

СКОРОСТЬ ЗВУКА В УДАРНО-СЖАТОМ ФТОРОПЛАСТЕ-4 В ДИАПАЗОНЕ НАПРЯЖЕНИЙ 1,5–45 ГПа

А. Ю. Николаев, В. Г. Вильданов, А. О. Борщевский, О. В. Ткачев,
В. Т. Заикин, В. М. Слободенюков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

Политетрафторэтилен ПТФЭ (фторопласт-4, Ф-4) является одним из широко используемых в практике полимером. Он обладает уникальными физико-химическими свойствами, включая высокие диэлектрические свойства, хорошую механическую обрабатываемость, а также химическую стойкость и устойчивость к высокой температуре.

Экспериментальные данные по измерению скорости звука в ударно-сжатом фторопласте немногочисленны: в работах [1] и [2] получено по две точки при напряжениях 11–21 ГПа. Каких-либо обобщенных зависимостей для скорости звука в указанных работах не приводится, в работе [3] получено семь точек для скорости звука в диапазоне 17–63 ГПа.

Целью данной работы является измерение продольной скорости звука в ударно-сжатом Ф-4 манганиновыми датчиками (МД) в диапазоне 1,5–45 ГПа.

Измерение скорости звука проведено двумя методами: методом догоняющей разгрузки, в котором волна разрежения приходит к МД от тыльной стороны ударника, и методом встречной разгрузки, в котором волна разрежения приходит к МД от свободной поверхности образца. Для регистрации профилей волн сжатия-разрежения $\sigma_{xx}(t)$ в образцах Ф-4 применялась манганиновая методика [4], при этом манганиновые датчики (в опытах использовалось от одного до четырех датчиков) помещались между образцами из Ф-4 ($\rho_0 = 2,17\text{--}2,18 \text{ г/см}^3$).

Для создания ударных волн в образцах применялись нагружающие устройства (НУ) метательного типа, в которых диски-ударники разгонялись продуктами взрыва мощного ВВ. В разных НУ скорости ударников составляли 0,855–4,98 км/с. Толщины ударников (нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, АМц) варьировались в диапазоне 2–8 мм, а диаметр – 42–125 мм. Также применялась пороховая метательная установка, где нагружение образцов из Ф-4 происходило ударниками из АМЦ толщиной 10 мм, диаметром 63 мм, имеющими скорости 0,385 и 0,827 км/с.

Продольная скорость звука определялась с использованием априорно известных параметров ударного сжатия и полученного в опыте интервала времени между выходом к МД ударной волны и головной характеристики волны разгрузки, который определялся из волнового профиля напряжения $\sigma_{xx}(t)$. Типичная регистрограмма $U(t)$ приведена на рис. 1.

На рис. 2 приведен результат ее пересчета в профиль напряжения $\sigma_{xx}(t)$ по формуле, взятой из работы [5].

