

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В СМЕСЯХ ЖЕЛЕЗА С АЛМАЗОМ

В. М. Титов, В. Ф. Анисичкин, С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов,
А. И. Туркин*

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, karakhanov@hydro.nsc.ru

*Институт минералогии и петрографии СО РАН, 630090 Новосибирск

Методом боковой разгрузки проведены измерения скорости распространения звуковых возмущений в прессованных образцах из смесей железо — алмаз 90/10, железо — алмаз 85/15, железо — сера 90/10, а также в образцах прессованного железа (без добавок) и стали Ст. 3. Результаты измерений сопоставлены с геофизическими данными с целью поиска легкого химического элемента (или элементов) в составе земного ядра, который, уменьшая суммарную плотность ядра по сравнению с железоникелевой смесью, не уменьшал бы существенно скорость звука в ядре по сравнению с чистой железоникелевой смесью при давлениях, существующих в ядре. Установлено, что добавление алмаза приводит к росту скорости звука в ударно-сжатых образцах и уменьшению их плотности по сравнению с другими образцами, поэтому при моделировании состава внутренних слоев Земли следует учитывать возможное влияние углерода в алмазной фазе.

Ключевые слова: скорость звука, ударные волны, алмаз, железо, ядро Земли.

ВВЕДЕНИЕ

Определение скорости звука в веществе, находящемся при высоком давлении и температуре, — важная задача, которая в значительной мере стимулирована геофизическими исследованиями. Это связано с тем, что знания о внутреннем строении Земли и ее составе основаны, прежде всего, на изучении особенностей и скорости прохождения сейсмических волн в теле Земли.

Эксперименты, проводимые в статических условиях, обеспечивают получение данных, точность которых достаточно высока, поскольку условия опытов хорошо контролируются. Алмазные наковальни позволяют достигать мегабарных давлений при объеме образца менее 1 мм^3 и температурах порядка $600 \div 700 \text{ }^\circ\text{C}$, однако, как правило, возможности статических исследований в макрообъемах ($1 \div 2 \text{ см}^3$) ограничены диапазоном давлений $10 \div 20 \text{ ГПа}$ и температур $2000 \div 2500 \text{ }^\circ\text{C}$. Поэтому для определения физико-механических свойств веществ при экстремальных давлениях и температурах часто используются ударно-волновые эксперименты. Интерес представляют ударно-волновые данные как для отдель-

ных химических элементов, так и для смесей тех или иных компонентов. Большое число экспериментальных работ по исследованию ударной сжимаемости веществ проведено и для решения вопросов, возникающих при изучении структуры Земли.

Кроме данных по распространению сейсмических волн, существующие представления о внутреннем строении и составе Земли в значительной степени базируются на знаниях о распространенности химических элементов в Солнечной системе. При построении модели Земли также используются данные об ускорении силы тяжести, размерах, средней плотности и моментах инерции, измеренных астрономическими методами. В настоящее время считается, что ядро Земли состоит в основном из железа с добавкой никеля. Об этом говорит относительно высокая плотность ядра, его высокая электропроводность, которая необходима для поддержания работы геодинамо, создающего магнитное поле Земли, а также высокая распространенность железа в Солнечной системе [1]. Однако современные геофизические и ударно-волновые данные свидетельствуют о том, что плотность ядра меньше, чем плотность чистого железа (или железоникелевого сплава) при соответствующих давлениях и температурах (до 360 ГПа и нескольких тысяч градусов в

Работа выполнена при поддержке СО РАН (интеграционный проект № 50) и гранта Президента РФ (номер НШ-2073.2003.1).

Таблица 1
Расчетное содержание углерода (C_{Σ}) в недрах Земли

Область Земли	ρ , г/см ³	p , ГПа	C_{Σ} , %
Центр	13,012	363,24	$3,4 \pm 1$ ($7,4 \pm 1$)
Верх внутреннего ядра	12,704	328,87	$4,5 \pm 1$ ($8,6 \pm 1$)
Низ внешнего ядра	12,139	328,87	$9,6 \pm 1$
Верх внешнего ядра	9,909	135,40	$11,7 \pm 1$
Низ мантии	5,550	135,40	$17,5 \pm 2$

Примечание. Параметры состояния вещества (ρ , p) в недрах Земли взяты из [1]. Величины в скобках относятся к варианту сохранения карбидов железа при температуре ниже температуры затвердевания смеси.

центре Земли). Наряду с этим скорость сейсмических волн в ядре существенно выше (на $10 \div 12$ %) [2] скорости звука в железе при плотности вещества в ядре.

В связи с указанными фактами возникает проблема более тонкой детализации вещественного состава ядра Земли, а именно, обоснованного выбора легкого химического элемента (или элементов), добавление которого к железоникелевому сплаву привело бы плотностные и акустические характеристики смеси в соответствие с имеющимися данными о свойствах ядра. Очевидно, что таковыми могут быть только элементы, достаточно распространенные в Солнечной системе: H, C, N, O, Mg, Si, S. В частности, распространенность углерода (по числу атомов) в Солнечной системе более чем на порядок выше, чем кремния или серы [3]. Поэтому не исключена его концентрация глубоко в недрах Земли, в мантии или в ядре, так как его концентрация в коре для этого недостаточна.

Существующие методы расчета и известные экспериментальные данные пока не позволили однозначно выбрать какие-либо из этих элементов в качестве легких компонентов земного ядра, соответствующих необходимым требованиям. Известные результаты (например, [1, 4, 5]) показывают, что легкими добавками могут быть, вероятнее всего, сера, кислород, кремний или углерод. Следует отметить, что в качестве таких добавок чаще всего рассматриваются первые три, а углероду как возможному компоненту ядра, на наш взгляд, уделено явно недостаточное внимание. Предположение о том, что углерод при температуре и давлении внешнего и внутреннего ядра и нижней мантии может находиться в алмазной фазе, не противостоит

его фазовой диаграмме [6]. Поэтому интересно рассмотреть, каким образом примесь алмаза влияет на характеристики веществ, составляющих основу ядра или мантии Земли.

Согласованная с геофизическими данными по плотности и скорости звука оценка содержания углерода в алмазной фазе в составе Земли проведена в [7]. В этой работе сделан вывод, что в качестве легкой добавки к железу требуемым параметрам удовлетворяет углерод, в том числе и в алмазной фазе. Его возможное содержание в недрах Земли дано в табл. 1. При этом следует отметить, что добавка ≈ 2 % других элементов (здесь и далее указаны массовые доли), например, серы или кислорода, несколько улучшает согласование расчетных [7] и геофизических данных для ядра Земли, но не устраняет необходимости предположения о существенном количестве углерода в составе земных недр.

Как отмечено выше, существующие оценки температуры и давления в ядре, в общем, согласуются с полем устойчивости алмаза. Более сложным представляется вопрос о фазовом состоянии этого элемента в системе Fe–C при высоких давлениях и температурах. На основании многочисленных экспериментальных данных принято считать, что система Fe–C при атмосферном давлении описывается двумя видами равновесий — стабильным (железо — графит) и метастабильным (железо — цементит (Fe_3C)), реализация которых зависит от скорости охлаждения сплавов из жидкого состояния. Стабильная система Fe–C характеризуется отсутствием карбидов и образованием эвтектики «графит — гранцентрированный кубический твердый раствор в γ -железе (аустенит)». В метастабильной системе существует

карбид железа Fe_3C , образующийся по перитектической реакции жидкой фазы с графитом, и имеется эвтектика цементит — аустенит.

