

13. 10^c. V.G. Plekhanov, Spectroscopic manifestation of the strong nuclear interaction in solids, 5th Intern. Conf. Theor. & Appl. Phys. Vienna, Austria, J. Phys. Chem. & Biophys. 8, 43 (2018).
14. 11. D.I. Iwanenko, The neutron hypothesis, Nature 129, 798 - 798 (1932) .
15. 12. W. Heisenberg, Structure of atomic nuclei, Zs. Physik 77, 1 - 9 (1932) .
16. 13. S. Weinberg, The Discovery of Subatomic Particles (Penguin Books, New York, 1993).
17. 14. E.G. Bakhom, Fundamental disagreement of wave mechanics with relativity, Phys. Essays 15, 87 - 109 (2002).
16. E. Segre, Nuclei and Particles (W.A. Benjamin, Inc. , Reading, MA, 1977).
17. E.M. Henley, A. Garcia, Subatomic Physics (World Scientific Publishing Co., Singapore, 2007).
18. F.E. Close, An Introduction to Quarks and Partons (Academic Press, London, New York, 1979).
19. F.I. Yndurain, The Theory of Quark and Gluon Interactions (Springer, Berlin, 2013).
20. W.N. Cottingham, D.A. Greenwood, An Introduction to the Standard Model of Particle Physics (Cambridge University Press, Cambridge, 2007).
21. Y. Yukawa, On the interaction of elementary particles, Proc. Phys. Math. Soc. Jap. 17 (1935) 48.
22. R.S. Knox, Theory of Excitons (Academic Press, New York - London, 1963).
23. V.G. Plekhanov, Isotopic and disorder effects in large exciton spectroscopy, Phys. - Uspekhi 40 (1997) 553 - 579.
24. O.W. Greenberg, A new level of structure, Phys. Today, 38, 22 - 30 (1985).
25. B. Robson, The Generation model of particle physics, in, Particle Physics, E. Kennedy ed. (In Tech. Open Access Publisher, Rijeka, Croatia, 2012).
26. M. Aghirescu, The Cold Genesis of Matter and Fields (Science Publishing Group, New York, 2015).
27. C.S. Kalman and I. D'Souza, Preons: Models of Leptons, Quarks and Gauge Bosons as Composite Particles (World Scientific, Singapore, 1992).
28. C.S. Kalman, Why quarks cannot be fundamental particles, Nuclear Phys. B: Proceedings Supplements 142, 235 - 237 (2005).
29. O. Consa, The Helicon: A new preon model, Progress in Phys. 14, 215 - 219 (2019).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА ЗА ФРОНТОМ УДАРНЫХ ВОЛН ВО ФТОРОПЛАСТЕ И ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЕ

*Ф.И. Тарасов, Е.Б. Смирнов, А.Ю. Николаев, Р.Н. Канунников,
Д.Т. Юсупов, В.В. Малёв, А.С. Лобачёв, К.С. Сидоров, Д.В. Мухин*

РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

Использование полимерных материалов в качестве конструкционных в некоторых отраслях промышленности требует достоверного знания свойств материалов. Особый интерес представляет область динамических свойств.

Определение скорости звука, в частности, позволяет получать информацию об упруго-пластических свойствах материалов при ударном сжатии. Данные по скорости звука используются

при построении уравнений состояния материалов. Также знание скорости звука важно для корректной постановки взрывных экспериментов и обработки получаемых результатов.

Анализ ударной сжимаемости полимеров показывает, что при ударно-волновом нагружении они претерпевают превращения различного характера, в результате чего их свойства могут отличаться от первоначальных.

В настоящей работе в качестве материалов для исследования выбраны фторопласт и эпоксидная смола. В диапазоне давлений от 20 до 35 ГПа в данных материалах имеются особенности, которые можно связать с фазовыми превращениями [1-8]. Для уточнения границ фазовых превращений проведены взрывные эксперименты по определению скорости звука в ударно-сжатых материалах с использованием фотоэлектрического (ФЭМ) и манганинового методов. Ранее ФЭМ не применялся для определения скорости звука в ударно-сжатых фторопласте и эпоксидной смоле.

