

УДК 536.71

УДАРНОЕ СЖАТИЕ ГИДРИДА ТИТАНА, ДЕЙТЕРИДОВ ТИТАНА, ТАНТАЛА И ЦИРКОНИЯ

А. Н. Голубков¹, Л. Ф. Гударенко¹, М. В. Жерноклетов^{1,2}, А. А. Каякин¹,
М. Г. Новиков¹

¹РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, AAKayakin@vniief.ru

²Саровский физико-технический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 607186 Саров

Приведены результаты экспериментального исследования ударного сжатия образцов гидрида титана TiH_2 , дейтеридов циркония ZrD_2 и тантала $TaD_{0.8}$, дейтеридов титана TiD_2 , $TiD_{1.6}$, $TiD_{1.1}$ в диапазоне давления $30 \div 220$ ГПа. Описана технология синтеза образцов дейтеридов титана и циркония из порошков титана и циркония, а также дейтеридов тантала из танталовых прутков. Эксперименты по определению ударных адиабат дейтеридов и гидридов выполнены с использованием известного метода отражения. Для сжатия образцов применялись генераторы ударных волн, формирующие волны зарядами взрывчатых веществ разной мощности. Предложен вариант описания полученных экспериментальных данных простыми уравнениями состояния.

Ключевые слова: тантал, титан, цирконий, гидриды, уравнение состояния.

DOI 10.15372/FGV20210411

ВВЕДЕНИЕ

В 1935 г. Вигнер и Хантингтон предсказали [1] переход твердого молекулярного водорода в атомарное металлическое состояние в условиях его сжатия при низких температурах давлением ≈ 25 ГПа. Современные квантовые методы Монте-Карло и теория функционала плотности предсказывают давление перехода водорода в металлическое состояние в диапазоне $400 \div 500$ ГПа. Способы достижения металлического состояния могут быть связаны либо с увеличением давления при низких температурах, либо с увеличением температуры, чтобы пересечь область плазменного фазового перехода. Совсем недавно при исследовании на алмазных наковальнях твердого молекулярного водорода при низких температурах путем измерения отражательной способности образцов авторы [2] обнаружили переход в металлическое состояние при давлении 495 ГПа. Более основательные свидетельства о металлизации дают эксперименты с ударными волнами, в которых зарегистрирован в дейтерии пере-

ход жидкий диэлектрик — жидкий металл при температурах $1000 \div 2000$ К и давлении около 300 ГПа [3]. Тем не менее, как следует из выводов обзора [4], необходимо выполнить еще большой объем работ, чтобы получить убедительные данные, подтверждающие металлизацию водорода, и это является стимулирующим фактором в постановке новых экспериментов.

В [5] сделано предположение, что перспективными веществами для исследования металлизации водорода могут быть гидриды элементов IV группы периодической системы элементов. Можно ожидать, что металлизация в таких соединениях будет осуществляться при давлениях меньших, чем в твердом водороде, поскольку в них водород уже находится в атомарном состоянии.

Теоретическими исследованиями [6, 7], проведенными в ГНЦ РФ ТРИНИТИ, показано, что учет квантово-механических эффектов в изотопах водорода в присутствии ядер тяжелых элементов приводит к изменению распределения Максвелла — увеличению количества высокоэнергетичных ядер водорода на «хвосте» распределения Максвелла. Учет данного эффекта, в частности, необходим для уточнения сечений термоядерных реакций. Исследование уравнений состояния водородонасыщенных металлов при высоких давлениях позволит

Экспериментальная часть работы выполнена при финансовой поддержке госкорпорации «Росатом» (государственный контракт № Н.4х.4490.1344).

© Голубков А. Н., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В., Каякин А. А., Новиков М. Г., 2021.

более надежно верифицировать квантово-механические методы расчета свойств соединений изотопов водорода с металлами (смесей изотопов водорода с ядрами тяжелых элементов).

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования ударных адиабат гидрида титана TiH_2 , дейтеридов циркония ZrD_2 и тантала $TaD_{0,8}$, дейтеридов титана TiD_2 , $TiD_{1,6}$, $TiD_{1,1}$. Новые данные дополняют ранее полученную экспериментальную информацию об ударных адиабатах соединений изотопов водорода с тяжелыми металлами — гидридов и дейтеридов ванадия с разной концентрацией атомов изотопов водорода [8] и гидридов кальция, магния, титана, циркония, тантала [9]. Это расширяет базу данных для разработки уравнений состояния таких соединений и калибровки (верификации) методик расчета свойств веществ из первых принципов.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

В качестве исходных материалов для получения дейтеридов титана и циркония использовались порошки этих металлов с содержанием основных веществ более 99,5 %. Дейтерид тантала получали из танталового прутка, содержащего 99,9 % основного вещества. Во всех случаях при синтезе дейтерия с металлами использовался газообразный дейтерий по ТУ 9515-88.

