

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЭФФЕКТОВ НА УДАРНЫХ АДИАБАТАХ АЛЮМИНИЯ И СВИНЦА

*Е.Н.Аврорин, Б.К.Водолага, Н.П.Волошин,
В.Ф.Куропатенко, Г.В.Коваленко, В.А.Симоненко,
Б.Т.Черноволюк*

Получены данные по ударной сжимаемости алюминия и свинца относительно железа при давлениях $35 \div 240$ и $80 \div 550$ Мбар, соответственно, дающие первое надежное подтверждение проявления оболочечных эффектов на ударных адиабатах плотных веществ.

В ряде теоретических работ, например ^{1,2}, установлено влияние оболочечной структуры атомов на термодинамические свойства плотных веществ. В частности, оно приводит к осцилляции ударных адиабат относительно плавных интерполяционных зависимостей, которые строятся на основе экспериментальных данных при низких давлениях и результатов, полученных по модификации статистической модели Томаса – Ферми, учитывающей регулярные квантовые поправки ³ и неидеальность свойств ионных остовов (ТФПК) ⁴.

Учет оболочечных эффектов требует использования хотя и приближенных, но более сложных моделей. Выполнение расчетов по ним приводит к необходимости внесения дополнительных упрощений. Наиболее полные результаты получены по моделям самосогласованного поля (ССП) ¹ и Хартри – Фока – Слэтера (МХФС) ². Однако область применимости этих результатов не изучена. Более того, в некоторых областях термодинамических переменных, в частности, на нижней полуоволне ударной адиабаты алюминия результаты работ ^{1,2} расходятся на ве-

личину, сравнимую с оцениваемым эффектом, что показано на рис. 1 в переменных давлении P – сжатие $\sigma = \rho/\rho_0$. Этим обусловлена актуальность экспериментальных исследований.

Принципиальная возможность получения экспериментальной информации во всем диапазоне проявления осцилляций на нормальных ударных адиабатах плотных веществ показана в ^{5,6}. Однако значительные погрешности измерений и учета затухания волны не позволяют использовать эти результаты для уточнения теоретических данных. По тем же причинам неправомерна попытка связать газодинамические измерения с обсуждением оболочечных эффектов в ⁷. Для достижения требуемой точности нами была усовершенствована постановка опытов и методика измерений. В частности, использовались ударные волны с хорошо определенной формой фронта, измерения проводились в единой постановке при 8 значениях давления, были уменьшены базы измерений, применялся новый способ регистрации.

Изучалась ударная сжимаемость алюминия. Нас привлекла большая амплитуда осцилляций нижней полуволны ударной адиабаты и необходимость устранения неопределенности в этой амплитуде. В ⁵ были получены указания на аномальность свойств свинца. Поэтому он был выбран в качестве второго исследуемого вещества. Использовалась традиционная схема метода отражений с размещением эталонного вещества первым по ходу фронта. Эталонном служило железо. При выборе его мы исходили из прогнозируемой малости оболочечных эффектов у этого материала в области, необходимой для обработки. Толщина опорного эталонного слоя 25 мм, а примыкающих к нему слоев алюминия, железа и свинца – 8; 10; 12 мм, соответственно.

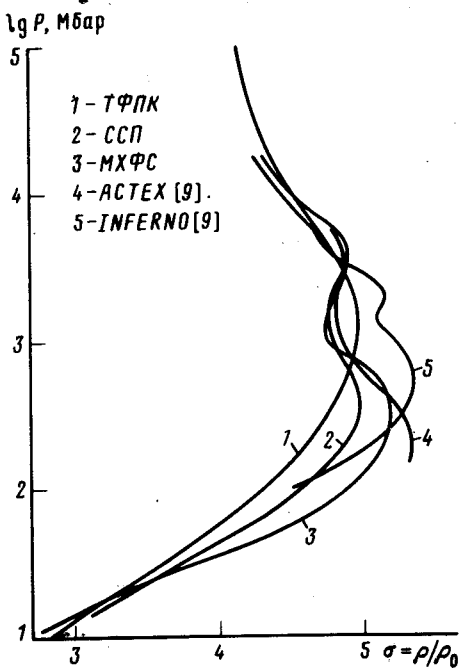


Рис. 1

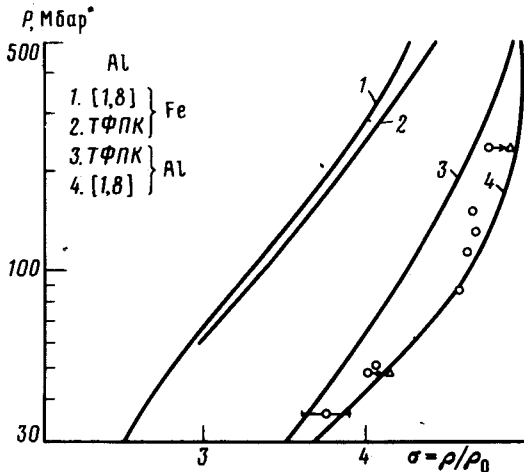


Рис. 2

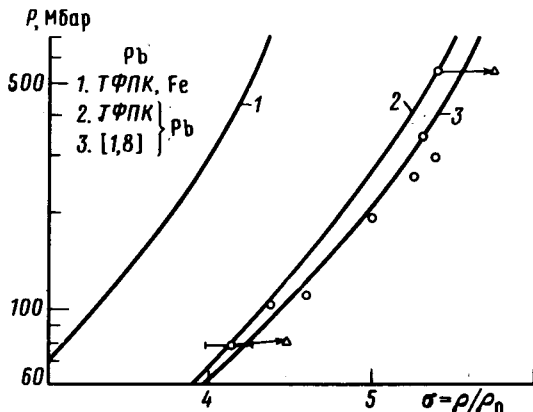


Рис. 3

Моменты выхода фронта на контрольные поверхности фиксировались по оптическому наблюдению прилегающих к ним слоев воздуха. Для обеспечения точности измерений в поле зрения одного светового канала находились три контрольные поверхности, соответствующие

выбранному давлению (две — эталона, одна — образца). Взаимная подсветка исключалась постановкой непрозрачных перегородок. Все три сигнала регистрировались единым детектором. Для повышения надежности в каждом канале устанавливалось два детектора. Сложность трехступенчатой формы сигнала предопределила применение осциллографической аппаратуры. Для повышения точности временных измерений использовалась схема регистрации, при которой рабочие сигналы записывались после хорошо известных задержек на короткие разветки.

