

## О ВЫБРОСЕ ЧАСТИЦ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫХОДЕ НА НЕЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И МЕТОДАХ ДИАГНОСТИКИ ЭТИХ ЧАСТИЦ

В. А. Огородников, А. Г. Иванов, А. Л. Михайлов, Н. И. Крюков,  
А. П. Толочко, В. А. Голубев

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

Представлены результаты экспериментальных исследований выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженных металлических образцов плоской и цилиндрической геометрии. Проанализированы возможности существующих методов диагностики рассматриваемого явления.

В литературе достаточно подробно рассмотрен вопрос о поведении скорости свободной поверхности (СП) вещества при выходе на нее ударной волны различной интенсивности [1]. В ряде работ исследовалась дисперсия скорости СП [2]. Это явление заключается в том, что при динамической деформации материалов вблизи поверхности ее соседние участки в пределах нескольких зерен могут двигаться с различными скоростями (микротоками) из-за проскальзывания друг относительно друга. В результате в материале образуются поры, трещины и т. п. При этом несколько в стороне остались вопросы, связанные с выбросом частиц с СП при выходе на нее ударной волны. Вместе с тем исследование этого явления представляет большой практический интерес как один из возможных механизмов диспергирования конструкционных материалов при ударно-волновом нагружении.

Выброс частиц со свободной поверхности образцов при выходе на нее ударной волны еще в 50-е годы был обнаружен и исследован сотрудниками ВНИИЭФ С. Б. Кормером, Ф. В. Григорьевым, А. П. Толочко, В. А. Голубевым и др. Однако полученные результаты не публиковались в открытой печати. Исследования были проведены на образцах плоской геометрии, выполненных из различных металлов. Образцы нагружались ударом пластины до давления  $\approx 70$  ГПа. В опытах использовали фотохронографическую методику регистрации и метод импульсной рентгенографии. В первом случае перед летящей в воздухе пластиной формируется ударная волна, свечение воздуха в которой регистрировалось фотохронографом

через прозрачную мишень (отсечку). В ряде случаев перед этим свечением регистрировали свечение, которое оказывалось существенно неоднородным и более слабым, что связывали с наличием частиц, выброшенных с поверхности образца. Во втором случае частицы металла впереди СП образца определяли по плотности почернения рентгеновской пленки с известной характеристической кривой.

Было показано, что выброс мелких частиц металла с СП определяется не примесями в образцах или способом их изготовления (литье, прессование, термообработка), а неоднородностью структуры образцов, связанной с шероховатостью или чистотой обработки их поверхности, и имеет микрокумулятивный характер. Из микронеровностей, связанных с рельефом СП после обработки, выбрасываются кумулятивные струи, которые затем распадаются под воздействием градиента скорости вдоль оси. Для изучения влияния чистоты обработки СП на выброс частиц поверхность образца разбивали на несколько участков. Каждый из них соответствовал определенному классу чи-

Таблица 1

| Класс чистоты | $R_z$ , мкм | $L$ , мм | Класс чистоты | $R_z$ , мкм | $L$ , мм |
|---------------|-------------|----------|---------------|-------------|----------|
| ∇1            | 320         | 8,0      | ∇6            | 10,0        | 0,80     |
| ∇2            | 160         | 8,0      | ∇7            | 6,3         | 0,80     |
| ∇3            | 80          | 8,0      | ∇8            | 3,2         | 0,80     |
| ∇4            | 40          | 2,5      | ∇9            | 1,6         | 0,25     |
| ∇5            | 20          | 2,5      | ∇10           | 0,8         | 0,25     |

