

РЕАКЦИЯ ВВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА И ТАТБ НА ДИНАМИЧЕСКОЕ НАГРУЖЕНИЕ МЕТОДОМ СОСТАВНОГО СТЕРЖНЯ ГОПКИНСОНА

А. М. Васильев, А. В. Юрлов, В. А. Пушков, Т. Г. Найданова, А. Н. Цибилов

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

Введение

Вопросы, связанные с изучением возможности инициирования взрывчатых превращений (ВП) во взрывчатых веществах (ВВ) при низкоскоростном воздействии, имеют большое практическое значение, в частности при моделировании аварийных ситуаций. В деятельности ЯОК используются ВВ, например, для исследовательских целей или в составе конструкций. При хранении, транспортировке и работе с ВВ могут возникать аварийные ситуации с воздействием на ВВ динамических нагрузок (падение самолета на склад ВВ, транспортная авария, теракт и т. п.). Для обеспечения технической безопасности необходимо знать свойства ВВ при воздействии различных нагрузок, включая динамические.

Из анализа имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что наиболее вероятным механизмом инициирования ВП является образование очагов реакции в результате диссипации энергии при пластической деформации в твердых ВВ. Очаги формируются сдвиговыми деформациями, приводящими 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 взрывчатого превращения.

Исследованиями механического воздействия на ВВ при различных скоростях нагружения активно занимаются в различных лабораториях, в частности в Российских и Американских [1–6]. Однако на сегодня для создания более адекватных моделей инициирования взрывчатого превращения необходим больший объем экспериментальных данных [3, 7–8]. В настоящем докладе приведены результаты исследования методом составного стержня Гопкинсона (ССГ) динамического сжатия и локализованного адиабатического

сдвига в образцах из ВВ на основе октогена и триаминотринитробензола (ТАТБ). Скорости деформаций в опытах составили $(0,2–3,7) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

1. Методика исследований

1.1. Эксперименты на динамическое сжатие

Метод ССГ исследователи используют для изучения поведения ВВ и тестирования численных моделей деформирования, например [9]. На рис. 1 приведена схема проведения опытов на динамическое сжатие материалов методом ССГ.

Образец (диаметр 20 мм, высота 10 мм), как в классическом варианте метода ССГ, размещается между нагружающим и опорным стержнями (рис. 1).

Устройство для создания импульсов нагружения (рис.1) с примерно постоянной амплитудой состоит из стального ударника 3 с наклеенным на его свободном торце слоем пластического ВВ 2, перфокрешера из алюминиевого сплава 4 и переходного стального диска 5. Иницирование ПВВ осуществлялось с помощью электродетонатора 1. Нагружающий 6 и опорный 9 мерные стержни ($\varnothing 20 \times 1000 \text{ мм}$) изготовлены из титана ВТ20. Обработкой сигналов (импульсов деформаций) от тензодатчиков 7 строилась диаграмма напряжение-деформация σ - ε при сжатии и определялась скорость деформации.

1.2. Эксперименты по исследованию локализованного сдвига

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

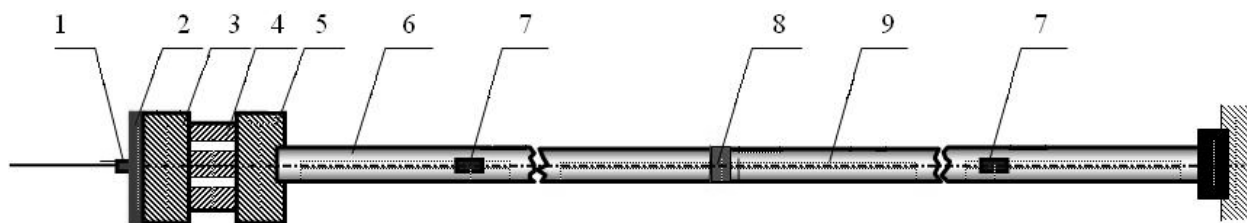


Рис. 1. Схема установки составного стержня Гопкинсона в редакции опытов на сжатие: 1 – электродетонатор; 2 – слой ПВВ; 3 – стальной ударник; 4 – перфокрешер (А1); 5 – стальной переходник; 6 – нагружающий стержень; 7 – тензодатчик; 8 – образец; 9 – опорный стержень

