

7. Воробьев А. А., Дремни А. Н., Канель Г. И. Зависимость коэффициентов упругости алюминия от степени сжатия в ударной волне.— ПМТФ, 1974, № 5, с. 94.
8. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Стаюкович К. И., Чельшев В. П., Шехтер Б. И.— В кн.: Физика взрыва. М., «Наука», 1975.
9. Arens T. J., Duvall G. E. Stress relaxation behind elastic shock waves in rocks.— «J. Geophys. Res.», 1966, vol. 71, N 18, p. 4349.
10. Nunziato J. W. One-dimensional shock waves in a chemically reacting mixture of elastic materials.— «J. Chem. Phys.», 1973, vol. 58, N 3, p. 961.

УДК 537.311 : 539.58 : 534.614

ДИНАМИЧЕСКАЯ СЖИМАЕМОСТЬ, ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ И СКОРОСТЬ ЗВУКА ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В КАПРОЛОНЕ

Л. В. Кулешова, М. Н. Паеловский

(Москва)

В данной работе изложены результаты экспериментального изучения свойств ударно-сжатого капролона в диапазоне давлений до 570 кбар. Начальная плотность образцов составляла $1,14 \text{ г/см}^3$, начальное удельное сопротивление $2,0 \cdot 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Исследование динамической сжимаемости капролона выполнялось методом отражения при помощи электроконтактной техники измерения [1] скорости ударной волны в образцах. Результаты эксперимента, характеризующие ударную сжимаемость капролона, приведены в табл. 1, где $u_{\text{экр}}$ — массовая скорость в экране, D и u — волновая и массовая скорости в капролоне, p — давление на фронте ударной волны, $\delta = V_0/V$ — относительное сжатие. Начиная с $u \approx 1,5 \text{ км/с}$ зависимость $D(u)$ для капролона практически линейна и может быть описана соотношением

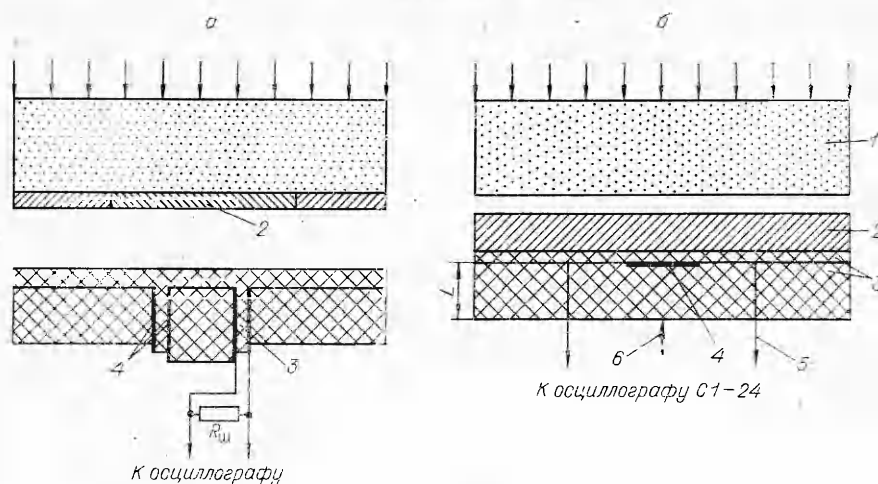
$$D = 3,30 + 1,32u.$$

При $u < 1,5 \text{ км/с}$ в $D - u$ -зависимости наблюдается кривизна подобно тому, как это наблюдалось ранее у фторопласта-4 [2].

Измерения электропроводности ударно-сжатого капролона проводились при помощи методики, подробно описанной в [3], позволяющей следить за развитием процессов, происходящих в веществе после прохождения по нему фронта ударной волны. Конструкция измерительного узла,

Т а б л и ц а 1

Материал экрана	$u_{\text{экр}}$, км/с	D , км/с	u , км/с	p , кбар	$\delta = V_0/V$	c , км/с
Медь	0,34	3,50	0,62	24,5	1,215	
Алюминий	1,14	5,56	1,65	105	1,422	$6,24 \pm 0,05$
»	1,50	6,04	2,14	149	1,549	$7,29 \pm 0,07$
»	2,70	8,21	3,71	348	1,824	
Железо	2,82	9,94	5,02	569	2,018	



