

## МЕТАНИЕ ПЛОСКИХ ПОРИСТЫХ СЛОЕВ СКОЛЬЗЯЩЕЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ

Ю. А. Павлов, А. М. Ставер, А. А. Штерцер  
(Новосибирск)

В настоящее время опубликовано большое количество работ, посвященных исследованию прохождения, отражения и взаимодействия ударных волн в пористых средах [1—4]. В то же время, за исключением [5], практически отсутствуют работы, касающиеся проблемы метания взрывом пористых слоев конечной толщины. Между тем метание порошковых слоев взрывом применяют для нанесения покрытий [6]. В связи с этим, процесс метания пористых слоев требует такого же детального изучения, как и метание компактных пластин, применяющееся в сварке взрывом. В [5] экспериментально определялись скорости метания пластин различной пористости и набора фольг, разделенных зазорами. Во всех случаях замечена немонотонная зависимость скорости от пористости. Отметим недостаточно подробное в этой работе изложение методики измерения скорости метания.

### Методика эксперимента

Для сравнения результатов выбрана схема экспериментов, аналогичная описанной в [7], для метания металлических пластин. В опытах 1, 2, 6, 8 (см. таблицу) пористый слой металлы вверх, в остальных опытах — вниз. При метании вниз пористым слоем был порошок, свободно засыпанный в картонную коробку. В каждом опыте измеряли массы порошка и ВВ и вычисляли их плотности. В опытах по метанию слоев порошка вниз картонные коробки с порошком за счет собственного веса имели прогибы, которые учитывались при определении плотности порошка.

Нормальную скорость перемещения свободной поверхности пористого слоя  $v_1$  и максимальный угол поворота  $\beta$  этой границы измеряли с помощью СФР в покадровом режиме. Подсветку осуществляли импульсной лампой ИФП-1000-2А. В экспериментах использовали медный порошок ПМС-1 (ГОСТ 4960—75) и песок с фракцией зерен  $\leq 1$  мм. Начальная плотность пористого слоя в разных опытах составляла 1,95—2,31 г/см<sup>3</sup>

Номер опыта	$\delta_1$ , мм	$\delta_0$ , мм	$\rho$	$D$ , км/с	$\beta_1$ , град	$\beta_2$ , град
1	11,0—11,5	6,0—6,5	0,56±0,09	3,26	10,0	8,1
2	15,0—16,0	6,0—7,0	0,80±0,11	3,60	12,2	10,8
3	15,5—16,5	11,0—13,0	0,46±0,07	3,64	7,6	6,9
4	16,0—16,5	15,5—16,5	0,36±0,04	3,60	7,0	5,6
5	10,5—12,5	16,0—16,5	0,23±0,04	3,20	5,5	3,7
6	10,5—11,0	10,0—11,0	0,35±0,06	—	—	5,4
7	6,0—7,0	10,0—12,0	0,19±0,04	2,83	5,0	3,1
8	10,0—10,5	5,5—6,5	0,60±0,09	—	—	8,6
9	5,5—6,5	14,0—16,0	0,13±0,03	2,84	3,5	2,2
10	10,0	10,0—12,0	—	3,20	—	—
11	15,0	11,0—12,0	—	3,48	—	—
12	15,5—16,0	11,0—11,5	0,60±0,07	3,36	10,6	8,6
13	10,0—10,5	15,0—16,5	0,28±0,04	3,37	4,5	4,5
14	5,5—6,5	15,0—15,5	0,17±0,04	2,83	5,0	2,8
15	15,0—15,5	15,0—16,0	0,48±0,05	3,54	8,7	7,2

Примечание.  $\delta_1$  и  $\delta_0$ , измеренные в разных точках коробок, укладывались в указанные в таблице диапазоны. Для расчетов  $\rho$  и  $\rho_0$  брались средние значения  $\delta_1$  и  $\delta_0$ . Углы  $\beta_2$  вычислены по среднему значению  $\rho$ .

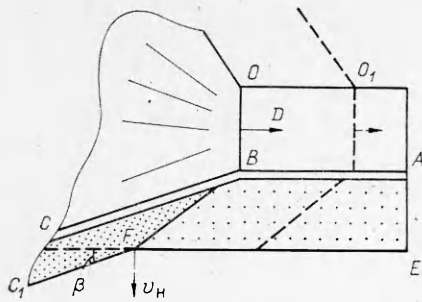


Рис. 1. Схема метания слоя порошка скользящей детонацией.  $ABC$  — граница контакта  $BB$  — медная пластина;  $EFC_1$  — свободная граница порошка;  $OB$  — фронт детонации;  $\beta$  — угол поворота свободной границы порошка;  $v_n$  — скорость метания, нормальная свободной границе порошка.

