

Теплопроводность индия при высоких давлениях и температурах ударного сжатия

© А.М. Молодец, А.А. Голышев

Институт проблем химической физики Российской академии наук,
Черноголовка, Московская обл., Россия

E-mail: molodets@icp.ac.ru

(Поступила в Редакцию 8 апреля 2008 г.)

Представлены результаты по электропроводности и теплопроводности индия в диапазоне давления до 27 GPa и температур до 1000 К. В этом диапазоне давлений измерено электросопротивление образцов индия при ступенчатом ударном сжатии. Построено уравнение состояния индия, с помощью которого рассчитана эволюция его термодинамических параметров в проведенных ударно-волновых экспериментах и затем определены зависимости удельного электросопротивления и коэффициента теплопроводности индия от объема и температуры. Показано, что в исследованном диапазоне давлений и температур коэффициент теплопроводности индия не зависит от температуры, а его трехкратное увеличение обусловлено лишь изменением объема при сжатии.

Работа выполнена при частичной поддержке программы Президиума РАН „Физика и механика сильно сжатого вещества и проблемы внутреннего строения Земли и планет“.

PACS: 62.50.-p, 65.40.-b

1. Введение

Метод измерения электропроводности при ударном сжатии является одним из важных экспериментальных методов физики ударных волн. Этим методом изучаются разнообразные физико-химические свойства и превращения сжатых твердых тел (см. [1]). В частности, экспериментальные данные по электропроводности ударно сжатых металлов могут быть использованы для получения сведений об их теплопроводности в экстремальных условиях, в которых статические измерения теплопроводности пока неосуществимы [2,3]. В настоящей работе проведены измерения электросопротивления ударно сжатого индия и получены данные по теплопроводности этого металла при высоких давлениях и температурах.

2. Экспериментальная часть

Индий чистотой 99.99% был приобретен в Aldrich Chemical Company и в исходном виде представлял собой пруток диаметром 6 мм. Частица индия наносилась на пластину слюды (монокристаллический природный мусковит) и раздавливалась стальным пуансоном до толщины $h_0 \approx 0.01$ мм. В результате образец индия оказывался нанесенным в виде фольги на слюдяную пластину (см. схему на рис. 1). Индиевой фольге придавался вид зигзагообразной ленты, к концам которой присоединялись медные токовводы толщиной 0.02 мм. На этой же слюдяной пластине располагался манганиновый датчик давления 3 толщиной 0.02 мм. На образец и манганиновый датчик накладывалась еще одна пластинка слюды. Получившаяся слойка 1–3 дополнялась двумя тефлоновыми пленками 4 и зажималась между двумя медными пластинами 5. Начальное сопротивление образцов составляло величину $R_0 = 0.38 \Omega$.

Ударное нагружение осуществлялось с помощью взрывного устройства [4]. Алюминиевая пластина-ударник 6 (рис. 1) разгонялась продуктами детонации взрывчатого вещества и соударялась с медными пластинами. В момент соударения ударник имел скорость $W = 2.05$ km/s. Ударник генерировал ударную волну в первой медной пластине. Затем „тефлоново-слюдяной сандвич“ с образцом и манганиновым датчиком подвергался ступенчатому увеличению давления ударного сжатия в результате реверберации ударных волн между медными пластинами. Максимальное значение давления в последней ступени 27 GPa достигалось в течение 0.5–0.6 μ s. Соотношения размеров ударника и экспе-

