

05
Электропроводность меди и олова в области малой плотности и большой удельной энергии

© С.Д. Гилев

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

(Поступило в Редакцию 19 сентября 2014 г.)

Выполнены измерения электропроводности высокопористых образцов меди и олова при ударном сжатии в области малой плотности и большой удельной энергии вещества. Построены зависимости электропроводности от ударного давления для медного порошка с плотностью 0.76 g/cm^3 (коэффициент пористости 11.8), для оловянных порошков с плотностью 1.9 и 4.8 g/cm^3 (коэффициент пористости 3.9 и 1.5). Найденные зависимости электропроводности от ударного давления являются немонотонными. В области большого давления электропроводность медного и оловянного порошков слабо зависит от ударного давления. При давлении $p > 2 \text{ GPa}$ электропроводность медного порошка удовлетворительно согласуется с моделью Бакулина.

Введение

Ударное сжатие конденсированного вещества позволяет достигать высоких плотностей удельной внутренней энергии ($> 1 \text{ kJ/g}$), что важно для исследования физического состояния материалов в экстремальных условиях и тестирования предлагаемых теоретических моделей [1]. Применение пористых веществ позволяет расширить диапазон достижимых параметров в пространстве $P-V-T$ (давление—удельный объем—температура). Для продвижения в область большого удельного объема и высокой плотности внутренней энергии удобно использовать вещества, имеющие большую пористость и соответственно малую массовую плотность.

Одна из наиболее серьезных проблем, возникающая при интерпретации экспериментальных данных, связана с влиянием неоднородной структуры исследуемого вещества на параметры его состояния. Ударное сжатие гетерогенного материала приводит к неоднородности поля температуры в исследуемом материале. Поверхностные слои частицы имеют большую температуру, чем внутренние. Оценка времени теплового прогрева частицы с характерным размером a дает формулу $\tau_T \approx \rho c_p a^2 / \lambda_T$ (здесь ρ — плотность, c_p — теплоемкость, λ_T — коэффициент теплопроводности). Для частицы меди, имеющей размер $a = 10 \mu\text{m}$, и значений теплопроводности, теплоемкости при нормальных условиях [2] такая оценка приводит к значению $\approx 1 \mu\text{s}$, что соответствует характерному времени ударно-волнового эксперимента с использованием химических взрывчатых веществ. Можно ожидать, что интенсивная пластическая деформация частицы будет облегчать ее прогрев, однако влияние этого фактора трудно оценить количественно. Неоднородность структуры усложняет интерпретацию экспериментальных данных, однако влияние этого фактора уменьшается при использовании тонких (микронных и субмикронных) порошков.

Одной из важнейших характеристик физического состояния вещества при высоких плотностях энер-

гии является электропроводность. Величина электропроводности и ее заметные изменения позволяют диагностировать фазовые переходы и обоснованно судить о физическом состоянии вещества в экстремальных условиях. В настоящее время имеется небольшое количество данных об электропроводности металлических порошков при ударном сжатии [3–5]. Они касаются порошков со следующими значениями пористости m (и соответствующей начальной плотности ρ_{00}): алюминий — $m = 1.65, 5.4, 7.35$ ($\rho_{00} = 1.65, 0.45-0.5, 0.37 \text{ g/cm}^3$) [3,4], медь — $m = 5$ ($\rho_{00} = 1.77 \text{ g/cm}^3$) [5]. (Под пористостью m здесь и далее понимается отношение плотности сплошного вещества ρ_0 к начальной плотности пористого образца ρ_{00} .) Выполненные ранее исследования дают представление о характерном поведении электропроводности при высоких плотностях энергии. Так, обнаружена немонотонная зависимость электропроводности металлических порошков от ударного давления. В то же время отсутствуют данные о транспортных коэффициентах при больших пористостях (алюминия при $m > 7.35$, меди при $m > 5$), а также для других металлов.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование электропроводности медного и оловянного порошков экстремально высокой пористости при ударном сжатии. Ранее эти порошки изучены при помощи магнитоэлектрического метода [6], что позволило найти кинематические характеристики ударной волны и сжимаемость порошков.

