

ЭЛЕКТРОДНЫЙ ДАТЧИК — ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНОГО СЖАТИЯ И МЕТАЛЛИЗАЦИИ ВЕЩЕСТВА

С. Д. Гилев

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

Для исследования конденсированных веществ, приобретающих при ударном сжатии высокую проводимость, используется электродный датчик массовой скорости. В веществе располагаются тонкие металлические электроды. Ударная волна распространяется по веществу вдоль электродов в поперечном магнитном поле. Движущееся проводящее вещество замыкает электроды и генерирует на них ЭДС. Для обоснования принципа действия электродного датчика выполнены измерения электропроводности порошков селена и алюминия. Высокая электропроводность порошков (до $\approx 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) позволяет использовать электродный датчик для определения кинематических характеристик ударной волны. Напряжение на электродах пропорционально среднему значению массовой скорости в зондирующем проводящем слое, располагающемся непосредственно за ударным фронтом. Введение в измерительную ячейку дополнительных электродов позволяет найти волновую скорость. Данная техника использована для построения ударной адиабаты порошков селена и алюминия различной плотности. Полученные экспериментальные данные представлены в виде линейных зависимостей волновой скорости от массовой скорости. Для порошка с крупными частицами толщина зондирующего слоя оказывается сравнимой с шириной ударного перехода. Это открывает возможность использования электродного датчика для исследования структуры ударного перехода и фазы металлизации вещества.

Ключевые слова: ударная волна, ударная адиабата, массовая скорость, электродный датчик, алюминиевый порошок, селен, электропроводность.

ВВЕДЕНИЕ

Ударное сжатие конденсированного вещества сопровождается рядом своеобразных физических явлений, и в частности возникновением заметной электрической проводимости у полупроводников и диэлектриков [1]. В настоящее время экспериментально установлен переход в металлическое состояние кремния [2, 3], серы [4, 5], йода [6], йодистого цезия [7], водорода [8], ксенона, криптона [9], селена [10]. Как следует из общих соображений, металлизация присуща всем полупроводникам и диэлектрикам при достаточно сильном сжатии. Возможны различные физические механизмы металлизации: полиморфный переход, термическая ионизация, уменьшение энергетической щели при сжатии, химическая реакция, изменение фазового состава и т. д. Ударное сжатие порошков металлов также сопровождается существенным изменением электрофизических свойств [11]. Частицы ряда металлических порошков (например, алюминия) в нормальном

состоянии покрыты достаточно прочной оксидной пленкой. Такой порошок насыпной плотности не обладает макроскопической проводимостью. Ударное сжатие порошка приводит к механическому разрушению оксидного слоя и возникновению макроскопической проводимости.

Металлизация при ударном сжатии представляет интерес как с точки зрения фундаментальной науки, так и для ряда приложений (датчики ударной волны, электрические ключи, генерация высоких плотностей электромагнитной энергии). Эффект резкого роста проводимости может быть использован для диагностики ударно-волновых процессов и определения физического состояния вещества при больших плотностях энергии. В частности, движущийся по конденсированному веществу фронт проводимости является удобным инструментом для нахождения кинематических характеристик ударной волны.

Для исследования ударного сжатия конденсированного вещества большое распространение получили электромагнитные методы. Регистрация массовой скорости диэлектриков и металлов осуществляется при помощи электромагнитных датчиков различной конструкции:

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-02-16398).

Таблица 1

Характеристики исследованных веществ

Порошок	Обозначение	Плотность, г/см ³	Форма частиц	Размер частиц, мкм
Порошок селена	Se	3.1	Неправильная	≈500
Алюминиевая пудра ПАП-2	Al-1	0.37	Пластинки	≈20; ≈1
Алюминиевая пудра ПАП-1	Al-2	0.51	—//—	≈20; ≈1
Алюминиевый порошок	Al-3*	1.48	Сферическая	20 ÷ 32
Алюминиевый порошок	Al-4*	1.49	—//—	32 ÷ 40
Алюминиевый порошок	Al-5*	1.23	—//—	100 ÷ 150
Алюминиевый порошок	Al-6*	1.37	—//—	100 ÷ 160

Примечание. *Порошки получены разделением на фракции полидисперсного алюминиевого порошка ПА-4.

фарадеевский фольговый датчик [12, 13], осесимметрический магнитный датчик [14, 15] и его варианты [16–19]. В классическом фарадеевском датчике [12, 13] тонкая фольга располагается между слоями диэлектрика во внешнем магнитном поле и при помощи электрических выводов соединяется с осциллографом. В осесимметрических датчиках [14–19] исследуемый металлический проводник не имеет электрического контакта с регистрирующей катушкой. Магнитное поле создается постоянным магнитом [14, 15] или специальной катушкой с током [16–19]. Бесконтактные схемы используются для исследования диэлектриков [18], металлов [14–17], металлических порошков [19]. Недостатками бесконтактного метода являются меньшее пространственное разрешение и более сложная технология обработки входных данных.

В настоящей работе для диагностики ударного сжатия конденсированных веществ предлагается новый электромагнитный метод, основанный на свойстве большой группы материалов (диэлектрики, полупроводники, порошки металлов) приобретать при ударном сжатии заметную проводимость. Метод используется для определения кинематических характеристик ударной волны в порошках. В табл. 1 приведены основные характеристики исследованных материалов. Применялись промышленные порошки насыпной плотности в состоянии поставки, а также выделенные из них отдельные фракции.

