

Ударная сжимаемость порошков меди и олова высокой пористости

© С.Д. Гилев

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: gilev@hydro.nsc.ru

(Поступило в Редакцию 14 февраля 2014 г.)

При помощи магнитоэлектрического метода выполнены измерения массовой и волновой скоростей в образцах меди и олова экстремально высокой пористости. Построены зависимости волновой скорости от массовой для меди с плотностью 0.76 и 0.54 g/cm³ (пористость 12 и 16 соответственно), а также для олова с плотностью 1.9 g/cm³ (пористость 3.9). Полученные данные позволяют с использованием законов сохранения найти другие гидродинамические параметры сжатого вещества (плотность, давление, удельная внутренняя энергия). Найдены параметры состояния меди и олова в неисследованной ранее области $P-V-T$ -состояний металлов, соответствующей малым плотностям и большим значениям удельной внутренней энергии.

Введение

Ударное сжатие порошков позволяет достичь высоких плотностей внутренней энергии (> 1 kJ/g), что важно для определения состояния вещества в этой области и, в частности, для экспериментальной проверки существующих теоретических моделей [1,2]. Максимальные плотности внутренней энергии достигаются при использовании порошков предельно низкой плотности. Имеющиеся на сегодняшний день данные по ударному сжатию порошков металлов ограничены следующими значениями плотности ρ_0 (и соответствующими коэффициентами пористости m): медь — $\rho_0 \geq 0.89$ g/cm³ ($m \leq 10$), алюминий — $\rho_0 \geq 0.33$ g/cm³ ($m \leq 8$), олово — $\rho_0 \geq 4$ g/cm³ ($m \leq 1.8$), свинец — $\rho_0 \geq 4.7$ g/cm³ ($m \leq 2.4$), магний — $\rho_0 \geq 0.83$ g/cm³ ($m \leq 2.1$), никель — $\rho_0 \geq 0.315$ g/cm³ ($m \leq 28$) [3]. (Под пористостью m здесь и далее понимается отношение плотности сплошного вещества к начальной плотности пористого образца при нормальных условиях.) Наибольший массив данных по сжатию высокопористых образцов существует для никеля, где в экспериментах Р.Ф. Трунина с коллегами максимальная пористость достигала 28. Для проверки уравнений состояний вещества необходимо иметь набор экспериментальных данных, охватывающих максимально широкий диапазон состояний, поэтому новые данные о характеристиках сжатого вещества с экстремально высокой пористостью крайне важны.

Настоящая работа посвящена исследованию порошков меди и олова предельно низкой плотности. Это позволяет достичь неисследованной области физических состояний в области высоких плотностей энергии.

Экспериментальный метод

Классическим методом определения ударной сжимаемости конденсированных веществ является метод отражения [4]. При помощи этого метода получен огромный массив экспериментальных данных по ударной сжима-

емости разнообразных материалов [3]. Для высокопористых веществ метод отражения может приводить к значительным погрешностям [5] (примерно на порядок величины больше, чем для сплошных материалов). Это обусловлено неопределенностью состояния эталонного материала при сильной разгрузке в опытах с высокопористыми веществами.

В настоящей работе для определения ударной сжимаемости используется магнитоэлектрический метод измерения массовой и волновой скоростей [6,7]. Метод основывается на особенностях ударного сжатия пористых материалов, которые первоначально являются непроводящими, но приобретают заметную электрическую проводимость при сжатии. Метод не требует применения эталонных материалов и основывается на использовании закона электромагнитной индукции.

Схема измерений показана на рис. 1. Заряд конденсированного взрывчатого вещества возбуждает плоскую ударную волну в диэлектрической пластине и далее в исследуемом веществе. В исследуемом веществе располагаются тонкие металлические электроды и создается

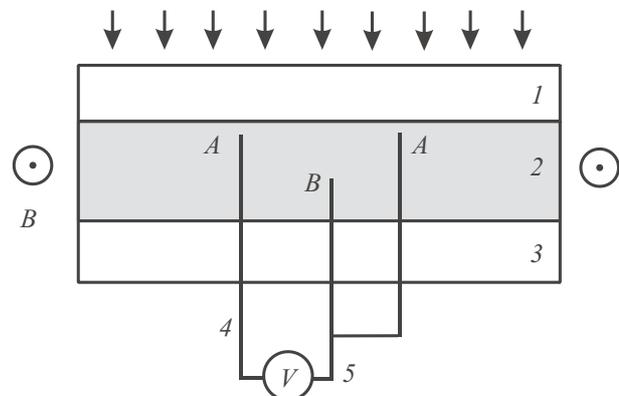


Рис. 1. Схема измерений массовой и волновой скоростей в ударно-сжимаемом образце: A, B — тонкие металлические электроды, 1, 3 — диэлектрик, 2 — исследуемое вещество, 4 — электроды, 5 — осциллограф.