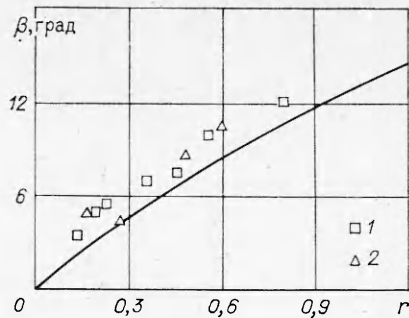


Рис. 2. Зависимость угла поворота пористого слоя от параметра  $r$  в экспериментах с медным порошком (1) и песком (2) (кривая — расчет по (1)).

для медного порошка и  $1,65\text{--}1,75\text{ г/см}^3$  для песка. По всем опытам вычисляли среднее значение начальной плотности  $\rho_0$  и среднеквадратичную ошибку, что составило  $\rho_0 = 2,13 \pm 0,03\text{ г/см}^3$  для медного порошка и  $\rho_0 = 1,70 \pm 0,02\text{ г/см}^3$  для песка. Песок и медь выбраны как материалы с сильно отличающимися физическими свойствами. В качестве ВВ использовали аммонит 6ЖВ. Во всех опытах плотность ВВ составляла  $0,85\text{--}1,08\text{ г/см}^3$ . Среднее значение плотности и среднеквадратичная ошибка  $\rho_1 = 0,93 \pm 0,02\text{ г/см}^3$ . Детонационная волна формировалась генератором линейной волны, изготовленным из пластикового ВВ толщиной  $1,5\text{ мм}$ . Между порошком и ВВ помещали медную пластину толщиной  $0,5\text{ мм}$ . Картонные коробки для порошка и ВВ имели толщину стенок  $0,5\text{ мм}$ .

Обработку результатов проводили при помощи увеличителя «Микрофот» типа 5 ПО-1. Параметры  $\beta_1$  и  $v_1$  измеряли, когда пористый слой уже разогнался, т. е. при перемещении свободной границы порошка на расстояние  $y \geq \delta_1$ , где  $\delta_1$  — толщина слоя ВВ. Получить высокую точность измерения угла  $\beta_1$  оказалось невозможным. Фактически измерение проводили в два приема. По первым кадрам, когда свободная поверхность метаемого слоя еще невозмущена, определяли начальный угол между свободной поверхностью и эталонной полосой из картона, на которой вырезали прямоугольные зубцы для определения масштаба изображения. Далее обрабатывали все кадры пленки, угол измеряли на каждом кадре по 5—6 раз. Изображение с помощью установки «Микрофот» переводили на лист бумаги так, что граница свободной поверхности обозначалась в виде ряда точек, по которым затем проводили линию. Так же строили линию, соответствующую эталонной полосе, от которой идет отсчет угла. Фактически эти две линии дают график, в котором ось абсцисс — эталонная полоса, а линия свободной поверхности отображает некоторую функцию  $y(x)$ . Это позволило вычислить в ряде точек кривой  $y(x)$  ее наклон, т. е. угол поворота свободной поверхности  $\beta$ . Поскольку при увеличении на «Микрофоте» края оптического изображения становятся расплывчатыми, то несколько измерений на одном кадре давали разброс значений угла  $\beta \approx \pm 0,5^\circ$ . Такой же разброс получался при измерениях начального угла свободной поверхности  $\beta_0$ , т. е. угла между эталонной полосой и свободной поверхностью порошка до взрыва. Из серии  $n$  измерений на

одном кадре бралась средняя величина  $\bar{\beta} = \sum_{i=1}^n (\beta_i - \beta_0)/n$ , а из средних

значений на всех кадрах определялся максимальный угол поворота  $\beta_1 = \max(\bar{\beta})$ . Указанный разброс значений  $\beta - \bar{\beta}_0$  в измерениях на всех пленках не превышал  $\pm 1^\circ$ . Отметим, что прогиб картонных коробок в опытах с метанием порошка вниз в такой процедуре измерения угла учитывался автоматически и не давал систематической ошибки.

Скорость детонации  $D$  вычисляли по перемещению  $OO_1$  (рис. 1) точки пересечения линии разлета ПД с линией свободной поверхности ВВ за известный промежуток времени. Вследствие значительной размытости этих линий абсолютная ошибка в измерении  $D$  была велика и составила  $\sim 15\%$ .

### Результаты экспериментов

Результаты экспериментов сведены в таблицу. В опытах 10, 11 без оптической регистрации для различных  $\delta_1$  электроконтактным методом с помощью частотомера ЧЗ-34А измеряли скорость детонации. Ошибка измерения не превышала 3%. Полученные скорости с точностью экспериментов совпадали со скоростями, определенными с помощью СФР-грамм в других опытах с такими же величинами  $\delta_1$ . Экспериментальные значения  $\beta_1$  сравнивали с вычисленными по формулам для компактных пластин, взятым из [7]:

$$\beta_2 = 0,83r/(r + 2,71); \quad (1)$$

$$r = m_1/(m_0 \cdot S_1/S_0 + m_2), \quad (2)$$

где  $m_1$ ,  $m_0$  — соответственно масса ВВ и порошка, засыпанных в коробки;  $m_2$  — масса медной пластины площадью  $S_1$ ;  $S_1$ ,  $S_0$  — соответственно площади коробок под ВВ и порошок. Формула (2) учитывает, что площадь заряда ВВ в опытах была меньше площади пористой массы. Такая постановка связана с необходимостью «отсечь» газообразные ПД, которые закрывали изображение объекта раньше времени.

