

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В СТАЛИ

М. М. Бойко, В. А. Летьгин, В. С. Соловьев

(Москва)

С применением емкостного датчика [1] исследовано распространение ударных волн в стальных образцах от контактного подрыва плоскостного заряда взрывчатого вещества. Обнаружено монотонное затухание максимального давления ударного сжатия с удалением от поверхности контакта. Вычислены скорости распространения первой и второй ударных волн. Расчеты проводились с использованием известной скорости упругой волны и найденных экспериментально интервалов времени между выходом волн на свободную поверхность пластин разной толщины. Эксперименты показали, что в условиях проведения опытов до толщин $x_1/h \approx 1.35$ (x_1 — толщина образца, h — высота заряда) ударная волна в стали распространяется в виде трех ступенек, а дальше вырождается в двухступенчатую.

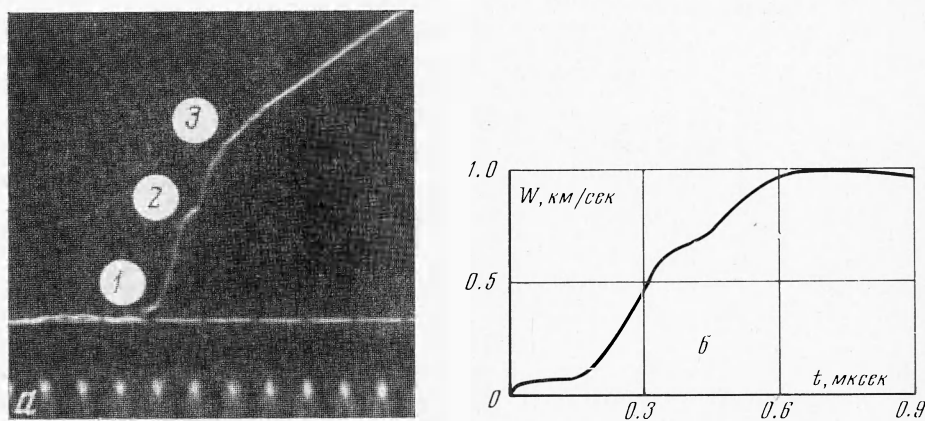
В работе Д. Банкрофта [2] с помощью контактных датчиков обнаружена сложная структура ударных волн в стальных образцах. Профиль давления ударных волн, вызванных ударом плоского ударника в железе, изучался Д. Хугесом [3]. Подробное изучение первой ударной волны в армко-железе емкостным датчиком осуществлено Тейлором [4]. Исследованию структуры ударных волн сжатия в железе и стали посвящен ряд работ С. А. Новикова, А. Г. Иванова и др. [5-8]. Для этих же целей использован оптический метод в работе Пейри [9]. В упомянутых работах отмечается, что в диапазоне давлений от 130 до 360 кбар импульс давления в железе и стали распространяется в виде двух последовательных волн сжатия, несущих основное давление, и предшествующей упругой волны с существенно меньшей амплитудой.

В данной работе экспериментально изучалось затухание ударных волн в стальных образцах при подрыве на их поверхности тротилового заряда диаметром $d = 50$ мм и высотой $h = 10$ мм. Затухание ударных волн вызвано волной разгрузки, догоняющей ударные волны со стороны заряда. Заряд инициировался с помощью плоскостной линзы так, что разновременность выхода детонационной волны на границу раздела со стальной преградой не превышала 0.1 мксек. Используемые инертные линзы оказывают незначительное влияние на профиль нагрузки, что оценивалось при их отработке. Сигнал с емкостного датчика регистрировался осциллографом ОК-17М. В опытах определялась зависимость профиля давления в ударной волне от толщины образца (x_1). Образцы были выточены из одного прутка Ст. 3. Материал взят в состоянии поставки. Осциллограмма сигнала, полученная в опыте при взрывном нагружении стальной пластины толщиной $x_1 = 6.6$ мм, и изменение скорости свободной поверхности пластины во времени, полученное после обработки осциллограммы, показаны на фиг. 1, а и б. (Частота отсчетчика времени 4 мгу; 1 — упругая волна, 2 и 3 — первая и вторая ударные волны.) Обработка осциллограмм производилась по формуле

$$W(t) = V(t) \delta / \left[C_0 ER \left(1 + \frac{1}{C_0 ER} \int_0^t V(t) dt \right)^2 \right] \quad (1)$$

где $W(t)$ — скорость свободной поверхности пластины, $V(t)$ — амплитуда сигнала, снимаемого с датчика; δ и C_0 — начальное расстояние между пластинами измерительного конденсатора и его емкость; E — напряжение источника питания, R — сопротивление входа осциллографа.