Постановка эксперимента с использованием ФЭМ узла и x,t -диаграмма волновых процессов представлены на рисунке 1.

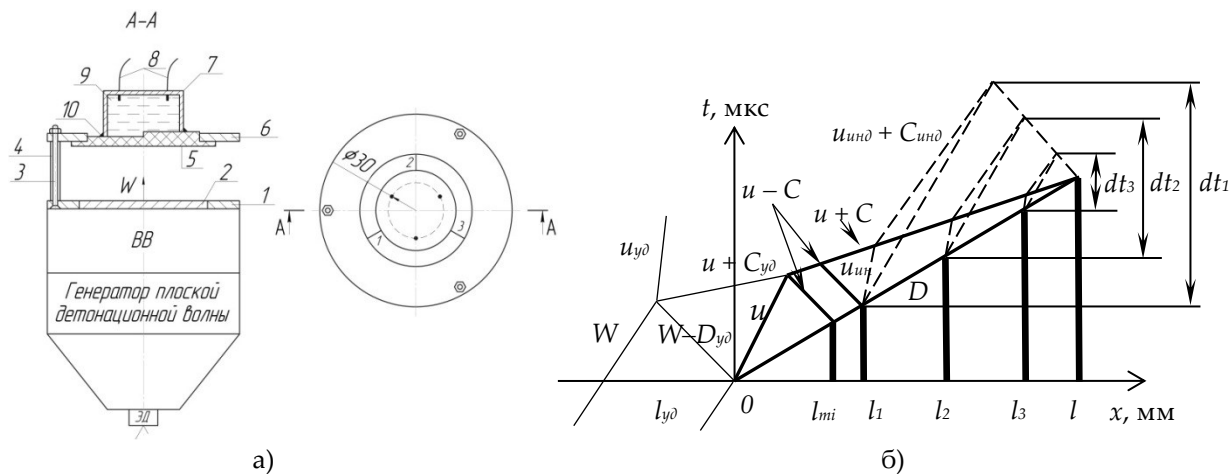


Рисунок 1. а) Экспериментальный узел: 1 – кольцо; 2 – ударник; 3 – винт (3 шт.); 4 – втулка (3 шт.); 5 – ступенчатый образец из полимерного материала, \varnothing 90 мм, ступени \varnothing 70 мм; 6 – кольцо; 7 – корпус; 8 – волоконно-оптические датчики (3 шт.); 9 – индикатор; 10 – клей; б) x,t -диаграмма волновых процессов

Для создания УВ в образцах применялись нагружающие устройства метательного типа на основе мощных конденсированных взрывчатых веществ. Такие устройства состоят из генератора плоской детонационной волны, заряда взрывчатого вещества и пластины-ударника. В экспериментах использовались ударники из нержавеющей стали 12Х18Н10Т или стали 10. Диапазон скоростей полета ударников составлял от 2,7 до 4,8 км/с.

Учитывая оптическую прозрачность исследуемых материалов в ИК-спектре, на каждую ступень образца приклеивалась алюминиевая фольга толщиной 0,01 мм для экранирования датчиков от преждевременной засветки излучением, вызванным сжатием образца ударной волной.

Толщины ступеней определялись из x,t -диаграммы таким образом, чтобы догон ФУВ волнами разрежения осуществлялся в индикаторе. В качестве индикатора использовался хлороформ. Индикатор заливался в корпус (поз. 7 на рис. 1) непосредственно перед проведением взрывного эксперимента.

Сигналы с волоконно-оптических датчиков (поз. 8 на рис. 3) подавались через оптоэлектронные преобразователи на осциллографы. Спектральная чувствительность преобразователей составляла от 480 до 960 нм и от 900 до 1700 нм.

Типичные сигналы, полученные в экспериментах, представлены на рисунке 2.

