

УДК 622.2

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА НА ДИНАМИЧЕСКОЕ НАГРУЖЕНИЕ МЕТОДОМ СОСТАВНОГО СТЕРЖНЯ ГОПКИНСОНА

А. В. Юрлов^{1,2}, В. А. Пушков^{1,2}, Т. Г. Найданова¹, А. Н. Цибилов¹,
А. В. Баканова¹

¹РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

²Саровский физико-технический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 607188 Саров

Проведено исследование динамического сжатия и локализованного адиабатического сдвига в образцах взрывчатого вещества (ВВ) на основе октогена с применением метода составного стержня Гопкинсона. Эксперименты по изучению динамического сжатия выполнены при скоростях деформации $(0.3 \div 2.0) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. Получены напряжения, при которых происходит разрушение образцов ВВ — $60 \div 80 \text{ МПа}$. Рассмотрено также поведение образцов ВВ на основе октогена в опытах по изучению локализованного сдвига при различных скоростях деформации ($200 \div 2500 \text{ с}^{-1}$). Рассмотрены вопросы возбуждения взрывных превращений в условиях реализованных динамических нагрузок.

Ключевые слова: ВВ, низкоскоростное воздействие, динамическое сжатие, разрушение, адиабатический сдвиг, взрывные превращения.

DOI 10.15372/FGV20160414

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы, связанные с изучением возможности инициирования взрывных превращений во взрывном веществе (ВВ) при низкоскоростном воздействии, имеют большое практическое значение, в частности при моделировании аварийных ситуаций. Из анализа имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что наиболее вероятным механизмом инициирования взрывных превращений является образование очагов реакции в результате ввода энергии при пластической деформации твердых ВВ. Очаги формируются под действием сдвиговых деформаций, которые приводят к образованию трещин и относительному скольжению материала ВВ по границе трещины. При этом в процессе деформирования происходит локализация адиабатического сдвига. В полосе сдвига реализуется сильный разогрев ВВ и возникает очаг реакции взрывного превращения.

Исследованиями механического воздействия на ВВ при различных скоростях нагру-

жения активно занимаются в различных лабораториях [1–6]. Однако для создания более адекватных моделей инициирования взрывного превращения необходим больший объем экспериментальных данных [3, 7, 8]. В настоящей статье приведены результаты исследования методом составного стержня Гопкинсона динамического сжатия и локализованного адиабатического сдвига в образцах ВВ на основе октогена. Скорости деформаций в опытах составили $(0.2 \div 2.5) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО СЖАТИЯ

Метод составного стержня Гопкинсона исследователи используют для изучения поведения ВВ и тестирования численных моделей деформирования (см., например, [9]). На рис. 1 приведена схема проведения опытов по динамическому сжатию материалов методом составного стержня Гопкинсона, которую авторы применяли в работе. Образец (диаметр 20 мм, высота 10 мм), как и в классическом варианте данного метода, размещается между нагружающим и опорным стержнями. Устройство для

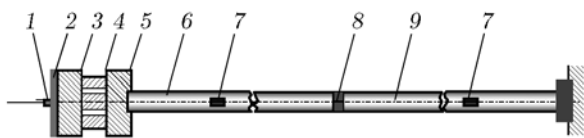


Рис. 1. Схема установки составного стержня Гопкинсона в редакции опытов на сжатие:

1 — электродетонатор, 2 — слой пластического ВВ, 3 — стальной ударник, 4 — перфокрешер (Al), 5 — стальной переходник, 6 — нагружающий стержень, 7 — тензодатчик, 8 — образец, 9 — опорный стержень

создания нагружающих импульсов напряжения с примерно постоянной амплитудой состоит из стального ударника с наклеенным на его свободный торец слоем пластического ВВ, перфокрешера из алюминиевого сплава и переходного стального диска. Инициирование пластического ВВ осуществлялось с помощью электродетонатора. Нагружающий и опорный мерные стержни ($\varnothing 20 \times 1000$ мм) изготовлены из титана ВТ20. По сигналам (импульсам деформаций) от тензодатчиков строилась диаграмма напряжение — деформация ($\sigma-\varepsilon$) при сжатии и определялась скорость деформации.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЛОКАЛИЗОВАННОГО АДИАБАТИЧЕСКОГО СДВИГА

