

$$\frac{\partial}{\partial x} \varepsilon E(x, t) = 4\pi\rho, \quad \int_0^L E(x, t) dx = -U(t)$$

$$\sigma(x) = \sigma_0 \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{l^2}\right) + \exp\left[-\frac{(x-L)^2}{l^2}\right] \right\}$$

где ε — диэлектрическая проницаемость жидкости, σ — ее проводимость, а ρ — плотность заряда. Проводимость считается не зависящей от времени (поскольку время пробоя много меньше времени диффузии). Можно показать, что при $L \gg l$ плотность тока через обкладки $j \equiv \sigma_0 E(0, t)$ определяется формулой

$$j = -\frac{U_0 \sigma_0}{L} \left[e^{-\gamma t} + \frac{2l}{L} \int_0^{\infty} d\xi \frac{\exp(-\gamma t e^{-\xi^2}) - \exp(-\gamma t)}{\exp \xi^2 - 1} \right]$$

где $\gamma = 4\pi\sigma_0/\varepsilon$. При $\gamma t \gg 1$

$$j \approx -\frac{\sigma_0 U_0}{L} \frac{l}{L} \frac{1}{\gamma t \sqrt{\ln \gamma t}}$$

Происхождение этой медленно (неэкспоненциально) убывающей части тока обусловлено постепенным перемещением слоя, где сосредоточен пространственный заряд, в глубь жидкости. За время $t \gg \gamma^{-1}$ слой смещается на расстояние $\sim l \sqrt{\ln \gamma t}$ от поверхности электрода.

Помимо задач, связанных с исследованием электрической прочности жидкостей, применение диффузионных электродов может оказаться полезным в высоковольтных накопителях энергии с жидким диэлектриком.

Автор благодарит Г. И. Будкера и А. Г. Пономаренко за обсуждение результатов.

Поступила 4 II 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Алхимов А. П., Воробьев В. В., Клишкин В. Ф., Пономаренко А. Г., Солоухин Р. И. О развитии электрического разряда в воде. Докл. АН СССР, 1970, т. 194, № 5.

УДК 539.3

УДАРНОЕ СЖАТИЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА ДО ДАВЛЕНИЙ ~ 1.7 МБАР

Н. Г. Калашников, Л. В. Кулешова, М. Н. Павловский

(Москва)

Изложены результаты экспериментального изучения однократной и двукратной ударной сжимаемости политетрафторэтилена (фторопласт — 4) и измерений скорости звука за фронтом волн нагружения.

Однократная ударная сжимаемость фторопласта-4 исследовалась методом отражения [1]. Измерения скорости распространения ударного фронта в образцах производились электроконтактным способом [2]. При расчете параметра сжатия за фронтом ударных волн изэнтропы расширения экранов отождествлялись с зеркальными отражениями ударных адиабат [2]. Использованные при этом динамические адиабаты меди, железа и алюминия взяты из [3,4]. Плотность исследовавшихся образцов фторопласта-4 составляла $\rho_0 = 2.19$ г/см³. Полученные результаты эксперимента, характеризующие однократную ударную сжимаемость фторопласта-4, приведены в табл. 1, где даны по порядку материал экрана и величина массовой скорости в нем \bar{U}_* , значения волновой D и массовой U скоростей в фторопласте, давление ударного сжатия P и относительное сжатие $\sigma = \rho / \rho_0$. На фиг. 1 (кривая 1) данные табл. 1 сопоставлены с результатами аналогичных исследований других авторов [5] (кривым 2, 3, 4 соответствуют значения

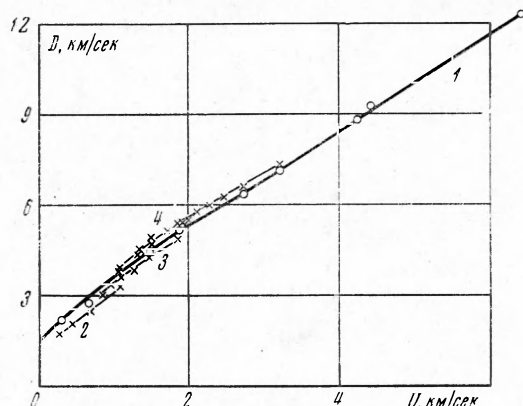
Таблица 1

Материал экрана,	U_* , км/сек	D , км/сек	U , км/сек	P , кбар	σ
Медь	0.17	2.15	0.30	14	1.162
Медь	0.34	2.70	0.64	38	1.310
Алюминий	1.14	4.46	1.45	142	1.482
Алюминий	1.50	5.16	1.86	210	1.564
Медь	1.76	6.36	2.70	376	1.738
Алюминий	2.70	7.12	3.18	496	1.807
Алюминий	3.70	8.81	4.25	819	1.932
Железо	3.08	9.28	4.42	898	1.910
Железо	4.55	12.35	6.45	1744	2.093