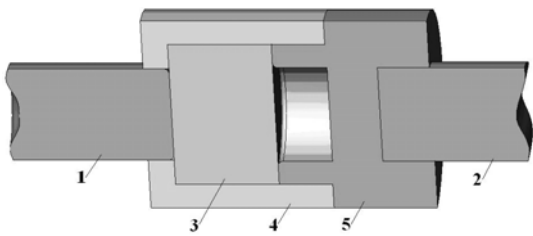


Рис. 2. Схема испытаний ВВ на локализованный сдвиг: 1 и 2 – нагружающий и опорный стержни, 3 – образец, 4 – корпус, 5 – опора

Здесь образец (диаметр 30 мм, высота 20 мм) помещается в специальную обойму, состоящую из корпуса и опоры. Средняя часть образца выдавливается внутрь опоры 5, при этом между выдавливаемой и остающейся частью должен формироваться локализованный сдвиг.

2. Результаты исследований

2.1. Эксперименты по изучению динамического сжатия ВВ на основе октогена

Опыты проведены при скоростях деформации $\dot{\epsilon} = (0,3 \div 2,0) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ (скорость нагружения $V_{\text{нагр}} = -2,5 \div 20 \text{ м/с}$), амплитуда нагружающих импульсов давлений составила $\sigma_i = 45 \div 560 \text{ МПа}$ или усилий $(14,1 \div 175,8) \cdot 10^3 \text{ Н}$. В экспериментах при $\dot{\epsilon} = (0,3 \div 0,6) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ наблюдалось отсутствие разрушения, а при $\dot{\epsilon} = (0,7 \div 2,0) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ полное разрушение образцов. В сохранившихся после опытов образцах отсутствовала пластическая деформация, т. е. деформация была только упругой. В указанных условиях взрывчатого превращения не происходило.

На рис. 3 приведена характерная диаграмма «напряжение–деформация» для разрушенного образца.

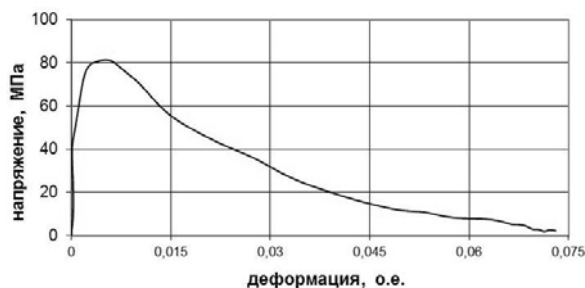


Рис. 3. Характерная диаграмма «напряжение – деформация» σ - ϵ разрушенного образца, $\dot{\epsilon} = 850 \text{ с}^{-1}$

В целом полученные диаграммы сжатия σ - ϵ имеют вид, характерный для хрупких материалов: за упругим участком следует очень короткий участок пластического деформирования, где достигается напряжение разрушения и затем следует резкий спад напряжения.

В табл. 1 приведены результаты экспериментов по сжатию ВВ на основе октогена.

Из результатов опытов с разрушением образцов следует, что величина напряжения, при котором происходит разрушение образцов ВВ, составляет 60–80 МПа. Практически сразу после приложения нагрузки из-за хрупкости ВВ происходило растрескивание образца и образец по макротрещинам разрушался на мелкие фрагменты и порошок. Значительного скольжения материала ВВ по границам трещин не происходило из-за быстрого разлета фрагментов, и очаги реакции взрывчатого превращения не успевали сформироваться.

