

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ СЖИМАЕМОСТИ АБС 20/20 С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДИК МАНГАНИНОВОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ И МИКРОВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКИ В ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ 8–40 ГПА

*А. В. Цветков, Е. Н. Богданов, М. Е. Шаврин, В. И. Буренин,
А. В. Родионов, Г. А. Козлов, Е. В. Рычагов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Распространение ударных волн в органических веществах сопровождается физико-химическими превращениями, связанными с преобразованием формы молекул и разрывом связей в них. Практический интерес представляет конструкционный материал АБС 20/20 (сополимера стирола (C_8H_8) с бутадиеном (C_4H_6 , 20 %) и акрилонитрилом (C_3H_3N , 20 %), $\rho_0 = 1,05$), который используется при изготовлении прецизионных устройств для генерации мощных ударных волн и при моделировании слоистых термоядерных мишеней. В интервале амплитуд ударных волн 8–40 ГПа АБС 20/20, как и многие другие органические вещества, претерпевает физико-химические превращения, что проявляется в виде излома на его ударной адиабате. Уравнения состояния полимеров в широком диапазоне изменения давления, учитывающие данные превращения, являются необходимым элементом для численного решения задач физики высоких плотностей энергии.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования ударно-волновой сжимаемости АБС 20/20. Целью работы являлось применение методик непрерывной регистрации для определения параметров ударного сжатия полимерных материалов. Исследования проведены с применением методик манганинового датчика и микроволновой диагностики с длинами волн зондирующего излучения 3,2 мм и 2,1 мм. Посредством последней в экспериментах регистрировались одновременно значения волновых D и массовых скоростей U , что вме-

сте с регистрацией профилей давления P за фронтом ударной волны манганиновыми датчиками делает измерения полными: $P = \rho_0 DU$, где ρ_0 – начальная плотность материала.

Постановка экспериментов

Эксперименты проводились по двум основным схемам, представленным на рис.1.

Ударная волна в образцах АБС 20/20 создавалась при распаде разрыва на границе с металлическим экраном. В схеме 1, рис. 1,а, ударная волна в экране формируется при торможении продуктов взрыва активного заряда взрывчатого вещества, в схеме 2, рис. 1,б, продукты взрыва активного заряда разгоняют металлический ударник, который, в свою очередь, взаимодействует с экраном. Плоский детонационный фронт в активном заряде диаметром 120 мм создавался при помощи генераторов плоской ударной волны. В качестве активных зарядов использовались цилиндрические детали из прессованного ТНТ и состава на основе гексогена разной длины и диаметром 120 мм. Исследуемые образцы АБС 20/20 диаметром 50 мм и толщиной 14 мм размещались вплотную к экранам.

Параметры конструкций нагружающих устройств, используемых в экспериментах, представлены в табл. 1.

Движение ударной волны в исследуемых образцах регистрировалось при помощи радиоинтерферометров [1–4] с длинами волн зондирующего излучения 3,2 мм и 2,1 мм, которое вводилось в образец через диэлектрический волновод из фторопласта-4 и излучатель из полистирола.

