

Обмен опытом

УДК 620.18, 53.08

«МЕТОД ФОТОГРАФИИ» КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРАГМЕНТАЦИИ

Статья поступила 9 августа 2016 г.

Поиск статистических закономерностей фрагментации — значимая фундаментальная и прикладная задача. Явление фрагментации, представляющее собой разделение твердого тела на части в результате воздействия квазистатической нагрузки, удара или взрыва, наблюдается как в природных объектах, так и инженерных системах. Естественно, диапазон пространственных и временных масштабов широк. Понимание процесса разрушения должно привести к созданию новых материалов, которые могли бы выдерживать такие условия нагружения, при которых поглощение энергии сопровождается выраженными процессами фрагментации, описываемыми определенными статистическими законами [1 – 6].

Основной инструмент исследования статистических закономерностей фрагментации — определение распределения фрагментов по размерам (массам). Цель работы — разработка метода исследования рас-

пределения фрагментов по размерам с учетом экспериментальных данных [7 – 9].

Трубчатый образец 1 с коаксиальным проводником 2 устанавливали вертикально в центре цилиндрической взрывной камеры 3 (рис. 1). Изменение импульса ударно-волнового нагружения обеспечивали переменной величиной энергии на конденсаторной батарее 9. Поскольку высоту трубки варьировали, использовали параметр удельной энергии нагружения [7 – 9]

$$w = \frac{W_C - Q_w}{m_0}, \quad (1)$$

где W_C и Q_w — энергия, запасенная на конденсаторной батарее и расходуемая на испарение медного проводника, установленного вдоль оси керамической трубки (так, на испарение 15 мм медного проводника диамет-

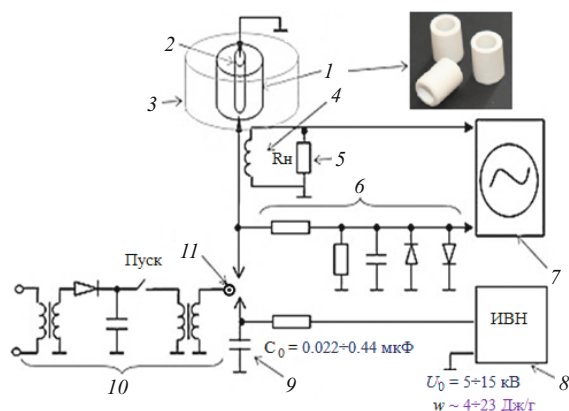


Рис. 1. Схема экспериментальной установки электрического взрыва проводника в жидкости: 1 — трубчатый образец; 2 — проводник; 3 — взрывная камера; 4, 5 — пояс Роговского и нагрузка; 6 — делитель напряжения; 7 — 2-канальный осциллограф; 8 — источник высокого напряжения; 9 — система конденсаторов; 10, 11 — схема системы поджига разряда на проводник [7–9]

ром 0,1 мм расходует 6,5 Дж); m_0 — начальная масса керамической трубки.

В результате разряда на проводник в жидкость (дистиллированная вода) распространялась ударная волна, растягивающая трубчатый образец в радиальном направлении.

Поскольку традиционный «метод взвешивания» достаточно трудоемкий и требует затрат времени [6], а возможности определения массы мелких фрагментов ограничены точностью электронных весов (0,0001 г для модели HR-202i), использовали альтернативную методику — так называемый «метод фотографии», который заключался в следующем. Фрагменты раскладывали на черной подложке и снимали на фотокамеру CANON 7D, 16.1 Mpix. Затем полученные цифровые фотографии обрабатывали на компьютере с помощью оригинальной программы, написанной в математическом пакете Matlab. При этом разрешение фотографии (например, 245 пикселей на квадратный сантиметр) позволяло преобразовывать площадь даже самых маленьких фрагментов образца (0,0018 мм²) в массу (~10⁻⁷ г).

Площадь объекта вычисляли по методу «порогов на изображении» (the image thresholding method) [10]. Для этого фотографию сначала конвертировали в формат монохромного изображения, в котором черный цвет — фон подложки (нули в программном коде), белый — фрагменты (единицы в программном коде). Далее определяли границы, площадь и количество фрагментов.

