

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ЦЕРИЯ В УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

М. В. Жерножлетов^{a*}, *А. Е. Ковалев*^a, *В. В. Комиссаров*^a,
М. Г. Новиков^a, *М. Э. Зохер*^{b**}, *Ф. Д. Черне*^{b***}

^a *Российский Федеральный ядерный центр,
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
607188, Саров, Нижегородская обл., Россия*

^b *Los Alamos National Laboratory
Los Alamos, USA*

Поступила в редакцию 28 апреля 2010 г.

Церий имеет сложную фазовую диаграмму, которая объясняется наличием структурных фазовых переходов. Для определения начала плавления церия на ударной адиабате выполнены эксперименты по измерению скоростей звука в церии двумя методами. В диапазоне давлений 4–37 ГПа скорость звука в образцах церия измерена методом встречной разгрузки с помощью пьезорезистивных датчиков на основе манганина. Методом догоняющей разгрузки с использованием индикаторных жидкостей карбогала и тетрахлорметана скорость звука в церии измерена в диапазоне давлений 35–140 ГПа. Нагружение образцов осуществлялось генераторами плоских ударных волн с использованием мощных зарядов взрывчатых веществ. По измеренным значениям упругих продольных и объемных скоростей звука выявлено начало плавления церия на ударной адиабате, которому соответствует давление около 13 ГПа.

1. ВВЕДЕНИЕ

Церий обладает необычными по сравнению со многими металлами свойствами. К их числу относятся существование критической точки в твердом состоянии на линии изоморфного (γ - α) превращения, аномальное поведение сжимаемости, теплового расширения, теплоемкости и др. [1–4]. Специфичность характеристик церия связана с особенностями изменения при сжатии структуры его электронной оболочки, обусловленные переходом $4f$ -электронов на уровень $5d$. Сложная фазовая диаграмма церия, реализующаяся в области относительно невысоких давлений ($P \leq 25$ ГПа), является причиной формирования многоволновой структуры, образующейся как при его ударном сжатии, так и последующей разгрузке. С этой точки зрения церий является очень удобным материалом для проведения ударно-волновых исследований, направленных на полу-

чение многофазного уравнения состояния и прочностных характеристик [5].

Аномальное поведение сжимаемости ($(\partial^2 V / \partial P^2)_S < 0$) γ -церия вплоть до давления γ - α -перехода указывает на невозможность формирования в этой области ударного фронта и сжатие церия происходит изэнтропически [4]. При дальнейшем увеличении давления в церии образуется двухволновая конфигурация, состоящая из головной волны изэнтропического сжатия и следующей за ней ударной волны. Предсказанное в работе [4] расщепление волны сжатия на изэнтропическую простую и ударную волны, а также изменение начального состояния перед фронтом ударной волны с увеличением ее интенсивности подтверждено экспериментально регистрацией многоволновых профилей давлений с использованием манганиновых датчиков в работе [6] и датчиков ПВДФ в работе [7] при нагружении образцов давлениями соответственно 2.4 и 12 ГПа.

Одним из препятствий на пути построения полумпирических многофазных уравнений состояния церия, включающих помимо γ - и α -фаз описание

*E-mail: root@gdd.vniief.ru

**M. A. Zocher, zocher@laur.gov

***F. J. Cherne, cherne@laur.gov

жидкого состояния, является недостаток экспериментальных данных о плавлении церия при динамическом нагружении. Из-за аномального поведения кривой плавления церия (при $P < 5$ ГПа $dT/dP < 0$) [8, 9], связанного с γ - α -превращением, предполагается [5], что переход в жидкую фазу на ударной адиабате должен происходить при относительно низких давлениях. Однако существует значительная разница в оценках значений давления начала плавления. К примеру, ударная адиабата, рассчитанная по разработанному сотрудниками ВНИИТФ термодинамически полному двухфазному уравнению состояния церия [4], пересекает экспериментальную кривую плавления при давлении $P_{melt}^{calc} = 11.3$ ГПа. Это значение находится значительно ниже величины давления в точке обнаруженного авторами [10] излома в зависимости волновой скорости ударной волны D от массовой скорости u , которая отождествлялась с плавлением церия в ударной волне при $P_{melt}^{exp} = 48.0$ ГПа.

В связи с этим, основная цель работы заключалась в экспериментальном определении границ плавления церия на ударной адиабате.