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОРОШКОВ СЕЛЕНА И АЛЮМИНИЯ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

Для обоснования принципа действия электродного датчика необходима информация об электропроводности исследуемого вещества. В данном параграфе приводятся результаты измерений электропроводности порошка селена и алюминиевой пудры ПАП-2 при ударном сжатии. Использовалась электродконтакт-

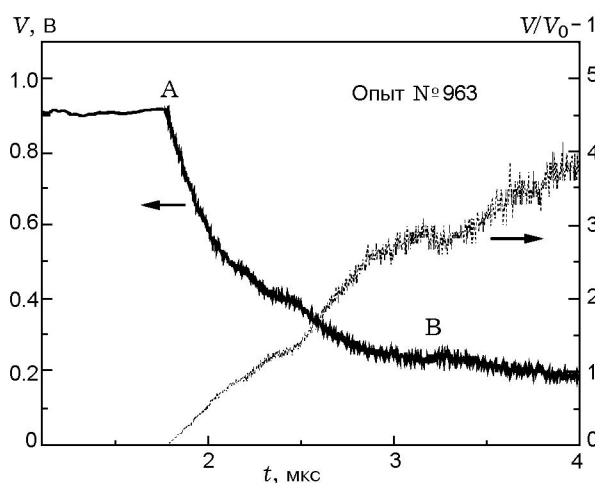


Рис. 1. Осциллограмма опыта по измерению электропроводности алюминиевой пудры ПАП-2 (левая шкала) и результаты ее обработки (правая шкала):

давление ударной волны 1.3 ГПа, электропроводность $(1.0 \pm 0.05) \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$; А — момент входа ударной волны в образец, В — расчетный момент ее выхода из образца

Таблица 2

Результаты опытов по измерению электропроводности порошков селена и алюминия

Вещество	Номер опыта	Взрывная система	p , ГПа	σ , Ом ⁻¹ · см ⁻¹
Se	629	ТГ(30)-ст(4.3)-к(0.1)-Se(3.8)-г(5.9)	23.8	$(7.3 \pm 1.4) \cdot 10^3$
	787	Т(60)-г(4.6)-к(0.1)-Se(3.5)-т(4.5)	17.3	$(9.7 \pm 1.2) \cdot 10^3$
	941	тэн(183)-г(4.6)-к(0.1)-Se(3.6)-т(4.5)	9.1	$(1.3 \pm 0.1) \cdot 10^3$
	946	Тп(219)-Д(5.9)-г(4.7)-к(0.1)-Se(3.7)-т(4.5)	5.5	90 ± 30
	952*	тэн(220)-Cu(6)-г(5)-Se(5.2)-г(5)	3.6	2.6 ± 0.4
Al-1	956	ТГ(60)-г(5)-к(0.1)-Al(3.1)-т(5.6)	5.9	$(3.7 \pm 0.4) \cdot 10^3$
	959	Т(60)-г(3)-к(0.1)-Al(3.1)-г(5.1)	4.1	$(4.2 \pm 0.4) \cdot 10^3$
	960	ТГ(60)-Cu(6.2)-г(3)-к(0.1)-Al(3.1)-г(5.1)	2.7	$(7.5 \pm 0.8) \cdot 10^3$
	961	Т(60)-Cu(6.4)-г(3)-к(0.1)-Al(3.1)-г(5.1)	1.7	$(1.15 \pm 1) \cdot 10^4$
	963	тэн(218)-Д(5.9)-г(3)-к(0.1)-Al(3)-г(5.2)	1.3	$(1 \pm 0.05) \cdot 10^4$
	964	тэн(225)-Cu(6.4)-г(3)-к(0.1)-Al(3.1)-г(5.1)	0.6	$(2.1 \pm 0.1) \cdot 10^3$
	959	ТГ(60)-г(3)-к(0.1)-Al(3.1)-г(5.1)	5.9	$(5 \pm 0.4) \cdot 10^3$
	971	гекс(220)-Cu(6.4)-г(3)-к(0.1)-Al(3.1)-г(5)	0.9	$(8.3 \pm 1.2) \cdot 10^3$
	972	ТГ(60)-г(5.1)-Al(5.2)-к(0.1)-г(5.1)	5.9	$(2.8 \pm 0.5) \cdot 10^3$
	976	Т(60)-Д(6)-г(3.1)-к(0.1)-Al(3.1)-г(5.1)	3.3	$(5.2 \pm 0.5) \cdot 10^3$

Примечания. *Шунт выносной, сопротивление 5.8 Ом. Взрывчатые вещества: Т — тротил литой, Тп — порошок тротила, ТГ — сплав тротил/гексоген 50/50, тэн — порошковый тэн, гекс — порошковый гексоген. Материалы слоев: ст — стеклотекстолит, к — константан, г — гетинакс, т — текстолит, Cu — медь, Д — сплав Д16Т. Цифры в скобках после обозначения материала — толщина слоя, мм

ная шунтовая схема [3, 10, 11]. Конструкция измерительной ячейки, постановка опытов и процедура обработки первичных данных описаны в [11], поэтому здесь не обсуждаются.