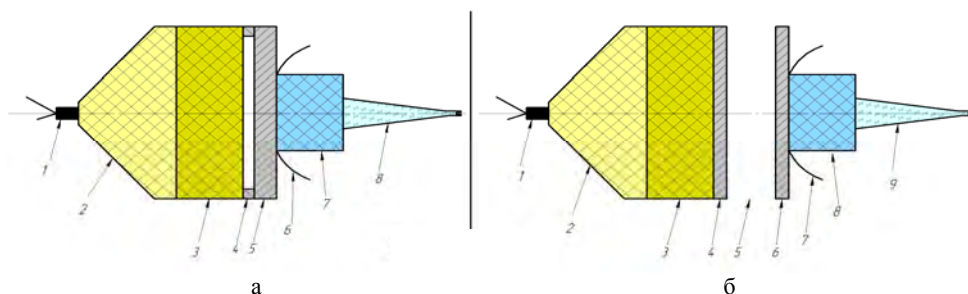


Рис. 1. Схемы проведения экспериментов: а – схема 1: 1 – электродетонатор, 2 – генератор плоской волны, 3 – активный заряд, 4 – воздушный зазор, 5 – экран (алюминий), 6 – манганиновые датчики, 7 – образец АБС 20/20, 8 – антенна радиоинтерферометра; б – схема 2: 1 – электродетонатор, 2 – генератор плоской волны, 3 – активный заряд, 4 – ударник (алюминий), 5 – воздушный зазор, 6 – экран (алюминий), 7 – манганиновые датчики, 8 – образец АБС 20/20, 9 – антенна радиоинтерферометра

Конструкции нагружающих устройств

№ опыта	Заряд ВВ, мм	Толщина ударника, мм	Толщина экрана, мм	Скорость свободной поверхности экрана W, км/с
1	Ø120 × 40	–	10	1,90 ± 0,02
2	Ø120 × 40	–	10	2,27 ± 0,02
3	Ø120 × 40	–	10	2,27 ± 0,02
4	Ø120 × 180	–	10	2,93 ± 0,02
5	Ø120 × 40	6	6	3,15 ± 0,02
6	Ø120 × 180	–	10	3,39 ± 0,02
7	Ø120 × 60	6	6	4,14 ± 0,02
8	Ø120 × 100	6	6	4,49 ± 0,04
9	Ø120 × 100	6	4	4,49 ± 0,04

В данной работе использование радиоволнового метода позволило в экспериментах непосредственно определить величины волновой D и массовой U скорости.

На рис. 2 представлена схема распространения радиоизлучения в исследуемой сборке.

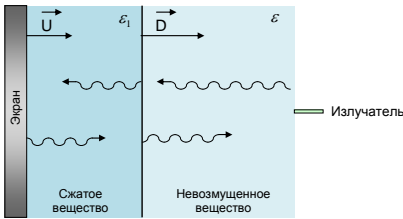


Рис. 2. Падение радиоизлучения на систему фронт ударной волны – экран

В представленной на рис. 2 системе часть радиоизлучения будет отражаться от фронта ударной волны, другая же часть пройдет сквозь него, отразится от границы раздела сжатое вещество-экран и вновь пройдет сквозь ударный фронт.

Амплитуду принимаемого сигнала можно записать следующим образом [5]:

$$S(t) = \sum_m \sum_n A_{mn} \cos \left(\omega_0 t + 2\pi \left(\frac{2n(D-U)}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_2} - \frac{2mD}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1} \right) t + \Delta\varphi_{mn} \right) \quad (1)$$

где ω_0 – круговая частота излучения, ε_1 и ε_2 – коэффициенты диэлектрической проницаемости невозмущенного и сжатого вещества соответственно, A_{mn} – коэффициенты мод излучения, а $\Delta\varphi_{mn}$ – сдвиг фаз мод. Анализируя данное выражение, можно увидеть, что в самом простом случае с отсутствием переотражений излучения (моды с $m = 1$ $n = 0$ и $m = 1$ $n = 1$) интерферограмма имеет вид:

$$A(t) = A_{10} \cos \left(2\pi \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1} t + \Delta\varphi_1 \right) + A_{11} \cos \left(2\pi \left(\frac{2(D-U)}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_2} - \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1} \right) t + \Delta\varphi_2 \right) \quad (2)$$

Следует заметить, что в реальном эксперименте в сигнале спектральные компоненты являются преобладающими вследствие малой мощности высших гармоник сигнала из-за потерь энергии при переотражениях на границах раздела.