Наряду с основными параметрами, входящими в уравнение состояния вещества, такими как давление P , объем V или плотность ρ , температура T и энтропия S , необходима информация о скорости звука c — одной из величин, характеризующих поведение вещества в условиях ударного сжатия и последующей разгрузки. Убедительным, наглядным и в настоящее время наиболее точным методом регистрации плавления при ударно-волновом нагружении является измерение продольной упругой c_L и объемной c_B скоростей звука за фронтом ударной волны в зависимости от ее амплитуды [11]. После плавления вещество теряет свои анизотропные свойства, к числу которых относится упругость. Таким образом, если в эксперименте регистрировать наличие (или отсутствие) разницы между упругой продольной c_L и объемной c_B скоростями звука в области давлений, охватывающей предполагаемую зону плавления вещества в ударной волне, то можно определить значение давления для нижней и верхней границ плавления. Уменьшение различия между c_L и c_B , соответствующее приближению коэффициента Пуассона к значению 0.5, отвечает началу плавления.

Первые результаты измерений скорости звука в ударно-сжатых образцах церия оптическим методом с использованием фотодиодных преобразователей и методом регистрации профилей давления с помощью манганиновых датчиков кратко изложены авторами в [12]. В настоящей работе результаты преж-

них исследований церия уточнены, в частности, это касается экспериментов с использованием манганиновых датчиков. Кроме того, в экспериментах по измерению скорости звука получены новые данные по ударно-волновому сжатию церия, которые ранее не приводились.

2. ИНДИКАТОРНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА

Оптические измерения скоростей звука проведены методом догоняющей разгрузки с использованием индикаторных жидкостей, подробно описанным в работе [13]. Для создания ударных волн в образцах церия применялись генераторы ударных волн, основанные на разгоне тонких ударников продуктами взрыва цилиндрических зарядов взрывчатых веществ (ВВ) разной мощности. В экспериментах исследовались полученные электролитическим методом образцы церия плотностью 6.75 г/см³ и чистотой 99.83%.

Схема экспериментов представлена на рис. 1. После удара быстро летящей тонкой пластины по экрану, на котором располагается ступенчатый образец церия, с тыльной стороны ударника формируется волна разрежения. Волна разрежения последовательно проходит через слой ударника, экрана, исследуемого образца и далее входит в индикаторную жидкость, которой залит ступенчатый образец. Задача состоит в определении толщины образца X_{max} , на которой волна разрежения догонит фронт ударной волны на границе с жидкостью. Если на исследуемый образец толщиной x , которая меньше X_{max} , поместить индикатор, то до момента прихода на ударный фронт первой характеристики волны разрежения в индикаторе будет фиксироваться посто-

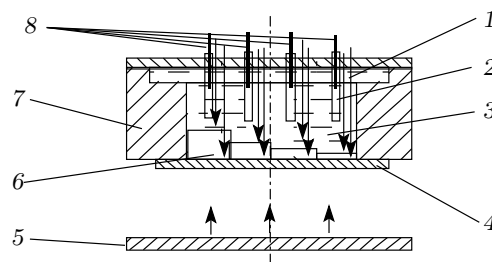


Рис. 1. Конструкция устройства для измерения скорости звука в церии оптическим методом: 1 — электродатчики, 2 — трубочки, 3 — индикаторная жидкость, 4 — экран, 5 — ударник, 6 — образец церия, 7 — обойма, 8 — световоды