Фрагменты образца разбивали на две группы (рис. 2). Первая (I) включала фрагменты, имеющие форму прямоугольного параллелепипеда (крупные фрагменты, условно называемые 2D-фрагментами), ширина d^* одной из граней которого соответствовала толщине трубчатого образца d . Объем такого фрагмента — произведение его площади на фотогафии на вы-

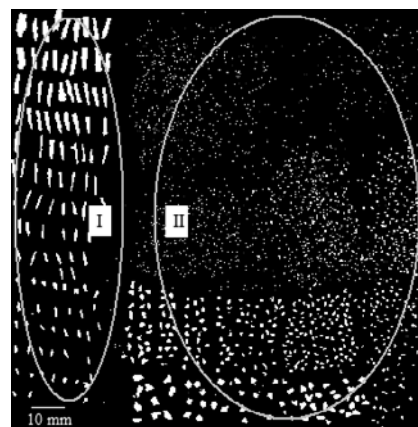


Рис. 2. Обработанное в компьютерной программе цифровое изображение фрагментов образца: I и II — фрагменты прямоугольной и неправильной геометрической форм

соту (толщину образца), и, следовательно, массу m^* 2D-объекта можно определить из выражения

$$m^* = S \rho, \quad (2)$$

где

$$S = \frac{S_{out} + S_{in}}{2} \quad (3)$$

находили как среднеарифметическое по двум фотографиям из-за кривизны фрагмента (S_{out} и S_{in} — площади поверхностей 2D-фрагмента, соответствующие внешней и внутренней сторонам трубчатого образца); ρ — плотность материала образца (в нашем случае ~2600 кг/м³).

Вторая группа (II) состояла из фрагментов неправильной (осколочной) формы (мелкие, так называемые 3D-фрагменты). Для них ввели специальный безразмерный параметр — фактор формы α .

Определение массы объекта с помощью фактора формы основывается на подобии форм крупных и мелких фрагментов [11]. В нашем случае крупные (I) и мелкие (II) фрагменты не подобны, поэтому для оценки фактора формы α использовали следующее выражение:

$$\alpha_{(II)} = \frac{\langle m_{d^* < d} \rangle}{\rho \langle S_{d^* < d}^{3/2} \rangle}, \quad (4)$$

где

$$\langle m_{d^* < d} \rangle = \frac{m_{frag} - m_{d^* = d}}{N_{d^* < d}} \quad (5)$$

средняя масса 3D-фрагментов (m_{frag} и $m_{d^* = d}$ — массы всех образовавшихся фрагментов и «двумерных» фрагментов образца, полученные взвешиванием на электронных весах; $N_{d^* < d}$ — число 3D-фрагментов, полученное в результате обработки данных цифровой фотографии); $\langle S_{d^* < d}^{3/2} \rangle$ — среднее значение объема 3D-фрагмента ($S_{d^* < d}$ — площадь, вычисленная по фотографии).

Далее с помощью компьютерной обработки данных находили количество фрагментов одинаковой

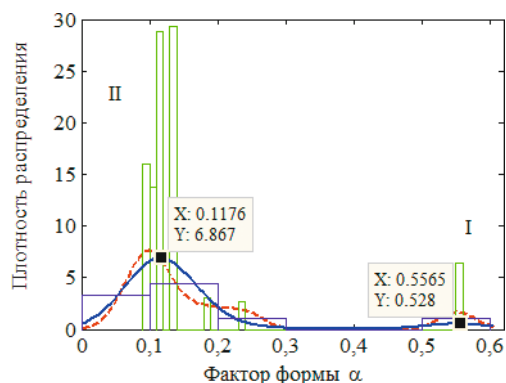


Рис. 3. Функция плотности распределения фактора формы α для фрагментов I и II

площади. Затем фрагменты сортировали по убыванию площади.

Для фрагментов II фактор формы α не зависел от удельной энергии и составлял

$$\alpha_{(II)} = 0,14 \pm 0,04. \quad (6)$$

Фактор формы определяли также в результате сортировки фрагментов по ситам. При этом α для каждого сита находили отдельно. Формула (4) после соответствующей замены на средние массу и объем фрагмента, рассчитанные по данным одного сита, имела вид

$$\alpha_{\text{сито}} = \frac{\langle m_{d^* < d} \rangle_{\text{сито}}}{\rho \langle S_{d^* < d}^{3/2} \rangle_{\text{сито}}}.$$

На рис. 3 приведена функция плотности распределения фактора формы α для фрагментов I и II двух образцов (сплошная и пунктирная кривые). Кривые имеют два характерных максимума. Первый (наибольший) соответствует значению α для 3D-фрагментов [выражение (6)], второй — фактору формы для 2D-фрагментов. В случае определения массы крупных фрагментов с использованием параметра α (~0,55, см. рис. 3) отклонение от истинного значения составило бы более 20 %, поэтому массу 2D-фрагментов оценивали по формуле (2).