На рис. 1 показаны характерная осциллограмма опыта с алюминиевой пудрой ПАП-2 и результат ее обработки. В момент времени А ударная волна входит в исследуемое вещество. Как видно из рисунка, распространение ударной волны приводит к падению регистрируемого напряжения V . Это свидетельствует о появлении и росте проводящей области. Результаты обработки осциллограммы в переменных $(V_0/V - 1, t)$ близки к прямой линии (V_0 — начальное напряжение). Это означает, что электропроводность ударно-сжатого вещества однородна за ударным фронтом [11].

Данные о постановке опытов и результаты измерений электропроводности σ сведены в табл. 2. Диаметр зарядов взрывчатых веществ составлял: литых — 75 мм, порошковых — 63 мм. Давление ударной волны p рассчитывалось методом ударных импедансов на

основе известных ударных адиабат материалов. Для порошка селена и алюминиевой пудры использовались ударные адиабаты, полученные в настоящей работе (см. ниже). Результаты измерения электропроводности представлены на рис. 2 в виде зависимости от давления ударной волны.

Как видно из рис. 2, а, электропроводность порошка селена монотонно растет при увеличении ударного давления, достигая значения $\sigma \approx 10^4$ Ом⁻¹ · см⁻¹. Столь высокую электропроводность селена можно объяснить сильным разогревом ударно-сжимаемого порошка, приводящим к плавлению и металлизации [10].

Зависимость электропроводности алюминиевой пудры ПАП-2 от давления ударной волны (рис. 2, б) отличается немонотонным характером. Электропроводность возрастает до $\sigma \approx 1.2 \cdot 10^4$ Ом⁻¹ · см⁻¹ при $p = 1.7$ ГПа и падает при дальнейшем росте давления. Немонотонный характер изменения электропроводности пудры может быть объяснен следующим образом. При росте ударного давления проис-

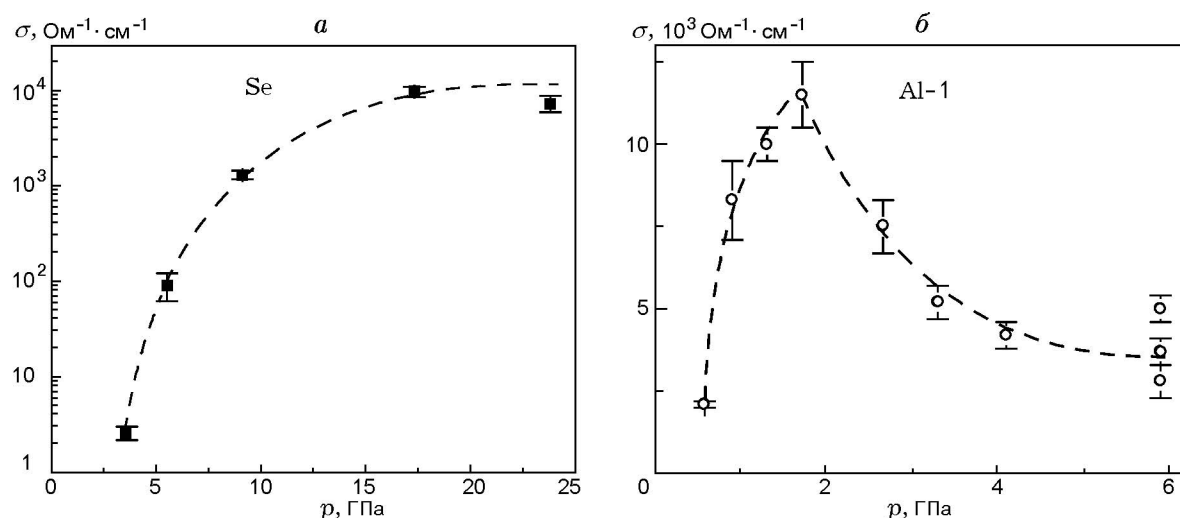


Рис. 2. Зависимость электропроводности порошка селена (а) и алюминиевой пудры ПАП-2 (б) от давления ударной волны

ходит термическое разложение парафинов и механическое разрушение поверхностных пленок. В результате в образце возникает контактная макропроводимость. Дальнейший рост давления приводит к увеличению температуры образца, что негативно влияет на электропроводность.

Найденная зависимость $\sigma(p)$ качественно соответствует результатам опытов [11] с алюминиевой пудрой ПАП-1. Электропроводность пудры ПАП-2 меньше, чем для ПАП-1, что объясняется различной плотностью порошков. В единице объема пудры ПАП-2 содержится меньше вещества, которое при ударном сжатии испытывает больший разогрев.

В целом для исследованных порошков (а также ряда других материалов [3–11]) возникающая при ударном сжатии электропроводность достаточно высока ($\sigma \gtrsim 10^3 \text{Om}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$). Как следует из проведенных опытов (а также из [3, 10, 11]), появление проводимости соответствует моменту прихода ударной волны на образец. Данная особенность позволяет использовать явление ударно-индуцированной проводимости для диагностики ударного сжатия.