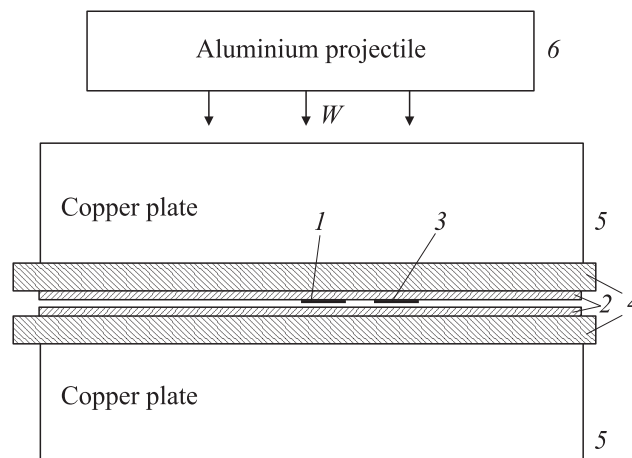


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки ступенчатого ударного нагружения образца. 1 — образец индия, 2 — пластины монокристаллов слюды (природный мусковит) толщиной 0.18 мм, 3 — манганиновый датчик, 4 — тефлоновые пленки толщиной 0.3 мм, 5 — медные пластины толщиной по 4 мм каждая, 6 — алюминиевый ударник толщиной 7 мм.

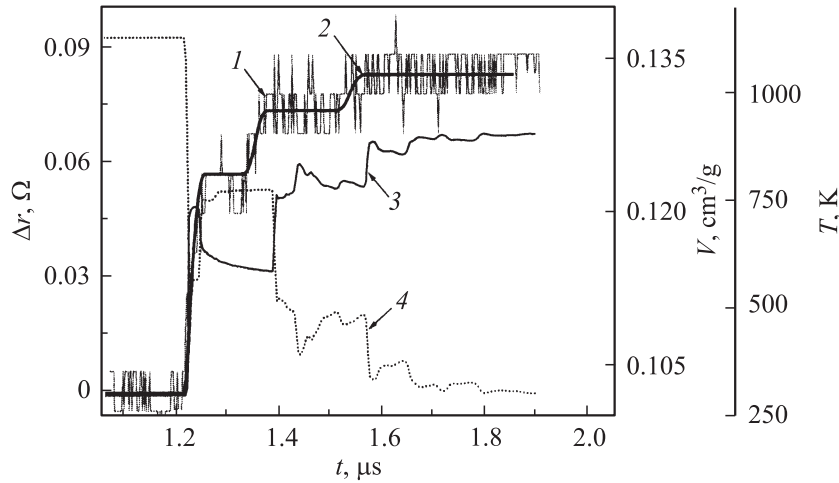


Рис. 2. Профиль электросопротивления образца, а также профили температуры и удельного объема ударно-сжимаемого индия. 1 — экспериментальный профиль увеличения электросопротивления $\Delta r = r(t) - r_0$, 2 — сглаженный профиль Δr , 3 — рассчитанный профиль температуры $T(t)$, 4 — рассчитанный профиль удельного объема $V(t)$.

риментальной сборки обеспечивали одномерный режим нагружения в течение времени ступенчатого ударного сжатия.

Во время эксперимента по тоководам пропускался постоянный ток. Первичной экспериментальной информацией служило падение электрического напряжения $U = U(t)$ на образце в течение времени t — времени реверберации волн сжатия между медными пластинами. Профиль (зависимость от времени t) $U = U(t)$ регистрировался высокочастотным осциллографом Tektronix TDS-744A. Профиль электросопротивления образца $r(t)$ рассчитывался с использованием предварительной калибровки $r(U)$. Пример экспериментального профиля разности между $r(t)$ и начальным сопротивлением r_0 показан на рис. 2.

3. Уравнение состояния индия и расчет термодинамических параметров

Для анализа экспериментальных данных ударного сжатия проведено численное моделирование плоского одномерного ударного нагружения экспериментальной сборки. Численный расчет взаимодействия одномерных ударных волн и волн разгрузки и сопутствующий расчет эволюции термодинамических параметров проводились модифицированным методом индивидуальных частиц в ячейке [5] в плоской одномерной постановке. Для замыкания системы уравнений газовой динамики использовались полуэмпирические уравнения состояния в форме Ми–Грюнаизена. Эти уравнения состояния материалов экспериментальной сборки строились по методике [6] и имели традиционную форму

$$P - P_S = \frac{\gamma}{V}(E - E_S), \quad (1)$$

где P — давление, E — удельная внутренняя энергия, V — удельный объем; $P_S = P_S(V)$, $E_S = E_S(V)$ соот-