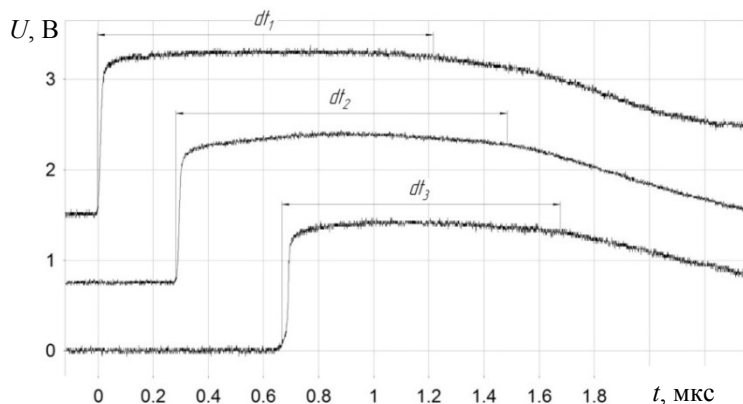


Рисунок 2. Типичные сигналы датчиков

Для определения скорости звука использовалось выражение:

$$C = \frac{C_{y\partial} \cdot D_{y\partial} \cdot R - u \cdot (C_{y\partial} + u + D_{y\partial} - W)}{C_{y\partial} \cdot \frac{D_{y\partial}}{D} \cdot R - (C_{y\partial} + u + D_{y\partial} - W)} - u \quad (1)$$

где $W_{y\partial}$ – скорость подлета ударника к образцу, [км/с]; $D_{y\partial}$ – скорость ударной волны в ударнике, [км/с]; $C_{y\partial}$ – скорость звука в ударнике, [км/с]; u – массовая скорость вещества образца за ФУВ, [км/с];

$D_{обр}$ – скорость ударной волны в образце, [км/с]; R – отношение толщины образца l , при которой происходит догон ФУВ первой характеристикой волны разрежения, к толщине ударника $l_{y\partial}$.

Из полученных профилей $U(t)$ определялись временные интервалы dt_i от момента выхода УВ на границу образец-индикатор до момента догона ФУВ волной разрежения в индикаторе. Далее, путем экстраполяции зависимости $dt_i = f(l_i)$ к $dt = 0$, определялась толщина образца l , на которой ВР догоняет ФУВ на поверхности образца. Кинематические параметры определялись методом P, u -диаграмм по известной априорно подлетной скорости ударника. При проведении предварительных оценок параметров ударного сжатия использовались следующие D, u -соотношения:

для нержавеющей стали 12X18H10T [9]:

$$D = 4,56 + 1,501 \cdot u, \quad (2)$$

для стали 10 при $1,40 \leq u \leq 8,00$ км/с [10]:

$$D = 3,664 + 1,790 \cdot u - 0,0342 \cdot u^2, \quad (3)$$

для фторопласта при $0,75 < u < 4,4$ км/с [11]:

$$D = 1,95 + 1,67 \cdot u, \quad (4)$$

для эпоксидной смолы:

$$\begin{aligned} D &= 2,65 + 1,562 \cdot u, \text{ при } 0 < u < 2,49 \text{ км/с,} \\ D &= 3,84 + 1,086 \cdot u, \text{ при } 2,49 < u < 3,61 \text{ км/с,} \\ D &= 2,86 + 1,355 \cdot u, \text{ при } 3,61 < u < 5,18 \text{ км/с.} \end{aligned} \quad (5)$$

для хлороформа [12]:

$$\begin{aligned} D &= 1,317 + 1,572 \cdot u, \text{ для } 0,8 \leq u \leq 2,9 \text{ км/с,} \\ D &= 3,456 + 0,833 \cdot u, \text{ для } 2,9 \leq u \leq 3,3 \text{ км/с,} \\ D &= 1,031 + 1,539 \cdot u, \text{ для } 3,3 \leq u \leq 4,8 \text{ км/с} \end{aligned} \quad (6)$$