ЭЛЕКТРОДНЫЙ ДАТЧИК: СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ И ЕЕ АНАЛИЗ

Схема простейшего электродного датчика показана на рис. 3. Плоская ударная волна входит в исследуемое вещество из диэлектрика. Перпендикулярно ударному фронту в образце

и диэлектрике расположено несколько тонких металлических электродов (на рисунке — три электрода). Крайние электроды А более длинные, средний электрод В короче крайних (на несколько миллиметров) и соединен с одним из них. Перед опытом в веществе создается однородное поперечное магнитное поле. Первоначально вещество является непроводящим. При ударном сжатии исследуемого вещества обра-

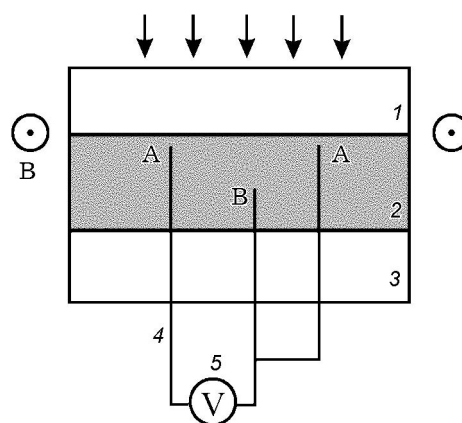


Рис. 3. Схема измерения массовой и волновой скоростей в металлизующемся веществе электродным датчиком:

1, 3 — диэлектрик, 2 — исследуемое вещество, 4 — электроды (тонкая медная проволока), 5 — осциллограф; плоская ударная волна распространяется во внешнем магнитном поле сверху вниз; осциллограф регистрирует напряжение с электродов

зуется проводящая зона, которая при подходе к электродам А замыкает их. Возникающая на электродах ЭДС индукции регистрируется осциллографом.

Используя закон электромагнитной индукции для контура, включающего согласно [20, с. 443] движущиеся частицы вещества, электроды и входное сопротивление осциллографа, нетрудно получить формулу для ЭДС индукции

$$\varepsilon = uBl, \quad (1)$$

где u — массовая скорость проводящего вещества, B — магнитное поле, l — расстояние между электродами. Регистрируемое напряжение зависит от массовой скорости вещества в зондирующем слое. При высокой электропроводности вещества существование зондирующего слоя обусловлено электромагнитным скин-эффектом. Характерную толщину скин-слоя x_* в ударно-сжимаемом безграничном веществе можно определить из условия равенства основных электродинамических времен: времени электромагнитной диффузии $\mu_0\sigma x_*^2$ и времени конвекции вещества относительно ударного фронта $x_*/(D-u)$ (μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, D — скорость ударного фронта). Подобные качественные соображения, подтверждаемые аналитическим решением задач о структуре электромагнитного поля в ударно-сжимаемом веществе [21, 22], приводят к формуле

$$x_* = \frac{1}{\mu_0\sigma(D-u)}. \quad (2)$$

Пусть ось x направлена в глубь ударно-сжатого вещества и $x=0$ соответствует фронту ударной волны. Тогда в проводящем веществе при $x \ll x_*$ преобладает диффузионный механизм изменения магнитного поля, при $x \gg x_*$ — конвективный механизм. Согласно (2) толщина скин-слоя в ударно-сжимаемом веществе определяется электропроводностью. Для ударных волн, генерируемых зарядами конденсированных взрывчатых веществ, она составляет для сплошной меди ≈ 4 мкм, для металлических порошков — от десятков микрон до нескольких миллиметров.

На практике регистрируемое напряжение на электродах зависит от соотношения двух размеров — толщины скин-слоя x_* и длины электродов L , находящихся в данный момент

в проводящем веществе. Длина L меняется при движении ударной волны вдоль электродов.

Пусть $x_* \gg L$. Это означает, что электропроводность вещества невелика (или время движения волны вдоль электродов мало). В этом случае толщина электромагнитного скин-слоя велика, электрическое поле в проводящем веществе однородно и размер зондирующего слоя определяется текущей длиной L . Пусть профили массовой скорости $u(x)$ и электропроводности $\sigma(x)$ стационарны. Тогда в рамках электротехнической модели нетрудно получить выражение для регистрируемой массовой скорости

$$u = \frac{\int_0^L u(x)\sigma(x)dx}{\int_0^L \sigma(x)dx}.$$

Экспериментальные данные (см. предыдущий параграф статьи, а также [3, 10, 11]) показывают, что в отсутствие химических реакций электропроводность вещества за фронтом ударной волны однородна. В этом случае регистрируемое значение u является средней массовой скоростью на текущей длине электродов, располагающихся в сжатом веществе.

Пусть $x_* \ll L$. Это означает, что электропроводность вещества велика (или время движения волны большое). В этом случае электрическое поле в проводящем веществе однородно лишь в области скин-слоя x_* . Слой толщиной x_* экранирует возмущения магнитного поля из глубины проводящего вещества. Измеряемое значение массовой скорости соответствует проводящей зоне толщиной x_* , перемещающейся по веществу с волновой скоростью.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДНОГО ДАТЧИКА

Метод электродного датчика применен для определения ударной сжимаемости порошков селена и алюминия. Цилиндрическая измерительная ячейка включала от двух до пяти электродов. В последнем случае четыре соседних электрода гальванически соединялись между собой. Многоэлектродная система позволила в одном опыте измерить волновую скорость на различных пространственных базах ($1 \div 10$ мм). Толщина исследуемых образцов $5 \div 10$ мм, диаметр $50 \div 70$ мм. В качестве электродов использовался медный провод диамет-

ром 0.5 мм. Расстояние между крайними электродами $20 \div 30$ мм. Поперечное магнитное поле создавалось разрядом конденсаторной батареи на катушки Гельмгольца (стальной прутки квадратной формы со стороной 500 мм, расстояние между витками 300 мм). Время роста тока в катушках составляло 115 мкс, максимальный ток ≈ 80 кА. Это обеспечивало в центре системы магнитное поле, равное ≈ 0.15 Тл. Магнитное поле регистрировалось индуктивным датчиком, расположенным непосредственно у измерительной ячейки. Неоднородность магнитного поля в области измерений не превышала 1 %. Ударное нагружение измерительной ячейки осуществлялось зарядами конденсированных взрывчатых веществ (диаметр $65 \div 75$ мм, длина $60 \div 200$ мм), которые находились в контакте с ячейкой.