Для успешного синтеза гидридов и дейтеридов важным фактором является состояние поверхности металла. Поверхность металла в состоянии поставки, как правило, покрыта оксидной пленкой, не удаляемой простым взаимодействием с дейтерием. Такие пленки часто являются хорошими защитными покрытиями, препятствующими взаимодействию металла с дейтерием. Для удаления оксидной пленки существует, в зависимости от металла, несколько методов активации. В частности, оксидную пленку с поверхности циркония и титана можно удалить посредством его термообработки в вакууме или водороде. В данной работе для каждого металла выбирали свой режим по температуре и длительности прогрева, который обеспечивал растворение оксидной пленки на поверхности металла.

Активация титана и циркония проводилась путем их прогрева в вакууме (давление остаточных газов $p \approx 0.13$ Па) в течение 2 ч при температуре ≈ 773 К. Тантал активирова-

ли также путем прогрева в вакууме в течение 3 ч при температуре ≈ 953 К.

Активация металлов и последующий синтез образцов дейтеридов требующихся металлов выполнялись в установке, аналогичной установке Сивертса, конструкция которой описана в [10]. Количество дейтерия, поглощенного металлом, зависит от условий синтеза, к которым относятся температура и давление подаваемого в установку газа, а также длительность отжига.

Масса загрузки металлов в реактор для синтеза дейтеридов составляла около 100 г. По завершении процесса синтезированные соединения извлекали из реактора, измельчали в ступке, просеивали через сито 0,2 мм и перемешивали в смесителе типа «пьяная бочка» в течение 0,5 ч. После этого отбирали две пробы для определения количества водорода или дейтерия, поглощенных металлом. Содержание поглощенного газа в каждой пробе анализировали путем ее сплавления с медью и измерения количества выделившегося газа. Результаты анализов осреднялись. Проведенный анализ показал, что получены образцы гидрида титана состава $TiH_{2,0}$, дейтерида титана составов TiD_2 , $TiD_{1,6}$ и $TiD_{1,1}$, дейтерида тантала состава $TaD_{0,8}$ и дейтерида циркония состава ZrD_2 .

Для проведения опытов с ударным сжатием изготавливались образцы из порошков синтезированных гидридов (дейтеридов) методом прессования в виде таблеток диаметром 12 мм, толщиной $3 \div 4$ мм, по массе и объему которых определяли начальную плотность образцов. Поскольку порошки дейтеридов прессуются довольно плохо, с целью сохранности прессформ плотность образцов была ограничена значениями $0.76 \div 0.90$ от плотности сплошного вещества данного состава.

Для оценки плотности сплошных соединений (соответствующего гидрида или дейтерида) при нормальных условиях были проанализированы собранные из разных источников данные, полученные при нормальных условиях, о кристаллической плотности или параметрах решетки таких соединений с разными отношениями атомов изотопа водорода к атомам металла. Для гидрида, дейтеридов титана использованы данные, приведенные в работах [10–15], для дейтерида циркония — в [10, 11, 13–18], для дейтерида тантала — в [11–13, 19–25]. Данные из этих работ показаны на рис. 1

Таблица 1

Коэффициенты зависимости (1) для гидридов и дейтеридов титана, циркония и тантала

Вещество	a , моль/см ³	b , моль/см ³	c , моль/см ³
TiH _n , TiD _n	0.0941	-0.0137	0.00217
ZrH _n , ZrD _n	0.0713	-0.00952	0.002
TaH _n , TaD _n	0.092	-0.0118	0.00115

