

УДК 539.63:537.311.3

## ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МЕДНЫХ ПОРОШКОВ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

С. Д. Гилёв

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, gilev@hydro.nsc.ru

Выполнены измерения электропроводности ряда составов на основе медного порошка при ударном сжатии. Исследовались порошок меди в состоянии поставки, смеси медь/стеклянные микросферы, медь/алюминий. Для измерения электропроводности использована авторская электроконтактная техника, позволяющая регистрировать переход изолятор — металл. Получены зависимости электропроводности порошков от давления ударной волны. Как и для алюминиевых порошков, исследованных ранее, эта зависимость для медного порошка имеет немонотонный характер. Максимальная электропроводность составляет  $\approx 9 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ . При дальнейшем росте ударного давления электропроводность уменьшается почти на порядок, что объясняется сильным температурным разогревом. Найденная электропроводность при больших ударных давлениях качественно соответствует известным широкодиапазонным моделям проводимости Гаранина и Бакулина.

Ключевые слова: ударное сжатие, металлический порошок, электропроводность, медь, сжимаемость.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследованию поведения порошков металлов при ударном сжатии посвящено большое количество работ, что обусловлено широким применением порошков для задач компактирования [1], синтеза соединений и получения новых материалов [2], создания энергетических составов [3–8], управления потоками электромагнитной энергии [9, 10]. В настоящее время понимание физических процессов при ударном сжатии недостаточно для разработки адекватной теоретической модели ударного сжатия порошков. В особенности это справедливо для электрофизических свойств порошков, которые только начинают исследоваться. Первое достаточно полное исследование электропроводности металлических порошков выполнено для порошка алюминия [11, 12]. В этих работах приведены также единичные данные для порошков других металлов. Хотя медные порошки широко используются во взрывных технологиях, данные об их электрической проводимости отсутствуют.

Настоящее исследование предпринято в связи с задачей получения сверхсильных магнитных полей методом ударно-волновой магнитной кумуляции [9, 10]. Метод основан на кумуляции магнитного потока в веществе, приобретающем высокую (металлическую) прово-

димость при ударном сжатии. При помощи ударно-волновой магнитной кумуляции к настоящему времени получены магнитные поля до 4 МГс [10], что соответствует плотности электромагнитной энергии  $\approx 6 \cdot 10^4 \text{ Дж/см}^3$  (примерно в 7 раз больше плотности энергии химического взрывчатого вещества). Хотя магнитные поля, получаемые этим методом, существенно меньше, чем при использовании медного лайнера, ударно-волновой метод имеет ряд очевидных достоинств: простота конструкции генератора и системы инициирования заряда взрывчатого вещества, подавление роста магнитогидродинамических неустойчивостей за счет постоянного обновления границы проводник — поле.

Максимальное магнитное поле, получаемое в процессе магнитной кумуляции, существенно зависит от электропроводности и сжимаемости рабочего вещества. Для эффективной магнитной кумуляции рабочее вещество должно обладать следующими свойствами: 1) быть не проводящим в начальном состоянии и приобретать электропроводность  $\approx 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  при ударном сжатии, 2) коэффициент сжатия вещества должен быть большим (как минимум,  $3 \div 4$ ). В силу сформулированных требований возможными кандидатами на роль рабочего вещества являются высокопористые металлические порошки. Обычно металлические порошки насыпной плотно-

Таблица 1

## Характеристики исследованных веществ

| Обозначение | Порошок   | $\rho_{00}$ , г/см <sup>3</sup> | $m = \rho_0/\rho_{00}$ |
|-------------|---|---------------------------------|------------------------|
| Сu-1        | Медный порошок ПМА  | 1.77                            | 5                      |
| Сu/МС-1     | Смесь медного порошка ПМА со стеклянными микросферами в соотношении 1 : 1 (по объему) | 1.0                             | 8.9                    |
| Сu/МС-2     | Смесь медного порошка ПМА со стеклянными микросферами в соотношении 1 : 2 (по объему) | 0.71                            | 12.6                   |
| Сu/МС-3     | Смесь медного порошка ПМА со стеклянными микросферами в соотношении 1 : 4 (по объему) | 0.51                            | 17.5                   |
| Сu/Al       | Смесь медного порошка ПМА с алюминиевой пудрой ПАП-2 в соотношении 1 : 2 (по объему)  | 0.94                            | 9.5                    |

