

**ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОГО СЖАТИЯ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРИСТЫХ СРЕД  
НЕВОЗМУЩАЮЩИМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ МЕТОДОМ**

УДК 534.22.2 + 621.7.044.2

**В. В. Пай, И. В. Яковлев, Г. Е. Кузьмин**

**Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,  
630090 Новосибирск**

*Для определения массовой скорости за ударной волной в пористых, волокнистых и других гетерогенных средах развит дистанционный электромагнитный метод. В качестве приложения к методу построена ударная адиабата порошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> насыпной плотности в области низких давлений.*

Для понимания процессов, протекающих при взрывном компактировании композиционных пористых тел, необходимо иметь достоверную информацию о характере напряженного состояния нагружаемой среды.

В настоящее время существует ряд экспериментальных методов определения параметров ударных волн (УВ) в порошковых и других гетерогенных средах. Все эти методы исследования можно разбить на две группы: локальные и дистанционные. К числу локальных относятся различные электроконтактные методы, позволяющие определять скорость УВ; метод измерения давления манганиновыми или пьезоэлектрическими датчиками; электромагнитный метод Звойского для измерения массовой скорости материала за ударной волной. Существенная особенность этих методов — размещение локальных датчиков в исследуемой среде, регистрация воздействия на них УВ и восстановление состояния среды по результатам измерений. Такие датчики вносят искажения в напряженное состояние среды, в связи с чем корректная оценка точности подобных методов, как правило, сравнима по сложности с исходной задачей исследования. К дистанционным методам относятся скоростная фотосъемка, импульсная рентгенография и электромагнитные методы, не предусматривающие размещения локальных датчиков в исследуемом веществе. Хорошо адаптированная для изучения процессов, происходящих в оптически прозрачных средах, скоростная фотосъемка практически не применима для определения ударно-волновых параметров в сплошных и пористых материалах. С ее помощью удается фиксировать лишь момент выхода УВ на внешнюю границу образца. Метод импульсной рентгенографии, полезный при определении конфигураций УВ в композиционных средах, имеет низкую разрешающую способность, не позволяя измерять параметры УВ с хорошей точностью. Наиболее обещающими с точки зрения применимости в исследованиях распространения УВ в пористых средах представляются разновидности электромагнитного метода, в которых не используются локальные датчики.

По-видимому, впервые использование дистанционного электромагнитного метода в задачах ударно-волнового нагружения порошков было предложено в работе [1]. Исследуемый образец порошкового материала помещался в однородное магнитное поле. Сигнал с расположенной вне образца измерительной катушки появлялся синхронно с процессом

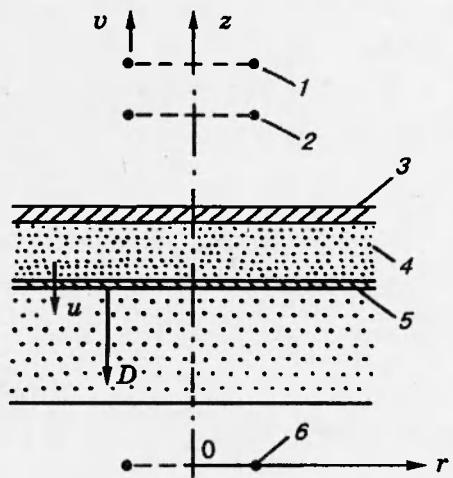


Рис. 1. Схема ударного сжатия с элементами измерительной системы:

1 — изображение излучателя, 2 — излучатель, 3 — металлическая пластина, 4 — слой порошка, 5 — фронт ударной волны, 6 — индукционный датчик

ударно-волнового сжатия, что позволило автору [1] сделать предположение о возможности применения такой схемы для определения параметров УВ в порошках. Наиболее подробно компрессия магнитного потока системой УВ в идеально уплотняющемся веществе, способном мгновенно переходить из непроводящего состояния в состояние с неограниченной проводимостью, рассмотрена в [2].

В данной работе рассматривается дистанционный электромагнитный метод определения массовой скорости за ударной волной в порошковых, волокнистых и других гетерогенных средах. В качестве приложения метода построена ударная адиабата порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с начальной насыпной плотностью  $1,06 \text{ г}/\text{см}^3$  в интервале давлений от  $\sim 0,8$  до  $\sim 5 \text{ ГПа}$ , при этом скорость УВ измерялась стандартным электроконтактным способом.