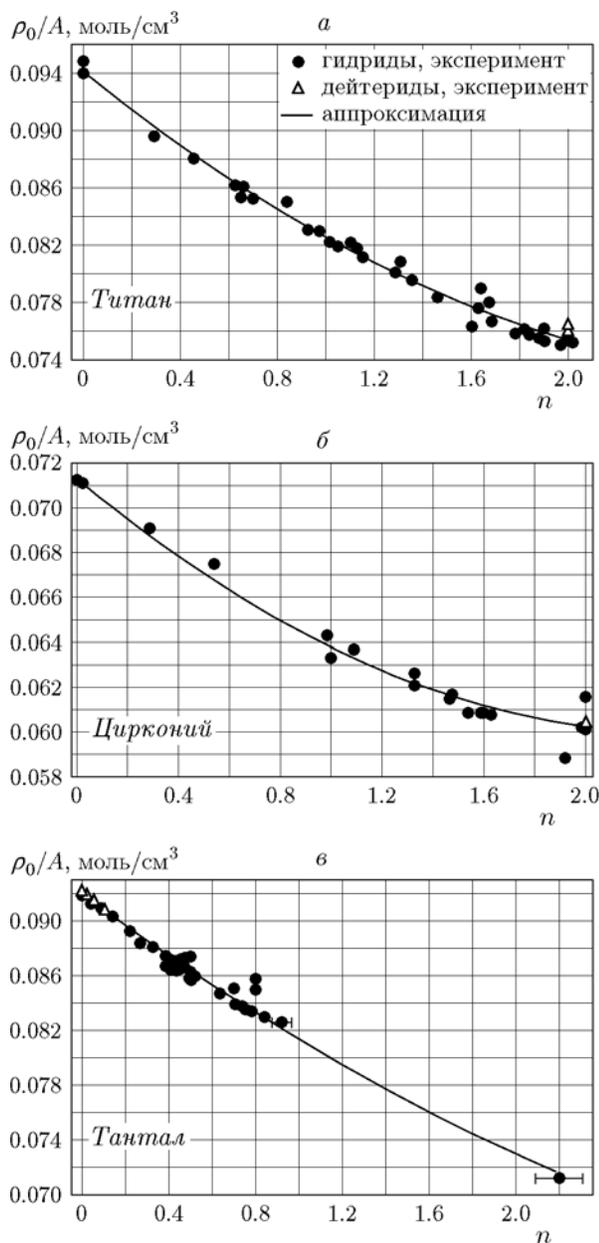


Рис. 1. Зависимость параметра ρ_0/A от отношения атомов изотопа водорода к числу атомов металла для гидридов и дейтеридов титана, циркония, тантала:

точки — экспериментальные данные для гидридов (дейтеридов) титана [10–15] (а), циркония [10, 11, 13–18] (б), тантала [11–13, 19–25] (в); линия — аппроксимация экспериментальных данных выражением (1) с коэффициентами из табл. 1

в виде зависимостей отношения ρ_0/A от n , где A — молярная масса соединения металла с изотопом водорода, ρ_0 — плотность сплошного соединения при нормальных условиях, определенная экспериментально или рассчитанная с использованием параметров кристаллической решетки, $n = N_{H,D}/N_{me}$ — отношение числа атомов изотопа водорода к числу атомов металла.

На рис. 1 также показаны аппроксимации экспериментальных данных функцией вида

$$\rho_0/A = a + bn + cn^2 \quad (1)$$

в диапазоне $0 \leq n \leq 2$.

Полученные в результате аппроксимации значения коэффициентов приведены в табл. 1.

По зависимости (1) определены плотности при нормальных условиях сплошных (непористых) составов, исследовавшихся в экспериментах: TiH₂, TiD₂, TiD_{1.6}, TiD_{1.1}, TaD_{0.8}, ZrD₂. Значения этих плотностей представлены в табл. 2.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

Определение ударных адиабат образцов выполнено с использованием известного метода отражения. Для нагружения образцов применялись генераторы плоских ударных волн, формирующие волны зарядами взрывчатых веществ разной мощности [26]. По три таблетки образцов устанавливались на диски из меди или железа, использовавшиеся как вещество-эталон. Ударные волны в эталонах создавались при ударе по ним лайнерами, разгоняемыми продуктами взрыва. Скорости ударных волн измерялись электроконтактными датчиками, которые устанавливались на эталонном диске (регистрация момента входа ударной волны в образец) и на торце образца (регистрация момента выхода ударной волны из образца). Сигналы с электроконтактов регистрировались осциллографами. Параметры ударных

Таблица 2
 Результаты экспериментов по ударному сжатию соединений
 тантала, титана и циркония с изотопами водорода

Образец	U , км/с	D , км/с	p , ГПа	ρ , г/см ³	V , см ³ /Г
TaD _{0.8} $\rho_{00} = 13.6$ г/см ³ $\rho_0 = 15.21$ г/см ³ $k = 1.118$	0.89	3.80	46.0	17.8	0.056
	1.20	4.24	69.2	19.0	0.05261
	1.86	5.25	132.8	21.1	0.0471
	2.23	5.86	177.7	21.95	0.0455
	2.60	6.35	225.0	23.0	0.043
TiH ₂ $\rho_{00} = 3.31$ г/см ³ $\rho_0 = 3.76$ г/см ³ $k = 1.136$	3.70	8.54	104.6	5.85	0.17
	3.30	8.15	89.0	5.56	0.18
	2.36	7.12	55.6	4.96	0.20
	3.25	8.13	87.4	5.52	0.18
	2.09	6.80	47.0	4.76	0.21
TiD ₂ $\rho_{00} = 3.40$ г/см ³ $\rho_0 = 3.91$ г/см ³ $k = 1.150$	1.48	5.74	28.9	4.58	0.218
	2.10	6.39	45.6	5.06	0.198
	2.68	7.31	66.6	5.37	0.186
	3.25	8.03	88.7	5.71	0.175
	3.90	9.03	119.7	5.98	0.167
TiD _{1.6} $\rho_{00} = 3.55$ г/см ³ $\rho_0 = 3.97$ г/см ³ $k = 1.118$	2.63	7.25	67.7	5.57	0.18
	1.43	5.88	30.0	4.69	0.21
	3.16	8.27	92.8	5.75	0.17
	3.62	8.32	106.9	6.28	0.16
	3.17	8.29	93.3	5.75	0.17
TiD _{1.1} $\rho_{00} = 3.67$ г/см ³ $\rho_0 = 4.09$ г/см ³ $k = 1.114$	1.49	5.20	28.4	5.14	0.194
	2.10	6.02	46.4	5.63	0.178
	2.65	7.10	69.0	5.85	0.171
	3.15	8.04	92.9	6.03	0.166
	3.51	8.63	111.2	6.18	0.162
ZrD ₂ $\rho_{00} = 4.38$ г/см ³ $\rho_0 = 5.74$ г/см ³ $k = 1.310$	2.36	5.59	57.8	7.58	0.132
	3.16	6.96	96.3	8.02	0.125
	3.54	7.4	114.7	8.4	0.119
	1.78	4.73	37.5	6.94	0.144
	1.21	3.93	29.8	6.32	0.158

волн в эталонных дисках определялись ранее в экспериментах при отработке генераторов ударных волн.