сти не обладают макропроводимостью (вследствие плохого контакта между частицами и наличия оксидных или иных изолирующих пленок на поверхности частиц). При ударном сжатии плотность порошка увеличивается, частицы лучше контактируют друг с другом, а оксидные пленки механически разрушаются. Одним из перспективных рабочих веществ для целей магнитной кумуляции является медный порошок. Поскольку ассортимент промышленных порошков ограничен, для дополнительного увеличения пористости порошок можно разбавить каким-нибудь малоплотным веществом. При этом макропроводимость смеси будет, естественно, меньше, чем у порошка без добавок. Насколько проводимость смеси уменьшится и будет ли проводимость достаточной для магнитной кумуляции, априорно не ясно.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование электропроводности составов на основе медного порошка при ударном сжатии. Нас интересовала величина электропроводности и ее зависимость от давления ударного сжатия в диапазоне давлений, создаваемых зарядами конденсированных взрывчатых веществ.

## ИССЛЕДУЕМЫЕ ВЕЩЕСТВА

В табл. 1 приведены основные характеристики исследуемых порошков. Использовались порошки насыпной плотности (начальная плотность  $\rho_{00} = 0.5 \div 1.77$  г/см<sup>3</sup>; коэффициент пористости  $m$ , определенный как отношение плотности монолитной меди  $\rho_0$  к плотности порошка  $\rho_{00}$ , составлял  $5 \div 17.5$ ). Наибольшее внимание уделено медному порошку ПМА. Его

частицы имели квазисферическую форму размером  $20 \div 50$  мкм. Для искусственного уменьшения плотности медного порошка его смешивали с более легкими порошками — стеклянными микросферами, алюминиевой пудрой. Стеклянные микросферы МС-В производства НПК «Терм» представляют собой пустотелые сферы диаметром  $30 \div 100$  мкм, эффективный диаметр — 60 мкм. Насыпная плотность порошка из микросфер — 0.15 г/см<sup>3</sup>. Изготавливались смеси медного порошка с микросферами с объемным содержанием компонентов 1 : 1, 1 : 2 и 1 : 4. Для понижения плотности смеси использовалась также алюминиевая пудра ПАП-2. Ее насыпная плотность составляла 0.37 г/см<sup>3</sup>, частицы имели форму чешуек (характерный размер  $\approx 20$  мкм, толщина  $\approx 1$  мкм).

## МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерения электропроводности использовался электроконтактный метод [11, 13]. Применявшаяся измерительная ячейка показана на рис. 1.

Заряд конденсированного взрывчатого вещества (диаметр 75 мм) инициируется генератором плоской волны (не показан на рисунке). Плоская ударная волна через диэлектрическую пластину и шунт (константановая фольга, толщина 100 мкм) входит в исследуемое вещество, которое находится в полости диэлектрической обоймы (длина полости 70 мм, ширина полости 10 мм). Измерения проводятся в режиме постоянного тока, создаваемого внешним источником. Регистрируется напряжение на электродах, подключенных к точкам В, С. Длина образца велика по сравнению с расстоянием

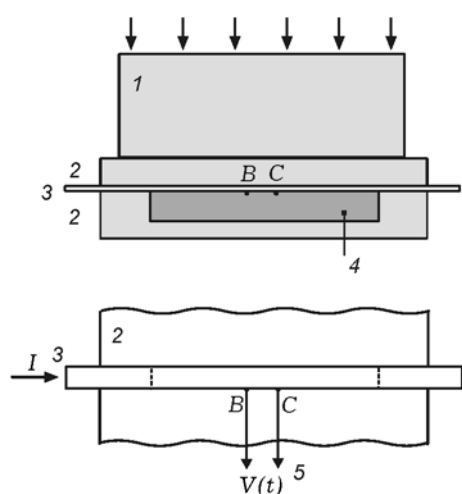


Рис. 1. Измерительная ячейка: разрез устройства и вид сверху (без верхней диэлектрической пластины):

1 — заряд конденсированного взрывчатого вещества, 2 — диэлектрик, 3 — шунт (константановая фольга), 4 — образец, 5 — электроды,  $B, C$  — точки подсоединения электродов к шунту

между электродами ( $6 \div 8$  мм), поэтому силовые линии электрического поля в области измерений параллельны поверхности шунта. Площадь поверхности раздела шунт — образец велика, по этой причине контактное сопротивление шунт — образец не влияет на результаты измерений. Уверенность в этом подкрепили специальные опыты, в которых к шунту подключались сплошные медные образцы. Регистрируемое сопротивление образцов в опытах оказалось близко к ожидаемому. Поэтому настоящий метод может быть использован для измерения металлической проводимости (вплоть до проводимости сплошной меди). Постановка опытов и метод обработки экспериментальных данных подробно описаны в [11]. Особенности измерения электропроводности при переходах изолятор — металл обсуждались также в [13].

