

СЖИМАЕМОСТЬ ЖЕЛЕЗА, АЛЮМИНИЯ, МОЛИБДЕНА, ТИТАНА И ТАНТАЛА ПРИ ДАВЛЕНИЯХ УДАРНЫХ ВОЛН 1–2.5 ТПа

Р.Ф.Трунин, Н.В.Панов, А.Б.Медведев

*Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
607200 г.Саров Нижегородской обл., Россия*

Поступила в редакцию 29 августа 1995 г.

В лабораторных условиях проведено исследование сжимаемости пяти металлов при давлениях в 1.0 (алюминий) – 2.5 (тантал) ТПа. Давления создавались ударом по образцам полусферической стальной оболочки, разогнанной продуктами взрыва сходящейся детонационной волны до скорости 23 км/с. Экспериментальные данные сравниваются с результатами, полученными с использованием сильных ударных волн подземных ядерных взрывов.

В связи с запрещением испытаний ядерных зарядов в подземных условиях, была утрачена возможность проведения измерений сжимаемости веществ в условиях сильных ударных волн амплитудами более 1–2 ТПа. Существующие лабораторные установки взрывного типа [1] были ограничены давлениями $P \leq 1$ ТПа (для веществ с начальной плотностью $\rho \approx 8.0$ г/см³). Даже не считая общего интереса продвижения измерений в область сверхвысоких давлений, после введения моратория на подземные взрывы, оставались неясными некоторые вопросы, требующие проведения исследований при терапаскальных давлениях. К их числу можно отнести, в частности, противоречия в данных по сжимаемости молибдена (при $P \approx 2$ ТПа), необходимость прямого сопоставления лабораторных и "подземных" данных по алюминию при $P \approx 1$ ТПа и некоторые другие. Для решения этих вопросов в лабораторных условиях было необходимо иметь установку, позволяющую проводить измерения сжимаемости при таких давлениях. Такая установка была создана – см. [2], где опубликованы результаты измерений сжимаемости тантала при $P \approx 1.7$ ТПа. Измерения проводились в условиях, когда высокие давления создавались ударом стальной оболочки, разогнанной продуктами взрыва сходящейся детонационной волны по измерительному сердечку с образцами металлов, расположенному вблизи центра системы.

Полученные в [2] давления являлись рекордными для лабораторных условий. Однако, они все же не позволяли решить вопросы прямого сопоставления данных по алюминию и молибдену, требующих создания установки с давлениями в 2 ТПа. Для реализации таких условий было решено использовать устройство [2] в форсированном режиме его работы. Для этого измерительный сердечник с образцами металлов был приближен к центру системы на такой минимальный радиус, где еще возможно проведение измерений волновых скоростей с необходимой точностью регистраций. Отметим, что речь идет об измерении абсолютной, в методическом смысле, сжимаемости веществ, то есть когда термодинамические величины, характеризующие состояние исследуемого вещества, такие как, например, давление и плотность ударного сжатия, определяются непосредственно через экспериментально найденные кинематические параметры – волновую и массовую скорость.

В опытах, как обычно в таких случаях, регистрировалась скорость ударной волны в исследуемых образцах металлов, созданная ударом стальной оболочки, разогнанной продуктами взрыва сходящейся детонационной волны до скорости $W \approx 23$ км/с. Образцы представляли собой полусферические таблетки – сегменты диаметром 9 и толщиной 3.5 мм, прикрытые сверху стальным полусферическим экраном той же толщины. Использовалась электроконтактная система регистрации с записью времен прохождения ударной волны по образцам на регистраторах типа СУПИ, с погрешностью обсчета осциллограмм не хуже $5 \cdot 10^{-9}$ с.

В используемом устройстве, при подлете оболочки к экрану, в нем возникает, помимо мощной основной, относительно слабая ударная волна (образованная движущейся впереди оболочки сжатой воздушной "подушкой"), которая опережает фронт основной волны. Для предотвращения предварительного замыкания контактов верхнего уровня этой опережающей волной, между ними и экраном устанавливался воздушный зазор толщиной в 0.3 мм, который "гасил" первую волну, не оказывая заметного влияния на фронт основной.