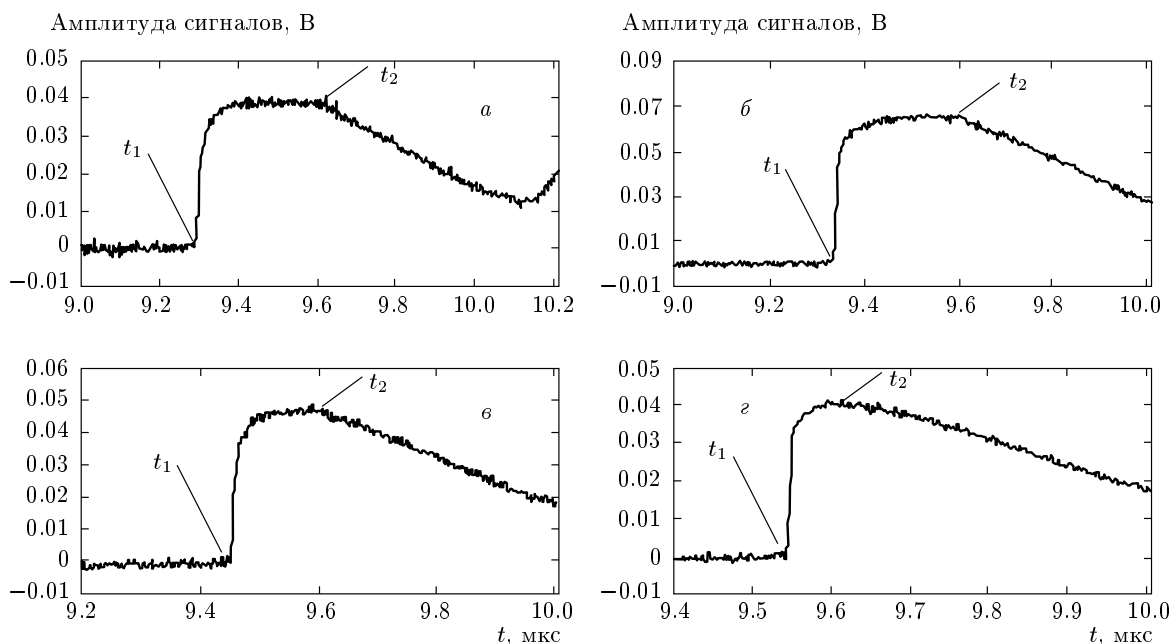


Рис. 2. Осциллограммы излучения фронта ударной волны в карбогале при $P_{ce} = 96.5$ ГПа за ступеньками церия, имеющими значения толщины: $a - 1.99$ мм, $b - 2.27$ мм, $c - 3.00$ мм, $d - 3.38$ мм

янная интенсивность излучения, которая затем начнет убывать. В качестве индикаторов использовались жидкости — карбогал (C_8F_{16}) и тетрахлорметан (CCl_4), имеющие начальную плотность ρ_0 равную соответственно 1.86 г/см³ и 1.58 г/см³.

Регистрация процесса свечения индикаторной жидкости при прохождении по ней фронта ударной волны осуществлялась с помощью кварц-волоконных световодов диаметром 400 мкм, расположенных над каждой ступенькой образца. Световые сигналы с помощью фотодиодных преобразователей «ФД 256» регистрировались осциллографами типа Agilent и Tektronix.

Типичные осциллограммы опыта по измерению скорости звука в четырехступенчатом образце церия приведены на рис. 2. Стрелками отмечены моменты t_1 входа ударной волны в индикаторную жидкость карбогал и момент t_2 , когда волна разрежения догоняет фронт ударной волны. Точность временных измерений движения фронта ударной волны в индикаторе не хуже 2 нс. Кроме того, в каждом опыте регистрировалась скорость движения ударной волны по образцу церия.

На рис. 3 представлен график линейной зависимости длительности постоянной интенсивности излучения от толщины образца церия, построенный по осциллограммам, приведенным на рис. 2. Путем экстраполяции этой зависимости к нулевому времени

получаем толщину X_{max} , при которой волна разрежения догоняет ударную волну в толщине образца церия.

Скорость звука в церии вычислялась по формуле

$$c_{sound} = \frac{X_{max}}{\sigma(t_{SW} - t_{RW} + X_{max}/D)}, \quad (1)$$

где σ — сжатие, t_{SW} — время входа ударной волны в образец, t_{RW} — время входа волны разрежения в образец, D — скорость ударной волны в образце церия, X_{max} — толщина ступеньки, при которой волна разрежения догоняет ударную волну на границе раздела церий-индикатор.

Расчеты $x-t$ -диаграмм, моделирующие движение ударных волн и волн разрежения в ударнике, экране и образце церия для определения t_{SW} и t_{RW} в (1), выполнялись по газодинамической программе ВНИИЭФ. В расчетах использовалась ударная адиабата церия из [14]. Для материалов ударника и экрана применялось уравнение состояния Ми-Грюнайзена с зависимостью коэффициента Грюнайзена Γ от плотности ρ .

Полученные экспериментальные данные по измерению скорости звука в церии оптическим методом обобщены в табл. 1. Приведенные в таблице параметры сжатия образцов ударными волнами определены двумя способами. В обоих способах в образце церия измерялась скорость ударной волны D . Мас-

Таблица 1. Экспериментальные данные по измерению скорости звука в церии оптическим методом

№	Экран			Церий				
	Материал и толщина экрана, мм	u_{bp} , км/с	P_{bp} , ГПа	D , км/с	u_{Ce} , км/с	P_{Ce} , ГПа	σ	c_{sound} , км/с
1	Fe-1.5	2.79	184	6.46*	3.24*	141 ± 8	2.00	6.09 ± 0.31
2	Fe-1.5	2.79	184	6.46*	3.24*	141 ± 7	2.00	6.02 ± 0.25
3	Fe-2.5	2.47	153	5.92*	2.89*	116 ± 6	1.95	5.49 ± 0.21
4	ВНЖ-95 ¹ -2.5	1.98	233	5.85	2.82	111 ± 4	1.93	5.59 ± 0.25
5	ВНМ ₃₋₂ ² -2.5	1.81	208	5.50	2.60	97 ± 2	1.90	5.11 ± 0.17
6	Ce	2.52	91	5.37	2.52	91 ± 7	1.88	5.23 ± 0.27
7	Al-3.0	2.70	66	5.02*	2.33*	79 ± 3	1.86	4.94 ± 0.18
8	Fe-2.5	1.48	73	4.21	1.80	51 ± 3	1.75	4.26 ± 0.16
9	Fe-2.5	1.47	72	4.19	1.79	51 ± 5	1.75	4.40 ± 0.26
10	Cu-6.0	1.13	57	3.65*	1.47*	36 ± 5	1.68	3.94 ± 0.11

¹⁾ ВНЖ-95 — сплав вольфрама (95 %), никеля (3.5 %), железа (1.5 %).