Данные постановки и результаты экспериментов по определению скорости звука с использованием ФЭМ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Данные постановки и результаты экспериментов (ФЭМ)

Материал образца	ЭК-34 по ОСТ В95 2372-83						Ф-4 по ТУ 6-05-810-88				
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	
№ опыта											
Материал ударника	12X18H10T					Сталь 10	12X18H10T				
$\rho_{уд}$, г/см ³	7,89	7,91	7,87	7,93	7,92	7,84	7,88	7,92	7,86	7,90	
$h_{уд}$, мм	4,00	4,00	3,98	4,02	4,02	3,03	3,99	3,97	3,98	3,98	
$W_{уд}$, км/с	2,65	3,64	3,84	4,01	4,01	4,80	2,65	3,64	3,84	2,65	
$\rho_{обр}$, г/см ³	1,18						2,16				
h_1 , мм	8,84	7,87	7,90	8,90	8,84	5,89	8,18	8,02	7,94	8,02	
h_2 , мм	11,86	9,89	9,90	11,94	11,88	7,87	10,15	9,99	9,92	9,98	
h_3 , мм	14,86	11,86	11,85	14,94	14,81	9,94	12,16	11,86	11,99	11,91	
u , км/с	2,248	3,045	3,203	3,342	3,341	3,893	2,079	2,783	3,203	2,08	
D , км/с	6,161	7,143	7,314	7,466	7,465	8,140	5,422	6,598	7,314	5,424	
ρ , г/см ³	1,86	2,06	2,10	2,13	2,13	2,26	3,50	3,73	3,77	3,50	
P , ГПа	16,35	25,66	27,65	29,44	29,43	37,40	24,35	39,66	43,44	24,35	
dt_1 , мкс	1,600	1,590	1,419	1,022	0,993	-	1,343	1,269	1,477	1,321	
dt_2 , мкс	0,893	1,255	1,073	0,818	0,742	0,626	0,870	0,935	1,094	0,897	
dt_3 , мкс	0,582	1,014	0,794	0,435	0,464	0,392	0,583	0,590	0,698	0,460	
C , км/с	7,28	7,85	8,90	7,72	7,59	9,48	6,15	7,58	7,72	6,54	

Также были проведены взрывные эксперименты по определению скорости звука в ударно-сжатых материалах с использованием метода манганинового датчика. Определение скорости звука осуществлялось методами догоняющей и встречной разгрузок. Для ударно-волнового нагружения использовались устройства с ударниками их стали 12X18H10T, аналогичные первой серии экспериментов. Схема постановки экспериментов представлена на рисунке 3.


Рисунок 3. Схема экспериментального узла

Манганиновый датчик (поз. 8 на рис. 3) располагался между экраном и образцом (поз. 6 и 7 на рис. 3, соответственно), при этом чувствительный элемент датчика устанавливался по центру образца. Зазор между экраном и образцом и отверстия в образце с выводами датчика заполнялись составом на основе эпоксидного клея. Толщины экрана и образца определялись из x, t -диаграммы (здесь не приводится) таким образом, чтобы исключить взаимовлияние догоняющей и встречной разгрузок.

Данные постановки и результаты экспериментов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Данные постановки и результаты экспериментов (МД)

Материал образца	ЭК-34								Ф-4	
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2
$W_{уд}$, км/с	2,35	2,91	2,90	3,58	3,60	3,62	3,85	3,87	4,03	4,05
$\rho_{обор}$, г/см ³	1,19	1,19	1,19	1,19	1,18	1,19	1,19	1,18	2,15	2,20
u , км/с	2,003	2,457	2,448	2,995	3,01	3,028	3,21	3,228	3,055	3,056
D , км/с	5,779	6,488	6,474	7,089	7,105	7,125	7,326	7,341	7,052	7,054
ρ , г/см ³	1,81	1,91	1,90	2,05	2,05	2,06	2,11	2,12	3,79	3,88
P , ГПа	13,66	18,81	18,70	25,07	25,32	25,55	27,74	28,13	46,77	47,14
C , км/с	6,50*	7,89*	7,13**	7,06*	7,62*	8,26**	7,27*	8,48**	7,89*	7,35**