В каждом опыте устанавливалось по 3 образца разных металлов; среди них в большинстве случаев присутствовало железо. Средние значения волновых скоростей, полученных в опытах, с учетом небольших (меньше 1%) поправок на различное затухание волн в металлах по сравнению с железом, таковы: железо, эталонный металл – $D = 20.19 \pm 0.25$ км/с, алюминий – $D = 24.17 \pm 0.40$ км/с, тантал – $D = 15.85 \pm 0.20$ км/с, титан – $D = 20.95 \pm 0.40$ км/с, молибден – $D = 18.74 \pm 0.40$ км/с.

Дальнейшая процедура обработки результатов такова: по экспериментальной волновой скорости в железе и известном его $D - U$ -соотношении (U – массовая скорость движения вещества за фронтом ударной волны): $D = 5.68 \pm 1.257 \cdot U$ (начальная плотность железа $\rho_0 = 7.85$ г/см³), справедливом в диапазоне 13 км/с $< U < 25$ км/с, находятся исходные состояния в железе: $U = 11.54$ км/с, $P = 1.83$ ТПа. После этого, по волновым скоростям в исследуемых металлах, через построения на $P - U$ -диаграмме, определяются их параметры сжатия. В данном случае результаты таковы:

алюминий

$$U = 15.08 \text{ км/с}, \quad P = 0.99 \text{ ТПа}, \quad \rho = 2.71 \text{ г/см}^3 \quad (\rho_0 = 2.71 \text{ г/см}^3);$$

тантал

$$U = 9.36 \text{ км/с}, \quad P = 2.47 \text{ ТПа}, \quad \rho = 40.00 \text{ г/см}^3 \quad (\rho_0 = 16.38 \text{ г/см}^3);$$

титан

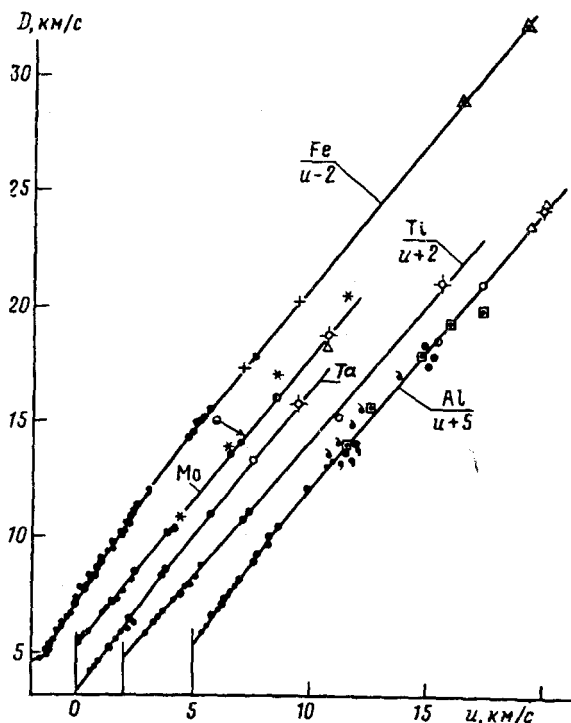
$$U = 13.67 \text{ км/с}, \quad P = 1.29 \text{ ТПа}, \quad \rho = 12.95 \text{ г/см}^3 \quad (\rho_0 = 4.5 \text{ г/см}^3);$$

молибден

$$U = 10.74 \text{ км/с}, \quad P = 2.05 \text{ ТПа}, \quad \rho = 17.80 \text{ г/см}^3 \quad (\rho_0 = 10.2 \text{ г/см}^3).$$

На рисунке они сопоставлены с имеющимися результатами [1, 3–14] полученными в лабораторных условиях и при подземных ядерных взрывах.

Какие выводы следуют из этих данных?



Ударные адиабаты железа, молибдена, тантала, титана и алюминия. Лабораторные измерения: +, o — исходные состояния в железе и соответствующие данные для металлов (настоящая работа); ρ, ∇, ●, ●, — результаты из [2, 13, 1(12), 14, 15], соответственно; измерения при подземных ядерных взрывах: ∇, *, Δ, ⊕, Δ, □, ⊕ — данные из работ [10, 9, 3, 4, 6, 7, 8], соответственно

Для алюминия. Новая экспериментальная точка практически совпала с измерениями из [6], проведенными при подземных взрывах. Можно считать, поэтому, оба результата взаимосогласованными. Тем самым снимается вопрос о справедливости сделанного в [6] допущения о тождественности скорости движения реперных таблеток, смонтированных в исследуемый блок и массовой скорости в алюминии.