$\rho_0 = 2.16, 2.179, 2.24 \text{ г/см}^3$). Начиная с $U = 1 \text{ км/сек}$, зависимость $D(U)$ практически линейна и может быть описана соотношением

$$D = 2.18 + 1.58 U$$

При $U \leq 1 \text{ км/сек}$ ход кривой $D(U)$ таков (см. фиг. 1), что $D_0 = 1.5 \text{ км/сек}$. Это значение точно соответствует величине упругой скорости звука, измеренной в [6]. Следует отметить также характерную для органических соединений кривизну зависимости



Фиг. 1

$D(U)$ фторопласта-4, соответствующую, по-видимому, увеличению теплоемкости вещества при росте температуры. Отсутствие заметных изломов на кривой ударной сжимаемости позволяет сделать вывод, что в исследованном веществе не происходит фазовых превращений.

Ударная адиабата фторопласта описана с помощью уравнения состояния с предельной плотностью

$$P = \frac{\rho_0 C_0^2}{n(h-\sigma)} \left[\left(h - \frac{n+1}{n-1} \right) \sigma^n + \frac{2n}{n-1} \sigma - (h+1) \right]$$

со следующими параметрами: начальная плотность вещества $\rho_0 = 2.19 \text{ г/см}^3$, начальная скорость звука $C_0 = 1.81 \text{ км/сек}$, показатель политропы $n = 6$, предельная степень сжатия $h = 3.4$. Расчетная кривая $P(\sigma)$ с экспериментальными точками нанесена пунктиром на фиг. 2.

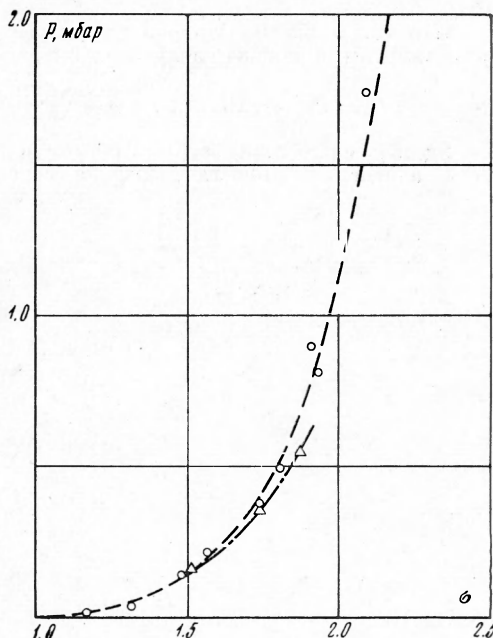
С помощью магнитоэлектрического метода определения массовых скоростей [7] исследовано также двукратное ударное сжатие фторопласта. В первой серии опытов двукратная сжимаемость измерялась при лобовом столкновении плоских ударных волн способом, подробно изложенным в [8]. Схема выполнения этих опытов представлена на фиг. 3, а (1 — заряд ВВ, 2 — экран из парафина толщиной 10 мм, 3 — фторопласт, 4 — рамка магнитоэлектрического датчика из алюминиевой фольги толщиной 0.1 мм с выводами к осциллографу. Толщина слоя фторопласта L_0 , заключенного между переключателями рамки датчика составляла 15 мм. Одна из полученных осциллограмм приведена на фиг. 4, а, где частота масштаба 5 Мгц. Как было показано в [8], небольшая ступ-

пенька на середине фронта первого выброса характеризует величину неодновременности подхода к рамке ударных волн с противоположных сторон. Уступ на середине заднего фронта соответствует неодновременности прихода к рамке отраженных волн сжатия. Амплитуда импульса на осциллограмме соответствует удвоенной величине массовой скорости передвижения перекладины рамки $2 U_1$.

Результаты эксперимента приведены в первой строке табл. 2, в которой даны материал экрана и U_* , параметры сжатия образцов первой ударной волной, параметры сжатия образцов второй (отраженной) ударной волной (D_{12} — скорость распространения отраженной волны относительно движущегося материала, P_2 — давление за фронтом отраженной волны $\sigma_2 = \rho_2 / \rho_0$ — величина относительного сжатия).

Видоизмененный вариант этого метода был использован также в случае, когда двукратное сжатие образцов фторопласта толщиной 4—5 мм осуществлялось (см. фиг. 3, б) с помощью ударной волны, отражавшейся от расположенного за образцом фторопласта 3 экрана 5, в данном случае медного, обладавшего большей динамической жесткостью по сравнению с фторопластом. Одна из осциллограмм этой серии опытов представлена на фиг. 4, б. Первый выброс левого импульса осциллограммы соответствует моменту прихода ударной волны на нагружения к первой перекладине рамки датчика 4. Амплитуда левого импульса пропорциональна массовой скорости в волне нагружения U_1 . Столообразная часть импульса соответствует времени t_1 движения ударной волны со скоростью D_1 по образцу до второй перекладины рамки, так что $D_1 = L_0 / t_1$.

