

ДИНАМИЧЕСКАЯ СЖИМАЕМОСТЬ И ТЕРМОДИНАМИКА ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ АЛЮМИНИЯ В МЕГАБАРНОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ

*А.В.Бушман, И.К.Красюк, П.П.Пащинин,
А.М.Прохоров, В.Я.Терновой, В.Е.Фортос*

Проведены измерения динамической сжимаемости плотной плазмы алюминия при давлениях 2 – 4 Мбар. Одновременно измерены параметры адиабатического расширения ударносжатого алюминия. Для описания результатов динамических экспериментов предложено полуэмпирическое широкодиапазонное уравнение состояния.

Для анализа физических эффектов и динамики движения вещества при высоких локальных энерговыделениях необходимы сведения о термодинамических свойствах сжатой и разогретой металлической жидкости и плотной плазмы в условиях сильного межчастичного взаимодействия. Именно эффекты плазменной неидеальности затрудняют чисто теоретическое описание такой среды ¹ и стимулируют проведение экспериментов в мегабарном диапазоне давлений.

Для генерации плотной плазмы алюминия использовались взрывные одно- и двухступенчатые слоистые кумулятивные системы ^{2, 3}, в которых применялись инертные и химически активные прокладки из легкосжимаемого вещества, что позволило ускорить молибденовые ударники толщиной 0,1 – 0,2 мм до скоростей 8 – 13 км/с. Полное энерговыделение в опыте составляет около 5 МДж, локальный радиус кривизны подлетающего молибденового ударника около 40 см. В каждом эксперименте электронно-оптическим преобразователем "Агат СФ" фиксировались скорость подлета ударника (W_{Mo}), скорость ударной волны в профилированной алюминиевой мишени общей толщиной около 0,5 мм (D) и скорость ударной волны в воздухе атмосферного выделения (D_B) при разлете материала образца. Скорость движения ударносжатой плазмы (u) находилась методом торможения по известной ударной адиабате молибдена ⁴ с использованием измеренных значений W_{Mo} и D . Зафиксированное экспериментально значение скорости движения волны D_B позволяет по стандартной ударной адиабате воздуха определить параметры волны изэнтропического расширения – массовую скорость W^S и давление p^S .

Реализованные состояния вырожденной плазмы (рис. 1) относятся к области параметров, где на основании ранее выполненных экспериментов был предсказан электронный фазовый переход ⁵. Полученные экспериментальные точки на ударной адиабате алюминия свидетель-

ствуют о малой сжимаемости плазмы в исследованном диапазоне плотностей и не содержат указаний на какие-либо аномалии, которые можно было бы отнести за счет эффектов существенного перераспределения электронов по оболочкам в процессе сжатия. Кроме того, новые результаты согласуются со стороны низких давлений с данными измерений на пневматических и взрывных генераторах ударных волн ^{6, 7}, а со стороны сверхвысоких давлений с результатами уникальных измерений абсолютной сжимаемости ⁸ и данными, полученными американскими исследователями при проведении подземных ядерных взрывов ⁴. Это позволяет непротиворечиво описать совокупность динамических экспериментов ^{4, 6-8} и измерений настоящей работы с помощью гладкой кривой, свидетельствующей об отсутствии влияния электронных переходов на сжимаемость плазмы в широком исследованном интервале давлений и плотностей. Отметим, что приведенные на рис. 1 новые результаты по фиксации сжимаемости алюминиевой плазмы разумно согласуются с расчетами по квантовомеханической модели присоединенных плоских волн ⁹, которая также не дает фазового перехода в этой области.

