

ФАЗОВЫЕ ДИАГРАММЫ И КРИВЫЕ ПЛАВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА И ЖЕЛЕЗНИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ПО ДАННЫМ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ И СТАТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ОБЛАСТИ СОСТОЯНИЙ ЯДРА ЗЕМЛИ

А.И. Фунтиков

Институт теплофизики экстремальных состояний РАН, Москва

Вестник ОГТГН РАН № 5 (15) 2000 т.1

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dggms/5-2000/planet13

Имеющиеся результаты ударно-волновых измерений сжимаемости, скорости звука и температуры на адиабатах ударного сжатия железа и сплавов железа с никелем в области давлений от 140 до 350 ГПа использовались для оценки распределения плотности и температур в ядре Земли и проверки соответствующих модельных представлений. Одно из главных направлений здесь состоит в определении кривой плавления железа и температуры на границе наружного (жидкого) и внутреннего (твердого) ядра Земли, отвечающей давлению 330 ГПа. Наличие в наружном ядре, состоящем в основном из железа, никеля, не изменяет распределения плотности в нем, но наряду с легкими элементами, может повлиять на уменьшение температуры на кривой плавления.

В последние годы в связи со значительным развитием техники статических измерений в алмазных наковальнях с лазерным нагревом образца был существенно расширен диапазон давлений (до 200 ГПа) и достигнуты температуры в области кривой плавления, позволившие определить фазовые диаграммы и экстраполировать данные к состояниям, достигнутым при ударном сжатии.

Несмотря на некоторую несогласованность экспериментальных данных для железа внутри каждой из этих групп статических и ударно-волновых измерений, появилось существенное расхождение в результатах, по-видимому, лежащее вне замеченных ошибок обеих групп экспериментов, приводящее к различному положению определяемой этими методами кривой плавления на фазовой диаграмме и соответственно к различным оценкам температур во внутренних областях Земли [1]. Так, по измерениям скорости звука на ударной адиабате [2] плавление на ней отвечает давлению $P = 240$ ГПа и температуре $T = 5700$ К, а пересечение статической кривой плавления [3] с ударной адиабатой - $P = 155$ ГПа и $T = 3600$ К. Ударно-волновые данные для железоникелевого сплава в целом согласуются с аналогичными данными для железа, позволяя расширить сопоставительный анализ экспериментальных данных с результатами статических измерений. Некоторое различие по ударному сжатию в области больших давлений для сплава, находящегося в исходном состоянии γ -фазы, и железа связано с фазовым переходом в нем $\alpha \rightarrow \epsilon$ при давлении 13 ГПа.

Для рассмотрения сложившегося противоречия этих групп данных нами были привлечены дополнительные экспериментальные результаты

измерения параметров изэнтроп, отвечающих плавлению при нормальном давлении при расширении из состояния при ударном сжатии, для железа и аустенитного сплава железа с никелем (нержавеющей стали) [4]. Используемый метод основан на установлении признаков плавления в образцах, сохраненных после ударного нагружения. В проведенных экспериментах были зарегистрированы соответствующие давления ударного сжатия - 140 и 175 ГПа. Такие данные, отвечающие нижней границе кривой плавления, могут быть использованы для определения температурной зависимости на изэнтропе по результатам ударно-волнового эксперимента [5], а также для проверки адекватности расчетов по уравнениям состояния фазовой диаграммы и кривой плавления. В то же время, принимая большую достоверность результатов статических измерений в начальной области давлений, эти данные позволяют также экстраполировать кривую плавления в область более высоких давлений.

За исходную точку проведенных оценок кривых плавления железа и сплава [6] принималась тройная точка пересечения фазовой границы γ - ϵ и кривой плавления железа, определенная по уточненным статическими измерениями [3] с параметрами $P = 60$ ГПа, $T = 2800$ К. Эта точка отвечает также данным статических измерений кривой плавления [7], и фазовой границе γ - ϵ по данным [8] для железоникелевого сплава.

Используя эти данные в области γ -фазы для железа и сплава, а также соответствующие данные по изотермической сжимаемости, и соотношение Линдемманна для кривой плавления, были определены зависимости коэффициента Грюнайзена от плотности, а по ним и положения изэнтроп, проходящих через начальную точку плавления при нормальном давлении, в этой области. При этом учитывалось преломление изэнтроп на фазовых границах области γ -фазы.