Сигнал (2) является суммой двух компонент – высокочастотной с частотой:

$$F_1 = \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1} \quad (3)$$

и низкочастотной с частотой:

$$F_2 = \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1} - \frac{2(D-U)}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_2} \quad (4)$$

Для определения скорости ударной волны D необходимо отфильтровать компоненту с частотой

$F_1 = \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1}$. Для определения массовой скорости U ,

равной скорости границы раздела сжатое вещество-экран, необходимо знать коэффициент диэлектрической проницаемости сжатой среды ε_2 , который можно определить по отношению интенсивности компоненты сигнала, отраженного от фронта ударной волны (гармоника I_{10} с частотой $F_1 = \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1}$), к интен-

сивности сигнала, отраженного от экрана (гармоника I_{11} с частотой $F_2 = \frac{2D}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_1} - \frac{2(D-U)}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_2}$):

$$R = \frac{I_{10}}{I_{11}} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{4 \sqrt{\varepsilon_1} \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (5)$$

Из соотношения (5) можно получить выражение для коэффициента диэлектрической проницаемости ударно-сжатого вещества ε_2 :

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 (1 + 8R^2 + 4R \sqrt{4R^2 + 1}) \quad (6)$$

а из (4) – выражение для массовой скорости:

$$U = \frac{F_2 \lambda_0}{2 \sqrt{\varepsilon_1}} + D \frac{(\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1})}{\sqrt{\varepsilon_2}} \quad (7)$$

Таким образом, для определения массовой скорости U (скорости контактной границы) необходимо

определить волновую скорость D и провести амплитудно-частотный анализ экспериментальной интерферограммы с целью определения отношения R гармоник сигнала (5) и значения частоты F_2 .

Для регистрации профилей давления на границе экран-образец и определения значений амплитуд P и скоростей D ударных волн в АБС 20/20 применялась методика манганинового датчика давления [6–8]. Манганиновые датчики изготовлены из манганиновой фольги толщиной 30 мкм, полная толщина датчика вместе с изоляцией составляла около 230 мкм. Сопротивление активного элемента датчика составляет около 0,3 Ом. Переход от регистрируемого в эксперименте напряжения U на датчике к давлению P производится с использованием калибровочной зависимости электрического сопротивления манганина от давления ударного сжатия:

$$P = a + b(U/U_0 - 1) + c(U/U_0 - 1)^2 + d(U/U_0 - 1)^3, \quad (8)$$

где U/U_0 – отношение амплитуд напряжений на датчике после и до прихода волны сжатия, которое определялось по экспериментальным осциллограммам, a , b , c и d – коэффициенты калибровочной зависимости манганинового датчика: $a = 0,2854$ ГПа, $b = 35,051$ ГПа, $c = 1,7776$ ГПа, $d = 2,0568$ ГПа. Погрешность определения давления манганиновыми датчиками составляет около 5 %.

Результаты экспериментов

На рис. 3 приведены характерные профили давления в АБС 20/20, зарегистрированные манганиновыми датчиками. Как видно из рис. 3, все профили имеют «столообразный» вид, спад давления на кривых 2 и 3 обусловлен приходом тыльной волны разрежения.

На рис. 4 для иллюстрации представлена экспериментальная интерферограмма, зарегистрированная в одном из экспериментов радиоинтерферометром

с длиной волны зондирующего излучения 3,2 мм. Из графика, рис. 4, можно видеть, что сигнал является результатом биений двух синусоидальных сигналов с различными частотами и может быть описан выражением (2).