* – скорость звука определялась по методу догоняющей разгрузки;

** – скорость звука определялась по методу встречной разгрузки.

На рисунках 4 и 5 результаты данной работы представлены в графическом виде. Погрешность определения скорости звука фотоэлектрическим методом составляет 6%, манганиновым – 8%. Для сравнения на рисунках 4 и 5 показаны данные авторов [1-5, 8], полученные ранее с использованием других методов регистрации динамических параметров. Также на рисунках отмечены скорости звука при нормальных условиях, полученные ультразвуковым методом [13].

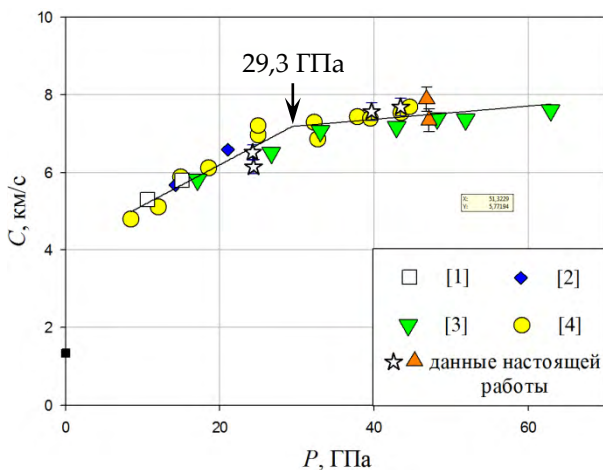


Рисунок 4. Скорость звука в ударно-сжатом Ф-4

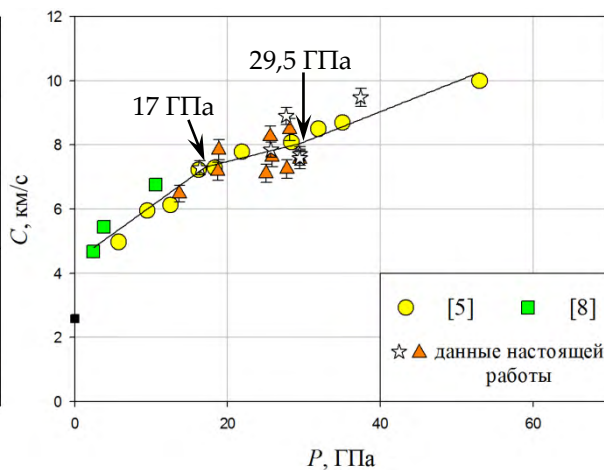


Рисунок 5. Скорость звука в ударно-сжатом ЭК-34

Результаты настоящей работы согласуются с данными [1-4] по определению скорости звука в ударно-сжатом фторопласте. Общая совокупность данных была аппроксимирована линейной функцией. Как видно из рисунка 4, линия аппроксимации претерпевает излом при давлении 29,3 ГПа, что может быть обусловлено фазовым переходом в веществе при ударном сжатии. В работе [3] излом C - P -характеристики обнаружен при давлении 34 ГПа, который авторы объясняют диссоциацией фторопласта на чистый углерод и газообразные фторуглероды.

Из рисунка 5 видно, что при давлениях 17 и 29,5 ГПа линия аппроксимации зависимости $C(P)$ эпоксидной смолы меняет наклон, что может свидетельствовать о фазовом превращении эпоксидной смолы при указанных давлениях. Верхняя граница предполагаемого фазового превращения определена весьма условно. Для ее уточнения требуются данные по скорости звука при давлении > 30 ГПа.

В диапазоне давлений 25 ÷ 30 ГПа наблюдается значительный разброс данных по скорости звука. Такое поведение вещества типично при наличии фазового перехода и может быть обусловлено разрывами химических связей и образованием новых, о чем говорилось в [5]. Однако, не стоит исключать такие факторы, как: различные исходные компоненты и технология изготовления образцов, методы ударно-волнового нагружения и регистрации динамических параметров.