Исследуемые вещества

В табл. 1 приведены основные характеристики исследуемых порошков. Медный порошок (Cu-1 и Cu-2 в таблице), а также оловянный порошок ПОМД (Sn-2) изготовлены ЗАО ФК „Кристалл“, Екатеринбург. Согласно информации производителя, оловянный порошок ПОМД

Таблица 1. Исследованные порошки

Обозначение	Порошок	Плотность ρ_{00} , g/cm ³	Пористость $m = \rho_0/\rho_{00}$	Размер частиц a , μm
Cu-1	Медный	0.76	11.8	~ 0.3
Cu-2	"	0.54	16.5	~ 0.3
Sn-1	Оловянный порошок ПО-1	4.8	1.52	5–30
Sn-2	Оловянный порошок ПОМД	1.9	3.85	~ 4.5

соответствует ТУ 1793-010-74350164-2012, а порошок ПО-1 соответствует ГОСТ 9723-73. Форма частиц у всех порошков сферическая.

Метод измерений и результаты экспериментов

Для измерений электропроводности использовался электроконтактный метод [3,5]. Используемая измерительная ячейка показана на рис. 1. Плоская ударная волна входит в ячейку сверху. До прихода ударной волны на образец по шунту протекает ток, который остается постоянным в процессе измерений. Метод измерений и процедура обработки экспериментальных данных описаны в [3,5], поэтому здесь мы ограничимся лишь краткими пояснениями.

На рис. 2 показана характерная запись напряжения с измерительной ячейки, полученная в экспериментах с медным порошком.

Измерения проводятся в режиме постоянного тока, поэтому первоначально на ячейке регистрируется постоянное напряжение. В момент времени *A* ударная волна входит в образец и напряжение начинает уменьшаться. Монотонное уменьшение напряжения свидетельствует о подключении к шунту нарастающей проводящей зоны. В момент *B* фронт ударной волны выходит из образца и попадает в диэлектрическую пластину.

В электротехническом приближении электропроводность образца определяется по формуле [3]

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

где δ_s — толщина фольги, ρ_s — удельное сопротивление фольги, V_0 — начальное напряжение.

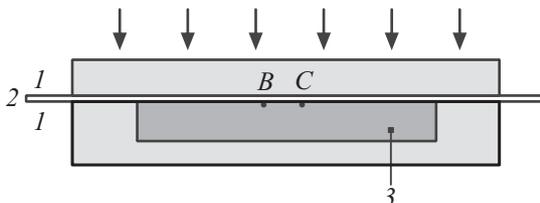


Рис. 1. Измерительная ячейка для регистрации электропроводности при ударном сжатии образца (разрез устройства). 1 — диэлектрик. 2 — шунт (константановая фольга). 3 — образец. B, C — точки подсоединения электродов к шунту.

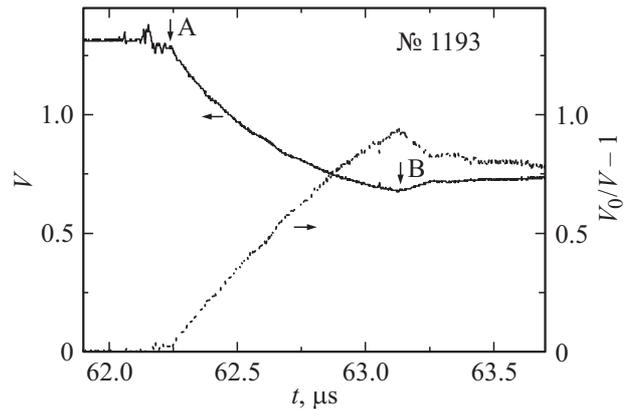


Рис. 2. Зависимость напряжения от времени (сплошная кривая) и результат ее обработки в переменных $(V_0/V - 1, t)$ (пунктирная кривая) в опыте по измерению электропроводности высокопористого порошка меди. Метки A и B отмечают соответственно моменты входа ударной волны в образец и выхода волны из образца.

Как видно из рис. 2, обработка записи напряжения в переменных $(V_0/V - 1, t)$ представляет собой прямую линию, что свидетельствует об однородности электропроводности за ударным фронтом.