Таким образом, масса 3D-фрагментов

$$m^* = \alpha_{(II)} S_{d^* < d}^{3/2} \rho. \quad (7)$$

На рис. 4 приведены результаты обработки данных эксперимента (распределение фрагментов по массе для одного образца в логарифмических координатах), полученные методами «взвешивания» и «фотографии». Цифрами I и II отмечены области распределения 2D- и 3D-фрагментов. По оси ординат указано количество фрагментов массой больше некоторого заданного значения, по оси абсцисс — масса фрагмента. Расхождение не превышало 5 % (область II).

Таким образом, результаты проведенных исследований по определению массы фрагментов традиционным способом («метод взвешивания») и методом об-

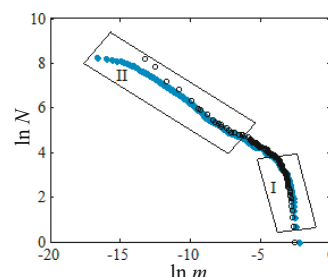


Рис. 4. Распределения фрагментов по массе, полученные методами «взвешивания» (○) и «фотографии» (●)

работки цифровой фотографии («метод фотографии») показали хорошее совпадение. Зафиксировано небольшое (около 5 %) расхождение в диапазоне $10^{-6} - 10^{-8}$ г при описании статистических закономерностей мелких фрагментов. Предложенный метод определения массы фрагментов, основанный на численной обработке их цифрового изображения, позволяет значительно сократить время и повысить качество статистического анализа фрагментации.

Автор выражает признательность М. М. Давыдовой, сотруднику лаборатории физических основ прочности ИМСС УрО РАН, за помощь в проведении анализа статистики фрагментации. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-01-96012 p_урал_a, 14-01-96015 p_урал_a, 14-01-00842 A).

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. Grady D., Kipp M. Geometric statistics and dynamic fragmentation / J. Appl. Phys. 1985. Vol. 58. N 3. P. 1210 – 1222.
2. Meibom A., Balslev I. Composite power laws in shock fragmentation / Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 76. N 14. P. 2492 – 2494.
3. Sil'vestrov V. V. Application Gilvarry distribution to describe the statistics the solid fragmentation under dynamic loading / Phiz. Gor. Vzryva. 2004. Vol. 40. N 2. P. 111 – 124 [in Russian].
4. Grady D. Length scales and size distributions in dynamic fragmentation / Int. J. Fracture. 2010. Vol. 163. N (1 – 2). P. 85 – 99.
5. Katsuragi H., Ihara S., Honjo H. Explosive fragmentation of a thin ceramic tube using pulsed power / Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. P. 095503(1 – 4).
6. Davydova M., Uvarov S. Fractal statistics of brittle fragmentation / Fract. Struct. Integr. 2013. Vol. 24. P. 60 – 68.
7. Bannikova I., Uvarov S., Davydova M., Naimark O. Study of ceramic tube fragmentation under shock wave loading / Proc. Mater. Sci. 2014. Vol. 3. P. 592 – 597.
8. Bannikova I., Uvarov S., Naimark O. Analysis of fragmentation statistics of alumina tubular specimens / AIP Conf. Proc. 2014. Vol. 1623. P. 59 – 62.
9. Bannikova I. A., Uvarov S. V., Naimark O. B. Experimental research of self-regularities of ceramics fracture under shock wave loading / PNRPU Mekh. Byull. 2015. N 3. P. 25 – 37 [in Russian].
10. Uvarov S. V., Naimark O. B. Experimental research of self-regularities of ceramics fracture under shock wave loading / PNRPU Mekh. Byull. 2015. N 3. P. 25 – 37.
11. Haralick R. M., Shapiro L. G. Computer and Robot Vision. Vol. 1. — Addison-Wesley, 1992. P. 28 – 48.
12. Brodskii R., Konevskiy P., Safronov R. Size distribution of sapphire fragments in shock fragmentation / Funct. Mater. 2011. Vol. 18. N 2. P. 200 – 205.

© И. А. Баникова
Институт механики сплошных сред УрО РАН,
г. Пермь, Россия; e-mail: malgacheva@icmm.ru