Результаты единичных экспериментов с исследуемыми образцами из дейтеридов тантала, титана, циркония и гидрида титана

при разных значениях интенсивности ударных волн, приведены в табл. 2. Кроме фактической плотности образцов соединений ρ_{00} , в таблице указаны плотности сплошного соединения при нормальных условиях ρ_0 , оцененные по (1) с коэффициентами из табл. 1, а также значения по-

риности образца $k = \rho_0/\rho_{00}$.

Результаты ранее выполненных исследований ударно-волновой сжимаемости гидридов титана, циркония, тантала представлены в работах [9] и [21]. Подчеркнем, что в работе [9], наряду с другими соединениями, исследовались также образцы из таких же соединений, как в настоящей работе: $\text{TaH}_{0.4}$, TiH_2 и $\text{ZrH}_{1.8}$. Проведенный нами анализ данных работы [9] показал следующее.

— Для состава $\text{TaH}_{0.4}$ со ссылкой на работу [13] указано значение плотности сплошного (непористого) вещества $\rho_0 = 15.1 \text{ г/см}^3$. Однако из комментария, приведенного в [13], эта плотность соответствует составу $\text{TaH}_{0.76}$. Оцененная нами по соотношению (1) с параметрами из табл. 1 плотность сплошного вещества $\text{TaH}_{0.4}$ составила $\rho_0 = 15.86 \text{ г/см}^3$. Экспериментальные данные [9] для состава $\text{TaH}_{0.4}$ с пористыми образцами ($\rho_{00} = 10.92$ и 12.5 г/см^3) имеют большой разброс и не согласуются с экспериментальными данными [21] для образцов $\text{TaH}_{0.5}$.

— Для TiH_2 со ссылкой на справочник [13] указана плотность $\rho_0 = 3.78 \text{ г/см}^3$, расчеты по формуле (1) дают близкое значение $\rho_0 = 3.76 \text{ г/см}^3$. Не удается одним уравнением состояния (УРС) согласованно описать результаты экспериментов с составом TiH_2 из [9] и из настоящей работы (см. табл. 2).

— В [9] представлены результаты восьми экспериментов с гидридом циркония $\text{ZrH}_{1.8}$. Для всех испытанных образцов указана одна и та же начальная плотность, совпадающая с плотностью сплошного (непористого) вещества. Не удается одним УРС согласованно описать экспериментальные данные для $\text{ZrH}_{1.8}$ из [9] и для ZrD_2 из настоящей работы (см. табл. 2).

По указанным причинам в дальнейшем результаты экспериментов с $\text{TaH}_{0.4}$, TiH_2 и $\text{ZrH}_{1.8}$ из [9] нами не рассматривались. Предварительный анализ также показал, что экспериментальные данные [21] для состава $\text{TaH}_{0.5}$ хорошо согласуются с экспериментальными данными для $\text{TaD}_{0.8}$, приведенными в табл. 2.

К настоящему времени термодинамические свойства гидридов (дейтеридов) титана, циркония и тантала при высоких давлениях недостаточно хорошо изучены как экспериментальными методами, так и в расчетах методами из первых принципов. Из-за небольшого объема имеющейся информации разработка

УРС для таких соединений затруднена.

В некоторых работах (см., например, [8, 27, 28]) отмечается, что сжимаемость гидридов и дейтеридов ниобия, ванадия, тантала близка к сжимаемости чистых металлов. Использование этого свойства позволяет оценивать термодинамические свойства гидридов по имеющимся УРС чистых металлов. Ниже мы проводим сравнение рассчитанных таким образом ударных адиабат для ряда гидридов с экспериментальными результатами, полученными в данной работе и в [21].

Для выбора формы УРС металлов проведено сравнение экспериментов, выполненных с соединениями Ta, с результатами расчетов, проведенных с использованием широкодиапазонного точного УРС [29] и простого по форме УРС, описанного в [30]. При использовании обоих УРС не выявлено практически значимых отличий в расчетах ударных адиабат Ta и его соединений $\text{TaH}_{0.5}$ и $\text{TaD}_{0.8}$. Учитывая это, все дальнейшие расчеты, результаты которых представлены в данной работе, выполняли с использованием УРС в форме [30].

В УРС [30] для расчета давления и удельной внутренней энергии выделены две составляющие:

$$p = p_x + p_T, \quad E = E_x + E_T.$$

Потенциальные p_x , E_x и тепловые p_T , E_T составляющие давления и удельной энергии рассчитываются по формулам

$$p_x(\delta) = \frac{c_0^2 \rho_0}{n} (\delta^n - 1),$$

$$E_x(\delta) = \frac{c_0^2}{n} \left(\frac{\delta^{n-1} - 1}{n-1} + \frac{1}{\delta} - 1 \right),$$

$$p_T = \Gamma \rho_0 \delta E_T, \quad E_T = E - E_x,$$

где $\delta = \rho/\rho_0$ — относительное сжатие, ρ_0 — плотность вещества при нормальных условиях, ρ — текущая плотность, c_0 — скорость звука в веществе при нормальных условиях, n — подгоночный параметр, Γ — коэффициент Грюнрайзена.

