

Ю. Д. Шишкин

РЕГИСТРАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОРОВОГО ВЕЩЕСТВА ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПОРОШОК КЕРАМИКИ  $Al_2O_3$ 

Экспериментально зарегистрировано существование электропроводного слоя за фронтом ударной волны, распространяющейся по пористому веществу, основной материал частиц которого — диэлектрик. Выявленные особенности протекания тока через измерительный зонд показывают, что проводимость связана с высоконагретым ионизованным состоянием порового газа. Предложенная схема регистрации позволяет получать качественную информацию о термодинамическом состоянии порового вещества за фронтом УВ.

Априорная структурная и фазовая неоднородность пористых материалов приводит к существенно неравновесному механизму диссипации механической энергии в тепловую при ударно-волновом нагружении таких сред [1, 2]. В результате микроударных явлений, протекающих на масштабе неоднородности, происходит интенсивный разогрев поверхности твердой фазы и газа, находящегося в порах. Время тепловой релаксации порового вещества определяется процессом передачи тепла в основной материал частиц.

Полное тепловое равновесие в сжатом материале установится за время  $d^2/a$ , которое для керамических материалов превышает время сжатия во фронте ударной волны (УВ)  $d/u$  в тысячу и более раз ( $d$  — размер частиц,  $u$  — массовая скорость за фронтом УВ,  $a$  — коэффициент температуропроводности). Следовательно, высоконагретое состояние порового газа может достаточно долго сохраняться за фронтом УВ. С физической точки зрения повышение температуры газа приводит к изменению электронной структуры молекул и, в частности, к образованию свободных ионов и электронов, что становится причиной его электропроводности.

В настоящей работе исследуется электропроводность, возникающая при ударном воздействии на пористое вещество, основной материал частиц которого является диэлектриком. Схема эксперимента приведена на рис. 1. Исследуемый порошок 5 керамики  $Al_2O_3$  (ТУ-6-09-426-75, средний размер частиц 40 мкм) засыпался в медную обойму 4 с внутренним диаметром 30 мм. Плотность засыпки  $\rho_{00} = 1,31 \text{ г/см}^3$ . УВ в образце генерировалась при помощи взрывной системы, состоящей из генератора плоской детонационной волны 1 и заряда ВВ 2 размером  $50 \times 20 \text{ мм}$ . Толщина дюралюминиевого экрана 3 составляла 5 мм.

В качестве схемы измерения использована одноэлектродная зондовая методика, применяемая в физике плазмы для диагностики ионизованных потоков газа [3]. При этом регистрируется величина тока на зонд, определяемая плотностью и температурой заряженных частиц газа. Данная схема позволяет наблюдать изменение электропроводности среды при переходе из начального состояния в конечное и минимизировать искажения структуры потока, вносимые измерительными датчиками. Электродом служила молибденовая проволока диаметром 0,12 мм (см. рис. 1, б).

Характерный вид зарегистрированных сигналов приведен на рис. 2, 3. Ось ординат соответствует величине тока, протекающего через зонд. Скорость УВ в порошке измерялась контактными датчиками на базе 5 мм с точностью 5%. Давление оценивалось по известной ударной адиабате

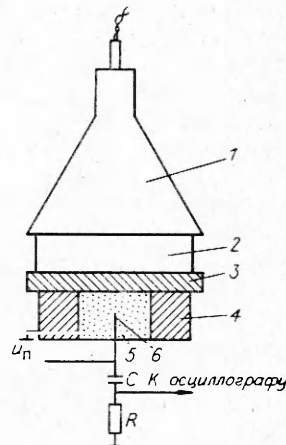


Рис. 1. Схема эксперимента.

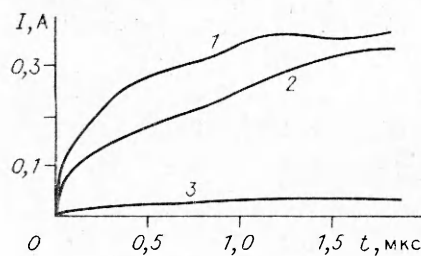


Рис. 2. Зависимость тока от времени для  $D = 2,8$  км/с,  $p = 6,8$  ГПа. 1 —  $u_{\text{п}} = -25$  В; 2 —  $u_{\text{п}} = 25$  В; 3 —  $u_{\text{п}} = 25$  В, отжиг при  $T = 300$  °С.

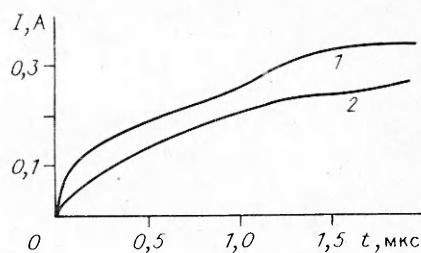


Рис. 3. Зависимость тока от времени для  $u_{\text{п}} = 25$  В. 1 —  $D = 2,8$  км/с,  $p = 6,8$  ГПа; 2 —  $D = 2,25$  км/с,  $p = 4,4$  ГПа.

экрана. Электрод зонда устанавливался в 5 мм от экрана. Предполагается, что возможны два механизма возникновения электропроводности: 1) увеличение проводимости поверхности частиц вследствие гетерогенного разогрева во фронте УВ, 2) проводимость связана с понижованным состоянием газа порошкового вещества.