²⁾ ВМ₃₋₂ — сплав вольфрама (95 %), никеля (3 %), меди (2 %).

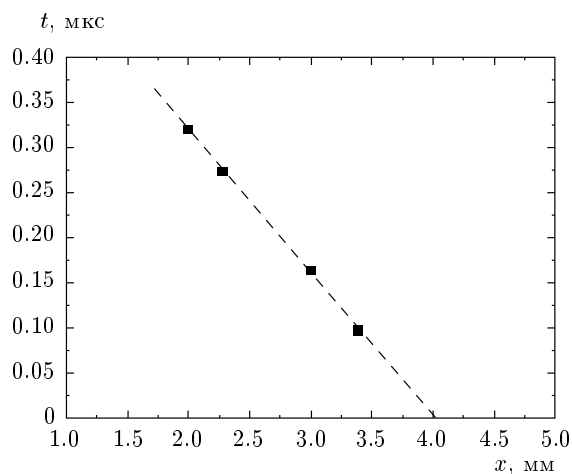


Рис. 3. Зависимость длительности постоянной интенсивности излучения фронта ударной волны от толщины образца церия

совая скорость u , давление P , сжатие σ в первом случае определялись по измеренной скорости ударной волны D и известной [14] ударной адиабате церия. В случае, когда использовались генераторы с заранее известными параметрами проходящих ударных волн в экранах, характеристики сжатого церия нахо-

дились методом отражения по измеренной скорости ударной волны и P - u -диаграмме с использованием законов сохранения и условия равенства давлений и массовых скоростей на границе раздела: экран — образец церия. Таким образом, в этих экспериментах получались независимые параметры волн на ударной адиабате церия, отмеченные в табл. 1 звездочками.

При давлениях в церии менее 30 ГПа температура свечения ударно-сжатых жидких индикаторов близка к пределу чувствительности регистрирующих фотодиодов, который составляет около 1500 К. В связи с этим, для определения скоростей звука в церии в области низких давлений (до 30 ГПа) применена методика манганинового датчика давления.

3. МЕТОД МАНГАНИНОВОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

Схема экспериментального устройства для измерения скоростей звука c_L и c_V в ударно-сжатом церии аналогична используемой в работе [15] и приведена на рис. 4. Образцы церия, представляющие собой диски диаметром 40 мм и высотой около 2 мм, устанавливались на экранах из алюминия или меди.

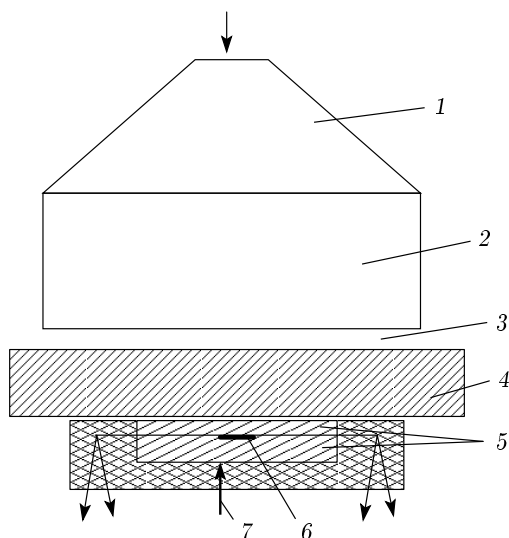


Рис. 4. Схема опыта: 1 — линза, 2 — основной заряд ВВ, 3 — воздушный зазор равный 5 мм, 4 — экран диаметром 120 мм и толщиной 10 мм, 5 — образцы церия, 6 — манганиновые датчики давления (3 шт.), 7 — электроконтактный датчик, двойная штриховка — эпоксидная смола

После детонирования заряда ВВ в экране формируется квазистационарный профиль ударной волны с несимметричностью фронта не более 0.05 мкс на площади диаметром около 70 мм. Три манганиновых датчика располагались между двумя слоями церия в изоляции из слюды. Датчики фиксировали профили прямой ударной волны и встречной волны разрежения, сформированной со свободной поверхности образца. Для получения временной отметки, соответствующей моменту выхода ударной волны на свободную поверхность образца, на нее устанавливался электроконтактный датчик. По моменту замыкания электроконтактного датчика определялись интервалы времен прохождения прямой ударной волной расстояния от манганинового датчика до свободной поверхности образца и отраженной обратно к манганиновому датчику волны разрежения. На рис. 5 представлена в качестве иллюстрации одна из осциллограмм, полученная при регистрации профиля напряжений в церии.