На рис. 4 показана характерная осциллограмма, полученная в опыте с трехэлектродной ячейкой, заполненной алюминиевой пудрой. Напряжение возникает в момент прихода ударной волны на крайние электроды А. По регистрируемому напряжению, используя (1), можно найти массовую скорость в процессе движения волны. В момент прихода ударной волны на центральный электрод В регистрируемое напряжение уменьшается. Промежуток времени между моментами А и В на рис. 4 определяет волновую скорость. В проведен-

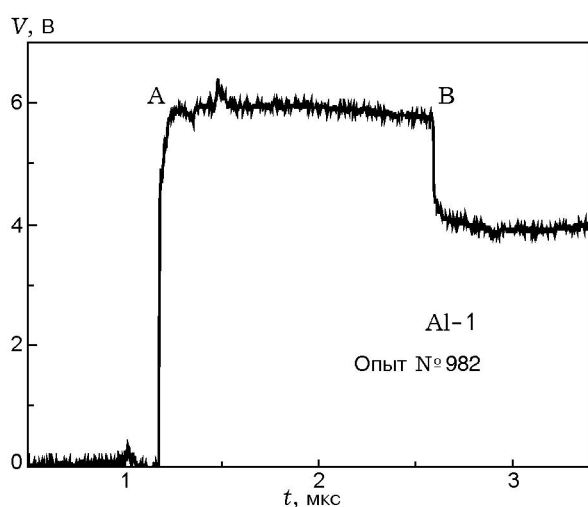


Рис. 4. Осциллограмма опыта с алюминиевой пудрой ПАП-2 при использовании трехэлектродной системы:

А — момент прихода ударной волны на крайние электроды, В — момент ее прихода на средний электрод; $u \approx 2.82$ км/с, $D \approx 3.53$ км/с

ных опытах погрешность определения массовой скорости составляла ≈ 6 %, волновой скорости ≈ 2 %.

Используя характерные значения электропроводности (металлический селен — $\sigma \approx 5 \times 10^3$ Ом $^{-1} \cdot$ см $^{-1}$, алюминиевая пудра — $\sigma \approx 7 \cdot 10^3$ Ом $^{-1} \cdot$ см $^{-1}$), получаем, что толщина x_* составляет ≈ 1 мм для селена, ≈ 2 мм для алюминиевой пудры, при этом толщина слоя немного варьирует для разных условий нагружения.

На рис. 5 показаны результаты измерения массовой и волновой скоростей электродным датчиком для порошка селена и алюминиевой пудры ПАП-1, ПАП-2. Экспериментальные точки для пудр разных марок оказались очень близки. Из рисунка видно, что зависимости волновой скорости D от массовой скорости u для порошков можно описать линейными функциями. С использованием метода наименьших квадратов получено, что для селена $D = 0.59 + 1.72u$, для алюминиевой пудры ПАП-2 $D = 0.19 + 1.19u$, для алюминиевой пудры ПАП-1 $D = 0.17 + 1.22u$. На рис. 5 показаны также известные экспериментальные данные для алюминиевого порошка плотностью

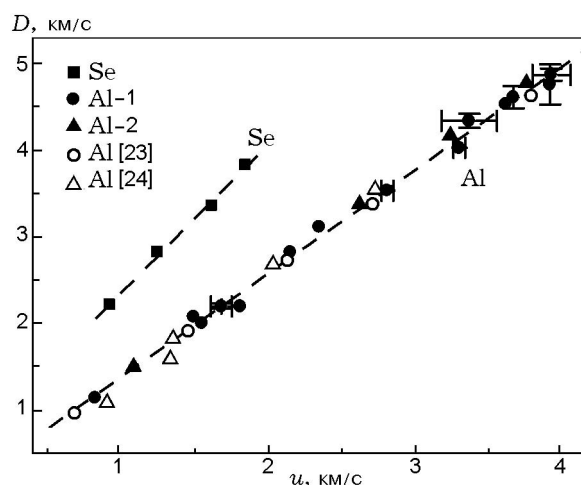


Рис. 5. Экспериментальные данные, полученные при помощи электродного датчика для порошка селена (Se), алюминиевой пудры ПАП-2 (Al-1) и ПАП-1 (Al-2), а также известные данные для алюминиевого порошка плотностью 0.34 г/см 3 [23] и пудры плотностью 0.45 г/см 3 [24]:

штриховая линия — результаты линейной аппроксимации опытных данных для селена и алюминиевой пудры ПАП-2

