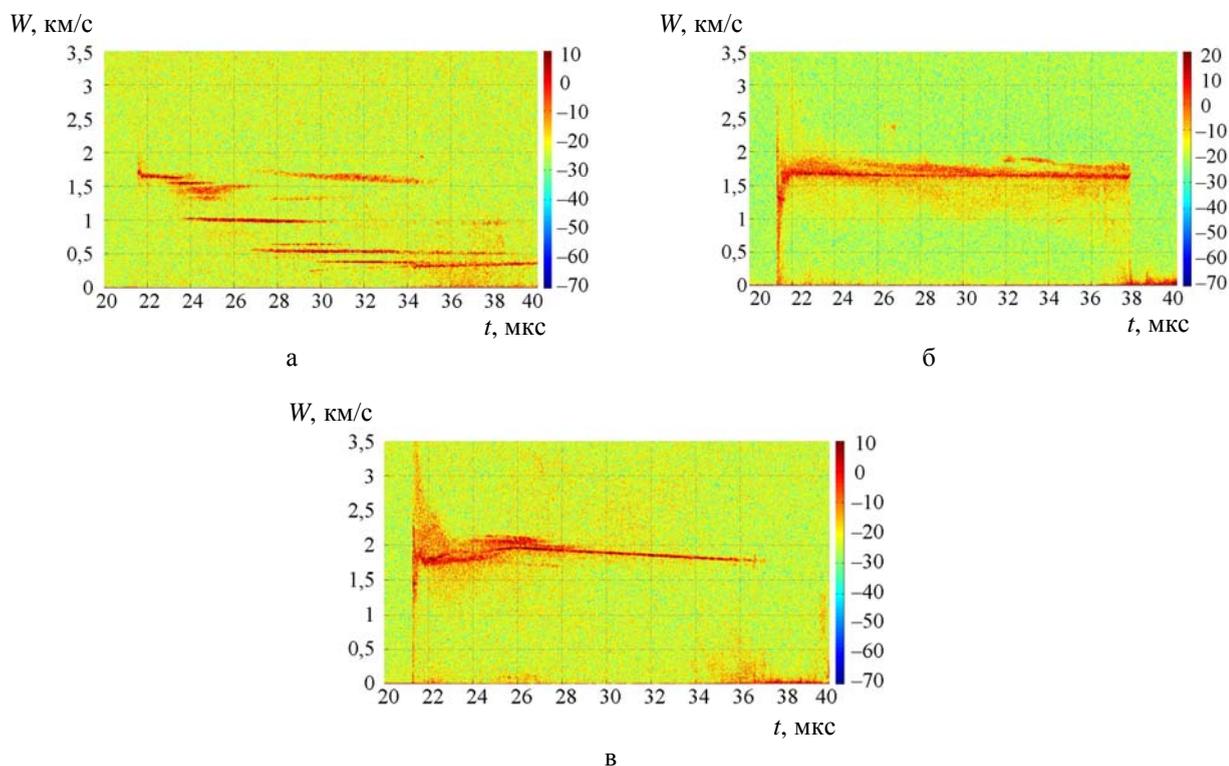


Рис. 4. Спектрограммы опыта с медными образцами по точкам зондирования:
 а – вершина, б – перекрестие, в – впадина

Заключение

Продемонстрирована возможность регистрации внутренней структуры пылевых облаков и откольного дробления металлов двумя способами. Проведены эксперименты по регистрации методом PDV дисперсии скорости потока частиц, выброшенного с поверхности, в твердом и жидком состояниях. На свинцовых и медных образцах показана возможность регистрации скорости облака частиц по всей глубине, а также внутренней структуры материала при откольном разрушении.

Список литературы

1. Holtkamp D. B., Clark D. A., Ferm E. N., Gallegos R. A. // Proc. Shock Compression in Condensed Matter-2003. P. 477–480.
2. Strand O. T., Goosman D. R., Martinez C., Whitworth T. L. // Rev. Sci. Instrum. 2006. Vol. 77. P. 083108-1–083108-8.
3. Фёдоров А. В., Михайлов А. Л., Финюшин С. А. и др. // Сб. докл. «XV Харитоновские чтения». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. С. 274.

Registration of Multiple Spalls and Structures of Ejected Particles Clouds

A. V. Fedorov, A. L. Mikhailov, S. A. Finyushin, D. A. Kalashnikov,
E. A. Chudakov, E. I. Butusov, I. S. Gnutov

The experimental results of study of spall destruction and particle ejection from the surface of copper and lead samples are presented. The velocity of a cloud of particles and the multiple spall parameters are recorded using laser interferometry method; the velocity dispersion of a cloud of particles along the full depth and the structure of spall destruction in metals are recorded with the angular sensors.