

ИЗЭНТРОПИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ УДАРНО-СЖАТОГО СВИНЦА

В.Е.Фортос, А.А.Леонтьев, А.Н.Дремин, С.В.Першин

Приведены результаты экспериментов по регистрации изэнтропы расширения пористого свинца, предварительно сжатого и разогретого во фронте ударной волны.

Для анализа физических явлений, вызванных быстрым энерговыделением в конденсированной фазе (лазерный нагрев, испарение скин-слоя лайнеров пинчей, магнитокумулятивных генераторов и т.п.) определяющими являются сведения об уравнении состояния металлов в широком диапазоне параметров от сильносжатого конденсированного состояния вплоть до идеального газа, включая область неидеальной плазмы и окрестность критической точки. В настоящее время для описания этого диапазона параметров не разработано сколь-нибудь надежной теории [1], а существующие экспериментальные методы не позволяют провести измерения при экстремально высоких температурах и давлениях.

В данной работе для исследования уравнения состояния металлов использовался динамический метод, основанный на генерации необходимых состояний при изэнтропическом расширении конденсированного вещества, предварительно сжатого и необратимо разогретого во фронте мощной ударной волны. Изменение и регистрация возникающих в волне разгрузки гидродинамических параметров осуществлялись путем расширения ударно-сжатого вещества в преграду с меньшей динамической жесткостью и известными термодинамическими свойствами [2, 3]. В этом случае измерение скорости ударной волны D в преграде позволяет определить давление P и массовую скорость u ударно-сжатого вещества, которые в силу условия на контактном разрыве оказываются равными давлению и массовой скорости исследуемого металла в волне разрежения. Проводя эксперименты с преградами различной динамической жесткости, таким образом можно определить изэнтропу расширения металлов в $P - u$ плоскости от состояния на ударной адиабате P_H, V_H, E_H до более низких давлений и температур. Переход от гидродина-

мических P , u к термодинамическим E - P - V переменным осуществлялся путем вычисления по экспериментально известной зависимости $u = u(P)$ интегралов Римана [4], выражающих законы сохранения для централизованной волны разрежения:

$$V = V_H + \int_P^{P_H} \left(\frac{du}{dP} \right)^2 dP, \quad E = E_H - \int_P^{P_H} P \left(\frac{du}{dP} \right)^2 dP. \quad (1)$$

Данная методика была использована для определения энтропии расширения свинца с начальной пористостью $m = 1,25$. В экспериментах применялся взрывной генератор прямоугольных ударных волн, обеспечивающий одномерное ускорение продуктами взрыва алюминиевой пластины до скорости $5,92 \cdot 10^5$ см/сек. Столкновение этой пластины с пористой свинцовой мишенью приводило к образованию ударной волны с амплитудой $0,94 \cdot 10^{12}$ дин/см² и расчетной энтропией $S = 0,8 \cdot 10^7$ эрг/г·град. В качестве преград в области высоких динамических давлений использовались образцы Al, Mg, плексигласа и полистирола различной плотности с экспериментально известными ударными адиабатами [2]. В области пониженных динамических давлений преградами служили сжатые газы, термодинамические свойства которых рассчитывались с учетом электронного возбуждения, ионизации и плазменной неидеальности [5]. Регистрация скорости ударных волн в образце и в преградах осуществлялась системой из шести электроконтактных датчиков, расположенных таким образом, чтобы учесть возможный перекося ударной волны. База измерений выбиралась в соответствии с требованиями стационарности течения на основании гидродинамических расчетов распространения ударных волн и искажающих волн разгрузки.

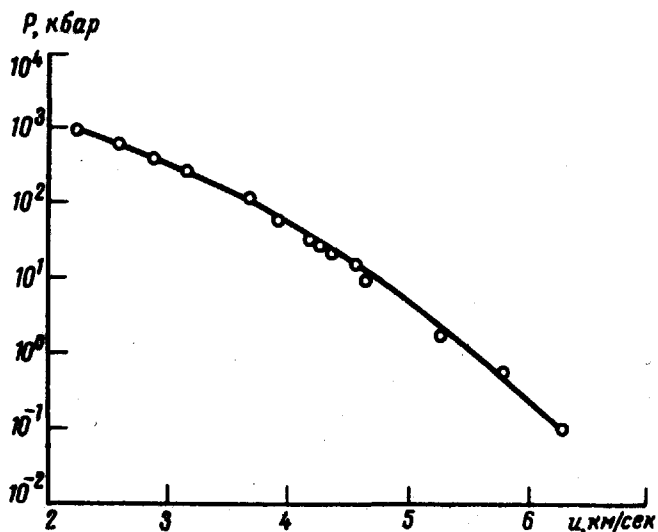


Рис. 1. Изэнтропа расширения в координатах, давление — P , массовая скорость u

Результаты экспериментов представлены на рис. 1. Каждая точка получена усреднением по 3 — 5 экспериментам при двух независимых регистрациях в каждом опыте. Точность определения D порядка 1%; $P \approx 2\%$, $u \approx 1,5\%$. На рис. 2 приведена полученная энтропия свинца, где, кроме того, изображена двухфазная область перехода жидкость — пар,