Таблица 2

| Материал образца | Класс чистоты | $x$ , мм | $u_{СП}$ , км/с | $u$ , км/с | $u/u_{СП}$ |
|------------------|---------------|----------|-----------------|------------|------------|
| Al               | ∇7            | 19,8     | 5,65            | 6,63       | 1,17       |
|                  | ∇5            | 19,8     | 5,65            | 6,63       | 1,17       |
|                  | ∇3            | 19,8     | 5,65            | 8,39       | 1,49       |
| Cu               | ∇7            | 21,1     | 3,68            | 4,64       | 1,26       |
|                  | ∇5            | 20,1     | 3,68            | 5,10       | 1,38       |
|                  | ∇3            | 20,1     | 3,68            | 5,48       | 1,49       |
|                  | ∇1            | 19,0     | 2,70            | 4,80       | 1,80       |
| Fe               | ∇7            | 19,8     | 3,88            | 4,54       | 1,17       |
|                  | ∇5            | 19,8     | 3,88            | 4,80       | 1,24       |
|                  | ∇3            | 19,8     | 3,88            | 5,08       | 1,31       |
| Pb               | ∇7            | 19,9     | 3,90            | 4,62       | 1,18       |
|                  | ∇5            | 19,9     | 3,90            | 5,32       | 1,36       |
|                  | ∇3            | 19,9     | 3,90            | 5,97       | 1,53       |

стоты. За меру чистоты поверхности согласно ГОСТ 2789-59 принята высота неровностей  $R_z$ , определяемая как среднее расстояние между пятью высшими точками выступов и пятью низшими точками впадин, находящимися в пределах длины  $L$ . В табл. 1 приведены значения параметров, характеризующих шероховатость поверхности для интересующих нас классов чистоты СП.

Результаты опытов по нагружению образцов из стали, алюминия, меди и свинца, имеющих чистоту обработки ∇3... ∇7, ударной волной с давлением на фронте  $\approx 70$  ГПа свидетельствуют о примерно линейной зависимости количества выбрасываемого металла, определенного рентгенографическим методом, от шероховатости поверхности и плотности материала образца:

$$m = kR_z\rho,$$

где  $m$  — удельная масса выбрасываемого металла, мг/см<sup>2</sup>;  $R_z$  — высота гребешков, мкм;  $\rho$  — плотность металла, г/см<sup>3</sup>;  $0,1 \leq k \leq 0,5$  в зависимости от материала образца. Анализ полученных результатов для различных материалов показал, что выбрасываемый с поверхности объем металла практически одинаков. Это говорит в пользу микрокумулятивного механизма выброса частиц металла. Из анализа результатов фотометрирования рентгеноснимков следует, что плотность выброшенного металла убывает в направлении от СП к переднему фронту частиц.

Помимо выяснения механизма выброса мелких частиц с СП при выходе на нее удар-

ной волны представляют интерес и другие вопросы: какую скорость имеют эти частицы, насколько они опережают СП образца, каков их размер и как эти параметры частиц зависят от величины  $R_z$ .

Поскольку в экспериментах с использованием фотохронографической и рентгенографической методик регистрации измерялся путь, пройденный СП образца и передним фронтом частиц, то, зная, например, момент рентгенографирования и время выхода ударной волны на СП, можно определить абсолютные скорости СП ( $u_{СП}$ ), частиц ( $u$ ) и относительную скорость частиц ( $u/u_{СП}$ ). Величина пути, пройденного СП, в опытах составляла  $x \approx 20$  мм.

В табл. 2 приведены экспериментальные значения скорости частиц для различных материалов в зависимости от чистоты обработки СП. Из табл. 2 следует, что с уменьшением шероховатости СП относительная скорость частиц уменьшается для всех исследованных металлов.

Размер частиц оценивали, основываясь на экспериментальном исследовании их торможения в сжатом воздухе. В этом случае движение частиц определяется в основном аэродинамическим сопротивлением [3]. Уравнение движения частицы металла, рассматриваемой как несжимаемый шар радиусом  $R$ , в первом приближении имеет вид

$$m \frac{du}{dt} = -k\pi R^2 \rho_g u^2,$$

откуда следует  $t = \frac{e^{ax} - 1}{au_0}$ , где  $t$ ,  $x$  — вре-

мя и путь, пройденный частицей;  $u$ ,  $u_0$  — текущая и начальная скорости частицы;  $a = (3/8)(\rho_g/\rho_m R)$ ;  $\rho_g$ ,  $\rho_m$  — плотность газа и материалы частицы;  $k = 0,5$ . Размер частиц находится по двум точкам осредненной траектории их движения из выражения