В табл. 3 приведены параметры УРС металлов и их соединений с водородом и дейтерием, исследовавшихся в данной работе и работе [21].

С использованием экспериментальных данных для Ta [31–38], Ti [31, 32, 39–41], Zr

Таблица 3
 Параметры уравнений состояния Ta, Ti, Zr
 и их соединений с водородом и дейтерием

Вещество	ρ_0 , г/см ³	ρ_{00} , г/см ³	c_0 , км/с	n	Γ
Ta	16.69	—	3.52	3	2.3
TaH _{0.5} [21]	15.67	15.60	3.62	3	2.3
TaD _{0.8} *	15.21	13.6	3.68	3	2.3
Ti	4.52	—	5.00	2.5	2.09
TiH ₂ *	3.76	3.31	5.49	2.5	2.09
TiD ₂ *	3.91	3.40	5.38	2.5	2.09
TiD _{1.6} *	3.97	3.55	5.338	2.5	2.09
TiD _{1.1} *	4.09	3.67	5.26	2.5	2.09
Zr	6.51	—	3.79	2.4	2.3
ZrD ₂ *	5.74	4.38	4.06	2.4	2.3

Примечание. * Данные настоящей работы.

[32, 42] подобраны значения параметров c_0 , n , Γ уравнений состояния этих металлов. Параметры УРС для соединений металлов с изотопами водорода получены в результате корректировки значений параметров УРС металла — плотности ρ_0 , скорости звука c_0 при нормальных условиях. Для соединений значения ρ_0 приняты равными указанным в табл. 2 или источнике [21], а c_0 пересчитывались из условия равенства сжимаемостей $\rho_0 c_0^2$

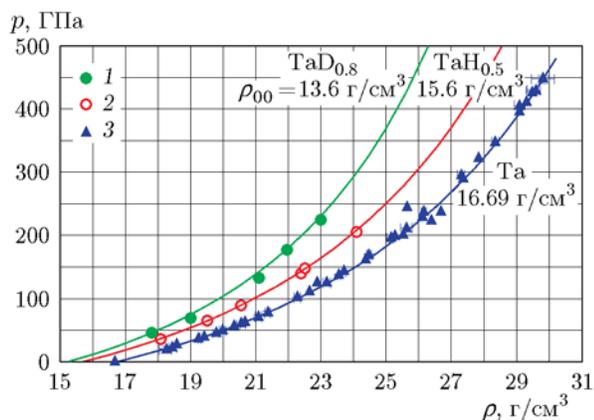


Рис. 2. Зависимость давления от плотности на ударных адиабатах Ta и соединений TaD_{0.8}, TaH_{0.5}:

эксперимент: 1 — TaD_{0.8}, данная работа, 2 — TaH_{0.5} [21], 3 — Ta [31–38]; линии — расчет по УРС с параметрами из табл. 3

металла и его соединения.

На рис. 2 представлены ударные адиабаты для Ta и его соединений TaD_{0.8} ($\rho_{00} = 13.6$ г/см³), TaH_{0.5} ($\rho_{00} = 15.6$ г/см³). Параметры их УРС приведены в табл. 3. На рисунке также показаны экспериментальные данные для TaD_{0.8} из табл. 2 (данная работа), TaH_{0.5} из [21]. Ударная адиабата Ta хорошо описывает экспериментальные данные [31–38]. Также хорошо согласуются с ними ударные адиабаты TaD_{0.8} и TaH_{0.5}, рассчитанные по УРС с параметрами из табл. 3.

На рис. 3 приведены рассчитанные по УРС с параметрами из табл. 3 ударные адиабаты для Ti и его соединений TiH₂ ($\rho_{00} = 3.31$ г/см³), TiD₂ ($\rho_{00} = 3.4$ г/см³), TiD_{1.6} ($\rho_{00} = 3.55$ г/см³), TiD_{1.1} ($\rho_{00} = 3.67$ г/см³),