Для раскрытия сущности предлагаемого метода необходимо исследовать электромагнитные процессы, происходящие при ударно-волновом сжатии плоского неограниченного слоя порошка, находящегося в магнитном поле, создаваемом внешними источниками. Схематический вид такого образца с элементами измерительной системы приведен на рис. 1, где показан слой порошка 4, на поверхности которого размещена плоская металлическая пластина 3. Над пластиной находится катушка с током 2, возбуждающая магнитное поле, условно изображенная в виде кругового витка. Под слоем порошка располагается индукционный датчик 6, на котором возникает регистрируемая ЭДС. Датчик представляет собой цилиндрическую катушку и показан на рис. 1 в виде кругового витка. Будем для краткости называть катушку, которая возбуждает магнитное поле, излучателем, а катушку, с которой снимается сигнал, — наблюдателем. Поскольку измерительные элементы (и, как правило, реальные исследуемые образцы) составляют вместе осесимметричную систему, используем естественные в данном случае цилиндрические координаты  $r, z$ . Плоскости рассматриваемых круговых витков перпендикулярны плоскости  $r, z$ , поэтому каждый такой виток изображен на рис. 1 в виде пары точек.

Для анализа электромагнитных процессов в порошке и измерительной системе воспользуемся методом электрических изображений [3]. Начиная с момента времени  $t_0$ , через излучатель 2 протекает постоянный ток  $I$ . Пусть  $\sigma_0$ ,  $\delta_0$  соответственно объемная проводимость и толщина пластины 3. Исходная объемная проводимость порошка 4 равна нулю. Тогда магнитное поле, создаваемое излучателем под пластиной, будет суперпозицией полей неподвижного излучателя 2 и его перемещающегося изображения 1. При этом

изображение имеет противоположное с излучателем направление тока и удаляется от него со скоростью  $v = 2/(\mu_0 \sigma_0 \delta_0)$  [3], где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость. При  $t = t_0$  положение изображения совпадает с положением излучателя. Пусть векторный потенциал, создаваемый излучателем 2, помещенным в начало координат, есть

$$\vec{A}_0(r, z) = \vec{e}_\varphi A_0(r, z).$$

Тогда векторный потенциал, создаваемый системой излучатель — изображение под пластиной, будет иметь вид

$$\vec{A}(r, z, t) = \vec{A}_0(r, z - z_0) - \vec{A}_0(r, z - z_0 - v(t - t_0)),$$

где  $z_0$  — координата излучателя. В наблюдателе 6, представляющем собой одиночный разомкнутый виток радиуса  $R$  с координатой  $z = 0$ , будет наводиться ЭДС индукции

$$U(t) = \frac{\partial}{\partial t} \frac{2\mu_0 S A(r, 0, t)}{R},$$

так как  $\int_S \vec{B} d\vec{S} = \mu_0 \oint \vec{A} d\vec{l}$ , где  $\vec{B}$  — магнитная индукция;  $S = \pi R^2$  — площадь, охватываемая витком 6;  $d\vec{l}$  — элемент дуги витка 6. В других обозначениях

$$U(t) = -\frac{2\mu_0 S v}{R} \left. \frac{\partial A_0(r, z - z_0 - v(t - t_0))}{\partial z} \right|_{z=0}.$$

Пусть в момент  $t_1 > t_0$  произойдет выключение (разрушение) излучателя 2, тогда поле под пластиной будет создаваться излучателем и изображением, отстоящими друг от друга на расстояние  $v(t_1 - t_0)$  и движущимися со скоростью  $v$ . Векторный потенциал магнитного поля в этом случае при  $t \geq t_1$  будет следующим:

$$\vec{A}(r, z, t) = \vec{A}_0(r, z - z_0 - v(t - t_1)) - \vec{A}_0(r, z - z_0 - v(t - t_0)).$$

Соответственно

$$U(t) = -\frac{2\mu_0 S v}{R} \left( \left. \frac{\partial A_0(r, z - z_0 - v(t - t_1))}{\partial z} \right|_{z=0} - \left. \frac{\partial A_0(r, z - z_0 - v(t - t_0))}{\partial z} \right|_{z=0} \right).$$

Пусть в момент  $t_2 \geq t_1$  через пластину 3 в порошок входит плоская ударная волна 5 (см. рис. 1) со скоростью  $D$  и массовой скоростью  $u$ , совпадающей со скоростью движения пластины.