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{e^{ax_1} - 1}{e^{ax_2} - 1}.$$

Необходимый участок траектории движения частиц регистрировали фотохронографическим методом с использованием прозрачной мишени, расположенной под углом к СП образца. В опытах с медными образцами установлено, что основная масса частиц, выбрасываемых с СП, класс чистоты которых  $\nabla 4$  и  $\nabla 6$ , характеризуется размерами  $R = (30 \pm 15)$  и  $(15 \pm 10)$  мкм. Следовательно, размер частиц примерно соответствует высоте микрорельефа поверхности ( $R \simeq R_z$ ). Ясно, что полученные оценки являются приближенными, поскольку основаны на ряде упрощающих предположений, например о равенстве начальных скоростей частиц, их размеров, и требуют уточнения. В этом плане перспективны результаты исследований [4], проводимых с использованием голографической диагностики, разрешающая способность которой оценивается в 1 мкм.

Следует отметить, что анализируемые выше результаты по определению массы выбрасываемых с СП частиц металла и их относительных скоростей, также носят сугубо оценочный характер. Это связано с постановкой опытов (малые площади исследуемых участков СП, нагружаемые образцы имели форму диска диаметром 90 мм) и с разрешающей способностью метода (чувствительность рентгеновских пленок, жесткость рентгеновского излучения и т. п.). Не случайно, что получены результаты для СП образцов с достаточно большой шероховатостью ( $R_z \geq 6$  мкм). При меньших значениях  $R_z$  разрешающая способность используемых методик, по-видимому, уже недостаточна для исследования рассматриваемого явления и ряда других. К таковым можно отнести, например, локальный выброс частиц с СП образцов из областей с наличием макроскопических дефектов или конструктивных элементов, что также является одним из возможных механизмов диспергирования ударно-нагруженных конструкционных материалов.

Продолжая дальнейшее исследование этих явлений авторы данной работы использовали в опытах цилиндрическую модель экспериментальной сборки, подробно описанную в [5]. Ис-

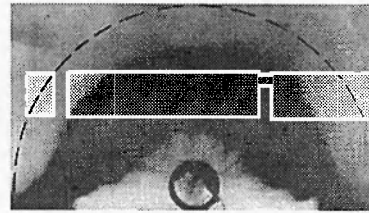


Рис. 1. Рентгеновский снимок в опыте с оболочкой из свинца, демонстрирующий взаимодействие потока частиц с цилиндрической оболочкой из стали

следовали образцы в виде полуцилиндрической оболочки с наружным радиусом 95,5 мм, толщиной стенки  $\approx 3$  мм и длиной 100 мм. Это позволило на порядок увеличить площадь исследуемой поверхности образца и уменьшить степень влияния разгрузки на результаты.

На рис. 1 приведен рентгеновский снимок, иллюстрирующий выброс частиц с СП свинцовой оболочки, имеющей чистоту обработки  $\nabla 5$  ( $R_z = 20$  мкм), при ее схождении в момент рентгенографирования к радиусу  $0,2R_{ВВ}$ , где  $R_{ВВ} = 150$  мм — наружный радиус ВВ. (Далее этот опыт называем опытом I.) Штриховой линией отмечено начальное положение СП оболочки. На оси полуцилиндрического заряда была установлена цилиндрическая стальная оболочка с наружным радиусом 13 мм и толщиной стенки 2,5 мм. Видно, что частицы металла заметно опережают СП свинцовой оболочки, взаимодействуют со стальной оболочкой и вызывают в ней достаточно сложные откольные явления. Оценки показывают, что в этом случае относительная скорость потока частиц  $u/u_{СП} \geq 1,5$ , а их удельная масса  $\approx 0,03$  г/см<sup>2</sup>. На рис. 2, 3 приведены рентгеновские снимки, иллюстрирующие выброс частиц с СП оболочек из меди ( $\nabla 5$ ,  $R_z = 20$  мкм) и свинца ( $\nabla 5$ ,  $R_z = 20$  мкм) при их смещении соответствен-