Непосредственно определялись средние по базам величины волновых скоростей. Переход к значениям на контактных границах осуществлялся расчетно. В зависимости от материала поправки составляют $4 \div 8\%$. В математической программе используется неоднородный разностный метод с выделением фронта сильных разрывов и с учетом теплопроводного и адиабатического режимов течения. Правильность поправок контролировалась в опыте. В таблице для каждого измерительного элемента приведены значения волновых скоростей D (км/с) на границах эталон — образец. Там же указана суммарная погрешность (%), отвечающая доверительной вероятности 0,95. Основной вклад в нее связан с неопределенностью выбора точки отсчета регистрируемого момента и обусловлен конечной толщиной луча осциллографа.

Железо	Алюминий			Свинец		
	D	D	P	σ	D	P
$88,20 \pm 0,7$	$107,1 \pm 0,9$	237,9	4,73	$76,70 \pm 0,7$	543,8	5,39
$71,25 \pm 0,6$	$85,98 \pm 0,8$	152,5	4,64	$61,33 \pm 0,7$	346,5	5,31
$66,74 \pm 0,6$	$80,11 \pm 0,8$	132,5	4,66	$56,98 \pm 0,6$	300,2	5,40
$62,65 \pm 0,6$	$75,03 \pm 0,7$	115,9	4,61	$53,43 \pm 0,6$	262,4	5,26
$54,90 \pm 0,6$	$65,22 \pm 0,6$	87,3	4,55	$46,60 \pm 0,5$	197,3	5,00
$42,63 \pm 0,7$	$50,58 \pm 0,7$	50,6	4,05	$35,44 \pm 0,6$	111,6	4,60
$41,79 \pm 0,6$	$49,45 \pm 0,7$	48,5	4,00	$35,00 \pm 0,6$	107,2	4,37
$36,77 \pm 0,5$	$43,57 \pm 0,6$	36,3	3,73	$30,42 \pm 0,5$	79,6	4,13

В таблице приведены также значения давления P (Мбар) и сжатия σ на ударных адиабатах алюминия и свинца, полученные с помощью интерполяционного уравнения состояния железа по данным работ ^{1,8}. На рис. 2, 3 эти результаты сравниваются с ударными адиабатами работ ^{1,8} и модели ТФПК. Для отдельных точек показаны погрешности в величине σ . Видно хорошее согласие эксперимента с результатами ^{1,8}. Если обработку проводить с помощью данных модели ТФПК, то при практически том же положении ударной адиабаты железа экспериментальные точки сместятся в сторону больших сжатий для алюминия на $\Delta\sigma/\sigma \cong 0,15$, а для свинца на $\Delta\sigma/\sigma \cong 0,25$ и значительно отойдут от соответствующих расчетных ударных адиабат (на рис. 2, 3 смещение некоторых точек показано стрелками). Это свидетельствует о заметной рассогласованности уравнений состояния ТФПК для эталона и образцов. Рассогласованность проявляется и в D , D -переменных. Так, соответствующие зависимости для пары алюминий — железо, построенные по данным ^{1,8} и ТФПК, расходятся в исследуемом диапазоне давлений на $1,25 \div 2$ км/с, что больше погрешности полученных данных.

Вид функциональной связи волновых скоростей в эталоне и образце близок к линейному. Поэтому в соответствии с предложением Н.Н.Калиткина можно статистически обработать всю совокупность экспериментальных данных. Это позволяет уменьшить в ~ 3 раза погрешность оценки амплитуды нижней осцилляции по сравнению с погрешностью одной точки. Значения амплитуды хорошо согласуются с величинами, полученными по уравнениям состояния типа ^{1,8}, хотя рассмотренная полуовална, возможно, более сжата по оси давлений.

Литература

1. Синько Г.В. ЧММСС, 1981, 12, 121.
2. Никифоров А.Ф., Новиков В.Г., Уваров В.Б. ДАН СССР, 1982, 267, 315.
3. Калиткин Н.Н. ЖЭТФ, 1960, 38, 1534.
4. Копышев В.П. ЧММСС, 1977, 8, № 6, 54.
5. Аврорин Е.Н., Водолага Б.К., Волков Л.П., Владимиров А.С., Симоненко В.А., Черноволюк Б.Т., Письма в ЖЭТФ, 1980, 31, 727.
6. Владимиров А.С., Волошин Н.П., Ногин В.П., Петровцев А.В., Симоненко В.А. Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, 69.
7. Модель И.Ш., Нарожный А.Т., Харченко А.И., Холин С.А., Хрусталеv В.В. Письма в ЖЭТФ, 1985, 41, 270.
8. Сапожников А.Т., Першина А.В. ВАНТ, сер. Методики и программы, 1979, 4, 47.
9. Yong D.A., Wolford J.K., Rogers F.J., Holian K.S. Phys. Lett., 1985, 108A, 157.

Поступила в редакцию
18 ноября 1985 г.