Схема исследований локализованного адиабатического сдвига в ВВ приведена на рис. 2. Узел взрывного нагружения, стержни Гопкинсона, методика измерения деформаций были такими же, как в опытах по изучению динамического сжатия (см. рис. 1). Отличался лишь

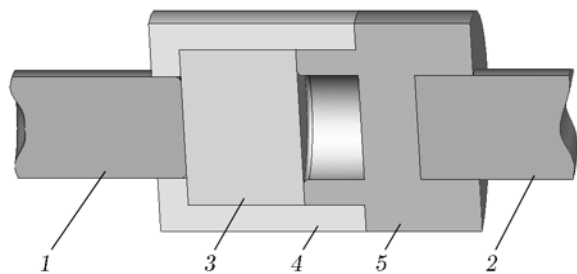


Рис. 2. Схема испытаний ВВ на локализованный сдвиг:

1, 2 — нагружающий и опорный стержни, 3 — образец, 4 — корпус, 5 — опора

узел крепления образца. Здесь образец (диаметр 30 мм, высота 20 мм) помещается в специальную обойму, состоящую из корпуса и опоры. Образец входит в обойму плотно, без зазора между образующей поверхностью образца и корпусом обоймы. Средняя часть образца выдавливается внутрь опоры, при этом между выдавливаемой и остающейся частями должен формироваться локализованный сдвиг. Зазор между выдавливаемой частью образца и внутренней образующей поверхностью опоры обоймы составляет 1 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Динамическое сжатие

Опыты проведены при скоростях деформации $\dot{\varepsilon} = (0.3 \div 2.0) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ (скорость нагружения $v_{\text{нагр}} = 2.5 \div 20 \text{ м/с}$), амплитуда нагружающих импульсов составила $\sigma_i = 45 \div 560 \text{ МПа}$ или $(14.1 \div 175.8) \cdot 10^3 \text{ Н}$. На рис. 3 представлена характерная диаграмма напряжение — деформация в опыте с разрушением образца.

Полученные диаграммы сжатия $\sigma-\varepsilon$ близки к виду диаграмм для хрупких материалов: за упругим участком следует короткий участок пластического деформирования, где достигается напряжение разрушения. Однако далее идет протяженный участок спада напряжения, свидетельствующий о достаточно длительном процессе разрушения (по зарегистрированным импульсам деформации на опорном стержне это занимает $\approx 80 \div 100 \text{ мкс}$).

В экспериментах при $\dot{\varepsilon} = (0.3 \div 0.6) \times 10^3 \text{ с}^{-1}$ и $\sigma_i = 45 \div 100 \text{ МПа}$ разрушений не

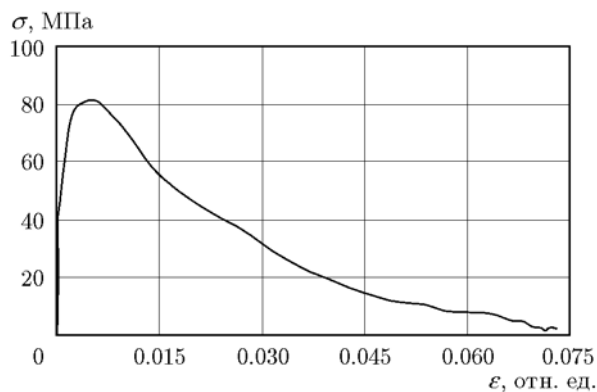


Рис. 3. Характерная диаграмма напряжение — деформация разрушенного образца ($\dot{\varepsilon} = 850 \text{ с}^{-1}$)

наблюдалось (пять опытов). В образцах, кроме этого, отсутствовала пластическая деформация, т. е. деформация была только упругой. При $\dot{\epsilon} = (0.7 \div 2.0) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ и $\sigma_i = 110 \div 560 \text{ МПа}$ образцы полностью разрушались (восемь опытов). В указанных условиях взрывного превращения не происходило. Из результатов опытов с разрушением образцов ВВ следует, что разрушение происходит при напряжении $60 \div 80 \text{ МПа}$.