При высоких давлениях в системе появляются стабильные состояния равновесия алмаза с жидкой фазой, происходит стабилизация цементита Fe_3C и образуется карбид Fe_7C_3 . При давлении 13 ГПа возможны появление третьего карбида железа — Fe_2C — и стабилизация твердого раствора на основе $\epsilon\text{-Fe}$ [8].

Оставляя в стороне некоторые противоречивые данные, в целом, можно сделать следующие выводы: растворимость углерода в твердом металлическом железе слабо зависит от давления и составляет $2 \div 3 \%$; увеличение давления приводит к расширению поля кристаллизации алмаза, а при умеренных температурах — к стабилизации Fe_3C и появлению других карбидных фаз.

Исходя из вышесказанного наличие углерода в алмазной фазе в ядре и мантии не противоречит существующим представлениям о формировании и составе оболочек Земли и о физико-химических свойствах углерода при высоких давлениях и температурах.

В связи с этим целью настоящей работы была экспериментальная проверка того, каким образом добавка алмаза к железу влияет на плотность и скорость звука смеси. Для этого определяли скорость звука в образцах, сжатых за фронтом ударной волны (УВ) и рассчитывали плотность ударно-сжатых образцов. Для сравнения в такой же постановке проведены опыты с образцами из прессованного железа, из смеси железа с серой и образцами из стали Ст. 3. Интерес представляли значения давления, близкие, по меньшей мере, к давлениям на верхней границе внешнего ядра Земли (135 ГПа). Соответственно этому выбирались условия ударного нагружения.

Сопоставление таких экспериментальных результатов с сейсмическими данными и расчетами может дать ответ на вопрос о целесообразности проведения в дальнейшем экспериментов при давлениях до нескольких сотен гигапаскалей, соответствующих давлению в ядре Земли.

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ЗВУКА В СМЕСИ ЖЕЛЕЗО — АЛМАЗ

Кроме расчетов, отмеченных выше [7], в данной работе проведена оценка скорости звука в смеси железо — алмаз аддитивным методом.

Если ударная адиабата вещества известна, то в предположении, что коэффициент Грюнайзена зависит только от удельного объема, скорость звука в точке на ударной адиабате может быть рассчитана по уравнению [9]

$$c^2 = v^2 \{ dp_H / dv [1 - \gamma(v_0 - v) / 2v] - \gamma(p_H - p_0) / 2v \},$$

где c — скорость звука, $\gamma = \gamma_0 v / v_0$ — коэффициент Грюнайзена, p_H , v — давление и удельный объем на ударной адиабате, p_0 , v_0 и γ_0 — начальные давление, удельный объем и коэффициент Грюнайзена соответственно.

В связи с тем, что проведение полномасштабных экспериментов с целью получения ударно-волновых данных для любого материала весьма сложная и дорогостоящая процедура, ударную адиабату смеси можно пытаться построить на основе результатов, полученных для отдельных ее компонентов, если для каждого компонента известны уравнения нулевых изотерм и коэффициенты Грюнайзена. В работе [9], например, изложена такая процедура, основанная на расчете нулевых изотерм каждого компонента, затем — нулевой изотермы смеси и на использовании уравнения Ми — Грюнайзена для получения адиабаты Гюгио смеси. При расчете по уравнению Ми — Грюнайзена необходимо знать константы в уравнении для потенциала, которые не всегда известны. Поэтому в [10] предложен интерполяционный расчет, основанный на информации об отдельных компонентах смеси. Рассматриваются два более простых метода расчета адиабаты Гюгио смеси. Результаты расчетов p - u_p -зависимости (p — давление, u_p — массовая скорость) по этим двум методам для сплава Inconel 718 показали, что при $p < 70$ ГПа построенные адиабаты Гюгио совпадают, а в диапазоне $p = 70 \div 100$ ГПа разница в давлении (при одном и том же значении u_p) не превышает 0,5 %. Один из этих методов (v - E) является упрощением уже отмеченного выше способа с использованием нулевых изотерм и исходит из построения адиабаты Гюгио смеси путем расчета внутренней энергии на адиабате как суммы внутренних энергий компонентов в соответствии с их массовой долей в смеси.

В данной работе проведен расчет ударной адиабаты сплава Fe-Ni 90/10 по уравнению Ми — Грюнайзена. Для расчета нулевых изотерм использован потенциал Борна — Майера [11]

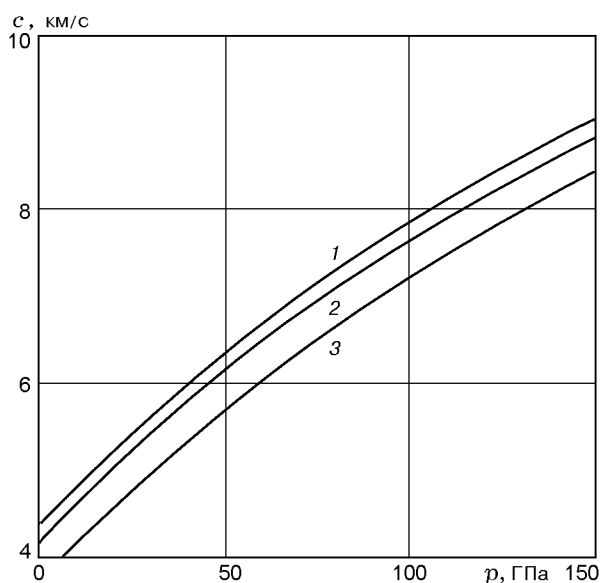


Рис. 1. Расчетные зависимости скорости звука от давления:

1 — смесь Fe–алмаз 85/15; 2 — смесь Fe–алмаз 90/10; 3 — сплав FeNi 90/10

$$E_c = \frac{3}{\rho_0} \left[\frac{A}{b} \exp \left(b \left(1 - x^{\frac{1}{3}} \right) \right) - K x^{-\frac{1}{3}} \right],$$

где E_c — холодная составляющая энергии вещества, ρ_0 — начальная плотность, A , b и K — константы. Расчет проведен в предположении $\gamma = \text{const}$ и постоянной удельной теплоемкости. Для этого же сплава проведен расчет ударной адиабаты v - E -методом. Результаты показывают, что до давлений $p \approx 150$ ГПа результаты расчетов по уравнению Ми — Грюнайзена и v - E -методом близки к экспериментальным данным [12].

Поэтому при отсутствии данных о константах в уравнении для потенциала при построении ударных адиабат смесей и расчета скорости звука по ним при $p \approx 100$ ГПа можно воспользоваться приближенным v - E -методом.

Результаты такого расчета для сплава Fe–Ni и смесей железо — алмаз показаны на рис. 1. Необходимые данные для алмаза взяты из [12]. Они получены на исходных образцах прессованного порошка из смеси алмаза (95 %) и графита (5 %) при плотности образцов 94 % ρ_0 . Как видно из рисунка, добавка алмаза увеличивает скорость звука в смеси. Этот результат является вполне естественным из-за высокого значения модуля упругости алмаза, что находит отражение в виде ударной адиабаты для монокристалла алмаза, определенной в ра-

боте [13]: $u_s = 12,6 + 1,00u_p$. Увеличение скорости звука при $p = 100$ ГПа составляет 7 и 8 % при добавлении 10 и 15 % алмаза соответственно. Расчеты [7] и эта оценка дали основание полагать, что возрастание скорости звука в смеси железо — алмаз вполне можно зафиксировать экспериментально.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты по измерению скорости звука за фронтом УВ проводили с образцами из железа и смесей железа с алмазом или серой. Для сравнения с влиянием добавки алмаза в железо была выбрана только добавка серы в железо, так как согласно проведенным расчетам добавки в железо кислорода, например, в виде оксидов, или кремния приводят к близким для смесей железа с серой результатам.

