

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗГРУЗКИ СТАЛИ, УДАРНО-СЖАТОЙ ВЫШЕ ТОЧКИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

Ю. В. БАТЬКОВ, А. Г. ИВАНОВ, С. А. НОВИКОВ

(Москва)

В [1] экспериментально показано, что адиабата ударного сжатия железа имеет излом при давлении  $\sim 13,0$  ГПа. Скачкообразное увеличение сжимаемости в точке излома ударной адиабаты железа и различных сталей на основе  $\alpha$ -железа вызвано фазовым переходом 1-го рода из  $\alpha$ -фазы (объемно центрированная кубическая решетка) в  $\epsilon$ -фазу (гексагональная решетка). Наличие излома приводит к тому, что в диапазоне давлений от 13,0 до 36,0 ГПа импульс давления в железе и сталях распространяется в виде двух последовательных волн сжатия. Исследования структуры волн [2] показали, что фронт второй волны имеет заметное размытие (ширина фронта  $\sim 0,3$  мкс), что вызвано релаксационным процессом при переходе железа из одной фазы в другую при ударном сжатии.

При разгрузке железа, ударно-сжатого выше давления 13,0 ГПа, происходит обратный фазовый переход. Адиабата Пуассона также имеет излом в точке перехода. Вообще точка излома при нагружении соответствует началу фазового перехода, т. е. должна существовать некоторый участок ударной адиабаты, соответствующий смеси двух фаз (на ударной адиабате железа точка окончания фазового перехода экспериментально не выявлена). При разгрузке точка излома адиабаты Пуассона соответствует окончанию  $\epsilon \rightarrow \alpha$ -перехода. Обратному фазовому переходу также должен сопутствовать некоторый релаксационный процесс.

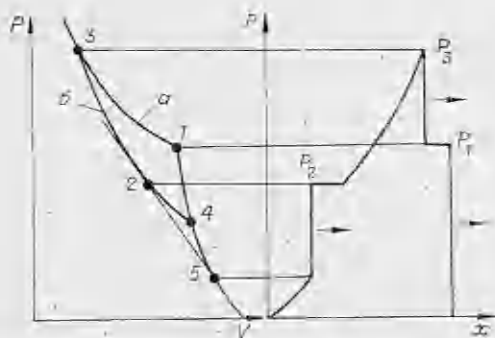
Излом кривой сжимаемости — частный предельный случай аномального участка адиабаты с отрицательной второй производной  $\partial^2 p / \partial V^2 < 0$  ( $p$  — давление,  $V$  — объем). Как впервые показано в [3], при разгрузке такой среды формируется ударная волна разрежения (УВР). Условие устойчивости УВР геометрически выражается касанием волнового луча, определяющего скорость УВР, к двум ветвям адиабаты Пуассона [4]. На рис. 1 схематично представлены адиабата ударного сжатия (а), адиабата Пуассона (б) железа и профиль импульса давления, включающего две ударные волны сжатия ( $p_1, p_2$ ) и УВР ( $p_3$ ). Точка 1 соответствует началу  $\alpha \rightarrow \epsilon$ -перехода, 4 — окончанию обратного  $\epsilon \rightarrow \alpha$ -перехода, 2 и 5 — точки касания волнового луча к двум ветвям адиабаты Пуассона.

Первое экспериментальное доказательство существования УВР — образование отколов с гладкой поверхностью в опытах при взрывном нагружении образцов из железа и стали [5, 6]. Внедрение в практику газодинамических экспериментов манганиновых датчиков давления позволило непосредственно зарегистрировать УВР в железе и ряде других веществ [7—11]. Определенное с помощью манганиновых датчиков давление начала полиморфного  $\alpha \rightarrow \epsilon$ -перехода в армко-железе  $p_1$  по [10] равно  $12,6 \pm 0,4$  ГПа, по [11] —  $13,6 \pm 0,25$  ГПа. По регистрации изменений скорости свободной поверхности образцов после выхода на нее ударной волны с помощью емкостного датчика  $p_1 = 14,7 \pm 0,5$  ГПа [12]. По данным работы [13], выполненной с использованием лазерного интерферометра,  $p_1 = 12,8$  ГПа. Для стали Ст. 3 эта величина составляет 15,2 ГПа [7]. За давление начала обратного  $\epsilon \rightarrow \alpha$ -перехода в железе в [9—11, 13] принимается давление перед фронтом УВР  $p_2$ , равное  $12,3 \pm 0,4$  ГПа в [10],  $10,0 \pm 0,25$  ГПа в [11] и  $9,8 \pm 0,4$  ГПа в [13]. Таким образом, величина гистерезиса давления  $\Delta p = p_1 - p_2 \approx \epsilon$ -перехода в железе и сталях однозначно не определена и находится в пределах от 0,3 до 3,6 ГПа. При статических условиях нагружения величина гистерезиса  $\sim 5,0$  ГПа [14].