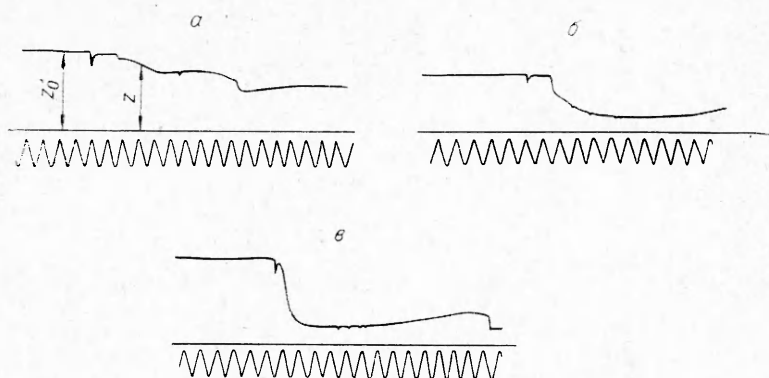
Фиг. 1

использовавшегося при изучении электропроводности капролона, схематически изображена на фиг. 1, а. Нагружение исследуемого образца 3 производилось ударом металлической пластины 2, разогнанной продуктами взрыва цилиндрического заряда ВВ 1 до скоростей в несколько километров в секунду. Легкость обработки капролона позволила изготовить конструкцию измерительного узла, не имеющую воздушных зазоров и свободную от влияния боковой разгрузки. Kontakтами служили два коаксиально-расположенных медных цилиндра 4. Благодаря расположению цилиндрических поверхностей медных контактов перпендикулярно фронту ударной волны, регистрация напряжения на контактах продолжается в течение всего времени движения ударной волны вдоль контактов. Для подачи импульса напряжения на контакты за несколько микросекунд до прихода к ним ударной волны нагружения использовался разряд конденсатора большой емкости на сопротивление $R_{ш}$, шунтирующее образец. Запись падения напряжения на $R_{ш}$, происходящего в результате резкого уменьшения сопротивления образца при прохождении по нему ударной волны, позволяла определить величину удельного сопротивления ударно-сжатого капролона ρ в момент времени t по формуле

$$\rho = \frac{2\pi}{\ln \frac{\Phi_1}{\Phi_2}} \cdot \frac{D}{\delta} \cdot \frac{R_{ш}}{z_0} \cdot \frac{z_x^2}{\left(\frac{dz_x}{dt}\right)_t},$$

где Φ_1 и Φ_2 — наружный и внутренний диаметры образца; $R_{ш}$ — величина шунтирующего сопротивления; z_0 — величина начального отклонения луча на осциллограмме (фиг. 2, а); z_x — это же расстояние в некоторый момент времени t ; $\left(\frac{dz_x}{dt}\right)_t$ — наклон траектории луча в этот же момент.

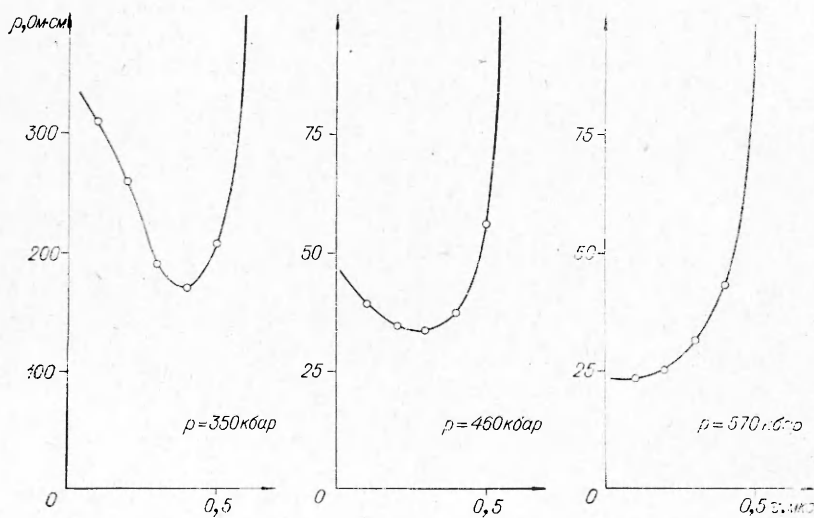
Типичные осциллограммы, полученные при измерениях электропроводности капролона при давлениях 350; 460 и 570 кбар, приведены на фиг. 2, а — в соответственно. Частота масштабной синусоиды на осциллограммах 5 МГц. Интересно отметить непостоянство удельного сопротивления за фронтом ударной волны. Форма распределения $\rho(x)$ зависит от давления: чем ниже давление, тем острее минимум $\rho(x)$ и тем дальше от фронта ударной волны он отстоит (фиг. 3). Продолжительность импульса проводимости ограничена временем $\sim 0,5$ — $0,6$ мкс. Весьма вероятно, что