Для вариации ударного давления в образце использовались различные взрывчатые вещества. Для ослабления ударной волны между зарядом взрывчатого вещества и диэлектрической пластиной дополнительно размещались одна или две медные пластины (в последнем случае с дополнительным диэлектриком).

На рис. 2 показаны характерные записи напряжения с измерительной ячейки, полученные в экспериментах с порошком  $Cu$  при ма-

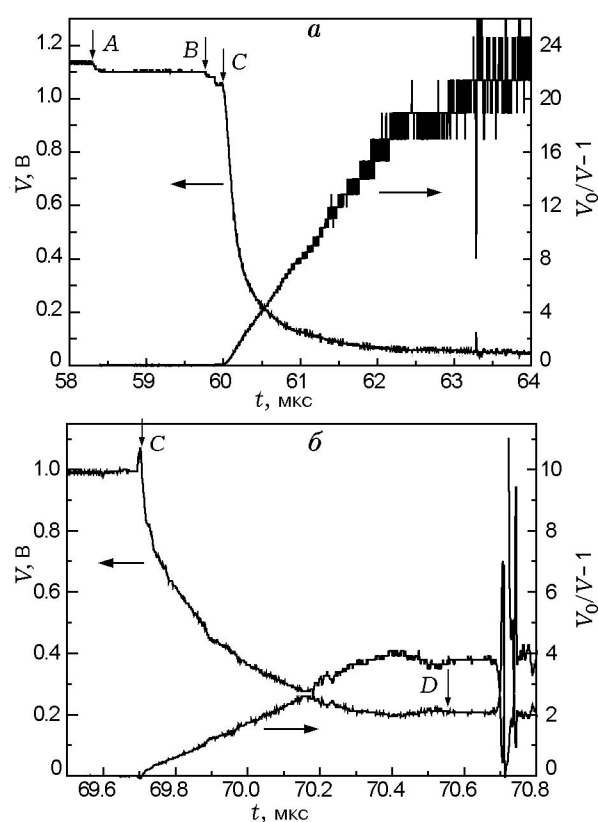


Рис. 2. Записи напряжения в опытах по измерению электропроводности медного порошка и результаты обработки записи в переменных ( $V_0/V - 1, t$ ):

$a$  — малое давление ударной волны, опыт № 1079,  $b$  — большое давление ударной волны, опыт № 1053;  $A$  — начало движения границы медной пластины,  $B$  — начало отклонения напряжения,  $C$  — появление заметной проводимости порошка,  $D$  — выход ударной волны из образца

лом и большом ударном давлении. Для других порошков записи имеют качественно тот же вид. Измерения проводятся в режиме постоянного тока, поэтому первоначально на ячейке регистрируется постоянное напряжение. В момент времени  $A$  граница медной пластины начинает движение и появляется индукционный сигнал. Вследствие расщепления ударной волны на шунте, в образец входит серия ударных волн возрастающей амплитуды. Первые волны имеют малую интенсивность и не приводят к заметному изменению напряжения (момент времени  $B$  и далее). В момент времени  $C$  напряжение резко уменьшается, что свидетельствует о выходе в порошок сильной ударной волны, вызывающей появление заметной проводимости. В дальнейшем сильная волна дого-

няет более слабые волны, и далее по порошку движется одна волна. Поэтому, за исключением начального временного участка, регистрируемое напряжение соответствует однократному сжатию образца в ударной волне. Последовательное уменьшение напряжения свидетельствует о подключении к шунту нарастающей проводящей зоны. В момент  $D$  ударная волна проходит образец и выходит в диэлектрическую пластину.

Переходные электромагнитные процессы в ударно-сжимаемом образце определяются безразмерным параметром  $R_2 = \mu_0 \sigma (D - u)^2 t$  [11]. Здесь  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума,  $\sigma$  — электропроводность ударно-сжатого вещества,  $D$  — волновая скорость,  $u$  — массовая скорость,  $t$  — время движения ударной волны. В экспериментах, проведенных с медными порошками, параметр  $R_2 < 1$ , что обусловлено главным образом сильной сжимаемостью образца. В этом случае для описания процесса перераспределения тока в измерительной ячейке применимо электротехническое приближение. Электропроводность образца определяется по формуле [11, 13]

$$\sigma = \frac{\delta_s}{\rho_s (D - u)} \frac{1}{t} \left( \frac{V_0}{V} - 1 \right), \quad (1)$$