Формула (1) показывает хорошее совпадение с экспериментами по метанию компактных металлических пластин в диапазоне  $r$ , который исследован в настоящей работе для пористых слоев. Это дает повод провести формальное сравнение углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . Отметим, что учет прогиба коробки с порошком приводит к уменьшению расчетного угла на  $\sim 0,1^\circ$ , что при указанной точности измерений несущественно.

На рис. 2 построена функция  $\beta_2(r)$  по формулам (1), (2) для компактных пластин, а также нанесены экспериментальные данные по метанию пористых слоев из меди и песка. Видно, что экспериментальные углы поворота  $\beta_1$  на  $1-2^\circ$  превышают значения углов, рассчитанных по формуле (1). Для проверки правильности определения углов также измерены  $v_1$ . Из рис. 1 видно, что имеет место соотношение

$$v_1 = D \operatorname{tg} \beta. \quad (3)$$

Измеренные значения  $v_1$  отличались не более чем на 30 м/с от рассчитанных по формуле (3) при подстановке в нее экспериментальных значений  $\beta_1$  и  $D$ . Величина  $v_1$  практически более удобна, чем  $v = 2D \sin(\beta/2)$ , так как легко может быть непосредственно измерена в экспериментах. Кроме того, в исследованном диапазоне  $r$  величина  $v_1$  превышает  $v$  лишь на 2%, что при имеющихся ошибках эксперимента несущественно.

### Обсуждение результатов

В опытах 1, 2 порошок метался вверх, коробки под порошок не были сверху ограничены картоном. На СФР-граммах этих опытов видно, что свободная граница летящего порошка четкая. Дальнейшие эксперименты на рентгеновской установке показали, что слой порошка после выхода ударной волны на свободную поверхность ведет себя как компактное тело. Это следует из параллельности свободной границы и границы контакта ВВ — порошок на рентгеновских снимках и означает, что увеличение скорости порошка в первой волне разгрузки пренебрежимо мало по сравнению с массовой скоростью за фритом ударной волны. В опытах 6, 8 на пути метаемого слоя медного порошка помещали шлифованную пластину из Ст. 3 толщиной 3 мм. При соударении порошка с пластиной на-

блюдаются течения, похожие на волнообразование, характерное для сварки взрывом. Этот факт также подтверждает, что пористый слой метается, как компактное тело.

На основании этих данных можно предложить следующий механизм разгона пористого слоя скользящей детонацией. Разгон состоит из двух этапов. На первом порошок приобретает скорость за фронтом ударной волны (УВ). Этап длится до момента времени, когда УВ выйдет на свободную поверхность порошка. На втором этапе разгона, поскольку порошок спрессован в УВ до состояния, близкого или равного компактному, метание происходит так же, как и в случае компактной пластины, т. е. за счет прохождения серии акустических волн. Если толщина слоя ВВ настолько мала, что к моменту выхода УВ на свободную поверхность давление в ПД становится незначительным, то второй этап разгона отсутствует.

Формальное сравнение эксперимента с расчетом по формуле (1) фактически означает сравнение результатов метания толстых пористых и тонких компактных масс при одном и том же  $r$ . Поскольку все (кроме одного) экспериментальные значения лежат выше расчетных, а систематическая ошибка (на наш взгляд) отсутствует, можно сделать вывод о большей передаче импульса пористой массе, чем компактному телу. Этот факт может быть связан с более длительным временем разгона пористого слоя. Среднее превышение экспериментальных углов над рассчитанными по формуле для компактных пластин составляет  $\sim 22\%$ .

*Поступила в редакцию 22/XI 1983*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Е. Кузьмин, А. М. Ставер. ФГВ, 1973, 9, 6.
2. И. Л. Костюков, А. М. Ставер. ФГВ, 1977, 13, 1.
3. А. А. Штерцер. ФГВ, 1982, 18, 1.
4. И. А. Костюков.— В кн.: Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума по импульсным движениям. М., 1979.
5. Н. Ф. Воскобойникова, И. М. Воскобойников. Там же.
6. Патент № 2357329 (Франция). Способ плакирования взрывом твердой поверхности порошковым материалом./Ингемар Перссон.— Заявл. 04.07.77; опубл. 10.03.78. МКИ В 23 Р 3/09.
7. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.