В табл. 2 дана информация о постановке эксперимента (тип взрывчатого вещества, состав слоистой системы, исследуемое вещество) и приведены полученные экспериментальные данные. Давление *p*, плотность ρ и другие гидродинамические параметры сжатого вещества вычислялись методом ударных импедансов на основе уравнения состояния продуктов взрыва конденсированных взрывчатых веществ [7], известных ударных адиабат сплошной меди, сплава Д16Т, гетинакса [8,9]. При расчете использовалась зависимость скорости ударной волны от массовой скорости для медного порошка Cu-1, Cu-2 в виде $D = -0.04 + 1.27u$, оловянного порошка Sn-2 в виде $D = 0.04 + 0.78u + 0.3u^2$ (скорости *D* и *u* выражены в km/s). Эти зависимости получены при обработке экспериментальных значений волновой и массовой скоростей [6]. Ударная адиабата порошка Sn-1 получена на основе уравнения состояния Оха-Перссона [10] и описывалась зависимостью $D = 0.65 + 1.9u - 0.071u^2$.

На рис. 3 экспериментальные данные представлены в виде зависимости электропроводности от давления ударной волны для медных порошков, а на рис. 4 для оловянных порошков. Погрешность определения элек-

Таблица 2. Постановка опытов и результаты измерений электропроводности высокопористых порошков в ударной волне: экспериментальное устройство, расчетное давление p , плотность ρ , приращение внутренней энергии ΔE , экспериментальное значение электропроводности σ

Порошок	Опыт	Экспериментальное устройство: материал слоя (толщина, mm)	p , GPa	ρ , g/cm ³	ΔE , kJ/g	σ , 10 ³ ($\Omega \text{ cm}$) ⁻¹	
Cu-1	1210	Тр(243)-Cu(2.5)-гет(3)-Cu(2.5)-гет(2.9)-К(0.1)-Cu-1(3)-гет(5)	0.22	4.8	0.12	< 0.5	
	1220	Тр(265)-Cu(2.5)-гет(3)-Д16Т(2.5)-гет(2.9)-К(0.1)-Cu-1(3)-гет(5)	0.52	4.26	0.28	19	
	1197	Тр(204)-Cu(6.3)-гет(3)-К(0.1)-Cu-1(3)-гет(5)	0.78	4.12	0.41	16	
	1196	Тр(200)-Д16Т(4.2)-гет(3)-К(0.1)-Cu-1(3)-гет(5)	1.8	3.91	0.93	8.5	
	1195	Тр(90)-Cu(6.2)-гет(3)-К(0.1)-Cu-1(3)-гет(5)	2.8	3.83	1.47	4.9	
	1194	ТГ(60)-Cu(6.1)-гет(3.1)-К(0.1)-Cu-1(2.9)-гет(5)	4.1	3.78	2.1	3.6	
	1193	Тр(60)-гет(3.1)-К(0.1)-Cu-1(2.9)-гет(5)	6.7	3.74	3.5	3.5	
	1200	Тр(66)-гет(3)-К(0.1)-Cu-1(3.1)-гет(5)	6.7	3.74	3.5	3	
	1192	ТГ(86)-Д16Т(4.2)-гет(3)-К(0.1)-Cu-1(2.9)-гет(5)	7.8	3.72	4.1	3.5	
	1209	ТГ(60)-гет(2.8)-К(0.1)-Cu-1(3)-гет(5)	9.6	3.71	5	3.1	
	Cu-2	1219	ТГ(60)-гет(3)-К(0.1)-Cu-2(3)-гет(5)	7.7	2.63	5.7	2.1
	Sn-1	1116	Тр(179)-Cu(3)-гет(3)-К(0.1)-Sn-1(3)-гет(5.3)	3.4	6.91	0.11	28.5
1115		Тр(171)-гет(4.8)-К(0.1)-Sn-1(3)-гет(5.3)	9.1	7.8	0.36	23.4	
1114		Гекс(174)-гет(4.8)-К(0.1)-Sn-1(3)-гет(3)	18	8.43	0.81	18.7	
1179		Т(60)-гет(4.8)-К(0.1)-Sn-1(4)-гет(4)	20	8.59	0.97	14.7	
1113		ТГ(60)-гет(4.8)-К(0.1)-Sn-1(3)-гет(5.3)	28	8.91	1.35	8.4	
Sn-2	1213	Тр(243)-Cu(2.5)-гет(3)-Cu(2.4)-гет(2.9)-К(0.1)-Sn-2(3)-гет(5)	0.61	3.8	0.08	7.4	
	1204	Тр(207)-Cu(6.2)-гет(2.8)-К(0.1)-Sn-2(3)-гет(5)	1.68	5.09	0.28	8.5	
	1205	Тр(207)-Д16Т(4.3)-гет(2.8)-К(0.1)-Sn-2(3)-гет(5)	3.45	5.62	0.6	9.6	
	1203	Тр(215)-гет(3)-К(0.1)-Sn-2(3)-гет(5)	5.08	5.62	0.88	8.7	
	1202	ТГ(60)-Cu(6.2)-гет(2.8)-К(0.1)-Sn-2(2.9)-гет(5)	7.68	5.36	1.32	5.6	
	1218	ТГ(90)-Cu(6)-гет(2.9)-К(0.1)-Sn-2(3)-гет(5)	8.1	5.36	1.38	5.1	
	1227	Т(90)-Д16Т(5.4)-гет(2.9)-К(0.1)-Sn-2(3)-гет(5)	9.8	5.21	1.64	4.3	
	1211	Т(60)-гет(3)-К(0.1)-Sn-2(2.9)-гет(5)	12.6	5.02	2.07	5.2	
	1226	ТГ(60)-Д16Т(2.5)-гет(3)-К(0.1)-Sn-2(3)-гет(5)	14.8	4.85	2.38	3.9	
	1137	ТГ(60)-гет(3)-К(0.1)-Sn-2(3)-гет(5.8)	17.9	4.66	2.78	4.2	
1212	ТГ(60)-гет(2.9)-К(0.1)-Sn-2(3)-гет(5)	18.2	4.66	2.85	3.4		