ветственно объемная зависимость давления и энергии вдоль опорной изотермы $T = T_0 = \text{const}$; $\gamma = \gamma(V)$ — объемная зависимость коэффициента Грюнаизена. При этом функция $P_S = P_S(V)$ согласно [6] имела вид

$$P_S = S_1 F_x + S_2, \quad (2)$$

$$F_x = 3 \left(-\frac{1}{5} x^{-\frac{5}{3}} + 2x^{-\frac{2}{3}} + 6x^{\frac{1}{3}} - x^{\frac{4}{3}} + \frac{1}{7} x^{\frac{7}{3}} \right), \quad (3)$$

$$x = \frac{V}{v_3}, \quad (4)$$

где S_1, S_2, v_3 — подгоночные параметры. Соотношение для $\gamma = \gamma(V)$ получается с помощью формулы Слэтера, которая определяется первой и второй производной (2)

$$\gamma = -\frac{2}{3} - \frac{V}{2} \frac{\partial^2 P_S / \partial V^2}{\partial P_S / \partial V} = \frac{2}{3} + \frac{2x}{1-x}. \quad (5)$$

Соотношение для $E_S = E_S(V)$ получается однократным интегрированием (2) (см. [6]).

Для индия в качестве опорной изотермы взята изотерма высокого давления индия In-I до 50 GPa из [7,8] при комнатной ($T_0 = 298$ K) температуре. Подгоночные параметры были подобраны методом наименьших квадратов так, чтобы график (2) наилучшим образом аппроксимировал экспериментальные точки индия In-I до 50 GPa из [7,8]. Полный комплект параметров для (1) представлен в таблице. График (2) с коэффициентами v_3, S_1, S_2 показан линией на рис. 3.

Величины подгоночных параметров v_3, S_1, S_2 , рассчитываемая величина константы интегрирования S_3 для $E_S = E_S(V)$ и начальный объем V_0 для комнатной изотермы высокого давления индия In-I

v_3 , cm ³ /mol	S_1 , GPa	S_2 , GPa	S_3 , kJ/g	V_0 , cm ³ /mol
33.08	-151.92	3158.34	-456.686	15.75

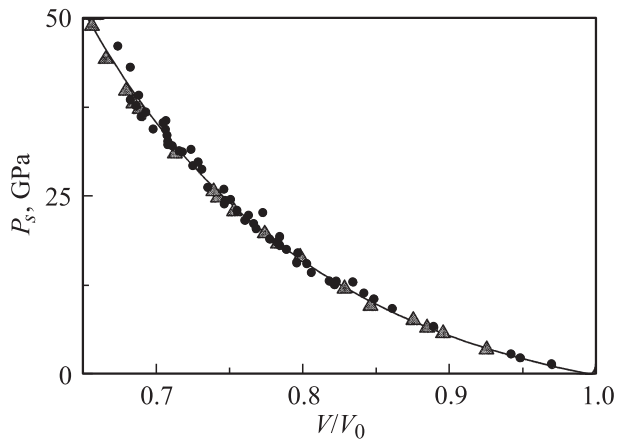


Рис. 3. Изотерма высокого давления индия In-I. Треугольники и кружки — экспериментальные данные [7] и [8] соответственно, линия — график (2).

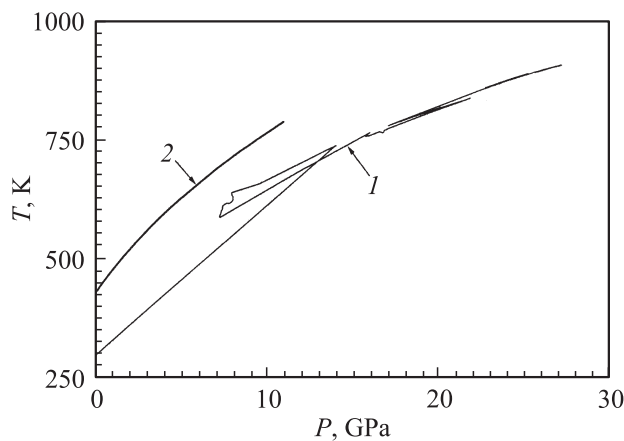


Рис. 4. Фазовая диаграмма индия в координатах температура T — давление P . 1 — траектория ступенчатого ударного сжатия индия. 2 — кривая плавления индия [9].