Обнаружено, что величина тока на зонд, в предварительно отожженном при  $T = 300$  °С порошке (потеря массы составляет 4,3%), значительно уменьшается при сохранении общего характера сигнала (см. рис. 2, 2, 3). Если исходить из первого предложенного механизма, отжиг порошка от адсорбированных примесей должен приводить к увеличению ударного разогрева поверхности частиц и, следовательно, к возрастанию сигнала. Поэтому можно сделать вывод, что наблюдаемая электропроводность связана в основном с высоконагретым ионизованным состоянием паров воды, испарившихся во фронте УВ.

Подтверждением данного механизма проводимости служат также эксперименты, в которых зарегистрирована зависимость сигнала от знака подаваемого напряжения. Для электронно-ионной плазмы величина тока существенно зависит от потенциала зонда относительно плазмы [3, 4]. В случае неэмиттирующей поверхности электрода ток при отрицательном потенциале в  $\sqrt{m_i/m_e}$  раз меньше ( $m_e$  — масса электрона,  $m_i$  — масса иона), чем при положительном. Оказалось (см. рис. 2, 1, 2), что при отрицательном потенциале ток становится больше, а сигнал нестационарным с точки зрения повторных экспериментов. Для положительного потенциала наблюдается достаточно хорошая повторяемость как по величине, так и по характеру сигнала. При отрицательном питающем напряжении нагретая поверхность зонда может служить источником электронов, движущихся в плазму. Следовательно, ток будет уже определяться не состоянием порошкового газа вблизи зонда, а процессами термоэмиссии и испарениями на поверхности электрода. Вероятно, это и приводит к наблюдаемой нестационарности сигнала при отрицательном потенциале зонда.

Увеличение ударного давления в порошке (см. рис. 3) приводит к росту протекающего тока, что естественно связать с более высокими параметрами генерируемого порошкового газа. Для определения положения фронта волны сжатия в порошке относительно сигналов проводимости проведены эксперименты с одновременной регистрацией массовой скорости с помощью электромагнитной методики и проводимости по данной схеме. Обнаружено, что в пределах ошибки измерения начало сигнала проводимости совпадает с появлением сигнала от датчика скорости. Величина задержки для сигнала проводимости составляла  $480 \pm 20$  нс, для массовой скорости  $500 \pm 40$  нс.

Выход сигнала на постоянный уровень свидетельствует об исчезновении проводящего состояния порошкового газа, что при условии стационарности параметров УВ в течение времени измерения определяется процессом его охлаждения. Для давлений 4,8 и 6,7 ГПа это время оказалось равным 1,4 мкс.

Проведенные сравнительные эксперименты показывают, что с помощью предложенной схемы регистрации возможно получение информации об эволюции термодинамического состояния порового газа при ударном воздействии на пористые непроводящие материалы. Следует отметить, что уровень регистрируемого в экспериментах сигнала достаточен для измерения скорости УВ в керамических материалах при помощи одноэлектродных контактных датчиков.

К основным результатам работы можно отнести следующее.

1. Экспериментально зарегистрировано существование электропроводного слоя за фронтом УВ, распространяющейся по пористому непроводящему материалу.

2. Основной вклад в проводимость вносит испарение паров воды, адсорбированных на поверхности частиц порошка.

3. На основе анализа полученных сигналов определено время существования проводящего состояния за фронтом УВ.

Автор благодарен Н. А. Костюкову за полезные советы и обсуждение результатов работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беляков К. В., Родионов В. П., Самосадный Б. П. О разогреве пористого вещества при ударном сжатии // ФГВ.— 1977.— 13, № 4.— С. 614.
2. Нестеренко В. Ф. Возможности ударно-волновых методов получения и компактирования быстрозакаленных материалов // Там же.— 1985.— 21, № 6.— С. 85.
3. Чан П., Тэлбот Л., Туриан К. Электрические зонды в неподвижной и движущейся плазме.— М.: Мир, 1978.
4. Беннлов М. С. Теория электрических зондов в потоках слабоионизованной плазмы высокого давления // ТВТ.— 1988.— № 5.— С. 993.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 12/III 1991,  
после доработки — 5/VII 1991

УДК 624.074.4 : 678.067

М. А. Сырунин, А. Г. Федоренко, А. Г. Иванов

#### ПРЕДЕЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ОБОЛОЧЕК ИЗ ОРИЕНТИРОВАННОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА ПРИ ВНУТРЕННЕМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

Экспериментально определена предельная (разрушающая) деформация оболочек из ориентированного стеклопластика в условиях внутреннего центрально-симметричного взрывного нагружения с реализацией различных уровней двухосности деформирования. Испытаны оболочки комбинированной спирально-кольцевой структуры армирования. Показано, что предельная окружная деформация растяжения составляет  $4,8 \pm 0,4\%$  и в пределах погрешности измерений совпадает с деформацией разрыва элементарного стеклянного волокна. Она, как и для стеклопластиков на тканой основе, может служить критерием прочности при исчерпании несущих свойств материала.

В работах [1—5] исследовались особенности динамического деформирования и разрушения цилиндрических круговых стеклопластиковых оболочек на основе стеклоткани при взрывном нагружении изнутри. В частности, установлено, что предельная окружная деформация  $\epsilon_y$  оболочки при разрушении в фазе первого расширения не зависит от вида импульсного нагружения (заполняющая среда — вода или воздух), характерного размера (внутренний радиус  $R$  изменялся от 15 до 700 мм) и относительной толщины стенки ( $\delta/R = 3,8 \div 27\%$ ). Ее значения составляют 4—5% и могут служить критерием прочности при интенсивных нагрузках [4, 6].

В [5, 7, 8] показано, что структура армирования стеклопластика, как на основе стеклоткани, так и намоточного ориентированного, существенно влияет на прочностные и деформационные характеристики, а также на характер разрушения цилиндрических оболочек при выб-