где  $\delta_s$  — толщина фольги,  $\rho_s$  — удельное сопротивление фольги,  $V_0$  — начальное напряжение. Для однородной электропроводности ударно-сжатого вещества обработка временной зависимости напряжения  $V(t)$  в переменных  $(V_0/V - 1, t)$  должна приводить к прямой линии, тангенс угла которой к оси времени определяет величину электропроводности. Полученные опытные данные свидетельствуют о том, что электропроводность ударно-сжатого медного порошка действительно однородна.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

В табл. 2 дана информация о постановке эксперимента (тип взрывчатого вещества, состав слоистой системы ослабления, исследуемое вещество) и приведены полученные экспериментальные данные. Давление  $p$ , коэффициент сжатия  $\rho/\rho_0$  и другие гидродинамические параметры сжатого вещества вычислены методом ударных импедансов на основе уравнения состояния продуктов взрыва конденсированных взрывчатых веществ [14], известных

ударных адиабат сплошной меди [15], гетинакса [16] и медных порошков близкой плотности [17].

Экспериментальные данные для порошков [17] описывались линейной зависимостью волновой скорости  $D$  от массовой скорости  $u$  в виде  $D = C_0 + \lambda u$ . Для порошка Cu использовались значения констант  $C_0 = -0.133$  км/с,  $\lambda = 1.385$  (соответствуют плотности порошка  $1.64$  г/см<sup>3</sup> в [17]), для смесей Cu/МС-1, Cu/МС-2, Cu/МС-3, Cu/Al — значения  $C_0 = -0.366$  км/с,  $\lambda = 1.349$  (соответствуют плотности порошка  $0.89$  г/см<sup>3</sup> в [17]). Предполагалось, что, поскольку массовая доля стеклянных микросфер (и алюминиевой пудры) относительно невелика, добавка не влияет на ударное сжатие вещества, приводя лишь к разбавлению порошка и уменьшению его средней плотности. Состояние порошков при малых давлениях ( $p < 7$  ГПа для порошка Cu,  $p < 1$  ГПа для порошка Cu/МС-1), для которых в [17] отсутствуют экспериментальные данные, оценивалось по модели [18].

В целом, используемый способ нахождения гидродинамических параметров исследуемого вещества является приближенным (особенно в области малых ударных давлений, где нет экспериментальных данных по сжимаемости порошков), однако он достаточен для определения тенденции изменения электропроводности.

На рис. 3 экспериментальные данные для порошков Cu и Cu/МС-1 представлены в виде зависимости электропроводности от давления ударной волны. Погрешность определения электропроводности в большинстве опытов составляет  $\approx 10\%$ ; в области малых давлений (где экспериментальные данные по сжимаемости отсутствуют) погрешность может быть больше. Погрешность определения ударного давления оценивается в  $10\%$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость электропроводности медного порошка от ударного давления  $\sigma(p)$  немонотонна. В начальном состоянии порошок не обладает макроскопической проводимостью. Сжатие порошка приводит к установлению механического контакта между проводящими частицами и к появлению объемной проводимости. Максимальная электропроводность медного порошка составляет  $\approx 9 \cdot 10^4$  Ом<sup>-1</sup> · см<sup>-1</sup>. Это значение в 6 раз меньше электропроводности сплошной меди при нормальных условиях.

Таблица 2

Постановка опытов по измерению электропроводности порошков в ударной волне, расчетные давление  $p$  и сжатие  $\rho/\rho_{00}$ , а также экспериментальные значения электропроводности  $\sigma$