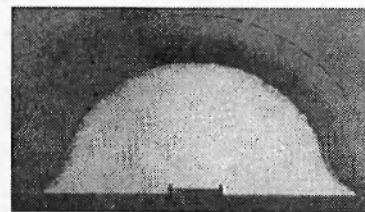


Рис. 2. Рентгеновский снимок в опыте с оболочкой из меди, полученный при смещении ее СП от начального положения на 25 мм

Т а б л и ц а 3

| Материал<br>образца | Шероховатость<br>поверхности | Геометрия образца  |                   |                    |                   |
|---------------------|------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
|                     |                              | плоская            |                   | цилиндрическая     |                   |
|                     |                              | $m, \text{г/см}^2$ | $u/u_{\text{СП}}$ | $m, \text{г/см}^2$ | $u/u_{\text{СП}}$ |
| Pb                  | ▽5                           | 0,023              | 1,36              | 0,015              | 1,18              |
| Cu                  | ▽5                           | 0,018              | 1,38              | 0,016              | 1,20              |

но на 25 и 33 мм от начального положения (опыты II, III). Эти смещения близки к пути, пройденному СП пластин в рассмотренных выше ранних исследованиях. В табл. 3 приведены удельные массы частиц и их относительные скорости для полученных ранее образцов плоской геометрии и для цилиндрических образцов. Из таблицы следует, что результаты, полученные на образцах из меди и свинца плоской и цилиндрической геометрии, не противоречат друг другу. Меньшие значения относительных скоростей частиц и их удельных масс в цилиндрических образцах можно объяснить меньшим давлением на фронте ударной волны при выходе на СП ( $p \approx 60$  ГПа) по сравнению с давлением в плоских образцах ( $p \approx 70$  ГПа). Хотя могут быть и другие причины, связанные, например, с изменением условий рентгенографирования.

Этим же можно объяснить, в частности, различие в оценках удельных масс частиц и их относительных скоростей в опытах I, III со свинцовыми оболочками (см. рис. 1, 3). Так, в опыте I  $m = 0,03 \text{ г/см}^2$  и  $u/u_{\text{СП}} \approx 1,5$ , а в опыте III  $m \approx 0,02 \text{ г/см}^2$  и  $u/u_{\text{СП}} \approx 1,2$ . Это связано с тем, что в опыте I использовано более мягкое рентгеновское излучение, чем в опытах II, III, позволившее зарегистрировать высокоскоростную, менее плотную часть потока частиц.

В тех случаях, когда разрешающая способ-

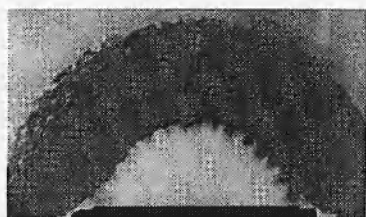


Рис. 3. Рентгеновский снимок в опыте с оболочкой из свинца, полученный при смещении ее СП от начального положения на 33 мм

ность рентгенографического метода недостаточна для регистрации выбрасываемого потока частиц металла, на некотором расстоянии от СП исследуемой оболочки располагали тонкую индикаторную оболочку из свинца с толщиной стенки 0,4 мм (фольга Асея в [4]). Индикаторная оболочка воспринимает импульс потока частиц металла, и по скорости ее смещения, используя законы сохранения для потока частиц, взаимодействующих с фольгой, можно определить массу и плотность потока частиц

$$m = \frac{\rho_{\text{ф}} \delta_{\text{ф}} S_{\text{ф}} u_{\text{ф}}}{u - u_{\text{ф}}}, \quad \rho = \frac{2\rho_{\text{ф}} \delta_{\text{ф}} u_{\text{ф}}}{u^2 t_g},$$