Таблица 1

Результаты экспериментов по исследованию динамического сжатия ВВ на основе октогена

№ оп.	Давление нагружающего импульса, МПа	Усилие в нагружающем импульсе * 10^3 Н	Скорость деформации, с^{-1} (скорость нагружения $V_{\text{нагр}}$, м/с)	Состояние образца
1	45	14,0	250 (2,5)	Образец не разрушился
2	96	30,0	290 (2,9)	Образец не разрушился
3	96	31,0	470 (4,7)	Образец не разрушился
4	100	31,5	370 (3,7)	Появилась трещина и небольшой откол на торце
5	110	35,0	600 (6,0)	Образец не разрушился
6	110	34,5	710 (7,1)	Образец разрушился
7	115	36,1	750 (7,5)	Образец разрушился
8	120	37,6	850 (8,5)	Образец разрушился
9	125	39,3	820 (8,2)	Образец разрушился
10	130	40,8	1200 (12,0)	Образец разрушился
11	470	147,6	1700 (17,0)	Образец разрушился
12	445	139,7	1720 (17,2)	Образец разрушился
13	560	175,8	2000 (20,0)	Образец разрушился

2.2. Эксперименты по изучению локализованного сдвига в ВВ на основе октогена

Опыты проведены при скоростях деформации $\dot{\epsilon} = 200\text{--}2500 \text{ с}^{-1}$ (скорость нагружения $V_{\text{нагр.}} = 4,8\text{--}50 \text{ м/с}$). Амплитуда нагружающих импульсов давлений составила $\sigma_i = 100\text{--}625 \text{ МПа}$ или усилий $P = (31,4\text{--}196,3) \cdot 10^3 \text{ Н}$. На рис. 4 приведено фото сборки со стержнями и обоймой, где размещен образец ВВ.

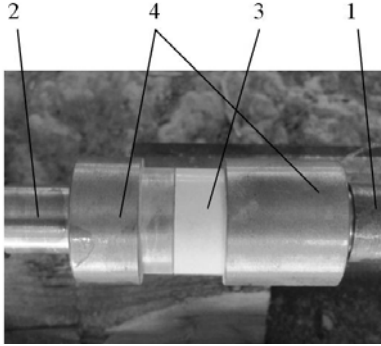


Рис. 4. Сборка со стержнями, вставленными в стальную обойму, где размещен образец ВВ: 1 и 2 – нагружающий и опорный стержни, 3 – образец, 4 – обойма (из двух частей)

В опытах при $\dot{\epsilon} = 200\text{--}550 \text{ с}^{-1}$ (скорость нагружения $V_{\text{нагр.}} = 4,8\text{--}10,0 \text{ м/с}$), также как в опытах на динамическое сжатие, взрывчатого превращения не происходило.

В экспериментах при $\dot{\epsilon} = 200\text{--}240 \text{ с}^{-1}$ образцы деформировались без разрушения, происходило небольшое выдавливание на $\sim 0,5\text{--}0,8 \text{ мм}$ одной части образца относительно другой, а также появление трещин в основном на образующей поверхности. На рис. 5 приведено фото диаметрального сечения одного из не разрушенных образцов.

Из рис. 5 следует, что разрушение образцов происходило под воздействием сдвиговых и осевых напряжений. При этом в процессе разрушения образца по полосе сдвига появляются трещины в поперечном направлении. По образцам была оценена ширина полосы сдвига, которая составляла $\sim 50\text{--}100 \text{ мкм}$.

В процессе нагружения полосы сдвига развились в трещины.



Рис. 5. Диаметральное сечение образца ВВ после опыта на локализованный сдвиг: опыт № 1, $P = 31,4 \text{ кН}$, $\dot{\epsilon} = 200 \text{ с}^{-1}$ ($V_{\text{нагр.}} = 4,0 \text{ м/с}$)

При $\dot{\epsilon} = 400\text{--}550 \text{ с}^{-1}$ ($V_{\text{нагр.}} = 8,0\text{--}9,0 \text{ м/с}$) наблюдалось разрушение образцов, при этом в процессе разрушения выдавливание одной части образца относительно другой происходило на сдвиговых деформациях. В целом характер разрушения образцов был хрупкий

Были проведены опыты и при более высоких скоростях деформации $\dot{\epsilon} = 1000\text{--}2500 \text{ с}^{-1}$ (скорость нагружения $V_{\text{нагр.}} = 20\text{--}50 \text{ м/с}$). Взрывчатого превращения в двух опытах при скоростях деформации $\dot{\epsilon} \sim 1000\text{--}1750 \text{ с}^{-1}$ (давление $275\text{--}430 \text{ МПа}$) не происходило, образцы разрушались. В трех опытах при скоростях деформации $\dot{\epsilon} \sim 2100\text{--}2500 \text{ с}^{-1}$ (давление $520\text{--}625 \text{ МПа}$) взрывчатое превращение происходило.