Примечание. Тр — порошковый тротил (плотность 1.0 g/cm³), ТГ — сплав тротил/гексоген 50/50 (плотность 1.66 g/cm³), Т — литой тротил (плотность 1.57 g/cm³, Гекс — порошковый гексоген (плотность 1.0 g/cm³), Cu — медная пластина, Д16Т — пластина из сплава Д16Т, К — константановый шунт, гет — гетинакс.

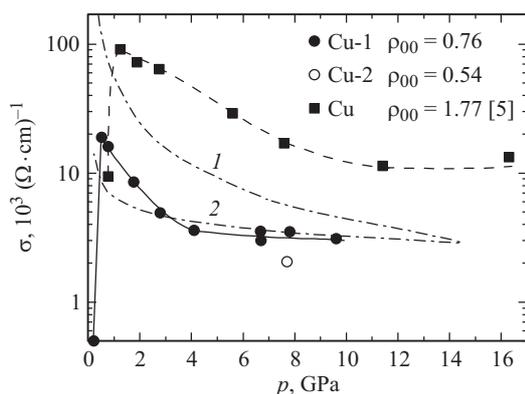


Рис. 3. Зависимость электропроводности медного порошка от давления ударной волны. Символами обозначены данные, соответствующие разным начальным плотностям Cu-1 — 0.76 g/cm³, Cu-2 — 0.54 g/cm³, Cu — 1.77 g/cm³ [7]. Штрихпунктирные кривые показывают расчетные зависимости электропроводности: 1 — модель Гаранина [11], 2 — модель Бакулина [12].

тропроводности и ударного давления для большинства опытов составляет 5–10.

Обсуждение

Из представленных экспериментальных результатов следует, что электропроводность высокопористых металлических порошков испытывает существенные изменения при росте ударного давления. Зависимость электропроводности от ударного давления $\sigma(p)$ для высокопористых порошков меди (Cu-1) и олова (Sn-2) имеет немонотонный характер. В начальном состоянии макропроводимость образца отсутствует. При малом давлении вследствие уплотнения и нагрева порошка электропроводность растет. Электропроводность достигает максимального значения $(1-3) \cdot 10^4 (\Omega \text{ cm})^{-1}$, при дальнейшем росте давления в условиях сильного температурного нагрева электропроводность значительно уменьшается. Отметим, что немонотонная зависимость $\sigma(p)$ не обнаружена у порошка Sn-1. По-видимому, для этого порошка рост электропроводности от нуля до макси-