Как хорошо известно (см., например, в [3]), объемная зависимость температуры Дебая $\theta = \theta(V)$ может быть определена путем интегрирования уравнения $d \ln \theta / d \ln V = -\gamma(V)$, где $\gamma(V)$ — объемная зависимость коэффициента Грюнайзена. Использование в качестве $\gamma(V)$ выражения (5) дает (см. [6]) формулу для θ

$$\theta = \theta_0 \left(\frac{1-x}{1-x_0} \right)^2 \left(\frac{x_0}{x} \right)^{2/3}, \quad (6)$$

где $\theta_0 = \theta(V_0)$, $x_0 = V_0/v_s$.

Расчет давления и энергии ударного сжатия производился аналогично [6] с использованием известных формул физики ударного сжатия на основе закона сохранения энергии. Необходимая для расчета температуры ударного сжатия величина теплоемкости $C_V = C_V(T)$ полагалась постоянной и равной $3R$, где R — удельная газовая постоянная.

На рис. 4 показана рассчитанная фазовая траектория индия при ступенчатом ударном нагружении в координатах

натах температура–давление. Как видно, эта фазовая траектория располагается под кривой плавления индия. Следовательно, экспериментальные данные по электропроводности индия в настоящей работе относятся к индию в твердом состоянии.

На рис. 2 показаны рассчитанные профили температуры и объема при ступенчатом ударном сжатии индия в постановке эксперимента по схеме рис. 1.

4. Обсуждение результатов

В одномерных условиях ударного нагружения экспериментальной сборки (рис. 1) можно считать, что длина и ширина образца индия остаются постоянными, а изменяется лишь его толщина $h = h(t)$, которая пропорциональна объему $V = V(t)$ ударно сжимаемого образца. Поэтому расчет удельного электрического сопротивления ρ может быть выполнен по формуле

$$\rho = \rho_0 \frac{rV}{r_0V_0}, \quad (7)$$

где r — экспериментальные значения электросопротивления образца, V — расчетные значения объема (рис. 2), индекс 0 обозначает те же величины в начальном состоянии. Полученные значения электросопротивления представлены звездочками на рис. 5. Видно, что удельное электросопротивление индия проходит через максимум.

Экстремум на графике удельного электросопротивления индия можно объяснить на основе формулы Блоха–Грюнайзена, согласно которой при высоких температурах электросопротивление пропорционально температуре T и обратно пропорционально квадрату температуры Дебая θ

$$\rho \sim \frac{T}{\theta^2}. \quad (8)$$

В соответствии с (8) появление экстремума на кривой 2 (рис. 5) обусловлено тем, что при небольших сжатиях в (7) основной повышающий сопротивление вклад вносит температура. Однако при сильном сжатии уменьшение электросопротивления за счет увеличения θ начинает превалировать над повышающим температурным вкладом.

Как отмечалось во введении, экспериментальные данные по зависимости удельного электросопротивления металла ρ при ударном сжатии позволяют вычислить его коэффициент теплопроводности k при высоких давлениях и температурах. Для этого используется закон Видемана–Франца

$$k = \frac{LT}{\rho}, \quad (9)$$

где T — температура, L — число Лоренца, равно $2.45 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega/\text{K}^2$. Значения k для индия при высоких давлениях ударного сжатия, полученные по (9), показаны кружками на рис. 5. Как видно, в отличие от удельного электросопротивления теплопроводность индия монотонно возрастает, увеличиваясь примерно в 3 раза при увеличении давления до 27 GPa.