Основу образцов составляло металлическое железо (реактив марки ОСЧ 13-2), зернистость $100 \div 1000$ мкм. В качестве добавок служили природный алмаз со средним размером частиц $100 \div 125$ мкм и элементарная сера (реактив ОСЧ 16-5).

Образцы готовили холодным прессованием при комнатной температуре в пресс-формах диаметром $18 \div 40$ мм. Давление на штоке разрезной пресс-формы составляло $1,7 \div 2$ ГПа. Плотность спрессованных цилиндрических образцов (ρ_{00}) рассчитывали на основании осреднения нескольких измерений высоты и диаметра и взвешивания. Плотность железоалмазных таблеток составляла $89 \div 96$ % от плотности монолитного образца (ρ_0). Получение более плотных образцов ограничивалось прогрессивно возрастающим с давлением трением между взаимоскользящими поверхностями пресс-формы и образца из-за внедрения в металл кристаллов алмаза. Параметры образцов, использованных в ударно-волновых экспериментах, приведены ниже (см. табл. 3).

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Существует несколько способов определения скорости звука в образце, сжатом за фронтом УВ. Подробное изложение двух основных методов дано в работе [14]. Первый из них — метод догоняющей разгрузки. В цитируемой работе он реализован с помощью электроконтактных датчиков, а позднее в [15] — с помощью оптической методики. Второй способ

измерения скорости звука — метод боковой разгрузки, суть которого состоит в том, что при движении УВ по цилиндрическому образцу ступенчатой формы боковая поверхность цилиндра меньшего диаметра служит источником волн разгрузки, которые распространяются со скоростью звука по ударно-сжатому материалу образца, догоняют фронт УВ и вызывают уменьшение давления в периферической зоне образца. Анализ схемы эксперимента [14] показывает, что тангенс угла разгрузки α и скорость звука c определяются следующими выражениями:

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{(c/u_s)^2 - [(u_s - u_p)/u_s]^2},$$

$$c = u_s \sqrt{(\operatorname{tg} \alpha)^2 + [(u_s - u_p)/u_s]^2},$$

здесь u_s — скорость УВ.

Для определения величин, входящих в эти выражения, используется оптическая регистрация кривизны фронта УВ, выходящей на торец образца. Простота и наглядность этого метода делают его весьма привлекательным для измерения скорости звука в ударно-волновых экспериментах. Еще одним преимуществом метода является возможность его использования в широком диапазоне давления в образце. В то же время, как обнаружено в [14], при $p = 30 \div 50$ ГПа в экспериментах с прочными материалами контур фоторегистрограммы скругленный, без ясно выраженной границы, отделяющей область, охваченную волной разгрузки. Это связано с тем, что в металлах существуют «упругие» волны, которые распространяются со скоростями, намного превышающими изоэнтропическую скорость волн объемного сжатия. В результате на поверхности волнового фронта появляются две концентрические зоны разгрузки — внутренняя, слабо разгруженная «упругая», и наружная, «пластическая», а измеренная скорость звука оказывается заметно больше скорости волн объемного сжатия. Несмотря на эти недостатки метод боковой разгрузки использован в настоящей работе, так как регистрируемые значения скорости звука позволяют все же провести сравнительный анализ влияния тех или иных добавок на распространение волн в образцах.

Экспериментальная сборка показана на рис. 2. Ударник разгонялся взрывной системой

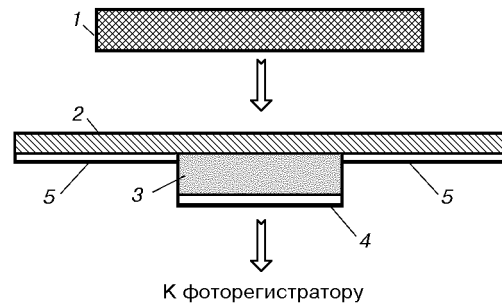


Рис. 2. Схема постановки экспериментов:

1 — ударник; 2 — стальной экран; 3 — образец; 4, 5 — пластины ПММА и аргоновые щели на поверхностях образца и экрана соответственно

и затем соударялся со стальным экраном. Скорость ударника определялась в отдельных экспериментах при помощи электроконтактных датчиков. Ударная волна, возникшая в стальном экране, входила в образец, торец которого закрывала пластина из ПММА, образуя щель. Эта щель заполнялась аргоном. Вспышка света, возникавшая при выходе УВ из образца в щель, фиксировалась фоторегистратором. Толщины ударников, экранов и образцов выбирались таким образом, чтобы волна разрежения, идущая со стороны свободной поверхности ударников, не успевала догнать фронт УВ к моменту его выхода из образца. Кроме фронта УВ на торце образца в каждом эксперименте регистрировался момент выхода УВ во вторую щель, расположенную на тыльной поверхности экрана. Эта обычная для подобных экспериментов схема позволяет в каждом опыте измерять также и скорость УВ в образце (по разнице во времени между моментами выхода УВ на тыльные поверхности образца и экрана). Это было необходимо, поскольку опыты проводили с образцами, ударные адиабаты которых не были известны. Кривизну используемых ударников определяли в отдельных опытах, для чего аргоновую щель помещали непосредственно на тыльную поверхность экрана.

Угол разгрузки α измеряли следующим образом. Фоторегистрограмму фронта УВ, вышедшей на торец образца, сканировали, затем проводили осреднение кривизны фоторегистрограммы относительно оси симметрии сборки, после этого полученные данные корректировали в первом приближении, учитывая собственную кривизну ударника. Массовую скорость в образце рассчитывали методом «отражения» [16]. Основная погрешность измере-

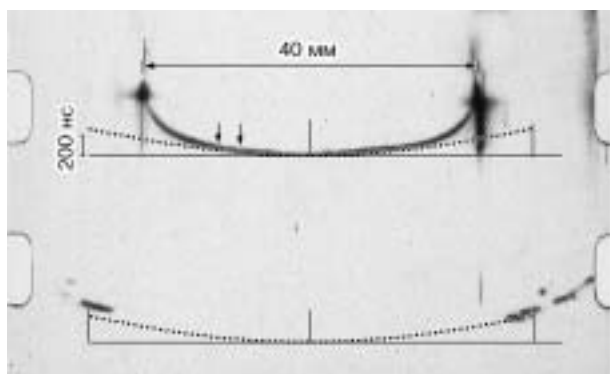


Рис. 3. Фоторегистрограмма выхода УВ на поверхность стального образца, опыт № 4; $p = 59$ ГПа

ний определялась тем, что скорость ударника и его кривизна не контролировались в каждом эксперименте. Поэтому при расчете скорости использовалась осредненная форма ударника. Аналогично при расчете массовой скорости методом «отражения» использовалась изоэнтропа разгрузки, выходящая из состояния на ударной адиабате стали, соответствующего осредненному значению скорости ударника. Оценка погрешности определения скорости УВ в образце около $\pm 2\%$, а скорости звука $\pm(5 \div 6)\%$. Предварительные результаты экспериментов и расчетов изложены в [17, 18].