| Порошок  | Номер опыта | Экспериментальное устройство:<br>материал слоя (толщина, мм)              | $p$ , ГПа | $\rho/\rho_{00}$ | $\sigma$ , $10^3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ |
|----------|-------------|---|-----------|------------------|--|
| Cu-1     | 1064        | Тэн(300)-Cu(4.3)-гет(4.8)-Cu(4.3)-<br>-гет(2.9)-К(0.1)-Cu-1(2.9)-гет(2.9) | 0.8       | 4.97             | 9.4  |
|          | 1079        | 6ЖВ(290)-Cu(6.2)-гет(4.8)-К(0.1)-Cu-1(5)-гет(4.8)                         | 1.2       | 4.92             | 91   |
|          | 1051        | Тэн(219)-Cu(6)-гет(3)-К(0.1)-Cu-1(5.2)-текст(5)                           | 1.9       | 4.85             | 72   |
|          | 1056        | Гекс(219)-Cu(6)-гет(3)-К(0.1)-Cu-1(5.2)-текст(5)                          | 2.7       | 4.78             | 64   |
|          | 1057        | Тэн(234)-гет(5)-К(0.1)-Cu-1(3.1)-гет(5)                                   | 5.6       | 4.34             | 29   |
|          | 1045        | Гекс(260)-гет(5)-К(0.1)-Cu-1(3.1)-гет(4.9)                                | 7.6       | 4.21             | 17   |
|          | 1054        | Т(60)-гет(5)-К(0.1)-Cu-1(3)-гет(5)  | 11.4      | 4.08             | 18   |
|          | 1053        | ТГ(60)-гет(5)-К(0.1)-Cu-1(3)-гет(4.7)                                     | 16.3      | 3.99             | 13   |
| Cu/МС-1  | 1081        | 6ЖВ(237)-Cu(6)-гет(3)-К(0.1)-Cu/МС-1(3)-гет(4.8)                          | 0.86      | 8.56             | 57   |
|          | 1068        | Тэн(230)-Cu(6.2)-гет(4.8)-К(0.1)-Cu/МС-1(4)-текст(6)                      | 1.2       | 8.42             | 51   |
|          | 1082        | Т(60)-Cu(6.2)-гет(3)-К(0.1)-Cu/МС-1(3.1)-гет(4.8)                         | 3.3       | 8.34             | 21   |
|          | 1046        | Гекс(220)-гет(5)-К(0.1)-Cu/МС-1(3)-текст(4.7)                             | 5.2       | 6.7              | 9.5  |
|          | 1067        | Т(60)-гет(4.8)-К(0.1)-Cu/МС-1(4.2)-текст(5.8)                             | 7.9       | 5.8              | 4  |
|          | 1066        | ТГ(60)-гет(4.8)-К(0.1)-Cu/МС-1(4.2)-текст(5.8)                            | 11.5      | 5.34             | 2.5  |
| Cu/МС -2 | 1058        | Тэн(239)-гет(4.8)-К(0.1)-Cu/МС-2(4.3)-гет(5.6)                            | 3         | 7.34             | 3  |
| Cu/МС -3 | 1048        | Тэн(230)-гет(3)-К(0.1)-Cu/МС-3(5)-гет(4.8)                                | 2.4       | 7                | 4  |
| Cu/Al    | 1086        | 6ЖВ(240)-гет(3)-К(0.1)-Cu/Al(3)-гет(4.8)                                  | 2         | 8.6              | 27   |
|          | 1087        | ТГ(60)-гет(3)-К(0.1)-Cu/Al(3)-гет(4.8)                                    | 11        | 5.3              | 10   |

Примечания. Материал слоев: Т — литой тротил (плотность  $1.57 \text{ г/см}^3$ ), ТГ — сплав тротил/гексоген 50/50 (плотность  $1.66 \text{ г/см}^3$ ), 6ЖВ — порошковый аммонит 6ЖВ (плотность  $1.0 \text{ г/см}^3$ ), гекс — гексоген (плотность  $1.0 \text{ г/см}^3$ ), тэн — порошковый тэн (плотность  $1.0 \text{ г/см}^3$ ), Cu — медная пластина, К — константановый шунт, гет — гетинакс, текст — текстолит.

При дальнейшем увеличении ударного давления электропроводность резко уменьшается.

Сравним полученные экспериментальные данные с результатами измерения электропроводности других металлических порошков [11, 12]. Электропроводность медного порошка оказалась максимальной среди других металлических порошков, хотя и близка к ним по порядку величины. Зависимость электропроводности медного порошка от ударного давления  $\sigma(p)$  качественно подобна зависимости для алюминиевого порошка [11, 12]. В то же время зарегистрированный диапазон уменьшения электропроводности при росте ударного давления составляет почти один порядок величины (что существенно больше, чем для алюминии-

вого порошка).

Сравним полученные данные с предсказаниями широкодиапазонных уравнений электропроводности, предложенных для описания поведения металлов при высоких плотностях энергии.