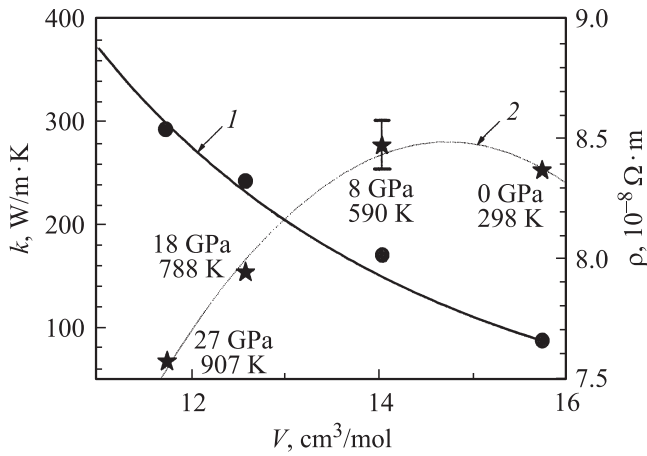


Рис. 5. Удельное электросопротивление (звездочки) и коэффициент теплопроводности (кружки) индия при высоких давлениях и температурах. 1 — график (11) с коэффициентами из таблицы, 2 — линия, соединяющая звездочки, проведенная для наглядности. Около точек указаны расчетные значения давления и температуры ступенчатого ударного сжатия.

Отметим, что, согласно (8) и (9), коэффициент теплопроводности не должен зависеть от температуры и определяется лишь объемной зависимостью температуры Дебая

$$k \sim L\theta^2. \quad (10)$$

Воспользовавшись в (10) для $\theta(V)$ формулой (6), запишем (10) как

$$k = k_0 \left(\frac{1-x}{1-x_0} \right)^4 \left(\frac{x_0}{x} \right)^{4/3}, \quad (11)$$

где $k_0 = k(V_0)$. График (11) показан на рис. 5 линией 1. Как видно, кривая 1 совпадает с экспериментом.

Подчеркнем, что кривая 1 и экспериментальные данные по теплопроводности индия получены независимо друг от друга. Поэтому их совпадение позволяет заключить, что в исследованном диапазоне ударного сжатия теплопроводность индия не зависит от температуры.

5. Заключение

Проведены измерения электрических свойств индия в диапазоне давлений 0–27 ГПа и температур 300–1000 К. Удельное электросопротивление индия существенно зависит как от температуры, так и от изменения объема при сжатии. Коэффициент теплопроводности индия при высоких давлениях не зависит от температуры. Трехкратное увеличение коэффициента теплопроводности при 27 ГПа определяется лишь объемной зависимостью характеристической температуры Дебая в соответствии с формулами Блоха–Грюнайзена и Видемана–Франца.

Список литературы

- [1] С.С. Набатов, В.А. Борисёнок, А.М. Молодец, Е.З. Новицкий. Электрические явления в ударных волнах. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров (2005). 265 с.
- [2] Y. Bi, H. Tan, F. Jing. *J. Phys.: Cond. Matter* **14**, 10 849 (2002).
- [3] H. Tan, T.J. Ahrens. *High Pressure Research* **2**, 159 (1990).
- [4] Г.И. Канель, А.М. Молодец, А.А. Воробьев. *ФГВ* **10**, 6, 884 (1974).
- [5] В.В. Ким, И.В. Ломоносов, А.В. Матвейчев, А.В. Острик. Численное моделирование процессов высокоскоростного удара. Препринт. ИПХФ РАН, Черноголовка, (2005). 26 с.
- [6] А.М. Molodets, D.V. Shakhrai, A.A. Golyshev, L.V. Babare, V.V. Avdonin. *High Pressure Research* **26**, 223 (2006).
- [7] K. Takemura, H. Fujihisha. *Phys. Rev. B* **47**, 8465 (1993).
- [8] O. Schulte, W.B. Holzapfel. *Phys. Rev. B* **48**, 767 (1993).
- [9] J.D. Dudley, H.T. Hall. *Phys. Rev.* **118**, 1211 (1960).