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПРИ ДАВЛЕНИИ $48 \div 60$ ГПа

Для проверки работоспособности методики предварительные эксперименты проводились при $p \leq 60$ ГПа. Ударник — дюралюминиевая пластина диаметром 78 мм, толщиной 8 мм, со скоростью $3,5 \div 3,6$ км/с. Диаметр стального экрана 120 мм, толщина 4,5 мм. Диаметр образцов $39 \div 40$ мм, толщина $9,8 \div 10,3$ мм.

В качестве тестового проведен эксперимент с образцом стали Ст. 3 таких же размеров, что и прессованные образцы. На фоторегистрограмму (рис. 3), полученную в этом опыте, дважды наложена (пунктирная) кривая, показывающая форму ударника в моменты прохождения фронтом верхней и нижней поверхностей образца. Интервал времени, измеренный между центрами этих кривых, соответствует времени прохождения УВ по образцу и используется для расчета ее скорости. Как видно из рис. 3, на профиле фронта нет резкого изло-

ма, по которому можно было бы легко выделить область, охваченную волной разрежения. Поэтому в качестве репера для определения угла разгрузки взята точка, в которой временной интервал между контуром УВ на торце образца и осредненным контуром ударника был равен пространственному разрешению методики обработки фоторегистрограмм ($25 \div 30$ нс). Стрелка, расположенная ближе к оси симметрии на рис. 3, указывает на точку, которая по времени отстоит от осевой точки фоторегистрограммы на 25 нс, — она была выбрана в качестве реперной для определения угла разгрузки. Для сравнения вторая стрелка, расположенная дальше от оси, отмечает точку, отстоящую от осевой точки на 35 нс. Аналогичным образом проведены измерения скорости звука и в остальных опытах этой серии.

Опыт с пористым железом. Поскольку в смешанных образцах порошок железа был основным компонентом, то для проверки используемой методики на образце без каких-либо добавок, кроме опытов со стальными образцами, проведен эксперимент с образцом прессованного железа ($\rho_{00} = 7,52$ г/см³). В этом опыте $u_s = 5,2$ км/с, $p = 52$ ГПа, $c = 7,6$ км/с.

Дополнительно к экспериментам выполнены расчеты кинематических и термодинамических параметров при нагружении железа пористостью $\rho_0/\rho_{00} \approx 1,05$, соответствующей пористости используемых образцов. Для решения этой задачи использовано уравнение состояния металлов, предложенное в работе [19]. Это полуэмпирическое уравнение состояния типа Ми — Грюнайзена учитывает уменьшение коэффициента Грюнайзена с ростом плотности, тепловое возбуждение электронов при высоких температурах и вполне удовлетворительно описывает экспериментальные данные по ударному сжатию сплошного и пористого железа в диапазоне давлений $35 \div 400$ ГПа.

В связи с тем, что при $p = 13,2$ ГПа в железе наблюдается фазовый α - γ -переход, в области давлений $p > 35$ ГПа ($\sigma = \rho/\rho_0 > 1,2$) рассматривается уравнение состояния только для фазы высокого давления: выше этого давления регистрируется одноволновая структура УВ.

Данные в интересующих нас диапазонах давлений приведены в табл. 2. Проведенный анализ показал, что использованное уравнение состояния хорошо описывает поведение мало-пористого железа в рассматриваемом диапа-

Таблица 2

Расчетные параметры на ударной адиабате для пористого железа: $\rho_{00} = 7,48 \text{ г/см}^3$, $\rho_0/\rho_{00} = 1,05$

σ	p_c , ГПа	γ	T , К	p_H , ГПа	c_S , км/с	u_s , км/с	u_p , км/с
1,23	39	1,794	1 020	46	6,699	5,219	1,253
1,24	42	1,781	1 119	50	6,787	5,371	1,324
1,25	46	1,768	1 222	55	6,875	5,518	1,396
1,26	49	1,756	1 330	59	6,963	5,661	1,468
1,27	53	1,744	1 442	63	7,051	5,802	1,541
1,31	67	1,700	1 940	82	7,401	6,338	1,836
1,32	71	1,689	2 077	88	7,488	6,468	1,911
1,33	75	1,679	2 219	93	7,575	6,597	1,986
1,34	79	1,670	2 366	98	7,663	6,724	2,062

Примечание. σ — степень сжатия, p_c — «холодное» давление, γ — коэффициент Грюнайзена, c_S — изоэнтропическая скорость звука, T — температура, p_H — давление на адиабате Гюгонио, u_s и u_p — скорость УВ и массовая скорость соответственно.

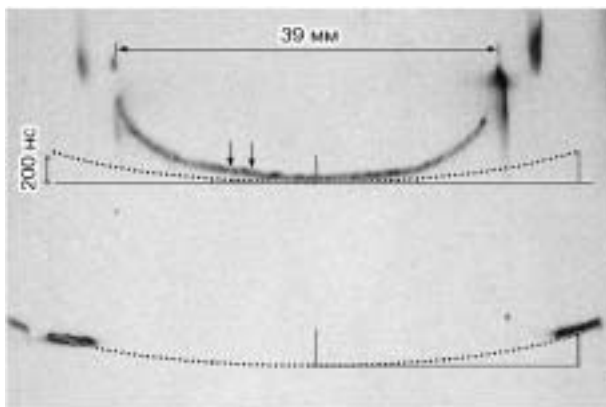


Рис. 4. Фоторегистрограмма выхода УВ на поверхность образца Fe-алмаз 85/15, опыт № 7; $p = 52 \text{ ГПа}$

зоне давлений.

В этой же постановке проведено по два опыта с образцами, спрессованными из смесей железо — алмаз и железо — сера. Массовое содержание алмаза в смеси выбрано высоким (15 %), чтобы надежно зарегистрировать изменение скорости звука, если оно возникнет в смеси. На рис. 4 показана фоторегистрограмма, полученная в одном из этих опытов с образцом железо — алмаз. Результаты экспериментов этой серии представлены в табл. 3.

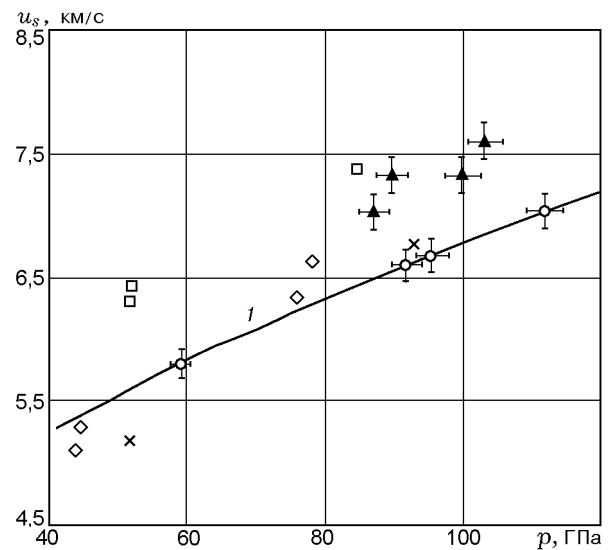


Рис. 5. Диаграмма давление — скорость УВ:

1 — зависимость u_s-p на ударной адиабате для стали Ст. 3, \circ — сталь Ст. 3, \blacktriangle — Fe-алмаз 90/10, \square — Fe-алмаз 85/15, \cdot — Fe-S 90/10, \times — Fe (пресс.)