В настоящей работе представлены результаты определения скорости звука во фторопласте и эпоксидной смоле в диапазоне давлений от 24 до 44 ГПа и от 14 до 38 ГПа, соответственно. Определение скорости звука в ударно-сжатых материалах осуществлялось фотоэлектрическим и манганиновым методами. Результаты настоящей работы удовлетворительно согласуются с данными [1-8].

По результатам аппроксимации совокупности данных для каждого материала установлены границы предполагаемых фазовых переходов: во фторопласте – при давлении 29,3 ГПа, в эпоксидной смоле – при давлениях 17 и 29,5 ГПа.

Список литературы

1. Н.Г. Калашников, Л.В. Кулешова, М.Н. Павловский. Ударное сжатие политетрафторэтилена до давлений ~ 1,7 Мбар // ПМТФ, 1972, № 4, с. 187-191.
2. М.Н. Павловский. Измерение скорости звука в ударно-сжатом кварците, доломите, ангидриде, хлористом натрия, парафине, плексигласе, полиэтилене и фторопласте-4 // ПМТФ, 1976, № 5, с. 136-139.
3. С. Е. Morris, J. N. Fritz, R. G. McQueen. The Equation of State of Polytetrafluoroethylene to 80 GPa. // J. Chem. Phys. 1984, V. 80 (10), p. 5203-5218.
4. А.Ю. Николаев, В.Г. Вильданов, А.О. Борщевский, О.В. Ткачёв, В.Т. Заикин, В.М. Слободенюков. Измерение скорости звука в ударно-сжатом фторопласте-4 в диапазоне давлений 1,5-45 ГПа // Молодёжь в науке: сборник материалов X Научно-технической конференции, г. Саров, Нижегородская область, 1-3 ноября, 2011.
5. К.К. Krupnikov, V.P. Krupnikova. Equation of state and matter transformation parameters under shock compression for epoxy resin // *Shock Waves*. Eds.: R. Brun, L.Z. Dimitrescu. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1995.
6. С.А. Бордзиловский, С.М. Караханов, К.В. Хищенко. Измерение яркостной температуры эпоксидной смолы при ударном сжатии // ФГВ, т. 49, №1, 2013, с. 138 – 142.
7. М.В. Жерноклетов, С.И. Киршанов, А.Е. Ковалёв, А.Б. Межевов, М.Г. Новиков. Экспериментальное определение температур ударного сжатия эпоксидного состава ЭД-5 // Харитоновские Научные Чтения: сборник тезисов VIII Международной конференции, с. 141, 2009.
8. В.М. Мочалова, А.В. Уткин, А.В. Павленко, С.Н. Малюгина, С.С. Мокрушин. Импульсное сжатие и растяжение эпоксидной смолы при ударно-волновом воздействии // Журнал технической физики, т. 89, № 1, 2019, с. 126 – 131.
9. Е.А. Kozlov. Shock Adiabatic Features, Phase Transition Macrokinetics, and Spall Fracture of Iron in Different Phase States. // *High Pressure Research*. 1992, Vol. 10, p. 541-582.
10. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. Под редакцией д-ра физ.-мат. наук Р.Ф. Трунина / Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001, 446 с.
11. Ю.Н. Жугин, К.К. Крупников, Н.А. Овечкин, Е.В. Абакшин, М.М. Горшков, В.Т. Заикин, В.М. Слободенюков. О некоторых особенностях динамической сжимаемости кварца // Физика Земли, № 10, 1994, с. 16-22.
12. М.Ф. Гоголя, И.М. Воскобойников. Излучение ударно-сжатых галогенпроизводных метана // ФГВ. Т. 24, № 6, 1988, с. 127-134.
13. Н.И. Бражников. Физические и физико-химические методы контроля состава и свойств вещества. Ультразвуковые методы / М. – Л.: Энергия, 1965, 248 с.