В случае, когда порошок после ударного нагружения остается изолятором, что выполняется, например, для керамических материалов  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  и т. п., скорости движения излучателя и изображения будут составлять  $u - v$  и сигнал, регистрируемый наблюдателем 6, становится равным

$$U(t) = \frac{2\mu_0 S(u - v)}{R} \left( \left. \frac{\partial A_0(r, z - z_0 + (u - v)(t - t_2) - v(t_2 - t_1))}{\partial z} \right|_{z=0} - \left. \frac{\partial A_0(r, z - z_0 + (u - v)(t - t_2) - v(t_2 - t_0))}{\partial z} \right|_{z=0} \right). \quad (1)$$

При известном распределении  $A_0(r, z)$  из последнего соотношения легко определить  $u$ .

Рассмотрим теперь случай, когда порошок приобретает металлическую проводимость соответствующего сплошного материала в УВ при значении массовой скорости  $u > u_*$ , где  $u_*$  — скорость, при которой «включается» проводимость. В сильных УВ, которые реализуются в динамических режимах прессования порошков, ширина фронта УВ, где происходят

существенные изменения массовой скорости, плотности и, следовательно, проводимости материала, составляет  $\sim (1-2)d$ , где  $d$  — размер частицы [4]. Оценим экранирующее действие фронта УВ на магнитное поле, создаваемое излучателем 2. Сразу после входа УВ в порошок магнитное поле излучателя и изображения «вмораживается» в образовавшийся слой монолита. Перейдем в систему отсчета, движущуюся вместе с пластиной со скоростью  $u$ . В начальный момент  $t = t_2$  магнитное поле под пластиной 3 есть суперпозиция полей излучателя 2 и изображения 1:

$$A_0(r, z - z_0) - A_0(r, z - z_0 - v(t_2 - t_1)).$$

Фронт УВ представляет собой в этой системе отсчета плоский слой материала, текущий со скоростью  $\sim (u_* - u)$  в направлении к источникам магнитного поля. Толщина этого слоя составляет  $\sim d$ , проводимость (монолита)  $\sim \sigma$ . Магнитное число Рейнольдса  $Re_m = (u - u_*)\delta/\nu_m$ , где  $\nu_m = 1/(\mu_0\sigma)$  характеризует возмущение магнитного поля фронтом УВ [5]. Поскольку невозмущенное поле не зависит от времени, при условии  $Re_m \ll 1$  можно считать магнитное поле совпадающим с тем, которое было бы создано внешними источниками в непроводящей среде. При характерных величинах  $(u - u_*) \approx 10^3$  м/с в сильных УВ и  $\sigma \approx 0,6 \cdot 10^8$  Ом<sup>-1</sup> м<sup>-1</sup> (меди) это условие выполняется для порошков с размерами частиц  $\leq 3$  мкм. Для медью содержащих порошков и порошков из алюминиевых сплавов это приближение справедливо для частиц с размерами на порядок больше. Напряжение, регистрируемое наблюдателем 6 при выполнении этого условия, равно выражению

$$U(t) = \frac{2\mu_0 S u}{R} \left( \frac{\partial A_0(r, z - z_0 + u(t - t_2) - v(t_2 - t_1))}{\partial z} \Big|_{z=0} - \frac{\partial A_0(r, z - z_0 + u(t - t_2) - v(t_2 - t_0))}{\partial z} \Big|_{z=0} \right). \quad (2)$$

Таким образом, в результате проведенного анализа установлено, что массовую скорость за УВ можно определить по ЭДС, наводимой в индукционном датчике. Для пористых материалов, остающихся изоляторами за волной, эта ЭДС описывается формулой (1), а для материалов, приобретающих проводимость монолита — формулой (2). Определение массовой скорости по этим формулам требует расчета векторного потенциала в условиях ударного нагружения.

Опишем теперь методы расчета векторного потенциала, создаваемого излучателем. Как следует из [5], векторный потенциал линейного кругового тока имеет только одну компоненту потенциала по оси  $\varphi$  —  $A_\varphi = A(r, z)$ , которая может быть записана в виде

$$A(r, z) = \frac{I}{2\pi} \int_0^\pi \frac{a \cos \varphi d\varphi}{(a^2 + r^2 + z^2 - 2ar \cos \varphi)^{1/2}},$$

где  $a$  — радиус витка. Используя параметр  $k$  такой, что  $k^2 = 4ar/((a+r)^2 + z^2)$ , приведем окончательное выражение для магнитного потенциала  $A$ :

$$A(r, z) = \frac{I}{\pi k} (a/r)^{1/2} [(1 - k^2/2)K(k) - E(k)].$$

Здесь  $K$ ,  $E$  — полные эллиптические интегралы 1-го и 2-го рода;  $k$  — вспомогательный параметр.