Для титана. Новые измерения подтвердили принятый ранее [15] ход зависимости D_{Fe} (экран) — D_{Ti} . Это необходимо было сделать, поскольку в этой зависимости, представляющей собой две пересекающиеся прямые разного наклона, точка пересечения и наклон второго участка определялись по аналогии с зависимостями для других пар металлов и требовали прямого экспериментального подтверждения. Полученные в настоящей работе данные относятся к области состояний, характерных для второго участка $D - D$ -диаграмм, и свидетельствуют о справедливости принятой в [15] интерпретации результатов.

Для молибдена. Данные подземных испытаний [3–5, 9] сильно отличаются друг от друга: относительно линейной $D - U$ -зависимости, продолженной от лабораторной к области состояний, характерной для подземных взрывов, результаты измерений [3] расположены ниже (см. рисунок), а измерения [4, 9] — выше этой линии. Данные [5] занимают промежуточное между этими двумя измерениями положение, но, к сожалению, полученные там параметры не намного превышали лабораторный диапазон измерений. Новая точка, расположенная при близких давлениях, как и измерения в [3, 4, 10], подтверждает линейный характер $D - U$ -зависимости молибдена из [11, 5] и указывает на ошибочность результатов из [3, 4, 9].

Для тантала. Цель измерений – изучение его сжимаемости при более высоких давлениях, чем те, что достигнуты в [11]. Полученные в этой работе давления в 2.4 ТПа являются рекордными для лабораторных измерений.

Таким образом, в условиях лабораторного эксперимента получены данные по абсолютной сжимаемости тантала, молибдена, титана и алюминия при давлениях более чем в два раза превышающих известные лабораторные значения для этих металлов. Измерения позволили уточнить положение ударных адиабат этих металлов в области сверхвысоких давлений и решить оставшиеся вопросы об интерпретации данных, полученных для алюминия, молибдена и титана в условиях подземных ядерных взрывов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (контракт 94-02-05272-а).

-
1. *Свойства конденсированных веществ при высоких давлениях и температурах*, под редакцией Р.Ф.Трунина, Изд. ВНИИЭФ, 1992 г.
 2. Р.Ф.Трунин, Н.В.Панов, А.Б.Медведев, *Хим. Физ.* **14**, 97 (1995).
 3. С.Е.Ragan, M.G.Silbert, and Diven, *J. Appl. Phys.* **48**, 2860 (1977).
 4. V.A.Simonenko, *High Press. Res.* **5**, 816 (1990).
 5. Р.Ф.Трунин, М.А.Подурец, Г.В.Симаков и др., *ТВТ* **32**, 785 (1984).
 6. Л.П.Волков, Н.П.Волошин, А.С.Владимиров и др., *Письма в ЖЭТФ* **31**, 623 (1980).
 7. Е.Н.Аврорин, Б.К.Водолага, Н.П.Волошин и др., *ЖЭТФ* **93**, 613 (1987).
 8. М.А.Подурец, В.М.Ктигоров, Р.Ф.Трунин и др., *ТВТ* **32**, 952 (1994).
 9. A.C.Mitchel, W.J.Nellis, A.Moriarty et al., *J. Appl. Phys.* **69**, 2981 (1991).
 10. Р.Ф.Трунин, М.А.Подурец, Г.В.Симаков и др., *ЖЭТФ* **108**, 851 (1995).
 11. К.К.Круликов, А.А.Баканова, М.И.Бражник, Р.Ф.Трунин, *ДАН СССР* **148**, 1302 (1963).
 12. В.Л.Глушак, А.П.Жарков, М.В.Жерноклетов и др., *ЖЭТФ* **96**, 1301 (1989).
 13. LASL, *Shock Hugoniot Data (Los-Alamos Series on Dynamic Material Properties)*, Ed. S.P.Marsh. Berkeley-Los Angeles-London: Univ. California Pres., 1980.
 14. I.C.Skidmore and E.Morris, *Experimental Equation of State Data for Uranium and its Interpretation in the Critical Region Thermodynamics of Nuclear Materials (Proc. of Symp.)*, Vienna, 1962, p.173.
 15. Р.Ф.Трунин, Л.А.Илькаева, М.А.Подурец и др., *ТВТ* **32**, 692 (1994).