Отсутствие взрывного превращения, возможно, связано с тем, что при приложении нагрузки из-за хрупкости ВВ образец растрескивался и разрушался по макротрещинам на мелкие фрагменты и порошок. Несмотря на значительную длительность процесса, очевидно, существенного скольжения материала ВВ по границам трещин не происходило из-за разлета фрагментов, и очаги реакции взрывного превращения не успевали формироваться. Этому способствовало отсутствие ограничения деформирования и разрушения образцов в радиальном направлении.

Визуальный контроль испытанных, но не разрушенных образцов в целом выявил в образцах небольшие повреждения или трещины. Был проведен контроль их плотности (гидростатическим методом) и акустических параметров (ультразвуковым методом) в сравнении с неиспытанным образцом. Выявлено уменьшение определяемых параметров. Плотность образцов после нагружения снизилась на $0.37 \div 1.17 \%$, скорость продольных волн — на $6 \div 28 \%$, скорость поперечных волн — на $10 \div 27 \%$, модуль упругости — на $18 \div 48 \%$. Полученные данные указывают на то, что увеличение давления нагружающего импульса приводит к росту поврежденности образцов, что стало причиной уменьшения вышеуказанных параметров. Корреляции коэффициента затухания ультразвука с параметрами нагружения не выявлено.

Локализованный сдвиг в ВВ

Опыты проведены при скоростях деформации $\dot{\epsilon} = 200 \div 2500 \text{ с}^{-1}$ (скорость нагружения $v_{\text{нагр}} = 4.0 \div 50 \text{ м/с}$). Амплитуда нагружающих импульсов напряжений составила $\sigma_i = 100 \div 625 \text{ МПа}$ или $(31.4 \div 196.3) \cdot 10^3 \text{ Н}$. Постановка экспериментов приведена на рис. 2.

В экспериментах при $\dot{\epsilon} = 200 \div 550 \text{ с}^{-1}$ ($v_{\text{нагр}} = 4.8 \div 11.0 \text{ м/с}$) и $\sigma_i = 100 \div 130 \text{ МПа}$,



Рис. 4. Диаметральное сечение образца ВВ после опыта на локализованный сдвиг ($\sigma_i = 100 \text{ МПа}$, $\dot{\epsilon} = 200 \text{ с}^{-1}$ ($v_{\text{нагр}} = 4.0 \text{ м/с}$))

так же как в опытах на динамическое сжатие, взрывного превращения не происходило. При этом в двух экспериментах при $\dot{\epsilon} = 200 \div 240 \text{ с}^{-1}$ ($v_{\text{нагр}} = 4.0 \div 4.8 \text{ м/с}$) и $\sigma_i = 100 \div 110 \text{ МПа}$ образцы деформировались без разрушения, наблюдалось небольшое выдавливание на $\approx 0.5 \div 0.8 \text{ мм}$ одной части образца относительно другой, а также появлялись трещины, в основном на образующей поверхности. На рис. 4 приведена фотография диаметального сечения одного из неразрушенных образцов.

Из рис. 4 следует, что деформирование образцов происходило под действием сдвиговых и осевых напряжений. При этом в процессе деформирования образца вдоль полосы сдвига появляются трещины в поперечном направлении. По испытанным образцам оценена ширина полосы сдвига, которая составляла $\approx 50 \div 100 \text{ мкм}$. В процессе нагружения полосы сдвига развились в трещины.

В других четырех экспериментах при $\dot{\epsilon} = 400 \div 550 \text{ с}^{-1}$ ($v_{\text{нагр}} = 8.0 \div 11.0 \text{ м/с}$) и $\sigma_i = 130 \div 180 \text{ МПа}$ наблюдалось разрушение образцов. В процессе разрушения под действием сдвиговых деформаций происходило выдавливание одной части образца относительно другой. В целом характер разрушения образцов был хрупкий.