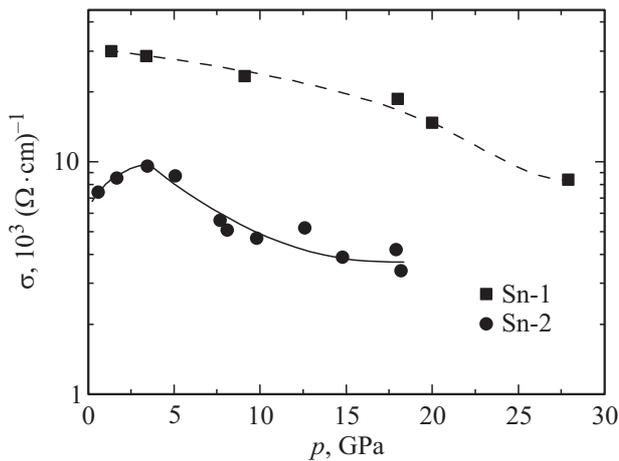


Рис. 4. Зависимость электропроводности оловянного порошка от давления ударной волны. Символами обозначены данные, соответствующие разным начальным плотностям Sn-1 — 4.8 g/cm³, Sn-2 — 1.9 g/cm³.

мального значения происходит в области совсем малых давлений, где экспериментальные данные отсутствуют.

Полученные результаты для порошка Cu-1 можно сравнить с данными, полученными ранее для медного порошка плотности 1.77 g/cm³ [5]. Обращает на себя внимание схожесть общего характера зависимостей электропроводности от ударного давления. При этом для порошка Cu-1 достигается меньшая электропроводность как в максимуме зависимости $\sigma(p)$, так и при больших давлениях. Это различие обусловлено физическим состоянием порошка, которое для порошка Cu-1 расположено в области меньших плотностей и больших температур.

Для порошка максимальной пористости (Cu-1) при росте ударного давления электропроводность выходит на асимптоту, испытывая лишь слабое уменьшение. Такое поведение можно качественно объяснить переходным характером зависимости $\sigma(p)$ при ударном сжатии от металлического состояния образца к плазменному состоянию. Электропроводность металла уменьшается с ростом температуры, так в классическом случае $\sigma \sim 1/T$. В зависимости $\sigma(T)$ для плазменного состояния электропроводность растет с ростом температуры; в классическом случае для плазмы $\sigma \sim T^{3/2}$. Участок практически постоянной электропроводности на рис. 3, по-видимому, соответствует переходной области между металлической и плазменной зависимостями $\sigma(T)$.

Переход от резкого изменения электропроводности к плавному падению при росте ударного давления можно заметить также для медного порошка с плотностью 1.77 g/cm³ (рис. 3), а также для оловянного порошка Sn-2 (рис. 4), хотя здесь эффект выражен слабее. Выход на насыщение для медного порошка с плотностью 1.77 g/cm³ происходит при больших ударных давлениях, чем для порошка плотности 0.54 g/cm³.

На рис. 3 показаны также модельные зависимости электропроводности меди от ударного давления, по-

лученные для условий поставленных экспериментов с использованием моделей Гаранина [11] и Бакулина [12]. Из рисунка видно, что модель Бакулина [12] удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными при давлении $p > 2$ GPa. Разумеется, эта модель не может описать начальный рост электропроводности при малой интенсивности ударной волны ($p < 0.5$ GPa).

Заключение

Таким образом, в работе найдена электропроводность меди и олова в неисследованной ранее области $P-V-T$ -состояний металлов, соответствующей малой плотности и большой удельной энергии вещества.

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.
- [2] Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
- [3] Гилев С.Д. // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41. № 5. С. 128–139.
- [4] Гилев С.Д. // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43. № 5. С. 116–125.
- [5] Гилев С.Д. // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49. № 3. С. 114–121.
- [6] Гилев С.Д. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 10. С. 142–144.
- [7] Физика взрыва / Под ред. К.П. Станюковича. Изд. 2-е. М.: Наука, 1975.
- [8] Альтшулер Л.В., Баканова А.А., Дудолодов И.П., Дынин Е.А., Трунин Р.Ф., Чекин Б.С. // ПМТФ. 1981. № 2. С. 3–34.
- [9] Маккуин Р., Марш С., Тейлор Дж. и др. Уравнение состояния твердых тел по результатам исследований ударных волн // Высокоскоростные ударные явления / Под ред. Р. Кинслоу. М.: Мир, 1973. С. 299–427.
- [10] Oh K.-H., Persson P.-A. // J. Appl. Phys. 1989. Vol. 65. N 10. P. 3852–3856.
- [11] Гаранин С.Ф., Мамышев В.И. // ПМТФ. 1990. № 1. С. 30–37.
- [12] Бакулин Ю.Д., Куропатенко В.Ф., Лучинский А.В. // ЖТФ. 1976. Т. 46. № 9. С. 1963–1969.