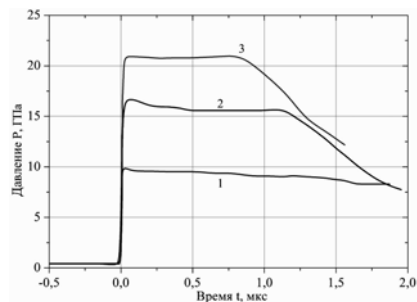


Рис. 3. Профили давления в АБС 20/20: 1 – опыт № 3; 2 – опыт № 6; 3 – опыт № 7

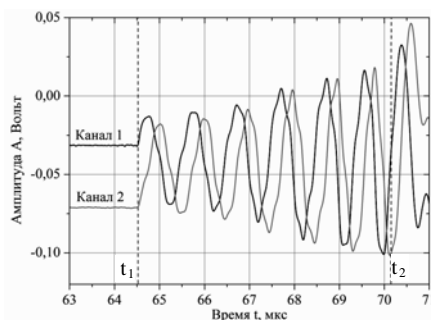


Рис. 4. Экспериментальная интерферограмма. Характерные моменты времени: t_1 – вход ударной волны в образец, t_2 – выход ударной волны из образца

Результаты всех опытов с использованием микроволновой диагностики представлены в табл. 2, с использованием методики манганинового датчика давления – в табл. 3. Экспериментальные точки на ударной адиабате для методики манганинового датчика давления определялись методом отражения ударных адиабат по измеренным значениям давления за фронтом ударной волны и изэнтропе расширения алюминия (материал экрана).

Таблица 2

Экспериментальные результаты с применением микроволновой диагностики

№ Опыта	$D_{\text{риф}}$, км/с		$U_{\text{риф}}$, км/с		$P_{\text{риф}}$, ГПа	
	$\lambda_0 = 2,1$ мм	$\lambda_0 = 3,2$ мм	$\lambda_0 = 2,1$ мм	$\lambda_0 = 3,2$ мм	$\lambda_0 = 2,1$ мм	$\lambda_0 = 3,2$ мм
1	–	$4,73 \pm 0,09$	–	$1,48 \pm 0,02$	–	$7,35 \pm 0,24$
2	–	$4,92 \pm 0,14$	–	$1,58 \pm 0,03$	–	$8,16 \pm 0,39$
3	$5,19 \pm 0,05$	$5,21 \pm 0,05$	$1,73 \pm 0,02$	$1,69 \pm 0,04$	$9,43 \pm 0,20$	$9,25 \pm 0,31$
4	–	$5,83 \pm 0,09$	–	$2,22 \pm 0,03$	–	$13,59 \pm 0,40$
5	$6,13 \pm 0,15$	–	$2,47 \pm 0,06$	–	$15,90 \pm 0,78$	–
6	–	$6,22 \pm 0,08$	–	$2,57 \pm 0,05$	–	$16,79 \pm 0,54$
7	$6,64 \pm 0,06$	$6,65 \pm 0,06$	$2,74 \pm 0,02$	$2,74 \pm 0,02$	$19,10 \pm 0,33$	$19,13 \pm 0,33$
8	–	$6,74 \pm 0,07$	–	$3,31 \pm 0,06$	–	$23,42 \pm 0,67$
9	–	$6,77 \pm 0,35$	–	$3,55 \pm 0,18$	–	$25,24 \pm 2,58$
10	$7,05 \pm 0,07$	$7,12 \pm 0,07$	$3,32 \pm 0,04$	$3,65 \pm 0,10$	$24,58 \pm 0,54$	$27,29 \pm 1,02$

где λ_0 – длина волны излучения радиоинтерферометра, $D_{\text{риф}}$ – волновая скорость в образце, определенная радиоинтерферометром, $U_{\text{риф}}$ – массовая скорость в образце, определенная радиоинтерферометром, $P_{\text{риф}}$ – давление в образце, определенное по $D_{\text{риф}}$ и $U_{\text{риф}}$: $P_{\text{риф}} = \rho_0 D_{\text{риф}} U_{\text{риф}}$.