0.34 [23] и 0.45 г/см³ [24]. Данные [23] получены стандартным методом отражения, данные [24] — более грубым методом рентгенографирования. Результаты проведенных нами измерений для алюминиевой пудры близки к известным [23, 24]. Это подтверждает работоспособность техники электродного датчика.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты демонстрируют возможность применения электродного датчика для исследования ударной сжимаемости металлизующихся веществ. Для подобных материалов классический фольговый датчик [12, 13] неприменим. Новой технике присущ ряд особенностей. В отличие от фольгового датчика, в настоящей схеме проводящая перемычка возникает в процессе ударного сжатия. Массовая скорость измеряется в зондирующем слое, толщина которого зависит от электропроводности металлизующегося вещества. По мере движения ударной волны зондирующий слой перемещается по исследуемому веществу со скоростью ударного фронта, давая актуальную информацию о массовой скорости. Если массовая скорость за ударным фронтом неоднородна, а электропроводность невелика, то регистрируется среднее значение скорости по текущей толщине слоя.

Известные методы измерения массовой скорости [12–18] дают информацию для слоя движущегося вещества, состоящего из тех же материальных элементов. Полученные таким образом данные соответствуют методу Лагранжа для описания движения сплошной среды. Техника электродного датчика дает информацию из зондирующего слоя, который перемещается относительно материальных элементов вещества. Тем самым реализуется подход Эйлера к описанию движения сплошной среды [25].

Использование техники электродного датчика ограничено требованием заметной проводимости вещества при ударном сжатии. Действительно, необходимо, чтобы электрическое сопротивление проводящего слоя R было много меньше входного сопротивления осциллографа. Взяв для оценки $R \approx 0.5$ Ом, толщину слоя ≈ 1 мм, нетрудно получить условие на электропроводность исследуемого вещества: $\sigma > 20$ Ом⁻¹·см⁻¹. Это значение σ на несколько порядков меньше электропроводности металлов,

ударно-сжимаемых полупроводников и некоторых диэлектриков [1, 3–11], что позволяет использовать метод для широкого класса материалов. Метод применим для слабопроводящих сред, где бесконтактная техника не эффективна.

Пространственное разрешение измерений в поперечном направлении (относительно движения ударной волны) определяется расстоянием между электродами. Это расстояние может быть достаточно малым, поэтому пространственное разрешение электродного датчика лучше, чем для бесконтактной техники (в последнем случае происходит осреднение массовой скорости по большой площади движущегося проводника).

Приведенные на рис. 5 данные для порошка алюминия [23] получены методом отражения. В данном методе ударная адиабата эталонного материала зеркально отражается для нахождения состояния вещества в проходящей волне. При большой разнице ударных импедансов эталона и исследуемого вещества использование зеркального отражения требует серьезного обоснования. Как показано в [26], в этом случае погрешность определения массовой скорости может достигать 10 ÷ 15 %. Использование электродного датчика для определения ударной сжимаемости высокопористых веществ имеет ряд преимуществ. Техника электродного датчика носит абсолютный характер. Массовая скорость находится из закона электромагнитной индукции. Измерения не требуют калибровки или предварительного определения свойств эталонного материала.

Особенности работы электродного датчика позволяют использовать его для исследования структуры ударного перехода и процесса ударно-волновой металлизации. Проиллюстрируем это утверждение несколькими примерами.

На рис. 6 показаны записи массовой скорости в опытах с алюминиевыми порошками, имеющими различный размер частиц, — мелким порошком Al-3 и крупным порошком Al-5 (см. табл. 1). В обоих случаях применялась одинаковая измерительная ячейка с двумя электродами. В качестве диэлектрика (3 на рис. 3) использовался пенопласт (плотность ≈ 0.1 г/см³).

Как видно из рис. 6, во время движения ударной волны по веществу массовая скорость практически постоянна. Для мелкого порошка

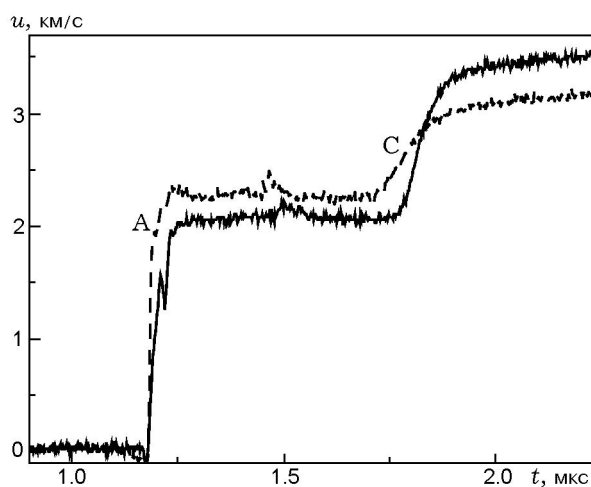


Рис. 6. Результаты измерения массовой скорости в опытах с алюминиевым порошком:

штриховая линия — мелкий порошок (Al-3), сплошная — крупный порошок (Al-5); А — момент прихода ударной волны на электроды, С — момент ее выхода в пенопласт

регистрируется бóльшая, чем для крупного порошка, массовая скорость. Выход ударной волны из порошка в среду с малым ударным импедансом (пенопласт) сопровождается ростом массовой скорости (для мелкого порошка — 32 %, для крупного порошка — 65 %).