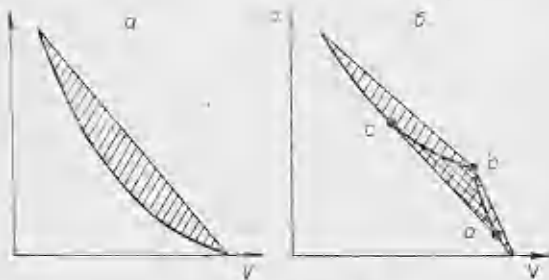
В данной работе приводятся результаты исследований профиля давлений в стали Ст. 3, полученные во взрывных экспериментах с помощью манганинового датчика, и результаты измерения остаточной температуры стали после взрывного нагружения, позволяющие оценить величину гистерезиса фазового перехода.

В первой серии экспериментов ударная волна в образцах из стали диаметром 120 мм толщиной  $\sim 60$  мм создавалась плоской детонационной волной в заряде пресованного тротила ( $\rho_0 = 1,51$  г/см<sup>3</sup>,  $\varnothing 90 \times 40$  мм). Профили давлений  $p(t)$ , нормальных фронту ударной волны, регистрировались в двух сечениях образца с помощью проволочных манганиновых датчиков [15]. Для обеспечения необходимого времени жизни датчика ( $\sim 10$ —15 мкс) в ущерб временной разрешимости общая толщина датчиков вместе с изолирующими прокладками из фторопласта составляла 0,3—0,5 мм. Полученная экспериментально в предварительных опытах калибровочная зависимость относительного изменения сопротивления проволочного датчика  $\Delta R/R_0$  от давления  $p$  в диапазоне 1,5—20,0 ГПа описывается эмпирической формулой  $p = (0,32 + 35,395 \Delta R/R_0)$  ГПа и хорошо согласуется с опубликованными в [9, 10, 16].

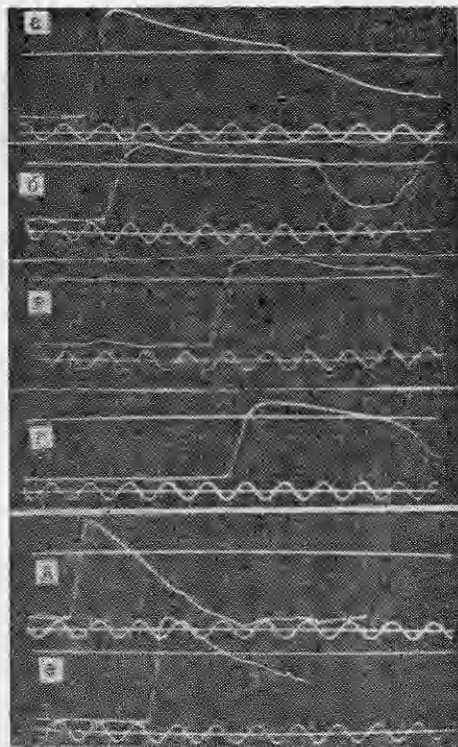
Типичные осциллограммы профилей давления  $p(t)$  в образце на расстояниях 10, 20, 25 и 35 мм от поверхности нагружения показаны на рис. 2, а — г соответственно. Для демонстрации различия в процессах разгрузки представлены профили давления в алюминиевом образце (АД1) на расстояниях 10 и 25 мм (рис. 2, д, е), полученные в аналогичном опыте. Частота масштабной синусоиды на осциллограммах 1,0 МГц. В отличие от [7] в наших опытах не наблюдались искажения регистрируемого сигнала в стали наводкой от электромагнитной помехи, связанной с изменением маг-