поперечное магнитное поле. При движении ударной волны электроды замыкаются. При этом на электродах, согласно закону электромагнитной индукции, возникает напряжение, пропорциональное массовой скорости

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

где u — массовая скорость проводящего вещества за ударным фронтом, B — магнитное поле, l — расстояние между электродами. При движении ударной волны вдоль длинных электродов величина u в формуле (1) представляет собой среднее значение массовой скорости на пространственной базе, равной толщине скин-слоя в металлизующемся веществе $x_* \approx 1/\mu_0\sigma(D-u)$, где μ_0 — магнитная постоянная, σ — электропроводность сжатого вещества, D — скорость ударной волны. Приход ударной волны к третьему электроду приводит к резкому падению регистрируемого напряжения, что используется для определения волновой скорости на пространственной базе между электродами A и B . Подробное описание метода дано в [6,7].

Результаты измерений

Исследовались порошки металлов, изготовленные ЗАО ФК Кристалл, г. Екатеринбург: медный порошок (плотность 0.54–0.76 г/см³, средний размер частиц 300 нм), оловянный порошок ПОМД (плотность 1.9 г/см³, средний размер частиц 4.5 мкм).

На рис. 2 приведена характерная экспериментальная осциллограмма. Метки A , B и C отмечают моменты прихода ударной волны соответственно на первую пару электродов, на третий электрод и на диэлектрическую стенку (рис. 1). При движении ударной волны вдоль электродов напряжение немного уменьшается. Данный факт обусловлен падением массовой скорости от ударного фронта вглубь сжатого вещества. Для определения

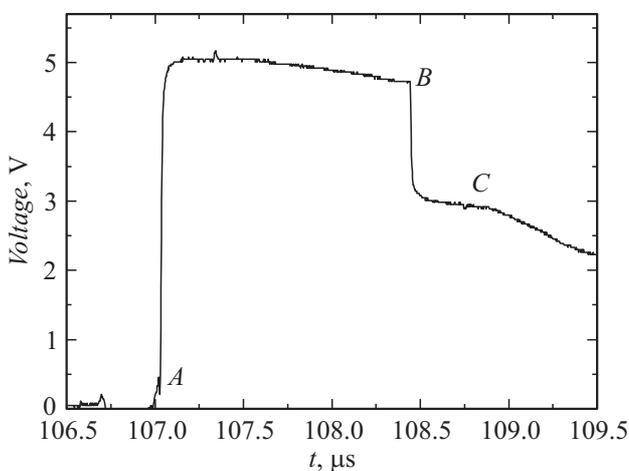


Рис. 2. Запись напряжения с измерительной ячейки, полученная в опыте по ударному сжатию медного порошка с плотностью 0.76 г/см³.

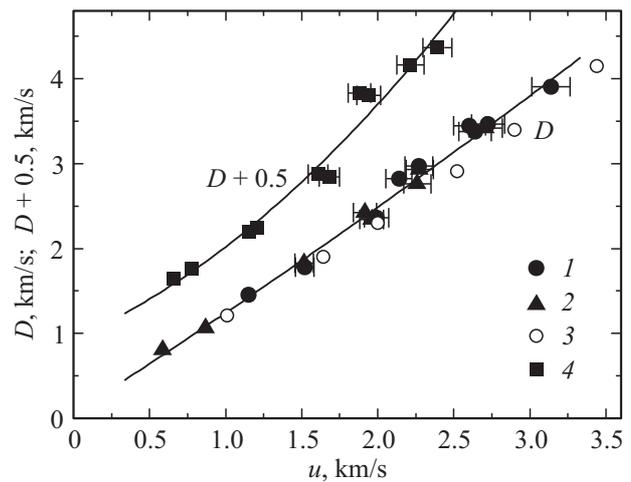


Рис. 3. Зависимости волновой скорости D от массовой скорости u для медного порошка (ρ , г/см³: 1 — 0.76, 2 — 0.54, 3 — 0.89 [3]) и оловянного порошка (4 — $\rho_0 = 1.9$ г/см³, точки смещены вверх на 0.5 км/с). Сплошные кривые представляют собой аппроксимации наших экспериментальных данных, найденные методом наименьших квадратов.

массовой скорости за ударным фронтом u использовалось максимальное значение напряжения (непосредственно после момента A). Интервал времени между моментами A и B дает возможность по известной пространственной базе найти среднюю волновую скорость D .

Для вариации интенсивности ударного сжатия использовались различные взрывчатые вещества и их смеси с инертными наполнителями.

Результаты выполненных экспериментов представлены на рис. 3, где показаны найденные зависимости волновой скорости D от массовой скорости u для медного и оловянного порошков. Из рисунка следует, что в пределах экспериментальных погрешностей (около 4% по массовой скорости, 1.5% по волновой скорости) данные для медных образцов плотности 0.76 и 0.54 г/см³ не имеют значимых различий. Это дает возможность использовать их совместно для нахождения единой зависимости волновой скорости от массовой скорости — $D(u)$. Найденные по методу наименьших квадратов аппроксимирующие зависимости $D(u)$ показаны на рис. 3 сплошными кривыми для медных и оловянных порошков.