В этот момент происходит сброс луча на осциллограмме вниз к нулевой линии. Первый выброс правого импульса осциллограммы соответствует приходу к рамке отраженной волны от медного экрана. В течение интервала времени t_2 отраженная волна движется со скоростью D_{12} по образцу, предварительно уже сжатому первой волной нагружения — $D_{12} = L_0 / \sigma_1 t_2$. Амплитуда правого импульса пропорциональна изменению массовой скорости ΔU во фронте отраженной ударной волны. Таким образом, первый импульс соответствует сжатию образца фторопласта первой волной нагружения, а второй импульс — сжатию его второй ударной волной, отраженной от медного экрана. Результаты экспериментов приведены во второй строке табл. 2. Использование описанной ме-



Фиг. 2

Таблица 2

Материал экрана	U_* , км/сек	Параметры сжатия фторопласта первой ударной волной				Параметры сжатия фторопласта отраженной ударной волной			
		D_1 , км/сек	U_1 , км/сек	P_1 , кбар	$\sigma_1 = \rho_1 / \rho_0$	D_{12} , км/сек	ΔU , км/сек	P_2 , кбар	$\sigma_2 = \rho_2 / \rho_0$
Парафин	2.03	4.55	1.52	151	1.503	7.86	1.52	545	1.866
						6.80	0.89	349	1.732

тодика позволяет получить экспериментальные точки, характеризующие двукратную сжимаемость исследуемого материала в промежуточной области давлений, заключенной между давлением, реализующимся при однократном сжатии, и давлением, достигнутым при лобовом столкновении ударных волн. Определение параметров сжатия образцов первой ударной волной в этих двух сериях опытов производилось исходя из экспериментально измеренной в специально выполненных опытах волновой скорости D_1 , а также известного соотношения $D(U)$ для фторопласта (см. фиг. 1)

$$P_1 = \rho_0 U_1 D_1, \quad \sigma_1 = D_1 (D_1 - U_1)^{-1}$$

Для случая лобового столкновения ударных волн параметры сжатия фторопласта второй ударной волной определялись согласно [8]

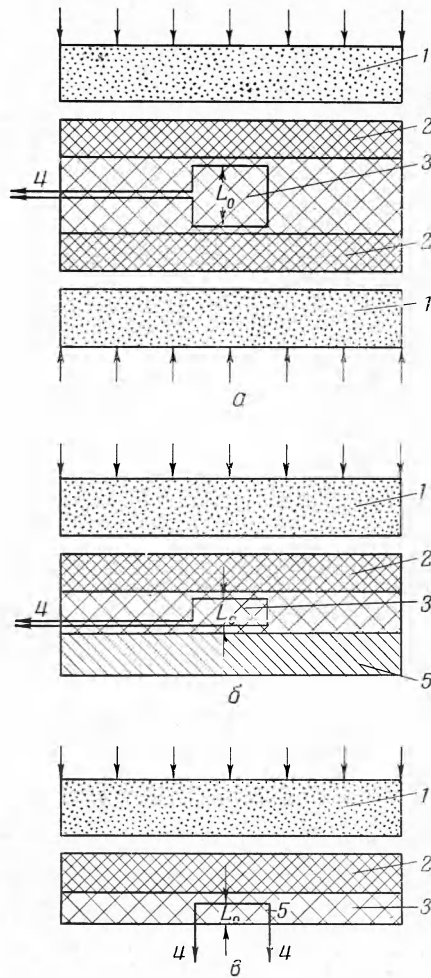
$$P_2 = P_1 + \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_2 - \rho_1} U_1^2, \quad D_{12} = \frac{\rho_2}{\rho_2 - \rho_1} U_1$$

Параметры сжатия фторопласта ударной волной, отраженной от медного экрана, вычислялись с помощью следующих выражений:

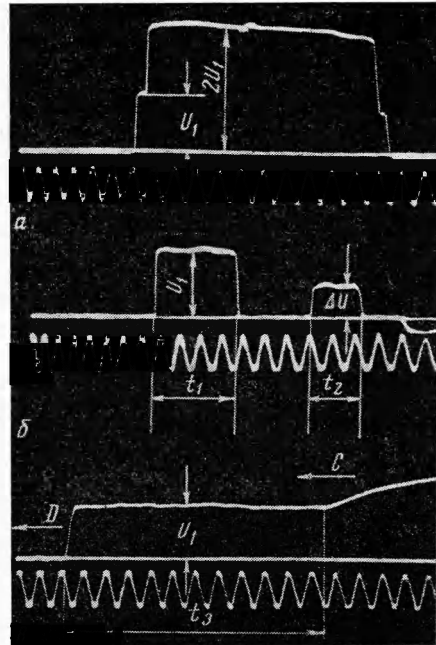
$$P_2 = P_1 + \rho_1 \Delta U D_{12}, \quad D_{12} = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_2 - \rho_1} \Delta U, \quad \sigma_2 = \frac{L_0}{L_0 - U_1 t_1 - \Delta U t_2}$$

Здесь ρ_1 и ρ_2 — плотности за фронтом первой и второй волн сжатия соответственно, ΔU — изменение скорости движения перекладины магнитоэлектрического датчика за счет прихода к ней отраженной ударной волны от медного экрана, L_0 — начальная толщина образца, t_1 и t_2 — времена прохождения по образцу первой и отраженной волн нагружения соответственно (см. фиг. 1, б).

На фиг. 2 данные табл. 2 сопоставлены с ударной адиабатой однократного сжатия. Исследования ударной сжимаемости фторопласта дополнены наблюдением волн разрежения, осуществленным с помощью методики, подробно описанной в [9,10]. Схема



Фиг. 3



Фиг. 4

проведения этих опытов изображена на фиг. 3, а (1 — заряд ВВ, 2 — экран из парафина, 3 — образец фторопласта, 4 — П-образный датчик из алюминиевой фольги с выводами к осциллографу, глубина его заложения в образец $L_0 \sim 5$ мм); одна из полученных осциллограмм приведена на фиг. 4, а (D — ударная волна сжатия, C — центрированная волна разрежения). Определенные таким образом максимальные скорости волн нагружки

$$C = U_1 + \frac{L_0 - U_1 t_3}{t_3 - L_0 / D}$$

Таблица 3

Материал экрана	U_* , км/сек	Параметры волны нагружения				C , км/сек
		D_1 , км/сек	U_1 , км/сек	P_1 , кбар	σ	
Парафин	1.41	3.99	1.21	106	1.460	5.3
	2.03	4.55	1.52	151	1.503	5.8

даны в табл. 3 вместе с параметрами волн нагружения фторопласта. Эти скорости волн разрежения соответствуют наклону изэнтроп расширения

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_S = C^2$$

который практически совпал с наклоном ударной адиабаты однократного нагружения.

Поступила 23 VIII 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., Физматгиз, 1963.
2. Альтшулер Л. В., Павловский М. Н., Кулешова Л. В., Симмаков Г. В. Исследование галогенидов щелочных металлов при высоких давлениях и температурах ударного сжатия. Физика твердого тела, 1963, т. 5, вып. 1.
3. Альтшулер Л. В., Кормер С. Б., Баканова А. А., Трунин Р. Ф. Уравнения состояния алюминия, меди и свинца для области высоких давлений. ЖЭТФ, 1960, т. 38, вып. 3.
4. Альтшулер Л. В., Баканова А. А., Трунин Р. Ф. Ударные адиабаты и нулевые изотермы семи металлов при высоких давлениях. ЖЭТФ, 1962, т. 42, вып. 1.
5. Netherwood P. H., Wagner M. H., Waldorf W. F., Loute N. A., Morgan D. T., Rockowitz M., Atkinson A. L. Compendium Shock Wave Data, Univ. California, 1966.
6. Дзенис В. В., Липовский В. Я. Исследование влияния геометрических размеров образцов на скорость распространения и декремент затухания продольных колебаний в фторопластах. Механика полимеров, 1966, т. 4.
7. Альтшулер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений. Усп. физ. н., 1965, т. 85, вып. 2.
8. Альтшулер Л. В., Павловский М. Н. Магнитоэлектрический метод определения плотности за фронтом сталкивающихся ударных волн. ПМТФ, 1971, № 2.
9. Альтшулер Л. В., Павловский М. Н. Исследования глины и глинистого сланца при сильных динамических воздействиях. ПМТФ, 1971, № 1.
10. Альтшулер Л. В., Павловский М. Н., Дракин В. П. Особенности фазовых превращений в ударных волнах сжатия и разгрузки. ЖЭТФ, 1967, т. 52, вып. 2.

Технический редактор Э. Ф. Бунова

Сдано в набор 2/VI-1972 г. Т-14078 Подписано к печати 11/VIII-1972 г. Тираж 2055 экз.
Зак. 736 Формат бумаги 70×108¹/₁₆ Усл. печ. л. 16,8 Бум. л. 6 Уч.-изд. л. 16,6

2-я типография издательства «Наука». Москва, Шубинский пер., 10