Отметим, что в настоящее время модель электропроводности металла при ударном сжатии отсутствует. Из общих соображений ясно, что электропроводность металла определяется влиянием сжатия, температуры и неравновесными эффектами, приводящими к генерации дефектов кристаллической структуры. Электропроводность порошковых сред дополнительно должна зависеть от соотношения между объемами металла и заполняющей сре-

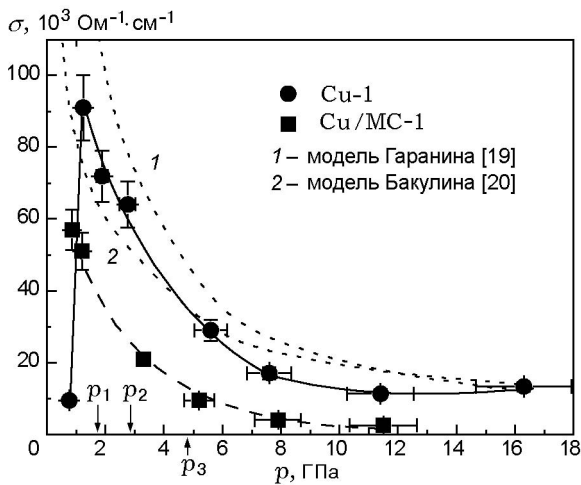


Рис. 3. Зависимость электропроводности ударно-сжатых медных порошков от давления ударной волны:

$p_1$  — начало плавления,  $p_2$  — полное плавление,  $p_3$  — начало испарения

ды (воздух), от площади контакта между металлическими частицами, от их формы, степени тепловой неравновесности по частице, а также от свойств заполняющей среды. В самом простом случае порошковую среду можно приближенно рассматривать как однородный материал, не имеющий пор, при этом масса и энергия распределяются по объему образца равномерно.

На рис. 3 показаны зависимости электропроводности от ударного давления, полученные для условий поставленных экспериментов при помощи наиболее известных моделей электропроводности — Гаранина [19] и Бакулина [20]. В моделях Гаранина и Бакулина электропроводность вещества является функцией плотности  $\rho$  и тепловой компоненты внутренней энергии  $E_T$ :  $\sigma(\rho, E_T)$ . Плотность сжатого вещества  $\rho$  и тепловая компонента внутренней энергии  $E_T$  вычислялись на основе ударной адиабаты порошка. При этом использовались следующие соображения. Изменение внутренней энергии вещества при ударном сжатии составляет

$$\Delta E = \frac{p}{2} \left( \frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho} \right).$$

Экспериментальные данные [17] показывают, что плотность ударно-сжатого высокопористого порошка меньше плотности сплошной меди. Это обстоятельство позволяет считать,

что весь прирост внутренней энергии порошка при ударном сжатии имеет тепловую природу:  $\Delta E \approx \Delta E_T$ . Для определения электропроводности вещества по найденным значениям  $\rho$  и  $E_T$  использовалась компьютерная программа MAG [21].

Из рис. 3 видно, что экспериментальная точка, соответствующая минимальному ударному давлению ( $p = 0.8$  ГПа) в медном порошке, выпадает из основной зависимости  $\sigma(p)$ , которая представляет собой монотонно убывающую функцию. Эта точка располагается существенно ниже, чем предсказывают модели проводимости Гаранина и Бакулина для данных условий эксперимента. Такое поведение означает, что для слабой ударной волны в порошке электрический контакт между металлическими частицами еще не установлен, а на регистрируемую проводимость влияют оксидные пленки на поверхности частиц. Остальные экспериментальные точки зависимости  $\sigma(p)$  для медного порошка располагаются между модельными кривыми или достаточно близко к ним. Близость экспериментальных и модельных значений проводимости (кроме эксперимента при минимальном давлении) можно рассматривать как аргумент в пользу реалистичности полученных значений электропроводности, хотя, разумеется, модели проводимости [19, 20] построены при ряде предположений, которые, строго говоря, могут не выполняться в данных условиях.

Модели [19, 20] предполагают наличие термодинамического равновесия в веществе. Основываясь на взаимном расположении экспериментальных точек и модельных кривых, можно утверждать, что достигаемое при ударном сжатии состояние порошка меди близко к равновесному. Этот вывод достаточно неожидан. Оценка времени теплового прогресса частицы с характерным размером  $a$  составляет  $\tau_T \approx \rho c_p a^2 / \lambda_T$  (здесь  $c_p$  — теплоемкость,  $\lambda_T$  — коэффициент теплопроводности). Для размера частиц  $a = 20$  мкм и значений теплопроводности, теплоемкости при нормальных условиях [22] такая оценка дает значение  $\approx 4$  мкс, что больше характерного времени измерений ( $\approx 1$  мкс). По-видимому, интенсивная пластическая деформация частиц облегчает их прогрев, хотя полного прогресса, конечно, нет. Поверхностные слои частицы имеют большую температуру, чем внутренние, и, соответственно, меньшую электропроводность, что приво-

дит к понижению макропроводимости образца. Поэтому меньшая проводимость порошка (по сравнению с моделями) может быть обусловлена тепловой неравновесностью.