Расчеты производились на ЭЦВМ с шагом по времени $5 \cdot 10^{-8}$ сек. Для вычисления давления по измеренной скорости свободной поверхности использовался закон сохранения импульса $P = \rho U D$, где $U = W/2$, P — давление ударного сжатия и ρ — плотность материала. Поскольку сжатие имеет ступенчатый характер, то для каждой ступеньки должно быть свое значение скорости ударной волны D с учетом того, что каждый последующий импульс давления распространяется по материалу, уже находящемуся в движении.



Фиг. 1а, б

Для определения скорости упругой волны D_{10} в работе [5] применялись ступенчатые датчики. Непосредственное измерение скорости второй и третьей ударных волн относительно потока перед ее фронтом D_{21} и D_{32} довольно затруднительно. Поэтому воспользуемся лишь значением скорости D_{10} , а скорости D_{21} и D_{32} вычислим, применяя подобно [3] простые соотношения, очевидные из $x-t$ -диаграммы процесса распространения ударных волн в пластине

$$D_{21} = (-B + \sqrt{B^2 - 4AC}) / 2A \quad (A = t_2, B = D_{10}t_2 - x_1 + 2U_1t_1, \\ C = -(x_1 - U_1t_1)(D_{10} + U_1)) \quad (2)$$

где t_1 и t_2 — время от момента приложения давления до выхода упругой и первой ударной волны на свободную поверхность, U_1 — массовая скорость за фронтом упругой волны. Причем если $D_{21} \gg U_1$ и t_2 мало отличается от t_1 , то

$$D_{21} \approx x_1 / t_2 - U_1 \quad (3)$$

При этом предположении $D_{32} \approx (-B + \sqrt{B^2 - 4AC}) / 2A$

$$A = t_3, \quad B = D_{21}t_3 - x_1 + 2U_2t_2 \\ C = -(x_1 - U_2t_2)(D_{21} + U_2) \quad (4)$$

где t_3 — время от приложения давления до выхода второй ударной волны, U_2 — массовая скорость за фронтом первой ударной волны.

В формулах (2) — (4) предполагается, что каждое последующее повышение давления распространяется по уже движущемуся материалу.

В табл. 1 представлены результаты экспериментов, по которым была определена скорость первой ударной волны, причем $t_1 = x_1/D_{10}$, $t_2 = t_1 + \Delta t_{21}$. Величина разновременности выхода волн Δt_{21} определялась по осциллограммам. Скорость упругой волны $D_{10} = 6.01$ км/сек взята по данным Л. В. Альшутлера [10].

Таблица 1

x_1 , мм	Δt_{21} , мксек	D_{21} , км/сек	x_1 , мм	Δt_{21} , мксек	D_{21} , км/сек
4.0	0.10	5.10	10.0	0.25	5.18
4.5	0.10	5.26	10.0	0.25	5.18
5.7	0.10	5.36	10.0	0.20	5.32
6.2	0.15	5.21	12.2	0.35	5.08
6.2	0.15	5.21	12.5	0.25	5.32
6.2	0.15	5.21	12.5	0.25	5.32
6.7	0.15	5.24	13.7	0.30	5.27
7.2	0.20	5.11	14.0	0.30	5.28
7.5	0.20	5.12	14.5	0.35	5.22
7.5	0.20	5.12	18.1	0.40	5.25
9.7	0.20	5.30	19.8	0.45	5.22
9.7	0.20	5.30	19.8	0.45	5.23
10.0	0.25	5.18	22.0	0.50	5.25

Как следует из табл. 1, с вероятностью 0.95 $D_{21} = (5.27 \pm 0.04)$ км/сек. С этой скоростью распространяется импульс давления, соответствующий точке фазового перехода. При вычислении скорости D_{21} массовая скорость за фронтом упругой волны определялась из осциллограмм и была равна $U_1 = (32.4 \pm 5.6)$ м/сек. Скорость второй ударной волны D_{32} определялась по формуле (4). Необходимые экспериментальные данные и результаты расчета показаны в табл. 2. При вычислении была взята средняя массовая скорость первой ударной волны $U_2 = (327 \pm 27)$ м/сек, так как до $x_1/h = 1.35$ затухание ее не обнаружено.