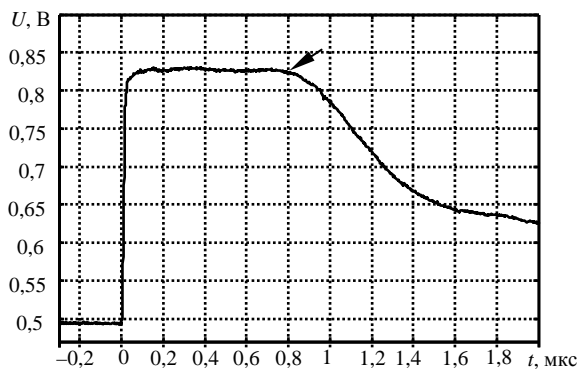


Рис. 1. Первичная регистрограмма

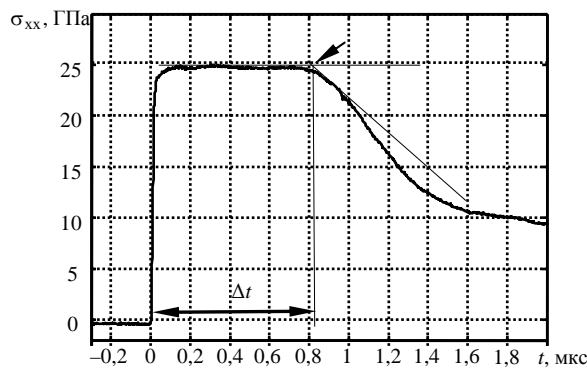


Рис. 2. Профиль продольного напряжения

Стрелкой указан момент прихода упругой волны разгрузки к манганиновому датчику, соответствующий интервал времени Δt (от фронта до этого момента).

Для определения параметров ударного сжатия фторопласта использовалось D - u соотношение, которое было получено авторами в результате анализа всей совокупности экспериментальных данных работ [1, 2, 6, 7]:

$$D = 1,456 + 2,201u - 0,1787u^2 + 0,0184u^3, \\ 0,2 < u < 4,4 \text{ км/с}$$

и D - u соотношения 12X18H10T и АМц

$$D = 4,56 + 1,501u \quad (\rho_0 = 7,89 \text{ г/см}^3) \quad [8],$$

$$D = 5,231 + 1,485u - 0,0244 \quad (\rho_0 = 2,735 \text{ г/см}^3) \quad [9].$$

Данные, которые были получены после обработки экспериментов, приведены в таблице.

Постановка опытов и параметры ударного сжатия фторопласта-4

Скорость полета ударника, W , км/с	Материал ударника	Параметры ударной волны в Ф-4			Скорость звука в Ф-4, C_l , км/с
		σ_{xx} , ГПа	u , км/с	D , км/с	
0,385	АМц	1,34	0,294	2,088	3,49
0,827	АМц	3,52	0,596	2,708	3,96
0,827	АМц	3,52	0,596	2,708	4,07
0,827	АМц	3,52	0,596	2,708	4,23
0,827	АМц	3,52	0,596	2,708	3,91
0,855	12X18H10T	4,72	0,729	2,973	4,21
1,29	12X18H10T	8,47	1,070	3,629	4,80
1,64	12X18H10T	12,01	1,336	4,122	5,11
1,90	12X18H10T	14,92	1,530	4,472	5,88
2,20	12X18H10T	18,55	1,751	4,861	6,12
2,68	12X18H10T	24,96	2,098	5,457	6,97
2,68	12X18H10T	24,96	2,098	5,457	7,21
4,02	АМц	32,26	2,448	6,043	7,29
3,20	12X18H10T	32,69	2,468	6,076	6,86
4,47	АМц	37,86	2,694	6,448	7,44
3,62	12X18H10T	39,52	2,763	6,561	7,39
3,85	12X18H10T	43,49	2,924	6,824	7,54
4,98	АМц	44,65	2,969	6,897	7,69

Экспериментальные данные по скорости звука из таблицы приведены на рис. 3.

Анализируя полученные данные по измерению продольной скорости звука, видим, что данные обоих методов – догоняющей и встречной разгрузки – согласуются в пределах погрешностей измерений.

Экспериментальные точки разделены на два диапазона. В каждом диапазоне зависимость $C_l(u)$ описана линейно

$$-C_l = 2,82 + 1,96u, \text{ при } 0,28 < u < 2,1 \text{ км/с};$$

$$-C_l = 5,65 + 0,64u, \text{ при } 2,1 < u < 3 \text{ км/с}.$$

Погрешность наших измерений продольной скорости звука в ударно-сжатом состоянии $C_l = C_l(u)$ оценивается в 5–8 % (2σ).