На рис. 4 полученные значения электропроводности медного порошка представлены в виде зависимости от температуры. Температура ударно-сжатого порошка оценивалась в предположении, что теплоемкость меди постоянна и равна значению при нормальных условиях [22]. Как видно из рисунка, экспериментальные значения электропроводности в области  $T = 1000 \div 1500$  К близки по порядку величины к электропроводности меди при атмосферном давлении [22], которые представлены сплошной кривой. Эксперимент, соответствующий минимальному давлению ударной волны и, следовательно, минимальной температуре, однако, сильно выпадает из монотонной зависимости электропроводности от температуры (аналогично зависимости  $\sigma(p)$  на рис. 3). При больших ударных давлениях, согласно оценкам, вещество испытывает плавление и далее частично испаряется. Такое поведение приводит к группировке точек на рис. 4 в виде вертикальной полосы, соответствующей температуре кипения меди.

Таким образом, для большей части экспериментальных данных электропроводность порошка определяется сильным температурным

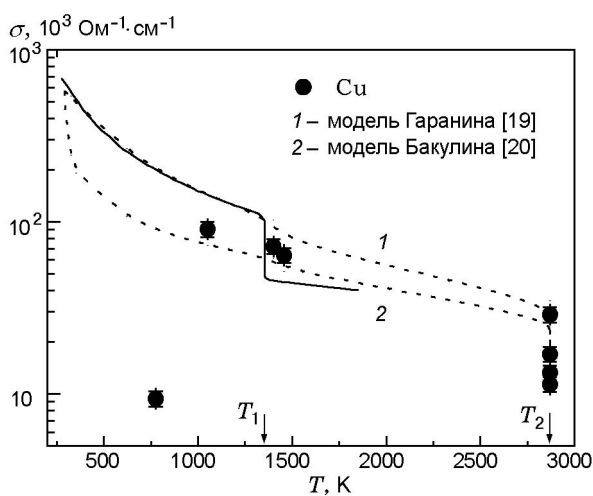


Рис. 4. Зависимость электропроводности медного порошка от температуры:

сплошная кривая — зависимость при нормальном давлении [22]; стрелками отмечены температура плавления  $T_1$  и кипения  $T_2$  меди при нормальном давлении

нагревом.

Обсудим полученные экспериментальные данные для смесей медного порошка со стеклянными микросферами и порошком алюминия.

Как следует из представленных данных (см. табл. 2, рис. 3), разбавление медного порошка микросферами приводит к заметному уменьшению электропроводности. По-видимому, хорошие изоляционные свойства стекла и диэлектрические микроструктуры, генерируемые при деформации микросфер, способствуют эффективному подавлению проводимости среды на макроуровне. Зависимость электропроводности смеси Cu/МС-1 от ударного давления  $\sigma(p)$  остается качественно сходной с зависимостью для порошка Cu. Отметим, что при росте ударного давления отношение электропроводности порошков Cu и Cu/МС-1 увеличивается. По-видимому, это связано с большей температурой смеси по сравнению с медным порошком (при том же давлении ударной волны), что обусловлено увеличением сжимаемости смеси.

Результаты опытов со смесью Cu/Al показывают, что разбавление медного порошка легким проводящим материалом (таким, как алюминиевая пудра ПАП-2) позволяет достичь значительной пористости при достаточной большой электропроводности сжатого вещества. Электропроводность смеси Cu/Al заметно больше электропроводности смеси медного порошка со стеклянными микросферами Cu/МС и чистой алюминиевой пудры [12]. Поэтому такой способ вариации начальной плотности является перспективным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные экспериментальные данные показывают, что электропроводность и сжимаемость медного порошка в ударной волне достаточно велики. Так, электропроводность ударно-сжатого медного порошка заметно больше, чем у алюминиевого порошка, использовавшегося ранее в качестве рабочего вещества в методе ударно-волновой магнитной кумуляции. Поэтому медный порошок может быть использован для целей магнитной кумуляции. Вместе с тем высокие значения электропроводности реализуются лишь при низких ударных давлениях, а при росте давления электропроводность порошка заметно понижается. Так же не ясно, достаточна ли элек-

трическая прочность порошка перед фронтом ударной волны в сверхсильном магнитном поле. Возможно, что для использования медного порошка потребуются его дополнительное пассивирование. Поэтому данный вывод нуждается в подтверждении в ходе специальных экспериментов по магнитной кумуляции.