На рис. 6 приведены записи деформаций на стержнях Гопкинсона одного из опытов со взрывчатым превращением. Для наглядности записи ограничены и представлены только в первой волне, проходящей через тензодатчики 7 (см. рис. 1).

Из рис. 6 следует, что в этом опыте при взрывчатом превращении амплитуда возникающего давления составляет 715 МПа . Аналогичные записи наблюдались и в двух других опытах со взрывчатым превращением, где амплитуда возникающего давления составляла 815 и 710 МПа . В описанной постановке время от момента удара до начала взрывчатого превращения составляет $110\text{--}170 \text{ мкс}$.

В табл. 2 приведены результаты экспериментов.

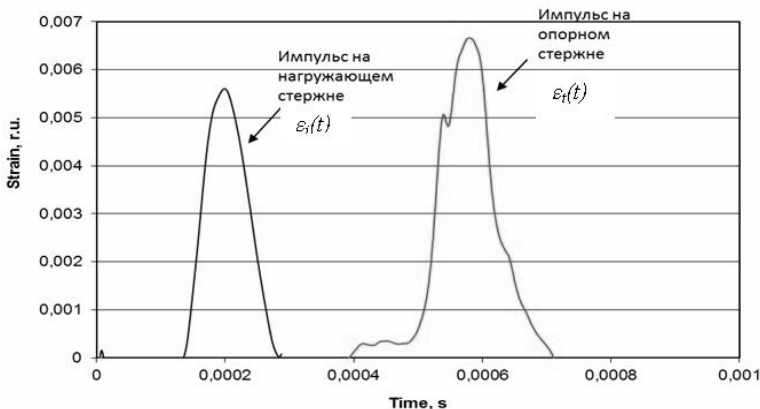


Рис. 6. Импульсы деформаций на стержнях Гопкинсона в одном из опытов со взрывчатым превращением

Результаты экспериментов по исследованию локализованного сдвига в ВВ из октогена

№ оп.	Давление нагружающего импульса, МПа	Усилие в нагружающем импульсе $\cdot 10^3$ Н	Скорость нагружения (стержня) м/с	Состояние образца	Амплитуда давления взрывчатого превращения, МПа
1	100	31,4	4,0	Выдавливание центральной части образца, трещины	–
2	110	34,5	4,8	То же	–
3	180	56,5	10,0	Разрушение образца	–
4	150	47,1	9,0	То же	–
5	130	40,8	11,0	То же	–
6	130	40,8	8,0	То же	–
7	275	86,3	20,0	То же	–
8	430	135,0	35,0	То же	–
9	625	196,3	50,0	Взрывчатое превращение	715
10	550	172,7	44,0	То же	710
11	520	163,3	40,0	То же	815

Полученные данные соответствуют широко применяемой теории о возникновении взрывчатого превращения. В отличие от постановки опытов на сжатие здесь ограничение деформирования образца в радиальном направлении (см. рис. 2) способствовало формированию локализованного сдвига и скольжению материала ВВ по границам микротрещин. Представленные экспериментальные данные будут полезны при разработке моделей инициирования взрывчатого превращения.

2.3. Эксперименты по изучению динамического сжатия ВВ на основе ТАТБ

Было проведено четыре опыта. Интервал скоростей деформации составил $\dot{\epsilon} = (2,2 \div 3,7) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ (скорость нагружения $V_{\text{нагр.}} = 22\text{--}37 \text{ м/с}$), амплитуды нагружающих импульсов давлений составили $\sigma_i = 275\text{--}540 \text{ МПа}$ или усилий $(86,4\text{--}169,6) \cdot 10^3 \text{ Н}$.