На том же рисунке приведены данные группы Р.Ф. Трунина, полученные для медного порошка плотности 0.89 г/см³ [3] — точки 3. Как видно из рисунка, наши данные для медного порошка в переменных $D-u$ близки к результатам Р.Ф. Трунина, хотя экспериментальные точки [3] в среднем смещены в область больших массовых скоростей. Отметим, что результаты [3] получены при помощи метода отражения, который для исследования высокопористых материалов может давать заметные погрешности.

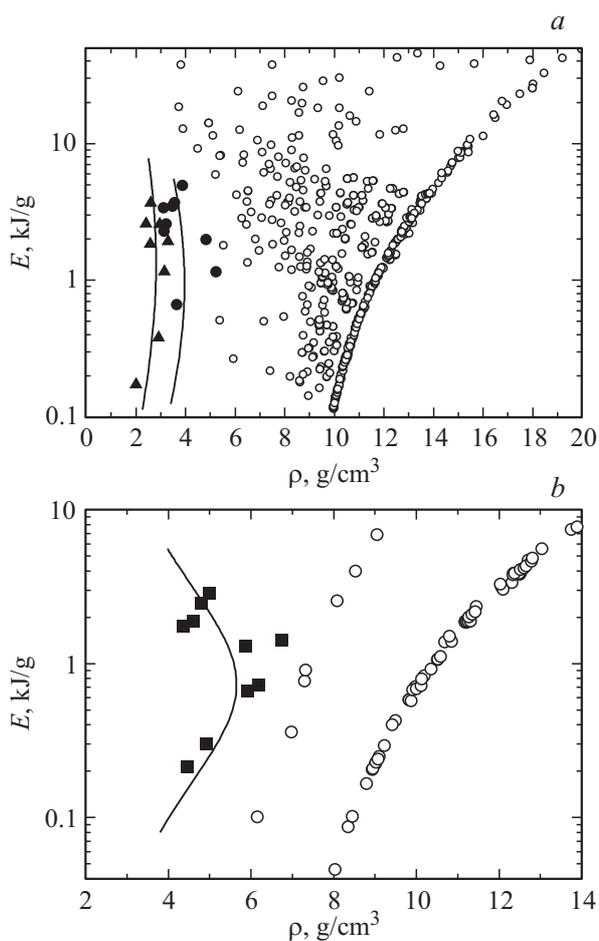


Рис. 4. Зависимость внутренней энергии меди (а) и олова (b) от плотности. Заштрихованные точки — наши данные, незаштрихованные фигуры — известные данные других авторов [8].

Полученные данные позволяют с использованием законов сохранения найти другие гидродинамические параметры сжатого вещества (плотность, давление, удельная внутренняя энергия).

На рис. 4 экспериментальные данные показаны в виде зависимостей внутренней энергии от плотности вещества. Как видно из рисунка, ударное сжатие высокопористых металлов при помощи зарядов конденсированных взрывчатых веществ позволяет достичь высоких плотностей внутренней энергии. Для больших значений пористости ударная сжимаемость образцов меди и олова оказывается аномальной: увеличение давления и внутренней энергии сопровождается уменьшением (или лишь слабым изменением) плотности вещества.

На тех же рисунках приведены все имеющиеся на сегодняшний день данные, полученные на сплошных и пористых образцах меди и олова (результаты взяты из базы ударно-волновых данных [8]). Из рисунков видно, что наши точки расположены заметно левее массива известных данных. Таким образом, полученные нами данные находятся в неисследованной ранее области

P – V – T -состояний вещества, соответствующей малым плотностям и большим значениям удельной внутренней энергии.

Заключение

При помощи магнитоэлектрического метода найдены параметры состояния меди и олова при сжатии высокопористых образцов.

Автор выражает благодарность В.С. Прокопьеву за помощь в проведении ударно-волновых экспериментов.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-08-00089.

Список литературы

- [1] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. 2-е изд. М.: Наука, 1966. 686 с.
- [2] Физика высоких плотностей энергии / Под ред. П. Калдиrola, Г. Кнопфеля. М.: Мир, 1974. 484 с.
- [3] Трунин Р.Ф., Гударенко Л.Ф., Жерноклетов М.В., Симанков Г.В. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. 2-е изд. Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ, 2006. 530 с.
- [4] Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках / Под ред. М.В. Жерноклетова. Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.
- [5] Бугаева В.А., Евстигнеев А.А., Трунин Р.Ф. // Теплофизика высоких температур. 1996. Т. 34. № 5. С. 684–690.
- [6] Гилев С.Д. // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43. № 5. С. 116–125.
- [7] Gilev S.D. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. Vol. 40. № 15. P. 4631–4635.
- [8] Электронный ресурс — база ударно-волновых данных <http://www.ihed.ras.ru/rusbank/>