В силу линейности уравнений электродинамики очевидно, что векторный потенциал и его производные для многовитковых катушек вычисляются как сумма потенциалов

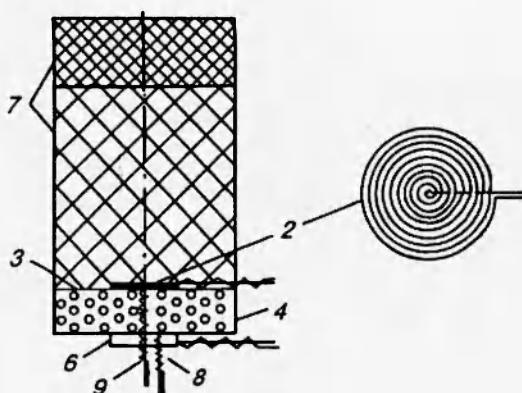


Рис. 2. Конструкция экспериментальной сборки:  
7 — взрывчатое вещество; 8, 9 — электроконтактные датчики; остальные обозначения см. рис. 1

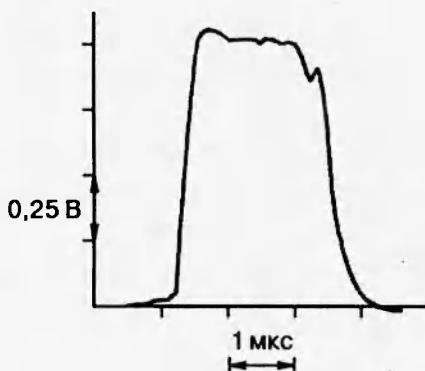


Рис. 3

Рис. 3. Осциллограмма процесса

Рис. 4. ( $D - u$ )-диаграмма ударного сжатия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с начальной плотностью 1,06 г/см<sup>3</sup>

отдельных витков.

На основании проведенного анализа разработана экспериментальная схема, реализующая описанный метод исследования УВ в пористых и композиционных материалах. Проведены эксперименты по определению массовой скорости при ударно-волновом нагружении порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Схема эксперимента приведена на рис. 2. Излучатель 2 представляет собой 15-витковую спиральную катушку диаметром 40 мм из медного провода прямоугольного сечения с шириной витка 1,0 мм, толщиной 30 мкм (т. е. практически плоскую). Наблюдатель 6 — катушка диаметром 40 мм в виде соленоида из 10 витков медного провода диаметром 0,3 мм. Ток, проходящий через излучатель, равен 5,7 А. Материал пластиинки — алюминий толщиной 0,3 мм. Нагружаемый материал — порошок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  плотностью 1,06 г/см<sup>3</sup>. Скорость плоской УВ, возбуждаемой в образце составным зарядом взрывчатого вещества 7, измерялась с помощью электроконтактных датчиков 8 и 9.

Осциллограмма процесса показана на рис. 3. Полученные данные приведены в форме ( $D - u$ )-диаграммы на рис. 4.

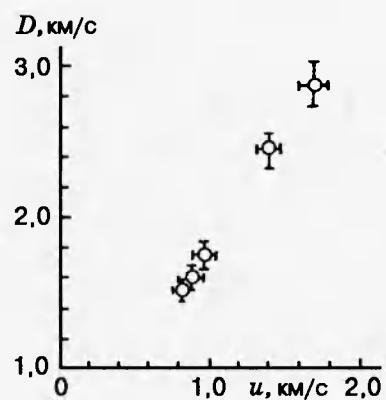


Рис. 4

Таким образом, в работе развит дистанционный электромагнитный метод измерения массовой скорости за ударными волнами, применимый для исследования процессов динамического нагружения композиционных многокомпонентных материалов. Проведен анализ физической модели, описывающей электромагнитные процессы, протекающие в пористых материалах при ударно-волновом нагружении. Построена ударная ( $D - u$ )-диаграмма порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  насыпной плотности.

Работа частично финансировалась Российским фондом фундаментальных исследований (код проекта 94-01-00999а) и Лос-Аламосской национальной лабораторией США (контракт 4540Q0015-35).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Нестеренко В. Ф. Бесконтактный метод измерения параметров ударно-сжатых металлов // Тезисы докл. III Всесоюз. симпоз. по импульсным давлениям. М., 1979.
2. Биченков Е. И., Гилев С. Д., Рябчун А. М., Трубачев А. М. Ударно-волновой метод генерации мегагауссных магнитных полей // ПМТФ. 1987. № 3.
3. Максвелл Дж. К. Трактат об электричестве и магнетизме. М.: Наука, 1989.
4. Нестеренко В. Ф. Импульсное нагружение гетерогенных материалов. Новосибирск: Наука, 1992.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.

*Поступила в редакцию 16/V 1995 г.*

---