Профиль давления P рассчитывался с использованием калибровочной зависимости электросопротивления манганина от напряжения ударного сжатия по амплитуде отклонения луча на экране [15]. Колебательный процесс на фронте осциллограммы объясняется циркуляцией ударной волны в изоляции манганинового датчика между исследуемыми образцами.

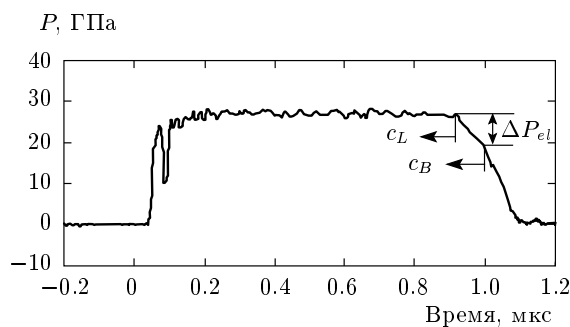


Рис. 5. Осциллограмма, полученная в эксперименте по регистрации профилей волн нагружения и разгрузки в церии, ΔP_{el} — скачок давления в упругой волне разгрузки

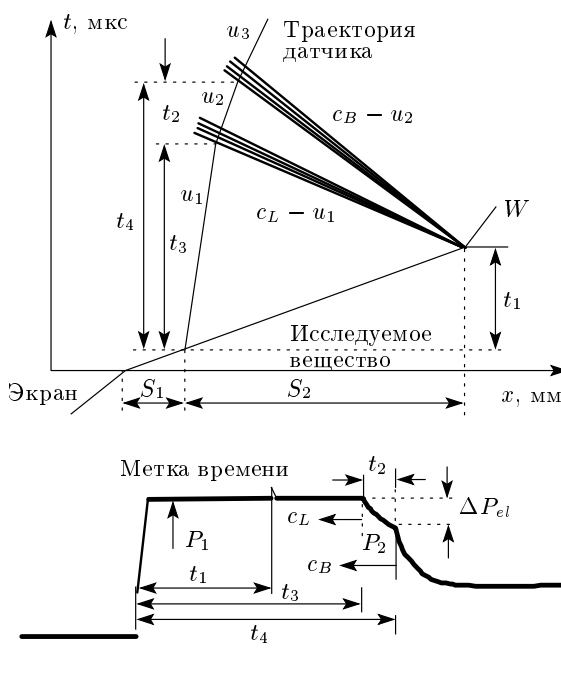


Рис. 6. Схематические $x-t$ -диаграмма и осциллограмма процесса ударного нагружения и последующей разгрузки исследуемого образца

Диаграмма $x-t$ процесса нагружения и последующей разгрузки образца из исследуемого вещества и схематическая осциллограмма показаны на рис. 6.

Параметры сжатия образцов определялись на основе экспериментально измеренных значений волновых скоростей в образцах $D = S_2/t_1$ (рис. 6) и давлений на фронте ударной волны. Кроме того, значения u_1 находились методом отражения по известным параметрам состояния в экране и экспери-

ментально измеренной волновой скорости в образце. В проведенных экспериментах «метка времени» не накладывалась на осциллограмму (как показано на рис. 6), а подавалась на другой луч этого же регистратора. Полученные в результате разной обработки первичной экспериментальной информации параметры ударных волн в серии усреднялись.

Совместная обработка осциллограмм, зарегистрированных датчиками давления и электроконтактным датчиком, дает возможность определить упругую и объемную скорости звука. Непосредственно из опытных осциллограмм находятся следующие параметры: P_1 — напряжение на фронте падающей ударной волны, P_2 — напряжение перед «головой» упругой волны расширения, ΔP_{el} — амплитуда упругой волны разгрузки, интервалы времени t_3, t_4 (см. рис. 6).

Максимальные скорости распространения упругих продольных и объемных волн разрежения по ударно-сжатым образцам церия вычислялись следующим образом. Величина упругой скорости звука c_L находилась по формуле

$$c_L = u_1 + \frac{S_2 - u_1 t_3}{t_3 - S_2/D}, \quad (2)$$

где S_2 — начальная толщина исследуемого образца, D — скорость распространения по образцу ударной волны, u_1 — массовая скорость вещества за ее фронтом, t_3 — временной интервал между моментом прихода к датчику ударной волны и моментом прихода к нему упругой волны разрежения.

Скорость D определялась из экспериментально измеренных значений P_n , с использованием известной [14] ударной адиабаты церия. Массовая скорость u_1 вычислялась из закона сохранения количества движения $P = \rho_0 D u$.