Были проведены опыты и при более высоких скоростях деформации $\dot{\epsilon} = 1000 \div 2500 \text{ с}^{-1}$ ($v_{\text{нагр}} = 20 \div 50 \text{ м/с}$), $\sigma_i = 275 \div 625 \text{ МПа}$. В двух опытах при $\dot{\epsilon} \approx 1000$ и 1750 с^{-1} ($v_{\text{нагр}} = 20$ и 35 м/с), $\sigma_i = 275$ и 430 МПа взрывного превращения не происходило, образцы разрушались. В трех опытах при $\dot{\epsilon} = 2200 \div 2500 \text{ с}^{-1}$ ($v_{\text{нагр}} = 40 \div 50 \text{ м/с}$), $\sigma_i = 520 \div 625 \text{ МПа}$ на-

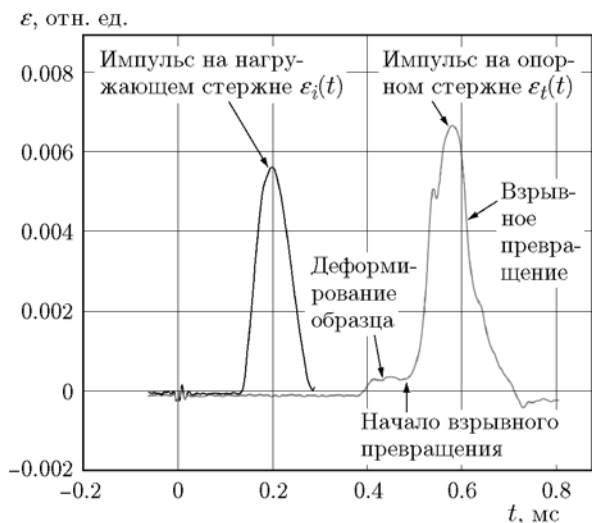


Рис. 5. Импульсы деформаций на стержнях Гопкинсона в одном из опытов с взрывным превращением

блюдалось взрывное превращение.

На рис. 5 приведены записи деформаций на стержнях Гопкинсона одного из опытов с взрывным превращением. Для наглядности записи ограничены и представлены только в первой волне, проходящей через тензодатчики (см. рис. 1).

Из рис. 5 видно, что амплитуда импульса $\varepsilon_t(t)$ на опорном стержне выше, чем амплитуда импульса $\varepsilon_i(t)$ на нагружающем стержне. По импульсу упругой деформации $\varepsilon_t(t)$, зарегистрированному на опорном стержне, определено, что амплитуда возникающего напряжения в этом опыте составила 715 МПа. Отметим, что такая величина напряжения относится не к деформированию образца, а только к взрывному превращению, что объясняет, почему $\varepsilon_t(t)$ по амплитуде больше, чем $\varepsilon_i(t)$. То есть энергия, выделившаяся при взрывном превращении больше, чем «закачанная» в образец.

Судя по форме импульса $\varepsilon_t(t)$ на опорном стержне (см. рис. 5), перед возникновением взрывного превращения присутствует небольшая часть импульса, которая наиболее очевидно соответствует процессу деформирования образца под действием сдвиговых напряжений. Длительность участка составляет ≈ 110 мкс.

Регистрация импульса деформации $\varepsilon_t(t)$ на опорном стержне позволяет, аналогично классическому варианту метода составного стержня Гопкинсона на сжатие, определить напряжение сдвига в образце:

$$\tau_{sh} = E(S/S_{sh})\varepsilon_t(t),$$

где E — модуль Юнга материала стержня, S — площадь поперечного сечения стержня ($\varnothing 20$ мм), S_{sh} — площадь сдвигового сечения образца, определяемая как площадь образующей поверхности образца, соответствующая диаметру стержня (см. рис. 2). В результате получено, что в опыте $\tau_{sh} = 12.3$ МПа.

Аналогичные записи импульсов деформаций $\varepsilon_i(t)$ и $\varepsilon_t(t)$ на стержнях наблюдались и в двух других опытах со взрывным превращением, где амплитуда возникающего при взрывном превращении напряжения равна 815 и 710 МПа, а длительность участка деформирования — 160 и 170 мкс соответственно. Амплитудные значения τ_{sh} в этих опытах составляют соответственно 15.5 и 11.3 МПа.