На рис. 5 приведены значения скорости УВ, зарегистрированные в экспериментах с образцами разного состава в координатах u_s-p . Отметим, что значения p не являются независимыми, а определены по измеренным скоростям УВ и пересчитаны по ударной адиабате дюралюминия $u_s = 5,385 + 1,316u_p - 0,0101u_p^2$ и стали $u_s = 3,600 + 1,687u_p$ [20] либо мето-

Таблица 3

Результаты ударного нагружения

Номер опыта	Образец	D , мм	h , мм	ρ_0 , г/см ³	ρ_{00} , г/см ³	ρ_{00}/ρ_0 , %	u_s	u_p	P_H , ГПа	ρ , г/см ³	tg α	c , км/с
							мм/мкс					
4	Ст. 3	39,7	10,2	7,82	—	—	5,8	1,30	59	10,1	1,09	7,77
15		24,98	6,45	7,82	—	—	6,6	1,78	92	10,71	0,74	6,84
16		18,11	5,17	7,82	—	—	6,68	1,83	95	10,76	0,69	6,7
24		18,1	5,01	7,82	—	—	7,04	2,04	112	10,96	0,83	7,67
10	Fe	38,82	10,1	—	7,52	95,8	5,2	1,32	52	10,09	1,27	7,64
19	(пресс.)	18,13	5,1	—	7,4	94,2	6,78	1,85	93	10,17	0,67	6,68
6	Fe-S 90/10	38,75	10,34	—	5,87	95,5	5,29	1,44	45	8,07	1,23	7,58
11		40,2	9,78	—	5,89	95,9	5,1	1,46	44	8,25	1,36	7,83
27		18,14	5,1	—	5,76	93,9	6,33	2,08	76	8,59	0,74	6,33
28		18,14	5,09	—	5,75	93,6	6,63	2,05	78	8,32	0,71	6,54
7	Fe-алмаз 85/15	38,85	9,96	—	6,21	93,8	6,3	1,32	52	7,86	1,29	9,51
8		39,25	9,9	—	6,17	93,2	6,44	1,31	52	7,76	1,28	9,68
22		18,14	4,97	—	5,86	88,5	7,37	1,96	85	7,98	0,76	7,79
18	Fe-алмаз 90/10	18,13	5,07	—	6,49	93,0	7,32	1,89	90	8,75	0,68	7,39
20		18,14	5,18	—	6,44	92,3	7,03	1,93	87	8,87	0,73	7,24
23		18,14	5,16	—	6,48	92,8	7,6	2,1	103	8,94	0,75	7,91
25		18,14	5,23	—	6,38	91,4	7,32	2,14	100	9,02	0,74	7,52

Примечание. D — диаметр, h — толщина, ρ_0 и ρ_{00} — начальные плотности монолитного и прессованного образцов; u_s — скорость УВ; u_p — массовая скорость в образце; ρ — плотность ударно-сжатых образцов; P_H — давление; tg α — тангенс угла разгрузки; c — скорость звука.

дом «отражения». На рис. 6 приведены значения скорости звука, измеренные в образцах различного состава, а также данные, имеющиеся в литературе.

Опыт со стальным образцом. В этом опыте $u_s = 5,8$ км/с, что соответствует скорости ударника 3,6 км/с, которая в пределах разброса совпадает с предыдущими измерениями скорости ударника, выполненными контактными датчиками. Соответствующее давление в образце $p = 59$ ГПа. Значение скорости звука $c = 7,8$ км/с, измеренное в этом опыте, удовлетворительно коррелирует с данными, полученными для железа в [14] — $c = 7,15$ км/с при $p = 41$ ГПа. При этом давлении расчетное значение объемной скорости звука $c_S = 6,14$ км/с [10] и, следовательно, $c/c_S = 1,16$. При $p = 59$ ГПа $c_S = 6,95$ км/с [10], и тогда для нашего опыта $c/c_S = 1,12$. Причины, по которым изме-

ренное значение скорости звука отличается от значения объемной скорости, отмечены выше. Для пористого железа значения p , u_s , u_p , полученные в эксперименте, близки к расчетным, а $c/c_S = 1,14$, по-видимому, по тем же причинам, что и для сплошного образца.

Опыты с образцами железо — алмаз. В этих экспериментах зарегистрирована ударная скорость $u_s = (6,37 \pm 0,07)$ км/с, что на $\approx 9\%$ выше, чем в сплошном стальном образце (5,8 км/с), и еще выше, чем в образце пористого железа (5,2 км/с, см. рис. 5), хотя плотность ρ_{00} обоих образцов железо — алмаз была меньше (93,8 и 93,2% ρ_0), чем у прессованного образца без добавки алмаза (95,8% ρ_0). Сравнение фоторегистрограмм на рис. 3 и 4 показывает, что кривизна фронта УВ в смесевом образце больше, чем в стальном, соответственно, больше и тангенс угла разгрузки (см. табл. 3).

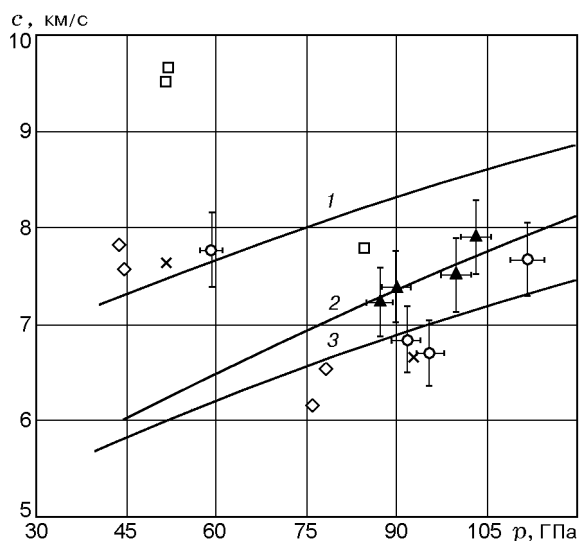


Рис. 6. Зависимость скорости звука от давления:

1 — интерполяционная кривая для продольной скорости звука в железе по экспериментальным данным [14, 22], 2 — объемная скорость звука в смеси Fe-алмаз 90/10 (расчет), 3 — объемная скорость звука в железе по данным [22] (расчет); ▲ — Fe-алмаз 90/10, □ — Fe-алмаз 85/15, ○ — Fe-S 90/10, ○ — сталь Ст. 3, × — Fe (пресс.)

В результате измеренная скорость звука высокая — 9,51 и 9,68 км/с. Столь заметное увеличение скоростей УВ и звука, очевидно, связано с добавкой алмаза в смесь. Скорость распространения волны разрежения локально сильно возрастает, когда волна переходит из железа в алмаз и затем движется по кристаллу алмаза. Кроме того, видно, что фоторегистрограмма, полученная на образце железо — алмаз, менее четкая, чем на сплошном стальном образце, что, очевидно, связано со структурой прессованного образца и наличием микропор на его поверхности.

Серия экспериментов в диапазоне $p = 46 \div 60$ ГПа показала работоспособность используемой методики для смесевых образцов и возможность получения не только качественных, но и количественных данных, что позволило перейти к опытам в интересовавшем нас диапазоне давлений при меньшей концентрации алмаза в смеси.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПРИ ДАВЛЕНИИ 85 ÷ 110 ГПа

Нагружающие устройства. Для получения давлений в диапазоне 85 ÷ 110 ГПа в качестве

нагружающих устройств использовали два типа ударников, разгоняемых взрывом. Ударники первого типа изготавливали из дюралюминиевого сплава Д16Т. Их диаметр 50 мм, толщина 5 мм. Скорость ударников определяли в отдельных независимых экспериментах при помощи электроконтактных датчиков, ее среднее значение $(5,4 \pm 0,1)$ км/с. На диаметре мишени 38 мм разновременность удара $\approx 25 \div 30$ нс. Ударники второго типа изготавливали из стали; их диаметр 50 мм, толщина 3 мм, скорость ≈ 4 км/с. Следует отметить, что хотя стальные ударники и создавали в стальных образцах давление на 10 ÷ 15 ГПа выше, чем ударники из Д16Т, кривизна их была несколько больше и на диаметре 40 мм разновременность удара достигала ≈ 150 нс.