На рис. 7 представлены результаты одновременной регистрации волновой и массовой скоростей электродным датчиком в опытах с алюминиевыми порошками, различающимися размером частиц. Здесь же показаны зависимости волновой скорости от массовой, найденные методом Оха — Персона [27] для порошков нескольких плотностей. Как видно из рисунка, данные измерений для мелких порошков (Al-3, Al-4) хорошо соответствуют модельной ударной адиабате для этой же плотности. Данные для крупных порошков (Al-5, Al-6) при большом давлении существенно расходятся с ударной адиабатой.

Представленные на рис. 6, 7 результаты измерений можно объяснить, исходя из особенностей работы электродного датчика. Электропроводности мелкого и крупного порошков достаточно близки [11]. Толщина зондирующего слоя в обоих случаях составляет $x_* \approx 0.1$ мм. В сильных ударных волнах толщина ударного перехода близка к размеру частицы a [28]. Для мелкого порошка $a < x_*$ и электродный датчик регистрирует массовую скорость вещества за ударным фронтом. Для крупного порошка

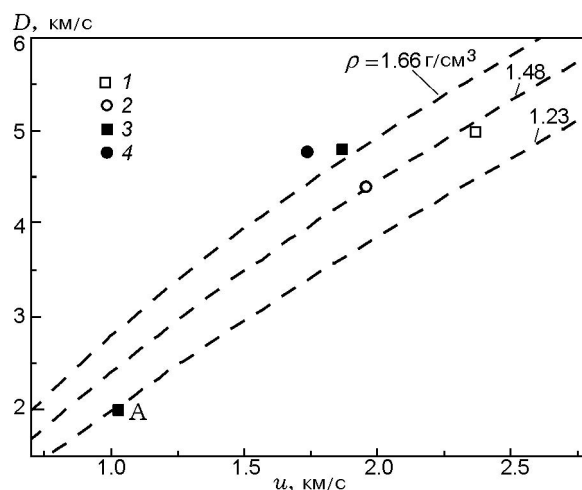


Рис. 7. Экспериментальные данные по ударному сжатию алюминиевых порошков с различным размером частиц:

1 — $a = 20 \div 32$ мкм (Al-3), 2 — $a = 32 \div 40$ мкм (Al-4), 3 — $a = 100 \div 150$ мкм (Al-5), 4 — $a = 100 \div 160$ мкм (Al-6); штриховые линии — зависимости волновой скорости от массовой, найденные методом Оха — Персона [27] для алюминиевых порошков различной плотности

$a > x_*$. В этом случае регистрируемое напряжение зависит от структуры ударного перехода и фазы включения проводимости.

Зону ударного перехода можно представить как область непрерывного изменения плотности, массовой скорости, давления от невозмущенных значений до соответствующих сжатому веществу. При возрастании плотности в этой зоне в веществе может возникать макроскопическая проводимость. (Для этого требуется разрушить тонкие изолирующие пленки на поверхности металлических частиц.) Регистрируемое электродным датчиком напряжение определяется средним значением массовой скорости на базе x_* , поэтому включение проводимости на фазе неполного сжатия в зоне ударного перехода приводит к уменьшению регистрируемого значения массовой скорости. Определяемая таким образом массовая скорость будет ниже скорости в сжатом веществе.

В опыте с крупным порошком (см. рис. 6) получено значение массовой скорости $u_* \approx 2.06$ км/с, расчетная массовая скорость в сжатом веществе $u \approx 2.69$ км/с. Значению u_* соответствует эффективная плотность ≈ 2.1 г/см³, что составляет ≈ 78 % от плотности сжатого вещества. Таким образом, опыты с круп-

ным порошком (см. рис. 6, 7) показывают, что включение проводимости происходит в фазе неполного сжатия в зоне ударного перехода. Такая интерпретация экспериментальных записей не противоречит результатам измерений при малом ударном давлении (точка А на рис. 7). В слабой ударной волне достигается меньшая плотность вещества и начало металлизации сдвигается к задней границе ударного перехода. Поэтому регистрируемая электродным датчиком массовая скорость оказывается близкой к скорости сжатого вещества и экспериментальная точка А располагается на ударной адиабате вещества.

Таким образом, использование электродного датчика позволяет получить информацию о фазе появления ударно-индуцированной проводимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования ударной сжимаемости конденсированных веществ может быть полезен электродный датчик. Принцип работы новой техники основан на свойстве большой группы материалов приобретать высокую проводимость при ударном сжатии. По сравнению с бесконтактными методами [14–19] настоящая техника отличается лучшим пространственным разрешением и простотой обработки данных. Отличительной особенностью метода является возможность непрерывной регистрации массовой скорости за ударным фронтом по мере его движения. Тем самым экспериментально реализуется подход Эйлера к описанию движения сплошной среды. При малой толщине зондирующего слоя возможны измерения массовой скорости в области ударного перехода. Новые качества измерительной техники полезны для диагностики динамики распространения ударной волны и исследования структуры ударно-индуцированной проводимости.