Ценность использования смеси медного порошка с инертными разбавителями (такими, как стеклянные микросферы) для целей магнитной кумуляции представляется сомнительной. Слишком сильным оказывается падение электропроводности при не очень существенном увеличении пористости и коэффициента сжатия. Более перспективным является разбавление порошка легким проводящим материалом.

Автор благодарит К. К. Маевского за предоставленные материалы по расчету ударного сжатия порошков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Прюммер Р.** Обработка порошкообразных материалов взрывом. — М.: Мир, 1990.
2. **Batsanov S. S.** Effects of Explosions on Materials: Modification and Synthesis Under High-Pressure Shock Compression. — New York; Berlin; Heidelberg: Springer Verlag, 1994.
3. **Дремин А. Н., Похил П. Ф., Арифов М. И.** Влияние алюминия на параметры детонации тротила // Докл. АН СССР. — 1960. — Т. 131, № 5. — С. 1140–1142.
4. **Анискин А. И.** Детонация взрывчатых веществ с алюминием // Детонация и ударные волны. — Черноголовка, 1986. — С. 26–32.
5. **Гришкин А. М., Дубнов Л. В., Давыдов В. Ю., Левшина Ю. А., Михайлов Т. Н.** Влияние добавок порошкообразного алюминия на параметры детонации мощных ВВ // Физика горения и взрыва. — 1993. — Т. 29, № 2. — С. 115–117.
6. **Имховик Н. А., Соловьев В. С.** Окисление дисперсного алюминия в продуктах детонации конденсированных ВВ // 21-й Международный пиротехнический семинар, 11–15 сентября 1995 г., Москва, Россия. — С. 316–331.
7. **Ермолаев Б. С., Хасаинов Б. А., Боден Ж., Прель А.-Н.** Поведение алюминия при детонации вторичных ВВ. Сюрпризы и интерпретации // Хим. физика. — 1999. — Т. 18, № 6. — С. 60–69.
8. **Архипов В. И., Махов М. Н., Пепекин В. И., Щетинин В. Г.** Исследование детонации алюминизированных ВВ // Хим. физика. — 1999. — Т. 18, № 12. — С. 53–57.
9. **Биченков Е. И., Гилев С. Д., Трубачев А. М.** Ударно-индуцированные волны проводимости в электрофизическом эксперименте // ПМТФ. — 1989. — № 2. — С. 132–145.
10. **Gilev S. D.** Model of shock-wave magnetic cumulation // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2009. — V. 4, N 2. — 025501 (6p).
11. **Гилев С. Д.** Электропроводность металлических порошков при ударном сжатии // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41, № 5. — С. 128–139.
12. **Гилев С. Д.** Электродный датчик — инструмент для исследования ударного сжатия и металлизации вещества // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 5. — С. 116–125.
13. **Гилев С. Д.** Измерение электропроводности конденсированного вещества в ударных волнах (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 4. — С. 3–23.
14. **Физика взрыва** / под ред. К. П. Станюковича. — 2-е изд. — М.: Наука, 1975.
15. **Альтшулер Л. В., Баканова А. А., Дудолов И. П., Дынин Е. А., Трунин Р. Ф., Чекин Б. С.** Ударные адиабаты металлов. Новые данные, статистический анализ и общие закономерности // ПМТФ. — 1981. — № 2. — С. 3–34.
16. **Высокоскоростные ударные явления** / под ред. Р. Кинслоу. — М.: Мир, 1973.
17. **Трунин Р. Ф., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В., Симаков Г. В.** Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. — 2-е изд. — Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ, 2006.
18. **Кинеловский С. А., Маевский К. К.** Простая модель расчета ударных адиабат порошковых смесей // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 6. — С. 101–109.
19. **Гаранин С. Ф., Мамышев В. И.** Остывание замагниченной плазмы на границе со взрывающейся металлической стенкой // ПМТФ. — 1990. — № 1. — С. 30–37.
20. **Бакулин Ю. Д., Куропатенко В. Ф., Лучинский А. В.** Магнитогидродинамический расчет взрывающихся проводников // Журн. техн. физики. — 1976. — Т. 46, № 9. — С. 1963.
21. **Rudenko V. V., Shaburov M. V.** User software MAG for personal computers as a tool for numerical simulation of one-dimensional magnetohydrodynamic flows // Megagauss X: Proc. of the 10th Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics / M. von Ortenberg (Ed.). — Berlin: Humboldt Univ. at Berlin, 2005. — P. 321–324.
22. **Таблицы физических величин: справочник** / под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976.

Поступила в редакцию 1/IV 2012 г.