Объемная скорость звука c_B определялась по формулам:

$$c_B = u_2 + \frac{S_2 - u_1 t_3 - u_2(t_4 - t_3)}{t_4 - S_2/D}, \quad (3)$$

$$u_2 = u_1 + \frac{\Delta P_{el}}{\rho c_L}, \quad (4)$$

u_2 — массовая скорость вещества перед «головой» объемной волны расширения, ρ — плотность сжатого вещества, t_4 — интервал времени между моментом прихода к датчику ударной волны и моментом прихода к нему объемной волны разрежения.

Скорости распространения упругой c_L и объем-

ной c_B волн разрежения связаны с коэффициентом Пуассона ν известным соотношением:

$$\nu = \frac{3 - (c_L/c_B)^2}{3 + (c_L/c_B)^2}. \quad (5)$$

На точность измерения значений скоростей звука влияет структура исследуемого материала, толщина образца церия и толщина прокладок из слюды, изолирующих манганиновый датчик. При выполнении вычислений вносились малые поправки, учитывающие толщину датчика давления и его изоляции. Точность измеренных в работе методом манганинового датчика скоростей звука в области давлений от 1 до 10 ГПа не превышает 6%, а давлений составляла около 3%. В области давлений менее 1 ГПа ошибка измерения доходит до 10%.

Результаты опытов по определению скоростей звука в серии с применением манганиновых датчиков обобщены в табл. 2.

В эксперименте № 11 (см. табл. 2), зарегистрированный манганиновым датчиком давления трехволновой профиль волны нагружения в серии аналогичен профилю, приведенному в работах [6, 15]. Профиль волны сжатия состоит из упругого предвестника, следующего за ним участка фазового γ - α -перехода и пластической волны.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные двумя методами экспериментальные результаты измерений скорости звука в серии в зависимости от давления представлены на рис. 7. На данном рисунке приведены значения измеренной ультразвуковым методом продольной $c_L = 2.40$ км/с и заимствованной из работы [10] объемной $c_B = 1.73$ км/с скоростей звука при атмосферном давлении, а также расчетная зависимость энтропической скорости звука от давления по уравнению состояния ВНИИТФ [4]. В качестве основы при построении этого уравнения состояния использована модель псевдобинарных твердых растворов, разработанная Аптекарем и Понятовским [17] для описания аномального поведения церия в окрестности γ - α -превращения. В модели [17] церий представляется как твердый раствор замещения, компонентами которого являются атомы церия, находящиеся в различных электронных состояниях. Свободная энергия индивидуальных фаз (компонент раствора) в уравнении состояния [4] представлена в виде суммы трех слагаемых, описывающих взаимодействие атомов при $T = 0$, квазигармонические колебания решетки, а также совместный вклад ангармонизма

Таблица 2. Результаты экспериментов с манганиновым датчиком

№	Экран			Церий					
	Материал	P_{bp} , ГПа	u_{bp} , км/с	P_1 , ГПа	ΔP_{el} , ГПа	u_1 , км/с	D , км/с	c_L , км/с	c_B , км/с
11	Cu	8.3	0.22	3.6	0.40	0.35	1.53	3.83	2.53
12		8.6	0.23	3.8	0.40	0.36	1.56	3.69	2.38
13		12.2	0.31	5.8	0.46	0.47	1.83	4.30	2.90
14		14.5	0.36	7.1	0.69	0.54	1.96	3.99	2.66
15		17.4	0.43	8.9	0.37	0.61	2.16	3.49	3.10
16		20.7	0.50	11.0	0.85	0.73	2.25	3.45	3.04
17		22.8	0.54	12.3	1.00	0.73	2.47	3.34	3.16
18		23.6	0.56	12.8	—	0.77	2.46	—	3.19
19		25.1	0.59	13.8	—	0.79	2.57	—	3.17
20	Al	20.6	1.11	21.5	—	1.06	2.99	—	3.60
21		22.4	1.19	23.8	—	1.14	3.11	—	3.68
22		28.4	1.44	31.5	—	1.35	3.45	—	3.74
23		30.7	1.53	33.7	—	1.42	3.55	—	3.81
24		32.8	1.61	36.6	—	1.48	3.66	—	3.92