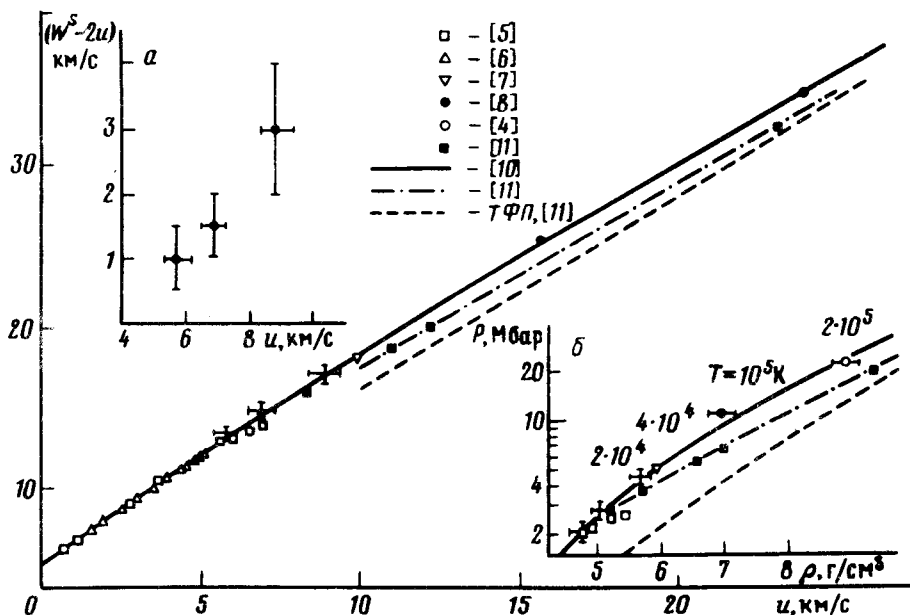


Рис. 1. Ударная адиабата алюминия. Выполненные опыты с экспериментальной погрешностью отмечены крестиками: *a* – скорость в волне изэнтропической разгрузки, *б* – $p - \rho$ -диаграмма для области высоких давлений

Регистрация термодинамических состояний, возникающих при адиабатическом расширении металла, предварительно сжатого и необратимо разогретого во фронте мощной ударной волны, впервые позволили определить свойства плотной вырожденной плазмы алюминия, проникнув в трудную для эксперимента и теории область сильнонагретой металлической жидкости. Анализ, проведенный на основе полученных данных (см. рис. 1, *a* и рис. 2) показывает, что зарегистрированные состояния плазмы относятся к диапазону пониженных, по сравнению с плотностью твердого тела, плотностей ($\rho/\rho_0 \approx 0,5$) и сильных разогревов, вблизи кривой высокотемпературного испарения и критической точки алюминия. Полученные данные свидетельствуют об отсутствии фазовых переходов, вызванных сильным кулоновским взаимодействием или переходом металл – диэлектрик ¹ в неидеальной плазме.

Результаты по адиабатическому расширению совместно с данными по фиксации ударной сжимаемости сплошных и пористых образцов, а также комплексом статических измерений, были использованы для построения широкодиапазонного уравнения состояния алюминия¹⁰. Качество описания динамического эксперимента вплоть до давлений ~ 20 Мбар полуэмпири-

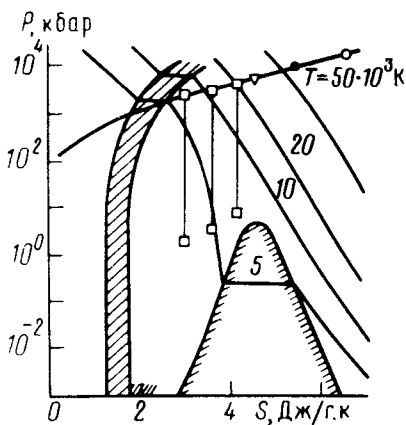


Рис. 2. Диаграмма энтропия – давление для алюминия. Показаны состояния в волнах ударного сжатия и изэнтропической разгрузки, область плавления и линия равновесия жидкость – пар отмечены штриховкой

ческим уравнением состояния представлено на рис. 1, б. Для сопоставления нанесены ударные адиабаты, рассчитанные по теории Томаса – Ферми с поправками и результаты интерпретации сравнительной сжимаемости алюминия и кремнезема, основанные на интерполяции¹¹. Видно, что альтернативные способы описания динамических характеристик плотной плазмы алюминия в таких экзотических условиях дают существенно худшие результаты; отличие от эксперимента по давлению достигает полутора – двух раз.

Литература

1. Фортв В.Е. УФН, 1982, 138, 361.
2. Терновой В.Я. Сб.: Нестационарные проблемы гидродинамики (Динамика сплошной среды в. 48) – Новосибирск: Институт гидродинамики СО АН СССР, 1980, с. 141.
3. Ивнов А.Г., Коротченко М.В., Новицкий Е.З., Огородников В.А., Певницкий Б.В., Пинчук С.Ю. ПМТФ, 1982, в. 2, с. 86.
4. Ragan C.E. Phys. Rev. Ser. A., 1982, 25, 3360.
5. Альтшулер Л.В., Баканова А.А. УФН, 1968, 96, 193.
6. Mitchell A.C., Nellis W.J. J. Appl. Phys., 1981, 52, 3363.
7. Корнер С.Б., Фунтиков А.И., Урлин В.Д., Колесникова А.Н. ЖЭТФ, 1962, 42, 686.
8. Волков Л.П., Волошин Н.П., Владимиров А.С., Ногин В.Н., Симоненко В.А. Письма в ЖЭТФ, 1980, 31, 623.
9. McMañan A.K., Ross M. In: High Pressure Science and Technology Ed. by K.D.Timmerhaus, M.S.Barber. N.-Y.: Plenum, 1979, 2, 726.
10. Бушман А.В., Фортв В.Е. УФН, 1983, 140, 177.
11. Альтшулер Л.В., Калиткин Н.Н., Кузьмина Л.В., Чекин Б.С. ЖЭТФ, 1977, 72, 317.