Экспериментальные результаты с применением методик манганинового датчика давления

№ Опыта	3	6	7	8
P_M , ГПа	$9,26 \pm 0,46$	$15,5 \pm 0,78$	$21,61 \pm 1,08$	$23,43 \pm 1,17$
D_M , км/с	$5,24 \pm 0,16$	$6,50 \pm 0,13$	$6,99 \pm 0,21$	$6,85 \pm 0,13$
U_M , км/с	$1,68 \pm 0,03$	$2,27 \pm 0,07$	$2,94 \pm 0,06$	$3,26 \pm 0,10$

где P_M – давление в образце, определенное манганиновым датчиком, D_M – волновая скорость в образце, определенная манганиновым датчиком, U_M – массовая скорость в образце, определенная по P_M и D_M : $U_M = P_M / (\rho_0 D_M)$.

На рис. 5 и рис.6 полученные результаты по ударно-волновой сжимаемости АБС 20/20 представлены в D - U -переменных. На графиках также приведены данные для полистирола – сополимера стирола – основного компонента АБС 20/20 [9, 10].

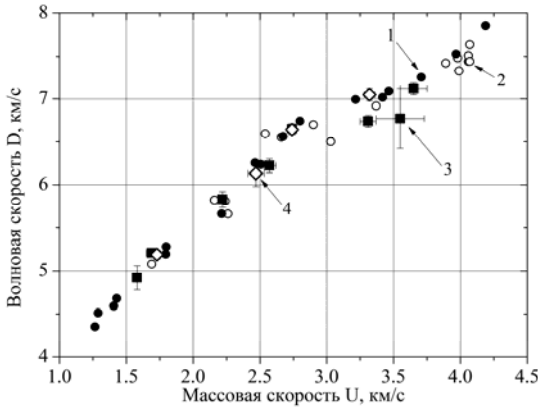


Рис. 5. Ударная адиабата в D - U -переменных. Метод микроволновой диагностики: 1 – полистирол [9]; 2 – полистирол [10]; 3 – радиointерферометр, настоящая работа, $\lambda_0 = 3,2$ мм; 4 – радиointерферометр, настоящая работа, $\lambda_0 = 2,1$ мм

Представленные на рис. 5 и рис. 6 данные показывают удовлетворительное согласие полученных в настоящей работе данных для АБС 20/20 с применением методик микроволновой диагностики и манганинового датчика давления с данными для полистирола.

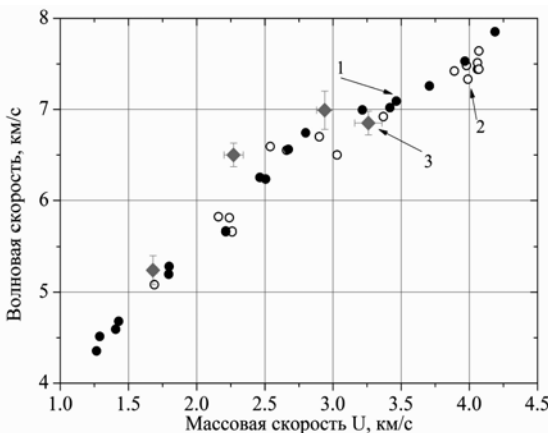


Рис. 6. Ударная адиабата в D - U -переменных. Метод манганинового датчика давления: 1 – полистирол [9]; 2 – полистирол [10]; 3 – манганин настоящая работа

На рис. 7 и рис. 8 полученные результаты по ударно-волновой сжимаемости АБС 20/20 представлены в P - ρ -переменных. На графиках также приведены данные для полистирола – сополимера стирола – основного компонента АБС 20/20 [9, 10].

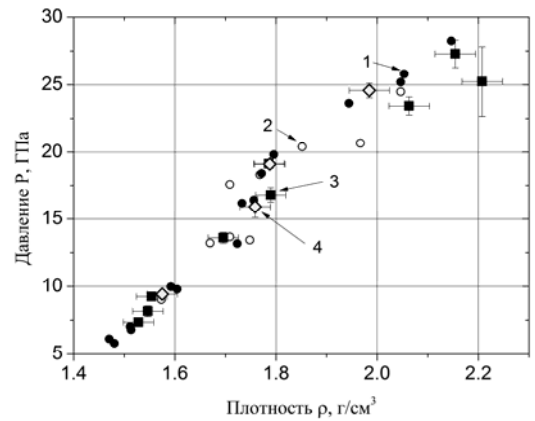


Рис. 7. Ударная адиабата в P - ρ -переменных. Метод микроволновой диагностики: 1 – полистирол [9]; 2 – полистирол [10]; 3 – радиointерферометр, настоящая работа, $\lambda_0 = 3,2$ мм; 4 – радиointерферометр, настоящая работа, $\lambda_0 = 2,1$ мм