Р и с. 1



Р и с. 3



Р и с. 2

нитной проницаемости железа, от которой в [17] избавлялись с помощью специального бифилярного манганинового датчика. Результаты обработки опытов (по 2—3 опыта на сечение) сведены в табл. 1. Как видно из осциллограмм профилей давления на рис. 2, все особенности импульса сжатия, характерные для стали с давлением начального сжатия выше фазового перехода (две волны сжатия, простая волна разрежения и УВР), достаточно хорошо видны на расстоянии 20 мм от поверхности нагружения (рис. 2, б). Амплитуда второй ударной волны  $p_3$  затухает на расстояниях 10—25 мм от поверхности нагружения с 17,0 до 13,0 ГПа. Величины давлений  $p_1$  и  $p_2$ , определенные на расстояниях 10—35 мм от поверхности нагружения, составляют для стали Ст. 3  $12,5 \pm 0,5$  и  $10,2 \pm 0,5$  ГПа соответственно. Величина  $p$ , практически (с учетом 10% погрешности измерений) совпадает с данными [10, 11, 13]. Значение  $p_2$  находится в хорошем согласии с результатами [11, 13] и значительно ниже  $12,3 \pm 0,4$  ГПа из [10].

В опытах с образцами из железа и стали обнаружено, что температура осколков, находящихся в пределах так называемой «зоны удара», резко очерченная граница которой образуется при скачкообразном уменьшении давления на фронте проходящей ударной волны при ее догоне УВР [17], значительно выше температуры других осколков образца. Естественно предположить, что это отличие связано с особенностями разгрузки железа в УВР. Как известно, при предположении о совпадении адиабат ударного сжатия и адиабаты Пуассона повышение температуры вещества после его разгрузки определяется в координатах  $p - V$  площадью заштрихованного сегмента на рис. 3, а. При разгрузке с участием УВР происходит дополнительное выделение тепла, соответствующее площади  $abc$  на рис. 3, б. Температура вещества после разгрузки определяется в этом случае общей площадью заштрихованной фигуры.

Во второй серии опытов измерялась остаточная температура осколков в виде «сердечников», образующихся при взаимодействии УВР в цилиндрических образцах

Т а б л и ц а 1

H, мм	Давление, ГПа		
	$p_1$	$p_2$	$p_3$
10	13,5	10,0	17,0
20	12,5	11,0	14,0
22,5	12,5	11,0	13,5
25	12,0	10,0	13,0
35	12,0	9,0	—

Т а б л и ц а 2

Номер опыта	L, мм	h, мм	T, °C	
			Эксперимент	Расчет
1	65	43	205	150
2	130	50	240	200
3	130	49	250	200
4	130	51	240	200

и находящихся в зоне, захваченной фазовым переходом [6, 17]. Схема постановки опытов аналогична приведенной в [6]. Образцы располагались на сухом песке, измерение температуры «сердечника» производилось с помощью калориметра, интервал времени от момента подрыва заряда до момента опускания осколка в калориметр не превышал 1 мин.

Расчетные и экспериментально измеренные после опытов значения температур «сердечников» приведены в табл. 2, где  $L$  — длина заряда ВВ,  $h$  — высота «сердечника»,  $T$  — температура сердечника. Расчет средней температуры «сердечника» после разгрузки делался на основе  $x - t$ -диаграммы течения, образующегося при отражении плоской детонационной волны от границы с образцом из железа, в предположении о совпадении ударной адиабаты и адиабаты Пуассона. Как видно из табл. 2, разница между расчетными и экспериментально измеренными температурами  $\sim 40^\circ\text{C}$  и достаточно велика, чтобы ее можно было объяснить неточностью измерений; наиболее вероятным объяснением является гистерезис при обратном фазовом переходе. Исходя из отмеченной выше разницы температур, можно оценить величину гистерезиса  $\alpha \rightleftharpoons \varepsilon$ -перехода. Формально это сводится к введению недостающей площади на  $p - V$ -диаграмме. (При проведении оценок верхняя ветвь адиабаты Пуассона строилась как продолжение ветви ударной адиабаты до начального объема, соответствующего  $\varepsilon$ -фазе.) Оценки показали, что излом адиабаты железа при разгрузке должен быть при давлении примерно 9,0 ГПа. Такую оценку гистерезиса ( $\Delta p = 4$  ГПа) следует считать завышенной, так как при расчете не принималось во внимание нагревание железа за счет перехода энергии деформации в тепловую.