В связи с тем, что размеры ударников были меньше, чем в ранее проведенных экспериментах, следовало уменьшить и размеры образцов. Диаметр образцов был уменьшен до ≈ 18 мм, а их толщина ограничена ≈ 5 мм, так как угол боковой разгрузки заранее не был известен и, кроме того, большая толщина образцов могла привести к снижению их плотности при прессовке.

Тестовые эксперименты. Прежде чем проводить эксперименты с образцами железо — алмаз, в качестве тестовых были проведены опыты со стальными образцами с использованием ударников обоих типов. Для дюралюминиевых ударников зарегистрированные скорости УВ оказались равными 6,6 и 6,68 км/с. Среднее значение $u_s = 6,64$ км/с соответствует скорости ударника 5,2 км/с, что находится в хорошем согласии (отклонение $< 4\%$) с измерениями, выполненными электроконтактными датчиками. С использованием стальных ударников были также поставлены два эксперимента с образцами из стали Ст. 3 диаметром 30 и 18 мм. Скорости УВ в них равны 6,9 и 7,0 км/с соответственно. Давление, рассчитанное по ударной адиабате стали, равно соответственно 104 и 112 ГПа.

Кроме того, проведен опыт с образцом прессованного железа с целью определить, не возникает ли каких-либо особенностей при измерении скорости УВ в прессованном образце, связанных с возможными неоднородностями структуры образца, поскольку известно [21], что при выходе сильной УВ из образца с его поверхности срывается поток частиц пыли, влияние которого могло бы затруднить обработку

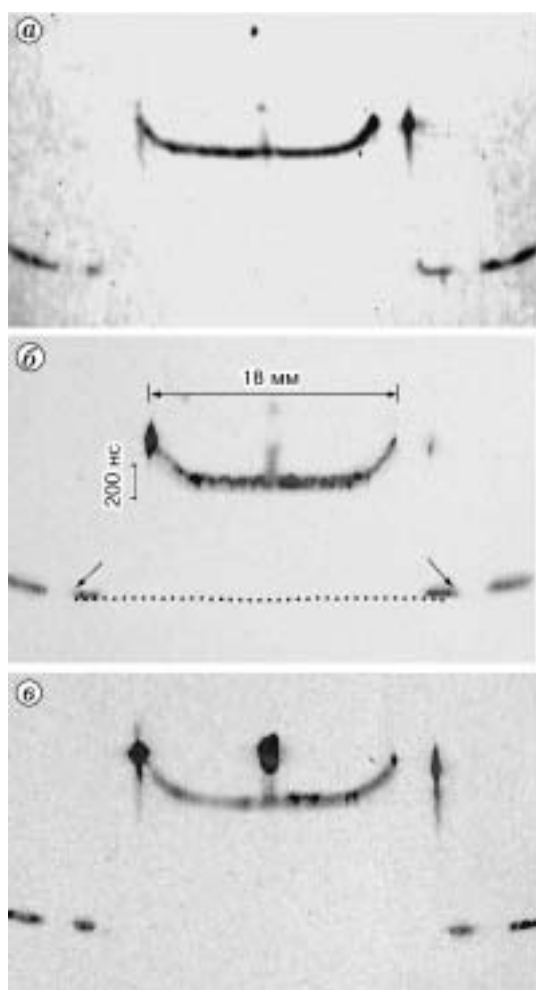


Рис. 7. Фоторегистрограммы выхода УВ на поверхность образцов:

a — опыт № 16, сталь Ст. 3, $p = 95$ ГПа; *б* — опыт № 18, Fe-алмаз 90/10, $p = 90$ ГПа; *в* — опыт № 19, Fe (пресс.), $p = 92$ ГПа; стрелками указаны габаритные метки на диаметре 28 мм в аргоновой щели, пунктиром — форма ударника из Д16Т

фоторегистрограмм. Измеренная в этом эксперименте скорость УВ 6,78 км/с, что согласуется с расчетом. Результаты экспериментов дали основание считать измерения скорости УВ в данном диапазоне давлений достаточно надежными.

На рис. 7 приведены фоторегистрограммы, полученные при высоких давлениях. Они заметно отличаются от фоторегистрограмм при $p = 55 \div 60$ ГПа. Зона, охваченная боковой волной разрежения, выделяется более четко, что позволяет точнее определить угол разгрузки. В то же время угол разгрузки у прессованных образцов выделяется лучше, чем у сплош-

ных, что, по-видимому, связано с меньшей прочностью прессованных образцов. Структура линии засветки на фоторегистрограммах, полученных на прессованных образцах, менее однородна, чем на сплошных образцах. Это связано с тем, что на поверхности прессованных образцов существуют неоднородности плотности, которые при ударном нагружении приводят к формированию локальных выбросов в виде микроструй.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Подробные измерения продольных и объемных скоростей звука в железе в широком диапазоне ударных давлений описаны в работах [14, 22–24] и анализировались в работах [25, 26]. Часть этих данных для продольных и объемных скоростей звука в железе приведена на рис. 6 вместе с экспериментальными результатами настоящей работы.

Из рис. 6 видно, что при $p = 55 \div 60$ ГПа значения скорости звука в стальных образцах находились вблизи кривой, описывающей поведение продольной скорости звука в железе, а при высоких давлениях они сместились к кривой, описывающей объемную скорость звука. Как указывалось в работе [14], это, скорее всего, связано с тем, что с увеличением давления в нагружающей волне амплитуда упругой волны разгрузки становится малой по сравнению с исследуемыми давлениями. В этой же работе отмечалось, что при высоких степенях сжатия ($1,2 \div 1,4$) тангенс угла разгрузки для железа $\leq 0,8$. Если обратиться к табл. 3, где приведены значения тангенса угла разгрузки, то можно отметить, что в экспериментах настоящей работы с ростом нагружающего давления происходит изменение тангенса угла разгрузки от значений $\approx 1,1 \div 1,3$ до $0,7 \div 0,8$.

Для того чтобы сопоставить результаты на образцах железо — алмаз при высоких давлениях с данными, полученными ранее, выполнены эксперименты со смесью железо — алмаз 85/15, эти данные также приведены на рис. 6. В экспериментах с данными образцами разброс по скорости УВ был больше, чем при $p = 52$ ГПа, что возможно, обусловлено невысокой плотностью образцов, которая достигала $\approx 89\% \rho_0$, и неоднородностью распределения добавки по толщине образца, которая при малых толщинах оказывает заметное влияние на измерения.