где  $\rho_{\text{ф}}$ ,  $\delta_{\text{ф}}$ ,  $S_{\text{ф}}$  — плотность, толщина и площадь индикаторной оболочки (фольги), подверженной воздействию потока частиц;  $u_{\text{ф}}$  — скорость фольги;  $t_g$  — время действия потока частиц. Величины  $u$ ,  $u_{\text{ф}}$  и  $t_g$  определяются с помощью фотохронографической методики, а  $S_{\text{ф}}$  — с помощью рентгенографической методики регистрации. В качестве иллюстрации на рис. 4 приведены рентгеновский снимок и фотохронограмма выброса частиц из области расположения конструктивного элемента в медной оболочке. Последний выполнен в виде пробки из вольфрама диаметром 10 мм. Как следует из рис. 4,а, при отсутствии индикаторной оболочки можно было бы сделать ошибочный вывод о скорости выбрасываемых частиц и их массе. Установка индикаторной оболочки позволяет получить информацию о наличии потока металлических частиц малой плотности; высокоскоростная часть потока не разрешается с помощью рентгенографической методики, но на снимке отчетливо видно его взаимодействие с индикаторной оболочкой на площади  $S_{\text{ф}}$  (см. рис. 4,а). Измерение величин  $S_{\text{ф}}$  по рентгенограмме (см. рис. 4,а) и  $u$ ,  $u_{\text{ф}}$ ,  $t_g$  по фотохронограмме (рис. 4,б) позволили оценить массу ( $m = 1,2 \text{ г}$ ) и плотность потока частиц ( $\rho = 0,2 \text{ г/см}^3$ ).

Из проведенного рассмотрения следует, что при выходе на свободную поверхность ме-

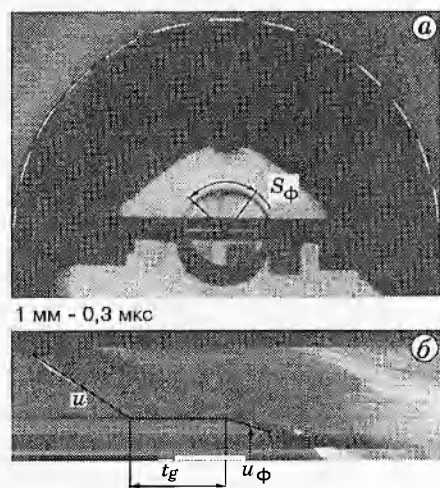


Рис. 4. Рентгеновский снимок (а) и фотохронограмма (б) опыта с оболочкой из меди при наличии в ней конструктивного элемента — пробки из вольфрама диаметром 10 мм, расположенной в полости оболочки:

$u$ ,  $u_\phi$  — скорости потока частиц и фольги;  $t_g$  — время действия потока;  $S_\phi$  — площадь фольги, подверженная воздействию потока частиц

галлического образца ударной волны интенсивностью  $\approx 60 \dots 70$  ГПа наблюдается выброс частиц размером  $1 \div 100$  мкм. Выброс носит микрокумулятивный характер и связан с шероховатостью или с наличием в образце дефектов и конструктивных элементов. Представляет интерес дальнейшее исследование этого

явления как одного из механизмов диспергирования ударно-нагруженных объектов с использованием усовершенствованных средств диагностики для получения более реалистичных количественных данных, в том числе в расширенном диапазоне давлений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1965.
2. Савенков Г. Г., Мещеряков Ю. И., Васильков В. Б., Чернышенко А. И. Колебания зерен и развитие турбулентного характера пластической деформации при высокоскоростном взаимодействии твердых тел // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 5. С. 97–102.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М.: Наука, 1954.
4. Dunning M., Jacoby V. Ejecta production from shocked metal samples // The Fourth Zababakhin Scientific Talks, Russian Federal Nuclear Center, October 16–20, 1995, Chelyabinsk Region, Russia: Abstr. Snezhinsk: All-Russian Research Institute of Technical Physics, 1995.
5. Иванов А. Г., Лавровский Ю. Д., Огородников В. А. Некоторые случаи развития детерминированных возмущений на сходящихся оболочках // ПМТФ. 1992. № 5. С. 116–118.

Поступила в редакцию 10/XI 1997 г.