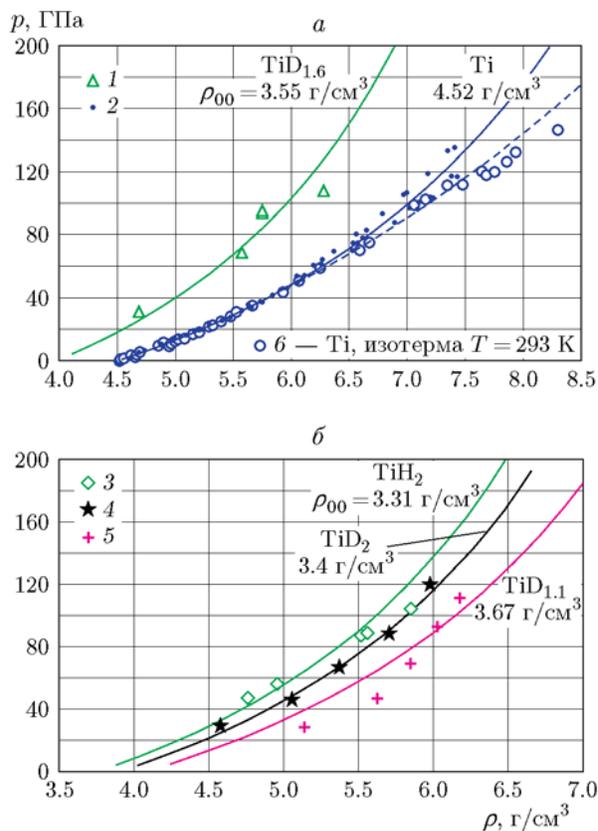


Рис. 3. Зависимость давления от плотности на ударных адиабатах и нормальной изотерме Ti и соединений TiH₂, TiD₂, TiD_{1.6}, TiD_{1.1}: эксперимент: a: 1 — TiD_{1.6}, данная работа, 2 — Ti [31, 32, 40, 41], 6 — Ti, изотерма $T = 293$ К [39]; б: 3 — TiH₂, 4 — TiD₂, 5 — TiD_{1.1}; расчет по УРС с параметрами из табл. 3: сплошные линии — ударные адиабаты, штриховая линия — изотерма Ti $T = 293$ К

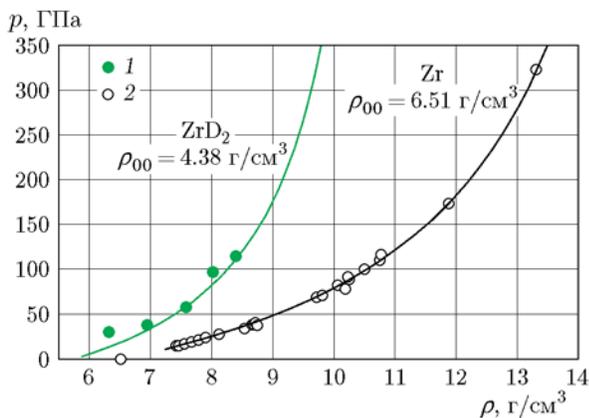


Рис. 4. Зависимость давления от плотности на ударных адиабатах Zr и соединения ZrD₂: эксперимент: 1 — ZrD₂, данная работа, 2 — Zr [32, 42]; линии — расчет

а также полученные для них экспериментальные данные. Ударная адиабата Ti хорошо описывает экспериментальные данные [31, 32, 40, 41]. Рассчитанные ударные адиабаты согласованно описывают и приведенные в табл. 2 экспериментальные данные для соединений титана с водородом TiH₂ и дейтерием TiD_{1.6}, TiD₂. Экспериментальные данные для TiD_{1.1} дают наклон ударной адиабаты, заметно отличающийся от рассчитанной по УРС адиабаты и от адиабат, полученных в экспериментах с TiD_{1.6} и TiD₂. Выяснение причин такого расхождения экспериментов с TiD_{1.1} с расчетом и экспериментальными данными для других составов требует дополнительных исследований (проведение контрольных экспериментов и расчетов исследований с анализом экспериментов).

На рис. 4 приведены рассчитанные по УРС с параметрами из табл. 3 ударные адиабаты для Zr и соединения ZrD₂. Видно, что расчеты хорошо согласуются с экспериментальными данными [32, 42] для Zr и с экспериментальными данными из табл. 2 для ZrD₂.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С использованием генераторов плоских ударных волн получены новые экспериментальные данные по кинематическим и термодинамическим параметрам ударных волн в образцах соединений TaD_{0.8}, TiH₂, TiD₂, TiD_{1.6}, TiD_{1.1}, ZrD₂ в диапазоне давления 30 ÷ 220 ГПа. Предложенные простые уравнения состояния позволили согласованно описать экспериментальные данные (за исключе-