Наибольший интерес представляют результаты, полученные на смесевых образцах с содержанием алмаза $\approx 10\%$, так как именно такое содержание алмаза могло бы понизить плотность вещества во внешнем ядре на границе с мантией до значений, определяемых в геофизических исследованиях. С этими образцами поставлено четыре эксперимента. В этой серии в двух опытах с ударником из Д16Т зарегистрированы скорости УВ 7,03 и 7,32 км/с. Два опыта проведены со стальным ударником, и в них скорости УВ составили 7,32 и 7,6 км/с, а скорость звука 7,5 и 7,9 км/с соответственно. Все данные на рис. 6 показывают, что при высоких давлениях скорость звука в смесевых образцах железо — алмаз выше, чем в стальных, хотя различие между ними не такое сильное, как при $p = 50 \div 60$ ГПа. По-видимому, это следствие используемой методики. Так, альтернативная методика измерения скорости звука методом догоняющей разгрузки, основанная на регистрации излучения индикаторов в УВ и использованная в работе [22], гораздо чувствительнее к изменению давления и регистрирует продольные скорости звука вплоть до точки предполагаемого фазового перехода (твердое вещество — жидкость) в районе $p \approx 240$ ГПа.

Из рис. 6 видно, что экспериментальные данные для смеси железо — алмаз 90/10 удовлетворительно описываются зависимостью скорости звука от давления, полученной в результате расчета аддитивным методом. Точно так же и расчетные значения для объемной скорости звука в стальных образцах в пределах погрешности измерения совпадают с экспериментальными данными. Среднее значение скорости звука в смеси Fe-S 90/10 близко к кривой, аппроксимирующей расчетные данные для объемной скорости звука в чистом железе.

С точки зрения проблемы, поставленной в работе, более естественно представлять все рассматриваемые данные в координатах «плотность вещества — скорость звука», что и сделано на рис. 8. Из этого представления видно, что скорость сейсмических волн во внешнем жидком ядре Земли (кривая 3) на $\approx 1,5$ км/с выше, чем скорость звука в чистом жидком железе (кривая 7), и даже выше, чем продольная скорость звука в нем (кривая 4). Такое представление нагляднее показывает и то, как наши результаты соотносятся с гео-

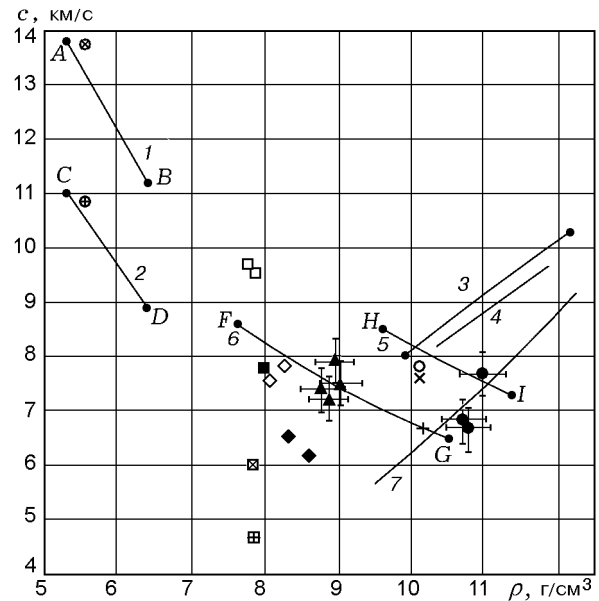


Рис. 8. Сопоставление результатов экспериментов и расчетов с геофизическими данными:

1, 2 — расчетные кривые для продольной и объемной скоростей звука в нижней части мантии при переменном содержании алмаза (0 в точках B, D; 17,5% в точках A, C); 3 — интерполяция геофизических данных для скорости звука во внешнем ядре (крайние точки — границы с внутренним ядром и мантией); 4 — интерполяция продольной скорости звука в железе по экспериментальным данным [22]; 5, 6 — изобары-изотермы ($p, T = \text{const}$) для $p = 135$ и 85 ГПа соответственно, построенные при переменном содержании алмаза в железе (0 в точках I, G; 11,7 и 23% в точках H, F); 7 — объемная скорость звука по данным [22]; \blacktriangle — Fe-алмаз 90/10, $p = 87 \div 103$ ГПа; \square, \blacksquare — Fe-алмаз 85/15, $p = 52$ и 85 ГПа соответственно; \circ, \bullet — Fe-S 90/10, $p = 44 \div 45$ и $76 \div 78$ ГПа; \circ, \bullet — сталь Ст. 3, $p = 59$ и $92 \div 112$ ГПа; $\times, +$ — Fe (пресс.), $p = 52$ и 93 ГПа; \otimes, \oplus — соответственно продольная и объемная скорости звука для низа мантии, \boxtimes, \boxplus — то же самое в железе при нормальных условиях

физическими данными. Область плотности, исследуемая в данной работе, лежит правее значения $7,5 \text{ г/см}^3$. На рис. 8 нанесены зависимости скорости звука в железе от плотности для продольной (кривая 4, построенная по экспериментальным данным работы [22]) и объемной (кривая 7, построенная по расчетным данным работы [22]) скоростей. На этой плоскости наши экспериментальные данные для стальных образцов расположены вблизи расчетных данных для объемной скорости звука.

На рис. 8 кривые 5 и 6 для объемной скорости звука построены в соответствии с методикой, описанной в [7]. Эти две кривые пред-

Таблица 4
Результаты измерения скорости звука
в композитных материалах

Состав	ρ_{00}/ρ_0 , %	c , км/с ($\pm 5\%$)
Fe-S 90/10	95	2,56
Fe-алмаз 80/20 ($d = 100/80$)	90	3,65
Fe-алмаз 85/15 ($d = 100/80$)	95	3,94

Примечание. d — размер частиц алмаза, мкм.

ставляют собой расчетные изобары-изотермы ($p, T = \text{const}$), показывающие, как менялась бы скорость звука, если изменять состав вещества Земли, находящегося на соответствующей по давлению и температуре глубине, добавляя в железо углерод в алмазной фазе. Вдоль этих кривых массовая доля алмазной добавки увеличивается от 0 в точках I и G до 11,7 и 23 % в точках H и F соответственно. Как видно, расчетная кривая 6 (для 85 ГПа) и наши экспериментальные данные хорошо согласуются, а расчетная кривая 5 (для 135 ГПа) удовлетворительно согласуется с геофизическими данными.

Данные, полученные для смеси железо — алмаз 90/10 и представляющие наибольший интерес, показывают, что плотность этих ударно-сжатых образцов значительно ниже, чем плотность ударно-сжатых образцов железа, а скорость звука выше. Поэтому можно ожидать, что с ростом давления до значения 135 ГПа, соответствующего верхней границе внешнего ядра Земли, эта тенденция сохранится. В отличие от алмаза добавка серы, как видно из рис. 8, также понижает плотность, но не увеличивает скорость звука до необходимых значений.

Для сравнения с результатами, полученными при высоких давлениях, измерялись скорости звука в образцах из стали Ст. 3 и смеси железа с алмазом и железа с серой при атмосферном давлении. Измерения в образцах из стали проводились интерференционным акустооптическим методом [27], а в композитных прессованных образцах — по времени прохождения звукового сигнала. В результате экспериментов получено, что скорость звука в стали равна $(6,0 \pm 0,03)$ км/с при толщине образца 3,48 мм. Данные для композитных образцов представлены в табл. 4.

Измерения скорости звука при нормальных условиях подтверждают, что и в этом случае добавка алмаза к железу приводит к существенно большим скоростям, чем добавка серы. (Следует обратить внимание на то, что скорость звука в прессованных образцах железо — алмаз ниже, чем в стали, что объясняется их пористостью.)