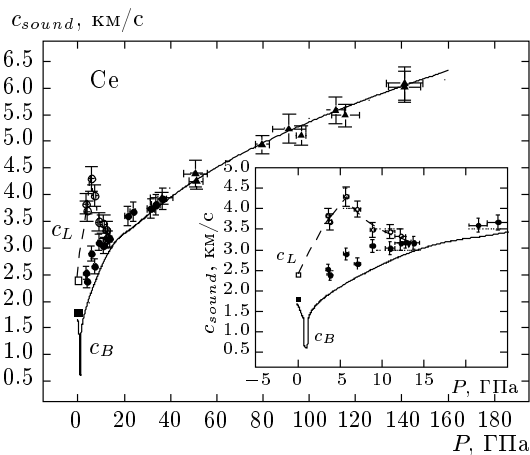


Рис. 7. Зависимость скорости звука в церии от давления: штриховая кривая — аппроксимация c_L , сплошная кривая — расчет по уравнению состояния ВНИИТФ [4]. Эксперимент: \blacktriangle — оптический метод; \circ , \bullet — соответственно упругая и объемная скорости звука (манганин); \blacktriangledown — данные работы [5]; ультразвуковые измерения: \square — упругая (данные ВНИИЭФ) и \blacksquare — объемная (данные работы [10]) скорости звука

и термически возбужденных электронов. На рис. 7 видна взаимная согласованность между расчетом и объемными скоростями звука, определенными в динамических экспериментах. Отметим, что для подбора параметров в уравнении состояния использовались только статические экспериментальные данные по теплофизическим и упругим свойствам церия, а также линии фазового γ - α -равновесия, полученные на образцах высокой чистоты (более 99.7%).

В работе [5] приведено значение скорости звука, определенное методом догоняющей разгрузки с использованием лазерного доплеровского измерителя волновой скорости и установки VISAR для регистрации профилей массовых скоростей на границе образца церия с прозрачным окном из фтористого лития. При $P = 13.2$ ГПа, $u = 0.812$ км/с, $D = 2.415$ км/с измеренное значение скорости звука в лагранжевых координатах равно $c_{Lagr} = 4.713$ км/с, а скорректированное к эйлеровым (лабораторным) координатам значение $c_{lab} = 3.14$ км/с. Представленное на рис. 7 это значение хорошо согласуется с результатами настоящей работы.

Совместный анализ экспериментальных данных по скоростям звука, полученных оптическим методом и методом манганинового датчика, свидетельствует о том, что при давлениях на ударной адиабате

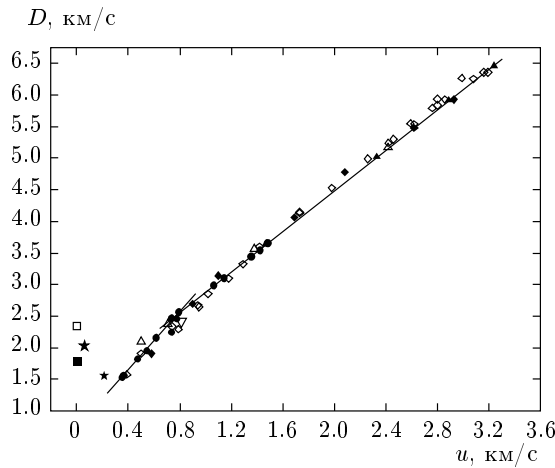


Рис. 8. Кинематические характеристики ударно-сжатого церия: \diamond — данные работы [10]; \blacklozenge — [16]; \triangle — [14]; \star , $*$ — [6]; \bullet , \blacktriangle , сплошная кривая — данная работа; ∇ — [5]; \square — c_L ; \blacksquare — c_B [10]

те церия более 13 ГПа зарегистрирована одноволновая структура волны разрежения. Значение коэффициента Пуассона, вычисленное по формуле (5) для опыта № 17 (см. табл. 2), составило 0.46 при давлении в церии 12.3 ГПа. Отсюда можно сделать вывод о том, что церий при давлениях свыше 13 ГПа находится в расплавленном состоянии.

Обратимся к кинематическим D - u -переменным ударной адиабаты. Согласно [18] при плавлении не выполняется критерий потери устойчивости, ударная волна сохраняет стабильность и образование жидкой фазы происходит на толщине фронта единой поверхности разрыва. Как отмечают авторы [18,19], в многочисленных измерениях ударно-волновой сжимаемости элементов и химических соединений в отличие от случая полиморфных превращений экспериментальные данные в D - u -координатах, как правило, не показывают явно выраженных изломов, связанных с областью сосуществования, но могут быть, тем не менее, аппроксимированы двумя прямыми линиями с разным наклоном. Это дает определенную информацию о кривой плавления вещества. Более точно положение кривой плавления вычисляется по уравнению состояния вещества.

На рис. 8 представлен график зависимости волновой скорости от массовой скорости в церии, построенный по экспериментальным результатам разных авторов. За исключением двух экспериментальных точек из работ [6,14] при $D < 2.3$ км/с, результаты других экспериментов хорошо согласуются между собой. Их достаточно отчетливо мож-

но разделить на два участка с локализацией точки излома при $D = 2.52$ км/с и $u = 0.78$ км/с, что соответствует давлению на ударной адиабате $P \approx 13$ ГПа. Выше этого излома никаких других особенностей в ходе адиабаты церия не обнаруживается вплоть до давлений 300 ГПа, достигнутых в работе [14]. И кажется весьма сомнительным предположение авторов [10] о небольшом изменении в наклоне ударной адиабаты при $P = 48$ ГПа, $u = 1.73$ км/с, которое связывалось ими с переходом твердой ГЦК-структуры в жидкое состояние.