оцененная по принципу соответственных состояний, аналогично работе [6]. Точность определения термодинамических параметров по (1) определялась методом Монте-Карло путем моделирования на ЭВМ вероятностной структуры процесса измерений [7] и составляла $\delta V/V \sim 15\%$; $\delta E/E \sim 25\%$. Измерение температуры T совместно с другими параметрами в данном эксперименте затруднено; оценки T для верхней точки изэнтропы S дают $T \sim 12,5 \cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{K}$, для нижней $T \sim 2,5 \cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{K}$.

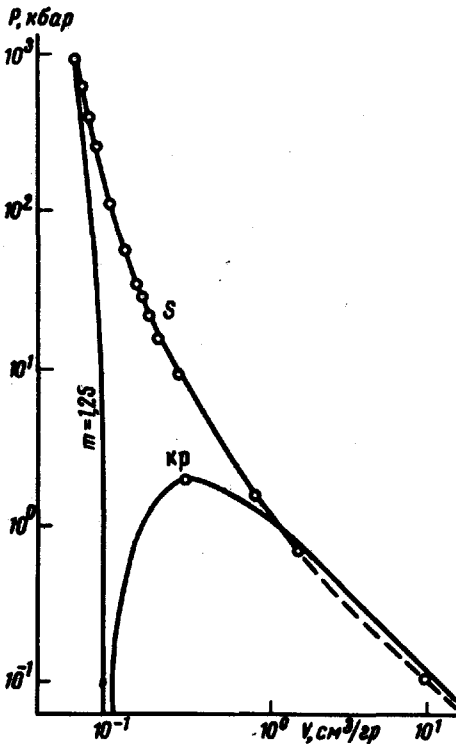


Рис. 2. Фазовая диаграмма свинца: H — ударная адиабата, $m = 1,25$, S — изэнтропа разгрузки, Кр. — оценка для критической точки

Результаты обработки изэнтропы показали, что по мере уменьшения давления при изэнтропическом расширении свойства металла меняются от конденсированного сильносжатого (эффективный показатель адиабаты $\gamma = (\partial \ln P / \partial \ln V)_S = 2,4$) до идеальноегазового ($\gamma \approx 1,7$) состояния; в нижней части изэнтропы свинец находится, по-видимому, в двухфазном состоянии (пунктир на рис. 2). Характерно, что в одной серии экспериментов удается пройти достаточно широкий диапазон параметров, в котором снимается вырождение электронной компоненты, реализуется область сильносжатой металлической жидкости и сильнонеидеальной плазмы. Отметим, что эксперимент не выявил заметных изломов [8] изэнтропы расширения вне области перехода "жидкость - газ", которые можно было бы интерпретировать как специфические фазовые переходы первого рода, обсуждавшиеся в [9] в связи с переходом "металл - диэлектрик" и в [10] в связи с фазовым переходом в сильнонеидеальной плазме. В исследованной области параметров фазовая диаграмма свинца имеет, по-видимому, обычный вид с одной критической точкой фазового перехода "жидкость - газ".

Авторы благодарны Л.В.Альтшулеру за помощь и ценные консультации, а также В.М.Иевлеву и В.Н.Зубареву за интерес к работе и обсуждения полученных результатов.

Институт химической физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
21 мая 1974 г.

Литература

- [1] S.P.Brush. *Progr. High. Temperat. Phys. and Chem.*, 1, Pergamon, 1967.
 - [2] Л.В.Альтшулер. *Успехи физ. наук*, 85, 197, 1965.
 - [3] C.Skidmore, E.Morris. *Proceed. of Symposium, Vienna, May, 1962.*
 - [4] Я.Б.Зельдович, Ю.П.Райзер. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. М., изд. Наука, 1966.
 - [5] В.К.Грязнов, И.Л.Иосилевский, В.Е.Фортов. *ПМТФ*, № 3, 70, 1973.
 - [6] R.G.Ross, D.A.Greenwood. *Progr. Mater. Sci*, 14, 173, 1971.
 - [7] В.Е.Фортов, Ю.Г.Красников. *ЖЭТФ*, 59, 1645, 1970.
 - [8] В.Е.Фортов. *ТВТ*, 10, 168, 1972.
 - [9] Я.Б.Зельдович, Л.Д.Ландау. *ЖЭТФ*, 14, 32, 1944.
 - [10] Г.Э.Норман. А.Н.Старостин. *ТВТ*, 6, 410, 1968.
-