Ф и г. 2

эти явления связаны с процессами плавления и диссоциации, происходящими в полимерах за фронтами ударных волн.

Диссоциация органических соединений приводит к значительному росту теплоемкости с ростом температуры. Экспериментально это явление наблюдалось в работе [4] при атмосферном давлении. В [5] проведены прямые измерения температуры в плексигласе (полиметилметакрилате) за фронтом ударной волны, здесь же показано, что температуры, реализуемые в плексигласе до давлений ~ 1 Мбар, существенно ниже тех, которые можно было бы вычислить, исходя из постоянной начальной теплоемкости. В предположении о полной диссоциации вещества на независимые атомы получается заниженное значение температур. Очевидно, что и капролон имеет аналогичную зависимость теплоемкости от температуры. Сходство таких характеристик капролона и плексигласа, как плотности и начальные теплоемкости, а также тождественность $D-u$ -соотношений позволяют предполагать равные нагревы при одинаковых амплитудах ударных волн. Поэтому для сопоставления данных по проводимости капролона с соответствующими температурами была использована экспериментальная зависимость $T(p)$ для плексигласа из [5] (табл. 2, где p —



Ф и г. 3

давление, T — температура, σ_0 — начальное значение электропроводности за фронтом ударных волн). В координатах $\lg \sigma T(T^{-1})$ данные табл. 2 располагаются на отрезке прямой линии с наклоном, соответствующим энергии активации 1,2 эВ.

Исследования динамической сжимаемости и электропроводности были дополнены измерениями скорости распространения волны разрежения по ударно-сжатому капролону. Редакция выполнения опытов схематически изображена на фиг. 1, б (1 — заряд ВВ, 2 — алюминиевый экран толщиной 10 мм, 3 — исследуемый образец из капролона, 4 — манганиновый датчик давления, представляющий собой синусоиду из манганиновой фольги толщиной 0,05 мм и вклеивающийся при помощи эпоксидной смолы между поверхностями раздела исследуемого образца). Начальное сопротивление R_0 манганинового датчика составляло ~ 2 Ом, суммарное сопротивление медных выводов $R_B = 0,02$ Ом. Для подачи импульса напряжения на манганиновый датчик за несколько микросекунд до прихода к нему ударной волны использовалась та же электросхема, которая применялась при изучении электропроводности. Изменение напряжения на выводах датчика, происходящее в результате изменения электросопротивления датчика при его ударном нагружении и в волне разрежения, фиксировалось при помощи осциллографа. Регистрируемый сигнал подавался без предварительного усиления непосредственно на отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки. Электроконтактный датчик б, расположенный на свободной поверхности исследуемого образца капролона, служил для получения на осциллограмме отметки, соответствующей моменту выхода ударной волны на свободную поверхность образца. Одна из полученных осциллограмм представлена на фиг. 4 (частота масштабной синусоиды 5 МГц).

Максимальная скорость распространения волны разрежения по ударно-сжатому капролону вычислялась по формуле

$$c = u + \frac{L - u(t_1 + t_2)}{t_1 + t_2 - L/D} = \frac{L}{\delta t_2},$$

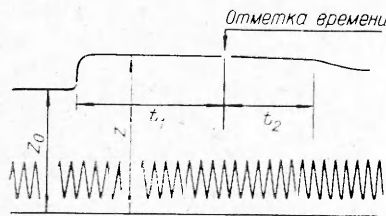
где $L = 15$ мм — начальная толщина исследуемого образца (см. фиг. 1, б);

t_1 — интервал времени от момента прихода ударной волны к манганиновому датчику и до момента замыкания электроконтакта; t_2 — временной интервал от момента замыкания упомянутого электроконтакта до момента прихода к манганиновому датчику волны разрежения. Определенные таким образом скорости распространения волн разрежения в капролоне c приведены в табл. 1.