Таблица 2

x_1 , мм	D_{21} , км/сек	$2U_1$, км/сек	$2U_2$, км/сек	$2U_3$, км/сек	Δt_{32} , мксек	D_{32} , км/сек
4.0	5.27	0.050	0.760	1.060	—	—
6.2	5.27	0.074	0.700	1.000	0.35	3.81
6.7	5.27	0.060	0.650	0.990	0.25	4.13
7.5	5.27	0.070	0.650	0.920	0.20	4.28
10.0	5.27	—	0.638	0.816	0.30	2.71
12.2	5.27	—	—	—	0.35	2.34
12.5	5.27	—	0.750	0.780	0.40	2.68
13.7	5.27	—	—	—	0.30	2.59
14.0	5.27	0.070	0.674	—	—	—
18.1	5.27	—	0.624	—	—	—
19.8	5.27	—	0.612	—	—	—

На основании проведенных экспериментальных замеров массовых скоростей и вычисленных скоростей ударных волн найдены профили импульса давления в стальных образцах для толщин $0.4 \leq x_1/h \leq 1.98$. Изменение давления в ударной волне с увеличением толщины образца представлено на фиг. 2 (1 — давление в упругой волне, 2 — давление в первой ударной волне, 3 — максимальное давление ударного сжатия).

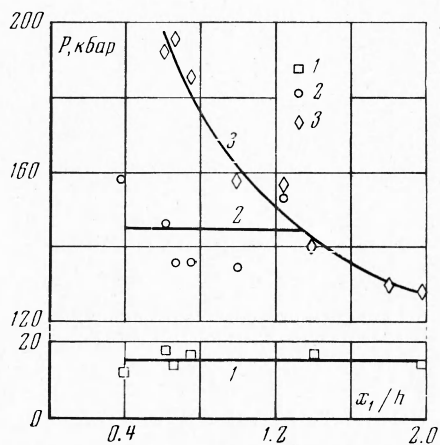
Давление в каждой ступеньке вычислялось относительно давления в предыдущей

$$P_{10} = \rho_{00} U_1 D_{10} \quad (5)$$

$$P_{21} = \rho_{10} (U_2 - U_1) D_{21} \quad (6)$$

$$P_{32} = \rho_{21} (U_3 - U_2) D_{32} \quad (7)$$

$$\left(\rho_{10} \approx \rho_{00}, \rho_{21} \approx \rho_{00} \frac{D_{21}}{D_{21} - (U_2 - U_1)} \right)$$



Фиг. 2

ругого давления $P_{10} = 15$ кбар не происходит. Давление фазового перехода $P_2 = 145$ кбар (в работе [7] $P_2 = 147$ кбар) до толщины $x_1/h = 1.35$ так же не меняется.

где ρ_{00} , ρ_{10} и ρ_{21} — плотность невозмущенного материала, плотность за упругой волной и плотность за первой ударной волной.

Как показали экспериментальные измерения и проведенные на их основе расчеты, максимальное давление ударного сжатия стальных образцов в исследованном диапазоне толщин $0.4 \leq x_1/h \leq 1.98$ монотонно падает с увеличением толщины пластины. Обнаружено, что до $x_1/h \approx 1.35$ профиль давления в стальном образце имеет трехступенчатый характер. В исследованном диапазоне постановка эксперимента позволяет сохранить условия одномерности, поэтому существенного изменения уп-

Поступила 14 VI 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А. Г., Новиков С. А. Метод емкостного датчика для регистрации мгновенной скорости движущейся поверхности. Приборы и техника эксперимента, 1963, № 1, стр. 135.
2. Vancroft D., Peterson E. L., Minchall S. Polymorphism of iron at high pressure. J. Appl. Phys., 1956, vol. 27, No. 3, p. 291.
3. Hughes D. S., Gourley L. E., Gourley M. F. Shock — wave compression of iron and bismuth. J. Appl. Phys., 1961, vol. 32, No. 4, p. 624.
4. Taylor J. W., Rice M. H. Elastic — plastic properties of iron. J. Appl. Phys., 1963, vol. 34, No. 2, p. 364.
5. Иванов А. Г., Новиков С. А., Синицын В. А. Исследование упруго-пластических волн в железе и стали при взрывном нагружении. Физика твердого тела, 1963, т. 5, вып. 1, стр. 269.
6. Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г. Исследование структуры ударных волн сжатия в железе и стали. ЖЭТФ, 1964, т. 47, вып. 3, стр. 814.
7. Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г. О фазовом переходе в железе при ударном сжатии. Физика металлов и металловедение, 1966, т. 21, вып. 2, стр. 252.
8. Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г. Исследование разрушения стали, алюминия и меди при взрывном нагружении. Физика металлов и металловедение, 1966, т. 21, вып. 4, стр. 608.
9. Reuge C., Pujol J., Thouvenin J. Experimental method for analysis of the structure of a shock wave in a solid. Proc. 4-th Sympos. (Internat.) detonat. White Oak, Md, 1965, Washington, 1967.
10. Альтшулер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений. Усп. физ. н., 1965, т. 85, № 2, стр. 197.