Таким образом состояние на изэнтропах в области ϵ -фазы становится известным в двух точках - на фазовой границе γ - ϵ и на ударной адиабате. Обе точки отвечают сравнительно небольшому изменению плотности от 9.5 до 11.5 г·см⁻³. Предполагая, как и раньше для области γ -фазы, что зависимость коэффициента Грюнайзена обратно пропорциональна плотности, она была определена, а по ней по соотношению Линдемманна получены оценки кривой плавления. В области давлений ~ 150 ГПа кривая плавления железони-

келевого сплава оказалась ниже (~ 100 K) соответствующей кривой для железа.

Кривые плавления для обоих материалов, полученные по данным изэнтропического расширения, проходящие через общую тройную точку, оказались достаточно близки к данным по кривой плавления железа [3], хотя лежат при $P = 150$ ГПа несколько выше ее, на 100-200 K. Полученные результаты для железа и сплава отвечают более низким значениям температуры на кривых плавления и не устраняют указанного противоречия между группами статических и динамических измерений, хотя появившиеся в последнее время результаты [9, 10] несколько сближают эти данные.

1. Boehier R. // *Annu. Rev. Earth Planet Sci.* 1996. V. 24. P. 15-40.

2. Brown J.M., McQueen R.G. // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. 7485-7494.
3. Shen G. et al. // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. N 3. P. 373-376.
4. Фунтиков А.И., Осипов Р.С., Цыганов В.А. // *ТВТ.* 1999. Т. 37. № 6. С. 887-894.
5. Зельдович Я.Б. // *ЖЭТФ.* 1957. Т. 32. № 6. С. 1577-1578.
6. Фунтиков А.И. // *Изв. РАН. Физ. Земли.* 2000 (в печати).
7. Couty R. et al. // *High Pressure Science and Technology-1995.* AIPAPT, 1995. P. 314-316.
8. Huang E. et al. // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 4497-4502.
9. Nguyen J.H., Holms N.C. // *High Press. Sci. and Technology-1999.* AIPAPT, 1999. P. 156-159.
10. Anderson O.L., Duba A.I. // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 101. N 10. P. 22659-22669.

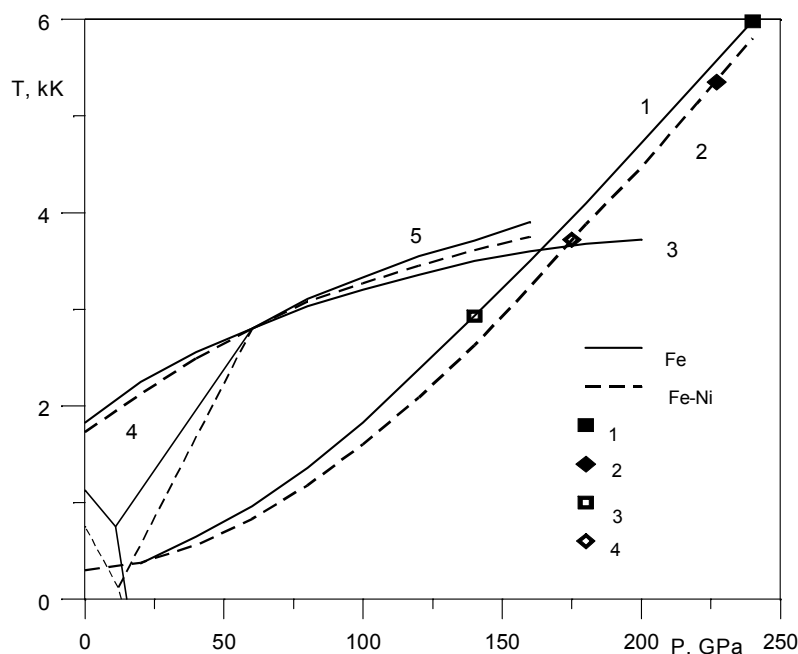


Рис. 1. Ударные адиабаты (1, 2), кривые плавления (3 - [3], 4 - [7], 5 - настоящая работа) и фазовые границы для железа и железоникелевого сплава; ударно-волновые измерения плавления (1, 2) и изэнтроп (3, 4)