Результаты работы хорошо согласуются с экспериментальными результатами ранее опубликованных работ. Небольшое расхождение наблюдается при $u = 2,1$ – $2,2$ км/с (при напряжении ударного сжатия 25 ГПа), где наблюдается излом зависимости $C_l(u)$. Указанный излом, по-видимому, соответствует обнаруженному в [3] фазовому переходу при 34 ГПа, связанному с диссоциацией фторопласта на углерод и газообразные фторуглероды. В образцах, использованных в данной работе, диссоциация Ф-4, вероятно, начинается при более низких напряжениях.

Экстраполяция экспериментальной зависимости $C_l(u)$ к нулю дает существенно большее значение C_l , чем полученное ультразвуковым методом. Такое поведение характерно и для других полимеров, в частности, вискинта.

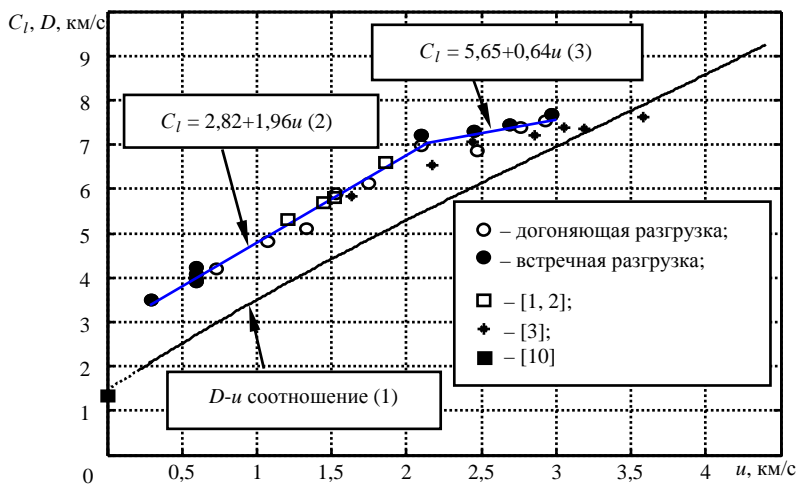


Рис. 3. Ударная адиабата и зависимости продольной скорости звука (2, 3) от массовой скорости в ударно-сжатом фторопласте-4

Литература

1. Калашников Н. Г., Кулешова Л. В., Павловский М. Н. Ударное сжатие политетрафторэтилена до давлений ~1,7 Мбар // ПМТФ. 1972. № 4. С. 187–191.
2. Павловский М. Н. Измерение скорости звука в ударно-сжатом кварците, доломите, ангидриде, хлористом натрии, парафине, плексиглазе, полиэтилене и фторопласте-4 // Там же. 1976. № 5. С. 136–139.
3. Morris C. E., Fritz J. N., McQueen R. G. The Equation of State of Polytetrafluoroethylene to 80 GPa // J. Chem. Phys. 1984. Vol. 80, N 10. P. 5203–5218.
4. Розенберг З. Применение манганиновых датчиков давления для измерения скоростей волн разрежения при высоких давлениях // ПНИ. 1986. № 2. С. 146–149.
5. Карманова Т. И., Лобойко Б. Г., Сапожников А. Т. и др. Градуировка манганиновых датчиков типа РДГ 1018 // Хим. физика. 1998. № 5.
6. Compendium of Shock-Wave Data. M. van Thiel. Lawrence Radiation Laboratory. University of California. Livermore. 1966.
7. LASL. Shock hugoniot data / S. P. Marsh. Berkeley. Los Angeles. London: University of California Press. 1980.
8. Kozlov E. A. Shock adiabat features, phase transition macrokinetics, and spall fracture of iron in different phase states // High Press. Res. 1992. Vol. 10. P. 541–582.
9. Жугин Ю. Н., Крупников К. К., Овечкин Н. А. и др. О некоторых особенностях динамической сжимаемости кварца // Физика Земли. 1994. № 10. С. 16–22.
10. Бражников И. Н. Физические и физико-химические методы контроля состава и свойств вещества // Ультразвуковые методы. М. – Л.: Энергия, 1965.