Автор выражает благодарность А. М. Трубачеву за многочисленные обсуждения принципа действия датчика, А. Н. Андрееву за участие в работе в ходе дипломной практики, Н. Г. Скоробогатых за техническую помощь в выполнении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бриш А. А., Тарасов М. С., Цукерман В. А. Электропроводность диэлектриков в сильных ударных волнах // ЖЭТФ. 1960. Т. 38, вып. 1. С. 22–25.
2. Павловский М. Н. Образование металлических модификаций германия и кремния в условиях ударного сжатия // ФТТ. 1967. Т. 9, вып. 11. С. 3192–3197.
3. Gilev S. D., Trubachev A. M. Metallization of silicon in a shock wave: metallization threshold and ultrahigh defect densities // J. Phys.: Condensed Matter. 2004. V. 16, N 46. P. 8139–8153.
4. Набатов С. С., Дремин А. Н., Постнов В. И., Якушев В. В. Измерение электропроводности серы при динамическом сжатии до 400 кбар // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5, вып. 3. С. 143–145.
5. Постнов В. И., Ананьева Л. А., Дремин А. Н. и др. Электропроводность и сжимаемость серы при ударном сжатии // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 4. С. 106–109.
6. Набатов С. С., Дремин А. Н., Постнов В. И., Якушев В. В. Измерение электропроводности конденсированного вещества при многократном ударно-волновом сжатии до одного мегабара // Химическая физика процессов горения и взрыва. Черногловка, 1980. С. 117–119.
7. Гатилов Л. А., Кулешова Л. В. Электропроводность йодистого цезия за фронтом ударной волны при давлениях до 100 ГПа // ФТТ. 1981. Т. 23, вып. 9. С. 2848.
8. Nellis W. J., Weir S. T., Mitchell A. C. Minimum metallic conductivity of fluid hydrogen at 140 GPa (1.4 Mbar) // Phys. Rev. B. 1999. V. 59, N 5. P. 3434–3449.
9. Mochalov M. A., Glukhoedov V. D., Kirshanov S. I., Levedeva T. S. Electric conductivity of liquid argon, krypton and xenon under shock compression up to pressure of 90 GPa // Shock Compression of Condensed Matter-1999 / M. D. Furnish, L. C. Chhabildas, R. S. Nixon (Eds). AIP Press, 2000. P. 983–986.
10. Гилев С. Д. Металлизация селена при ударном сжатии // ЖТФ. 2006. Т. 76, вып. 7. С. 41–47.
11. Гилев С. Д. Электропроводность металлических порошков при ударном сжатии // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 5. С. 128–139.
12. Зайцев В. М., Похил П. Ф., Шведов К. К. Электромагнитный метод измерения скорости продуктов взрыва // Докл. АН СССР. 1960. Т. 132, № 6. С. 1339–1340.
13. Хейс (В. Hayes). Система для измерения скорости частиц вещества с наносекундным разрешением в ударных и детонационных волнах // Приборы для науч. исслед. 1981. № 4. С. 92–102.
14. Hayes В., Fritz J. N. Measurements of mass motion in detonation products by an axially-symmetric electromagnetic technique // Proc. 5th Symp. Intern. on Detonation. Pasadena, 1970. P. 447–454.

15. **Фритц, Морган.** Электромагнитный метод измерения скорости частиц вещества // Приборы для науч. исслед. 1973. № 2. С. 119–125.
16. **Жугин Ю. Н., Крупников К. К.** Индукционный метод регистрации скорости конденсированной среды в ударно-волновых процессах // ПМТФ. 1983. Т. 20, № 1. С. 102–108.
17. **Жугин Ю. Н., Левакова Ю. Л.** Влияние электропроводности и толщины проводящей пластины на регистрируемый сигнал индукционного датчика массовой скорости // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 6. С. 199–209.
18. **Пай В. В., Яковлев И. В., Кузьмин Г. Е.** Исследование ударного сжатия композиционных пористых сред невозмущающим электромагнитным методом // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 2. С. 124–129.
19. **Пай В. В., Лукьянов Я. Л., Яковлев И. В., Кузьмин Г. Е.** Изменение магнитного поля в металлической порошковой среде при ее взрывном компактировании // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 6. С. 164–170.
20. **Тамм И. Е.** Основы теории электричества. М.: Наука, 1989.
21. **Гилев С. Д., Михайлова Т. Ю.** Токовая волна при ударном сжатии вещества в магнитном поле // ЖТФ. 1996. Т. 66, вып. 5. С. 1–9.
22. **Гилев С. Д., Михайлова Т. Ю.** Электромагнитное поле и токовые волны в проводнике, сжимаемом ударной волной в магнитном поле // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 6. С. 153–163.
23. **Трунин Р. Ф., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В., Симаков Г. В.** Экспериментальные данные по ударной сжимаемости и адиабатическому расширению конденсированных веществ. Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ, 2001.
24. **Белошапко А. Г., Букаемский А. А.** Ударная адиабата высокопористого алюминия // Ультрадисперсные материалы. Получение и свойства: Межвуз. сб. / Отв. ред. А. М. Ставер. Красноярск: КрПИ, 1990. С. 28–32.
25. **Седов Л. И.** Механика сплошной среды. М.: Наука, 1976.
26. **Бугаева В. А., Евстигнеев А. А., Трунин Р. Ф.** Анализ расчетных данных по адиабатам расширения меди, железа и алюминия // Теплофизика высоких температур. 1996. Т. 34, № 5. С. 684–690.
27. **Oh K.-H., Persson P.-A.** Equation of state for extrapolation of high-pressure shock Hugoniot data // J. Appl. Phys. 1989. V. 65, N 10. P. 3852–3856.
28. **Нестеренко В. Ф.** Импульсное нагружение гетерогенных материалов. Новосибирск: Наука, 1992.

Поступила в редакцию 28/VI 2006 г.