Полученные данные по изучению локализованного сдвига соответствуют широко применяемой теории о возникновении взрывного превращения. В отличие от постановки опытов на сжатие, здесь ограничение деформирования образца в радиальном направлении (см. рис. 2) способствовало формированию локализованного адиабатического сдвига и скольжению материала ВВ по границам микротрещин.

В опытах [1] при воздействии на аналогичное ВВ металлического ударника со скоростью $50 \div 60$ м/с зарегистрировано время от момента удара до возникновения взрывного превращения $140 \div 150$ мкс, что согласуется с представленными выше данными. Аналогично полученным нами данным, в течение этого времени происходит деформирование образца под воздействием механической энергии ударника.

Для опытов со взрывным превращением по участкам деформирования и соответственно диаграммам напряжение сдвига — деформация сдвига можно оценить работу деформирования образца, предшествующую началу взрывного превращения. Однако из-за сложности контроля зазора между образцом и опорой обоймы и, соответственно, контроля рабочей длины образца оценка деформации сдвига будет весьма грубой. Тем не менее, решив эту задачу, величину затраченной на динамическое деформирование работы (а это интегральное значение) можно использовать при установлении критерия иницирования взрывного превращения.

Представленные экспериментальные данные будут полезны при разработке моделей иницирования взрывного превращения.

Авторы выражают искреннюю благодар-

ность рецензенту за ценные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов Г. В., Базаров Ю. Б., Екимчев С. Н., Жиёмбетов А. К., Кудашов А. В., Олейников И. В., Шишканов А. В., Шустова Н. И. Влияние скорости ударника на параметры взрыва образцов из двух типов бризантных ВВ // Тр. XV Харитоновских чтений. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 111–118.
2. Pushkov V. A., Abakumov A. I., Yurlov A. V., Kal'manov A. V., Sedov A. A., Rodionov A. V. Response of HMX-based HE to low-velocity loading by steel cylindrical impactor // Proc. of the AIP Conf., N 1426, Pt 1. — 2011. — P. 418–421.
3. Абакумов А. И., Большаков А. П., Васенин С. Н., Гушанов А. Р., Карпенко И. И., Синецын В. А. Расчетно-экспериментальное исследование деформирования энергетических материалов в условиях низкоскоростного нагружения в опытах по методу составного стержня Гопкинсона // Тр. конф. «IX Харитоновские научные чтения». — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. — С. 215–226.
4. Chidester S. K., Tarver C. M., DePiero A. H., Garza R. G. Single and multiple impact ignition of new and aged high explosives in the Steven impact test // Proc. of the AIP Conf., N 505. — 2000. — P. 663–666.
5. Vandersall K. S. Experimental and modeling studies of crush, puncture, and perforation scenarios in the Steven impact test // 12th Intern. Detonation Symp. — 2002. — P. 131–139.
6. Idar D. J. Low amplitude insult project: PBX 9501 high explosive violent reaction experiments // 11th Intern. Detonation Symp. — 1998. — P. 101–110.
7. Belov G. V., Gushanov A. R., Isheyev D. V., Khvorostin V. N., Volodina N. A. Numerical simulation of experiments on the low-velocity impact on octogen-based HE using the explosive transformation initiation kinetics // Abstr. of 7th Intern. Meeting on New Models and Hydrocodes for Shock Waves Processes in Condensed Matter, Estoril, Portugal. — 2008. — P. 37–38.
8. Джексон Р., Грин Л., Барлетт Р., Хоуфер У., Крамер П., Ли Р., Нидик-мл. Э., Шоу Л., Вейнгарт Р. Закономерности иницирования и распространения детонации во взрывчатом веществе ТАТБ // Детонация и взрывчатые вещества: сб. — М.: Мир, 1981. — С. 323–342.
9. Mas E. M., Clements B. E., Blumenthal W. R., Cady C. M., Gray III G. T. Applying micro-mechanics to finite element simulations of split Hopkinson pressure bar experiments on high explosives // Shock Compression of Condensed Matter — 2001. — P. 539–542.

*Поступила в редакцию 20/VII 2015 г.,
в окончательном варианте — 10/XI 2015 г.*