Регистрация временного интервала t_1 позволяет определить величину волновой скорости в образце $D = L/t_1$, а отношение амплитуд отклонений луча на осциллограмме z/z_0 — сопротивление ударно-сжатого манганина $R = (R_0 + \frac{1}{2}R_B) \frac{z}{z_0} - R_B$ и с использованием зависимости электросопротивления манганина от давления из [6] — величину давления, реализующегося в исследуемом образце. Если из приведенных в табл. 1 данных рас-

Т а б л и ц а 2

p , кбар	T , К	σ_0 , Ом $^{-1}$.см $^{-1}$
350	2000	$(3,0 \pm 0,7)10^{-3}$
460	2400	$(2,1 \pm 0,2)10^{-2}$
570	2750	$(4,4 \pm 0,6)10^{-2}$



Ф и г. 4

считать «тангенс угла боковой разгрузки» $\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\left(\frac{c}{D}\right)^2 - \left(\frac{D-u}{D}\right)^2}$ [7],

то полученная величина составит 0,9—1,0, что значительно превышает известные значения (0,7) для ряда металлов [7] и NaCl [8] и в то же время хорошо согласуется с аналогичными величинами, полученными для парафина, полиэтилена, плексигласа и фторопласта-4 [8]. По-видимому, столь высокие скорости распространения волн разрежения и соответственно этому высокие значения $\operatorname{tg} \alpha$ являются характерными для полимерных материалов.

Поступила 5 X 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., Физматгиз, 1963.
2. Калашников Н. Г., Кулешова Л. В., Павловский М. Н. Ударное сжатие политетрафторэтилена до давлений $\sim 1,7$ Мбар. — ПМТФ, 1972, № 4, с. 187.
3. Кулешова Л. В. Электропроводность нитрида бора, хлористого калия и фторопласта-4 за фронтом ударных волн. — ФТТ, 1969, т. 11, вып. 5, с. 1085.
4. Маслов Н. Г. Зависимость теплоемкости алкилциклоалканов от температуры и длины линейной углеродной цепочки. — «Докл. АН СССР», 1952, т. 86, с. 767.
5. Зельдович Я. Б., Кормер С. Б., Синицын М. В., Курянин А. И. Температура и теплоемкость плексигласа, сжатого ударной волной. — «Докл. АН СССР», 1958, т. 122, с. 48.
6. Симаков Г. В., Павловский М. Н., Калашников Н. Г., Трунин Р. Ф. Ударная сжимаемость двенадцати минералов. — «Изв. АН СССР. Физика Земли», 1974, № 8, с. 11.
7. Альтшулер Л. В., Кормер С. Б., Бражник М. И., Владимиров Л. А., Сперанская М. И., Фунтиков А. И. Изэнтропическая сжимаемость алюминия, меди, свинца и железа при высоких давлениях. — ЖЭТФ, 1960, т. 38, вып. 4, с. 1061.
8. Павловский М. Н. Измерения скорости звука в ударно-сжатых кварците, доломите, ангидриде, хлористом натрии, парафине, плексигласе, полиэтилене и фторопласте-4. — ПМТФ, 1976, № 5, с. 136.

УДК 624.131+532.529

ПЛОСКИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ВОЛНЫ В СРЕДАХ С ОБЪЕМНОЙ ВЯЗКОСТЬЮ

Г. М. Ляхов, В. Н. Охитин

(Москва)

Распространение плоских волн в средах с объемной вязкостью при линейных диаграммах динамического и статического сжатия рассматривалось в работах [1—3]. При большом перепаде давления следует учитывать нелинейность этих диаграмм, а в случае сферических волн в твердых средах — условие пластичности. Для грунтов и горных пород предложено условие пластичности Мизеса—Шлейхера [4]. В многокомпонентных средах (водонасыщенные грунты, вода с пузырьками газа и др.) сферические взрывные волны рассчитывались без учета вязкости при нелинейной диаграмме сжатия [5], а плоские волны — с учетом вязкости, но для случая ударной стационарной нагрузки [6].

Ниже методом характеристик получено решение задачи о распространении плоской волны, создаваемой ударной нестационарной нагрузкой в среде с объемной вязкостью при нелинейных диаграммах динамического (ударного) и статического (соответствующего равновесному состоянию) сжатия. Для счета на ЭВМ