нием данных для TiD_{1.1}), представленные в настоящей работе, а также в работе [21] для TaH_{0.5}. При определении параметров уравнений состояния использовано отмеченное в работах [8, 27, 28] свойство одинаковой сжимаемости ($\rho_0 c_0^2$) металла и его соединений с изотопами водорода D и H. Приведенные в работе результаты свидетельствуют о том, что данное свойство реализуется при расчетах ударных адиабат рассмотренных соединений. Небольшой объем имеющейся экспериментальной и расчетной информации о термодинамических свойствах гидридов (дейтеридов) титана, циркония и тантала ограничивает разработку широкого диапазона уравнений состояния этих соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wigner E., Huntington H. B. On the possibility of a metallic modification of hydrogen // J. Chem. Phys. — 1935. — V. 3. — P. 764–770. — <https://doi.org/10.1063/1.1749590>.
2. Dias R. P., Silvera I. F. Observation of the Wigner-Huntington transition to metallic hydrogen // Science. — 2017. — V. 355. — P. 715–718. — DOI: 10.1126/science.aal1579.
3. Knudson M. D., Desjarlais M. P., Becker A., Lemke R. W., Cochrane K. R., Savage M. E., Bliss D. E., Mattsson T. R., Redmer R. Direct observation of an abrupt insulator-to-metal transition in dense liquid deuterium // Science. — 2015. — V. 348, N 6242. — P. 1455–1460. — DOI: 10.1126/science.aaa7471.
4. Утюж А. Н., Михеенков А. В. Водород и его соединения при экстремальных давлениях // Успехи физ. наук. — 2017. — Т. 187, № 9. — С. 953–970. — DOI: 10.3367/UFNr.2017.02.038077.
5. Ashcroft N. M. Hydrogen dominant metallic alloys: High temperature superconductors? // Phys. Rev. Lett. — 2004. — V. 92. — P. 187002. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.92.187002.
6. Елецкий А. В., Старостин А. Н., Таран М. Д. Квантовые поправки к равновесным константам скорости неупругих процессов // Успехи физ. наук. — 2005. — Т. 175, № 3. — С. 299–313. — DOI: 10.3367/UFNr.0175.200503d.0299.
7. Старостин А. Н., Грязнов В. К., Петрушевич Ю. В. Развитие теории распределения частиц по импульсам с учетом квантовых эффектов // ЖЭТФ. — 2017. — Т. 152, № 5. — С. 1104–1112. — DOI: 10.7868/S0044451017110256.
8. Голубков А. Н., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В., Каякин А. А., Шуйкин А. Н. Ударное сжатие гидридов и дейтеридов ванадия с разной концентрацией атомов газов // Физика горения и взрыва. —

2017. — Т. 53, № 3. — С. 72–81. — DOI: 10.15372/FGV20170308.
9. **Трунин Р. Ф., Жерноклетов М. В., Кузнецов Н. Ф., Сутулов Ю. Н.** Ударное сжатие гидридов металлов // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1987. — № 11. — С. 65–70.
 10. **Михеева В. И.** Гидриды переходных металлов. — М.: Изд-во АН СССР, 1960.
 11. **Эмсли Дж.** Элементы: справочник. — М.: Мир, 1993.
 12. **Sakamoto M.** Studies of hydrogen vibrations in transition metal hydrides by thermal neutron transmissions // J. Phys. Soc. Jpn. — 1964. — V. 19, N 10. — P. 1862–1866. — <https://doi.org/10.1143/JPSJ.19.1862>.
 13. **Антонова М. М.** Свойства гидридов металлов: справочник. — Киев: Наукова думка, 1975.
 14. **Beck R. L.** Research and development of metal hydrides: Summary Report for Oct. 1, 1958–Sept. 30, 1960. — Report LAR-10, Denver Univ. Denver Research Inst., 1960. — <https://doi.org/10.2172/4790244>.
 15. **Kalita P. E., Sinogeikin S. V., Lipinska-Kalita K., Hartmann T., Ke X., Chen Ch., Cornelius A.** Equation of state of TiH₂ up to 90 GPa: A synchrotron x-ray diffraction study and ab initio calculations // J. Appl. Phys. — 2010. — V. 108. — 043511. — <https://doi.org/10.1063/1.3455858>.
 16. **Справочник химика.** Основные свойства неорганических и органических соединений. — М.: Химия, 1971. — Т. 2.
 17. **Lityagina L. M., Dyuzheva T. I.** Isothermal compression study of 3d and 4d transition metal dihydrides II: Compression of ZrH_{1.99} up to 18 GPa // J. Alloys Compd. — 1992. — V. 179, N 1-2. — P. 73–76. — [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(92\)90206-O](https://doi.org/10.1016/0925-8388(92)90206-O).
 18. **Kuzovnikov M. A., Tkacz M.** High-pressure synthesis of novel polyhydrides of Zr and Hf with a Th₄H₁₅-type structure // J. Phys. Chem. C. — 2019. — V. 123, N 50. — P. 30059–30066. — <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b07918>.
 19. **Weymann K., Müller H.** Deuterides of Nb—Ta, Nb—V and Ta—V solid solutions // J. Less Common Met. — 1986. — V. 119, N 1. — P. 127–130. — [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(86\)90202-X](https://doi.org/10.1016/0022-5088(86)90202-X).
 20. **Syono Y., Taguchi H., Fukai Y., Atou T., Kusaba K., Fukuoka K.** Shock compression of VH_{0.50}, NbH_{0.75} and TaH_{0.50}: A comparative study // AIP Conf. Proc. — 1994. — V. 309, N 1. — P. 861–864. — <https://doi.org/10.1063/1.46235>.
 21. **Taguchi H., Fukai Y., Atou T., Fukuoka K., Syono Y.** Shock compression of NbH_{0.75} and TaH_{0.5}: Universal compression behavior of hydrogen in metallic environments // Phys. Rev. B: Condens. Matter. — 1994. — V. 49, N 5. — P. 3025–3029. — DOI: 10.1103/physrevb.49.3025.
 22. **Schober T., Dieker C., Feenstra R.** Dilute hydrides, deuterides and tritides of V, Nb and Ta: density measurements // J. Phys. F: Met. Phys. — 1988. — V. 18, N 6. — P. 1119–1125.
 23. **Meng H.** High pressure X-ray and Raman studies of the selected metal hydrides: Thesis / Inst. of Physical Chemistry of the Polish Academy of Sciences. — Warsaw, 2019.
 24. **Stalinski B.** X-Ray analysis and magnetic susceptibilities of Tantalum hydrides // Bull. Acad. Pol. Sci. — 1954. — V. 2, N 5. — P. 245–247.
 25. **Szafrański A. W., Tkacz M., Majchrzak S., Züjchner H.** Resistometric studies of the Ta—H system at high pressures and low temperatures // J. Less Common Met. — 1984. — V. 101. — P. 523–527. — [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(84\)90127-9](https://doi.org/10.1016/0022-5088(84)90127-9).
 26. **Альтшулер Л. В., Трунин Р. Ф., Крупников К. К., Панов Н. В.** Взрывные лабораторные устройства для исследования сжатия веществ в ударных волнах // Успехи физ. наук. — 1996. — Т. 166, № 5. — С. 575–581. — DOI: 10.3367/UFNr.0166.199605f.0575.
 27. **Fukizawa A., Fukai Y.** Effects of high pressure on the structure of VH_{0.5} and NbH_{0.75} // J. Phys. Soc. Jpn. — 1983. — V. 52. — P. 2102–2107. — <https://doi.org/10.1143/JPSJ.52.2102>.
 28. **Syono Y., Kusaba K., Fukuoka K., Fukai Y., Watanabe K.** Shock compression of V₂H and V₂D to 135 GPa and anomalous decompression behavior // Phys. Rev. B. — 1984. — V. 29, N 12. — P. 6520–6524.
 29. **Гордеев Д. Г., Гударенко Л. Ф., Каякин А. А., Куделькин В. Г.** Модель уравнения состояния металлов с эффективным учетом ионизации. Уравнения состояния Ta, W, Al, Be // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 1. — С. 106–120.
 30. **Забабахин Е. И.** Некоторые вопросы газодинамики взрыва. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 1997.
 31. **Крупников К. К., Баканова А. А., Бражник М. И., Трунин Р. Ф.** Исследование ударной сжимаемости титана, молибдена, тантала и железа // Докл. АН СССР. — 1963. — Т. 148, № 6. — С. 1302–1305.
 32. **LASL Shock Hugoniot Data** / S. P. Marsh (Ed.). — Berkeley: Univ. of California Press, 1980.
 33. **Трунин Р. Ф., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В., Симаков Г. В.** Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / под ред. Р. Ф. Трунина. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006.
 34. **Mitchell A. C., Nellis W. J.** Shock compression of aluminum, copper, and tantalum // J. Appl. Phys. — 1981. — V. 52, N 5. — P. 3363–3374. — <https://doi.org/10.1063/1.329160>.
 35. **Nellis W. J., Mitchell A. C., Young D. A.** Equation-of-state measurements for aluminum, copper, and tantalum in the pressure