Таким образом, результаты измерений скоростей звука и данные по кинематическим параметрам ударных волн в церии дают одинаковое значение давления $P \approx 13$ ГПа на ударной адиабате, выше которого церий уже расплавлен.

При давлениях в церии порядка 3 ГПа и менее ошибка измерений скоростей звука с применением манганинового датчика давления доходит до 10%. Поэтому в представляющей интерес для дальнейших исследований церия области давлений ниже 3 ГПа необходимо применение методов диагностики волновых процессов, обладающих более высоким временным и амплитудным разрешением, например, с использованием лазерных интерферометрических систем или датчиков на основе пленки из поливинилдендифторида.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения работы получены важные экспериментальные данные по зависимости скорости звука в церии от давления ударного сжатия. Совместно с вновь полученными и имевшимися ранее результатами по кинематическим параметрам ударных волн проведенные эксперименты позволили локализовать положение границы начала плавления церия на его ударной адиабате. Как следует из экспериментов при давлениях более 13 ГПа, церий находится в расплавленном состоянии. Об этом свидетельствуют: одноволновая структура волны разрежения в церии, зарегистрированная с помощью манганинового датчика при давлениях выше 13 ГПа; излом на ударной адиабате церия при этом же давлении, а также значение коэффициента Пуассона, которое по данным настоящей работы составило 0.46 при давлении в церии 12.3 ГПа. При более низких давлениях у церия, по-видимому, имеются особенности в ходе ударной адиабаты (в окрестности γ - α -превращения). Данная область давлений представляет интерес для дальнейших исследований церия.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Л. Аптекарь, В. И. Ращупкин, Е. Ю. Тонков, ФТТ **24**, 2517 (1982).
2. G. Eliashberg and H. Capellmann, Pis'ma v ZhETF **67**, 111 (1998).
3. О. Б. Циок, Л. Г. Хвостанцев, ЖЭТФ **120**, 1438 (2001).
4. В. М. Елькин, Е. А. Козлов, Е. В. Какшина, Ю. С. Морева, ФММ **101**, 1 (2006).
5. B. J. Jensen, *Shock Compression of Condensed Matter*, ed. by M. L. Elert, B. T. Buttler, M. D. Furnish, W. W. Anderson, and W. G. Proud, AIP Press, New York (2009), p. 1165.
6. М. Н. Павловский, В. В. Комиссаров, А. Р. Кутсар, ФГВ **35**, 98 (1999).
7. В. А. Борисенок, В. Г. Симаков, В. А. Волгин, В. М. Бельский, М. В. Жерноклетов, ФГВ **43**, 121 (2007).
8. B. Sitaud, J. Pere, and Th. Thevenin, *High Pressure Science and Technology*, ed. by S. C. Schmidt, J. W. Shaner, G. A. Samara, and M. Ross, AIP Press, New York (1994), p. 245.
9. A. Jayaraman, Phys. Rev. **137**, A179 (1965).
10. W. J. Carter, J. N. Fritz, S. P. Marsh, and R. G. McQueen, J. Phys. Chem. Sol. **36**, 741 (1975).
11. *Ударные волны и экстремальные состояния вещества*, под ред. В. Е. Фортова, Л. В. Альтшулера, Р. Ф. Трунина, А. И. Фунтикова, Наука, Москва (2000).
12. M. V. Zhernokletov, A. E. Kovalev, V. V. Komissarov et al., *Shock Compression of Condensed Matter*, ed. by M. L. Elert, M. D. Furnish, R. Chau, N. Holmes, and J. Nguyen, AIP Press, New York (2007), p. 117.
13. R. McQueen, R. Hixson, and J. Fritz, Rev. Sci. Instrum. **53**, 245 (1982).
14. Л. В. Альтшулер, А. А. Баканова, И. П. Дудолодов, ЖЭТФ **53**, 1967 (1967).
15. М. Н. Павловский, В. В. Комиссаров, ЖЭТФ **83**, 2146 (1982).
16. W. H. Gust and E. V. Royce, Phys. Rev. Ser. B № 8, 3595 (1973).
17. И. Л. Аптекарь, Е. Г. Понятовский, ФММ **25**, 777, 1049 (1968).
18. Л. В. Альтшулер, ПМТФ № 4, 93 (1978).
19. В. Д. Урлин, ЖЭТФ **49**, 485 (1965).