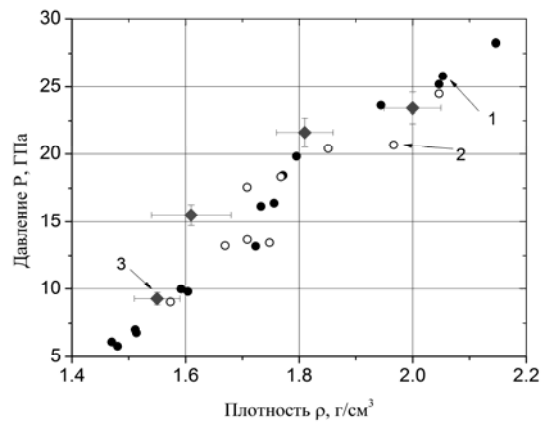


Рис. 8. Ударная адиабата в P - ρ -переменных. Метод манганинового датчика давления: 1 – полистирол [9]; 2 – полистирол [10]; 3 – манганин настоящая работа

Заключение

Проведены экспериментальные исследования ударно-волновой сжимаемости АБС 20/20 в диапазоне давлений 7–25 ГПа.

На основании полученных результатов показано, что данные по ударно-волновой сжимаемости АБС 20/20 хорошо согласуются с аналогичными данными для полистирола – сополимера стирола – основного компонента АБС 20/20. Зарегистрировано физико-химическое превращение, проявляющееся в виде излома на ударной адиабате, в диапазоне давлений 20,8–23,4 ГПа.

Отработана методика измерения полного набора параметров ударного сжатия: давления, массовой и волновой скоростей. Полученные данные могут быть использованы для верификации уравнений состояния полимеров.

Литература

1. Бельский В. М., Михайлов А. Л., Родионов А. В., Седов А. А. // ФГВ, 2011 г., т. 47, № 6, с. 29–41.
2. Rae P. J., Glover V. B., Gunderson J. A., Perry W. Lee // Shock Compression of Condensed Matter, 2011.
3. Невозмущающие методы диагностики быстротекающих процессов / Под ред. Доктора техн. наук А. Л. Михайлова. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. 322 с.
4. Михайлов А. Л., Костюков В. Е., Орехов Ю. И. и др. Некоторые результаты применения в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ радиоинтерферометров

миллиметрового диапазона длин волн для изучения газодинамических процессов. Труды международной конференции «VII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». 14–18 марта 2005. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005, С. 649–654.

5. Родионов А. В., Бельский В. М., Богданов Е. Н. и др. Труды международной конференции «XI Харитоновские тематические научные чтения». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009, С. 69–73.

6. Павловский М. Н., Комиссаров В. В. Особенности фазового превращения висмута в волне разрежения. ЖЭТФ, 1982, Т. 83, № 6(12), С. 2146–2151.

7. Павловский М. Н., Комиссаров В. В. Полиморфные превращения олова в ударных волнах сжатия и разгрузки. ЖЭТФ, 1990, т. 98, №5(11), С. 1748–1751.

8. Бельский В. М., Комиссаров В. В. Иницирование пластифицированного октогена тремя ударными волнами. Труды международной конференции «VII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005 . С. 148–151.

9. LASL Shock Hugoniot Data. Marsh S.P. U.California Press: Berkeley 1980, 658 с.

10. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / Под ред. Р. Ф. Трунина. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006, 531 с.