Отметим также, что давление  $p_2$  на фронте УВР не характеризует начала обратного фазового перехода при разгрузке. Это следует из приведенного выше условия «капания» (рис. 1). Давление на фронте сформировавшейся УВР в железе и сталях должно быть всегда выше точки излома на адиабате Пуассона, при этом величина  $p_2$  должна зависеть от максимального давления  $p_3$  на фронте ударной волны сжатия.

Таким образом, разность давлений  $\Delta p = p_1 - p_2$  не определяет величину гистерезиса  $\alpha \rightleftharpoons \varepsilon$ -перехода в железе и сталях при ударном сжатии, значения давлений  $p_2$  определяют только амплитуду сформировавшейся УВР в железе и сталях при данных условиях нагружения. Поэтому оцененное по остаточным температурам образцов давление (около  $\sim 4$  ГПа) должно быть ближе к истинному значению гистерезиса фазового перехода в железе, чем в [10].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bancroft D., Peterson E. L., Minshall S. Polymorphism of iron at high pressure.— J. Appl. Phys., 1956, v. 27, N 3.
2. Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г. Исследование структуры ударных волн сжатия в железе и стали.— ЖЭТФ, 1964, т. 47, вып. 3(9).
3. Зельдович Я. Б. Теория ударных волн и введение в газодинамику. М.: Изд-во АН СССР, 1946.
4. Иванов А. Г., Новиков С. А. Об ударных волнах разрежения в железе и стали.— ЖЭТФ, 1961, т. 40, вып. 6.
5. Иванов А. Г., Новиков С. А., Тарасов Ю. И. Откольные явления в железе и стали, вызванные взаимодействием ударных волн разрежения.— ФТТ, 1962, т. 4, вып. 1.
6. Egerman J. O. Smooth spalls and the polymorphism of iron.— J. Appl. Phys., 1961, v. 32, N 5.
7. Ананьин А. В., Дремин А. Н., Канель Г. И. Структура ударных волн и волн разрежения в железе.— ФГВ, 1973, т. 9, № 3.
8. Павловский М. Н., Комиссаров В. В. Особенности фазового превращения висмута в волне разрежения.— ЖЭТФ, 1982, т. 83, вып. 6(12).
9. Duval G. E., Graham R. A. Phase transitions under shock wave loading.— Rev. Modern. Phys., 1977, v. 49, N 3.
10. Ананьин А. В., Дремин А. Н., Канель Г. И. Полиморфное превращение железа в ударной волне.— ФГВ, 1981, т. 17, № 3.
11. Rosenberg Z., Partom Y., Yaziv D. Determination of the dynamic  $\alpha \rightleftharpoons \varepsilon$  transformation in iron using manganin stress gauges.— J. Phys. D : Appl. Phys., 1980, v. 13, p. 1489.
12. Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г. О фазовом переходе в железе при ударном сжатии.— ФМиМ, 1966, т. 21, вып. 2.
13. Barker L. M., Hollenbach R. E. Shock wave study of the  $\alpha \rightleftharpoons \varepsilon$  phase transition in iron.— J. Appl. Phys., 1974, v. 45, N 11.
14. Gilles P. M., Longenbach M. N., Marder A. R. High-pressure  $\alpha \rightleftharpoons \varepsilon$  martensitic transformation in iron.— J. Appl. Phys., 1971, v. 42, N 11.
15. Батюков Ю. В., Вишневецкий Е. Д. Аппаратура для измерения импульсных давлений пьезорезистивными датчиками в диапазоне 0,1—20 ГПа.— В кн.: Тезисы докл. II Всесоюз. симпозиум по импульсным давлениям. М.: ВНИИФТРИ, 1976.
16. Канель Г. И., Вахитова Г. Г., Дремин А. Н. Метрологические характеристики мanganin-датчиков давления в условиях ударного сжатия и разгрузки.— ФГВ, 1978, т. 14, № 2.
17. Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г. К вопросу о природе «зоны удара» в железе и стали.— ФМиМ, 1965, т. 20, вып. 1.

Поступила 7/VIII 1984 г.