- range 80–440 GPa (0.8–4.4 Mbar) // J. Appl. Phys. — 2003. — V. 93, N 1. — P. 304–310. — <https://doi.org/10.1063/1.1529071>.
36. **Holmes N. C., Moriarty J. A., Gathers G. R., Nellis W. J.** The equation of state of platinum to 660 GPa (6.6 Mbar) // J. Appl. Phys. — 1989. — V. 66, N 7. — P. 2962–2967. — <https://doi.org/10.1063/1.344177>.
37. **Yokoo M., Kawai N., Nakamura K. G., Kondo K.** Hugoniot measurement of gold at high pressures of up to 580 GPa // Appl. Phys. Lett. — 2008. — V. 92, N 5. — 051901(1–3). — <https://doi.org/10.1063/1.2840189>.
38. **Xi F., Jin K., Cai L., Geng H., Tan Y., Li J.** Sound velocity of tantalum under shock compression in the 18–142 GPa range // J. Appl. Phys. — 2015. — V. 117, N 18. — P. 185901(1–9). — <https://doi.org/10.1063/1.4919845>.
39. **Vohra Y. K., Spencer P. T.** Novel γ -phase of titanium metal at megabar pressures // Phys. Rev. Lett. — 2001. — V. 86. — P. 3068–3071. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.3068>.
40. **Трунин Р. Ф., Симаков Г. В., Медведев А. Б.** Сжатие титана в ударных волнах // Теплофизика высоких температур. — 1999. — Т. 37, № 6. — С. 881–886.
41. **Борисенок В. А., Жерноклетов М. В., Ковалев А. Е., Подурец А. М., Симаков В. Г., Ткаченко М. И.** Фазовые переходы в титане в ударных волнах в области давления до 150 ГПа // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 3. — С. 113–121.
42. **Альтшулер Л. В., Баканова А. А., Дудолов И. П.** Влияние электронной структуры на сжимаемость металлов при высоких давлениях // ЖЭТФ. — 1967. — Т. 53, вып. 12. — С. 1967–1977.

Поступила в редакцию 17.09.2020.

После доработки 30.11.2020.

Принята к публикации 19.02.2021.