В земных слоях, относящихся к нижней мантии, также наблюдается расхождение между значениями расчетной для силикатов и регистрируемой в геофизических исследованиях скоростью звука. На рис. 8 левее значений $6,5 \text{ г/см}^3$ нанесены две расчетные кривые, также построенные в соответствии с [7], для продольной и объемной скоростей звука в силикатах $((\text{Mg}_{0,9}\text{Fe}_{0,1})\text{SiO}_3, \rho_0 = 4,2 \text{ г/см}^3$, фаза перовскита), в которых увеличивается массовая доля алмазной добавки (от 0 в точках B и D до 17,5 % в точках A и C , согласно табл. 1). Как видно, с ростом массовой доли алмаза в смеси можно добиться удовлетворительного совпадения с геофизическими данными и для мантии Земли. Исходя из этого представляет интерес постановка экспериментов с образцами на основе силикатных материалов. В частности, одним из подтверждений проверяемой гипотезы о возможном влиянии углерода в алмазной фазе на физико-механические характеристики внутренних слоев Земли служат результаты работы [28]. В ней отмечается, что основная доля углерода, присутствующего на нашей планете, может находиться в мантии Земли. При изучении растворимости углерода в оливине авторы пришли к заключению, что в глубоких слоях верхней мантии большая часть углерода находится в отдельной фазе, возможно, в виде карбонадо (черного алмаза).

ВЫВОДЫ

Проведенные эксперименты показали, что добавка 10 % углерода в алмазной фазе к железу при $p \approx 100$ ГПа приводит к увеличению скорости ударной волны на $5 \div 8\%$, уменьшению плотности ударно-сжатых образцов на $16 \div 18\%$ и увеличению на $\approx 5\%$ скорости звука в смеси по сравнению с чистым железом. Таким образом, полученные в настоящей работе результаты подтверждают предположение о том, что добавление углерода в алмазной фазе при моделировании состава ядра может дать увеличение скорости звука, достаточное

для объяснения повышенных скоростей сейсмических волн по сравнению со значениями, предсказываемыми на основе модели ядра из чистого железа. Применение других методов регистрации и переход к ударникам, разгоняемым легкогазовыми пушками, очевидно, расширит диапазон исследований до давлений, соответствующих внутреннему ядру Земли, повысит точность экспериментов и достоверность получаемых результатов.

Авторы выражают благодарность В. В. Сильвестрову и А. В. Пластинину (Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН) за проведение расчетов по ударному сжатию пористого железа, В. Г. Половинкину (Институт физики полупроводников СО РАН) за помощь в проведении измерений скорости звука при нормальных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Жарков В. Н.** Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983.
2. **Dziewonski A. M., Anderson D. L.** Preliminary reference Earth model // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1981. V. 25. P. 297–356.
3. **Фоп Г.** Основы изотопной геологии: Пер. с англ. М.: Мир, 1989.
4. **Вуд Дж.** Метеориты и происхождение Солнечной системы: Пер. с англ. М.: Мир, 1971.
5. **Добрецов Н. Л., Кирдяшкин А. Г.** Об источниках мантийных плюмов // *Докл. АН.* 2000. Т. 373, № 1. С. 84–86.
6. **M. van Thiel, Ree F. H., Grover R.** Three phase carbon model with electronic excitation // *Shock Waves in Condensed Matter 1987* / S. C. Schmidt, N. C. Holmes (Eds). Elsevier Sci. Publ. B. V., 1988. P. 81–84.
7. **Анисичкин В. Ф.** Ударно-волновые данные как доказательство присутствия углерода в ядре и нижней мантии Земли // *Физика горения и взрыва.* 2000. Т. 36, № 4. С. 108–114.
8. **Григорович В. К.** Полиморфизм железа и электронное строение железных сплавов // *Изв. АН СССР. Металлы.* 1969. № 1. С. 53–68.
9. **Высокоскоростные ударные явления** / Под ред. Р. Кинслоу: Пер. с англ. М.: Мир, 1973.
10. **Meyers M. A., Murr L. E.** Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals // *Proc. Intern. Conf. on Metallurgical Effects of High-Strain-Rate and Fabrication.* June 1980. New York: Plenum Press, 1981.
11. **Жарков В. Н., Калинин В. А.** Уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах. М.: Наука, 1968.
12. **Compendium of Shock Wave Data** / M. van Thiel (Ed.) Lawrence Livermore Laboratory, 1977.
13. **Павловский М. Н.** Ударное сжатие алмаза // *Физика твердого тела.* 1969. Т. 13, № 3. С. 893–895.
14. **Альтшулер Л. В., Бражник С. Б., Владимиров Л. А. и др.** Изэнтропическая сжимаемость алюминия, меди, свинца и железа при высоких давлениях // *ЖЭТФ.* 1960. Т. 38, вып. 4. С. 1061–1073.
15. **McQueen R. G., Hopson J. W., Fritz L. N.** Optical technique for determining refraction wave velocities at very high pressures // *Rev. Sci. Instrum.* 1982. V. 53, N 2. P. 245–250.
16. **Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.** Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений М.: Наука, 1966.
17. **Караханов С. М., Бордзиловский С. А., Туркин А. И., Анисичкин В. Ф.** Измерение скорости звука в смесях железа с алмазом // *Международная конференция «Ударные волны в конденсированных средах»* — 2002. СПб., 2002. С. 127–129.
18. **Титов В. М., Караханов С. М., Бордзиловский С. А. и др.** Скорость распространения возмущений в смесях железа с алмазом // *Международная конференция «V Харитоновские тематические научные чтения».* Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. С. 79–81.
19. **Альтшулер Л. В., Баканова А. А., Трунин Р. Ф.** Ударные адиабаты и нулевые изотермы семи металлов при высоких давлениях // *ЖЭТФ.* 1962. Т. 42, № 1. С. 91–104.
20. **Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ** / Под ред. Р. Ф. Трунина. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.
21. **Огородников В. А., Иванов А. Г., Михайлов А. Л. и др.** О выбросе частиц со свободной поверхности металлов при выходе на нее ударной волны и методах диагностики этих частиц // *Физика горения и взрыва.* 1998. Т. 34, № 6. С. 103–107.
22. **Brown J. M., McQueen R. G.** Phase transitions, Grüneisen parameter, and elasticity for shocked iron between 77 GPa and 400 GPa // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91, No B7. P. 7485–7494.
23. **Chen G. Q., Ahrens T.** High-pressure melting of iron: new experiments and calculations // *Phil. Tras. R. Soc. Lond. A.* 1996. V. 354. P. 1251–1263.
24. **Coutry R., Sitaud B., Pere J., et al.** Melting curve of the Fe-36 at. % Ni alloy up to 49 GPa // *High Pressure Science and Technology-1995.* AIPART. 1995. P. 314–316.
25. **Фунтиков А. И.** Фазовая диаграмма железа. К вопросу о состоянии ядра Земли // *Физика Земли.* 2000. № 11. С. 70–76.
26. **Фунтиков А. И.** Исследование железоникелевого сплава при высоких динамических давлениях: сравнение с данными для железа в области состояний ядра Земли // *Физика Земли.* 2001. № 9. С. 3–9.

27. **Богданов С. В., Зубринов И. И., Пестряков Е. В., Сапожников В. К.** Интерференционный акустооптический метод измерения скорости звука // Акуст. журн. 2000. Т. 46, № 1. С. 35–41.
28. **Kepler H., Wiedenbeck M. & Shcheka S.** Carbon solubility in olivine and the mode of carbon storage in the Earth's mantle // Nature. 2003. V. 424. P. 414–416.

Поступила в редакцию 12/III 2003 г.