Во всех опытах происходило разрушение образцов на мелкие фрагменты размером 0,5–3,5 мм и пылеобразные частицы ВВ, часть которых осела на установке ССГ в области размещения образца. Часть фрагментов, образовавшихся в одном из опытов, приведена на рис. 7. В указанных условиях взрывчатого превращения не происходило.

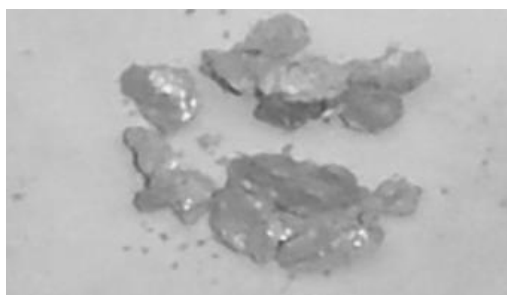


Рис. 7. Часть фрагментов образца из ВВ на основе ТАТБ после одного из опытов на динамическое сжатие

На рис. 8 приведены диаграммы «напряжение–деформация», построенные по результатам этих опытов.

Диаграммы динамического сжатия ВВ на основе ТАТБ в целом имеют вид, характерный для материалов, обладающих пластичностью. По сравнению с ВВ на основе октогена в близких условиях нагружения ВВ на основе ТАТБ обладает большей пластичностью: если в опытах деформация разрушения для ТАТБ составляет 3,0–7,5 %, то для ВВ на основе октогена она составляет 0,5–2,5 % (по средним значениям отличие составляет 3,5 раза). По имеющимся данным для ВВ на основе ТАТБ при статическом сжатии деформация разрушения тоже выше, чем для ВВ на основе октогена (~4,5 % против ~1,8 %, т. е. различие в 2,5 раза).

В табл. 3 приведены результаты экспериментов по сжатию ВВ на основе ТАТБ.

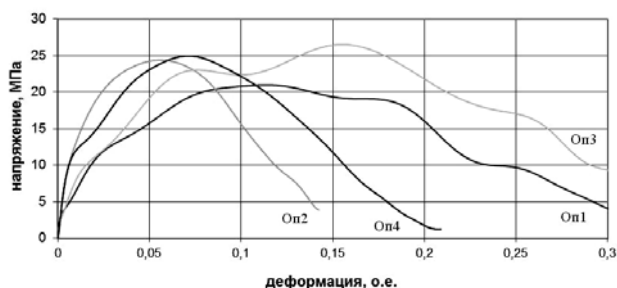


Рис. 8. Диаграммы «напряжение – деформация» σ - ϵ динамического сжатия ВВ на основе ТАТБ при $\dot{\epsilon} = 2200\text{--}3700 \text{ с}^{-1}$ ($V_{\text{нагр.}} = 22\text{--}37 \text{ м/с}$): Опыт 1 – $\dot{\epsilon} = 3500 \text{ с}^{-1}$, Опыт 2 – $\dot{\epsilon} = 2200 \text{ с}^{-1}$, Опыт 3 – $\dot{\epsilon} = 3700 \text{ с}^{-1}$, Опыт 4 – $\dot{\epsilon} = 2500 \text{ с}^{-1}$

Результаты экспериментов по исследованию динамического сжатия ВВ на основе ТАТБ

№ оп.	Давление нагружающего импульса, МПа	Усилие в нагружающем импульсе $\cdot 10^3$ Н	Скорость деформации, c^{-1} (скорость нагружения $V_{нагр}$, м/с)	Состояние образца
1	415	130,3	3500 (35,0)	Разрушение образца
2	275	86,4	2200 (22,0)	Разрушение образца
3	430	135,0	3700 (37,0)	Разрушение образца
4	540	169,6	2500 (25,0)	Разрушение образца

Из результатов опытов следует, что величина напряжения, при котором происходит разрушение образцов ВВ на основе ТАТБ, составляет 22–27 МПа, что меньше, чем для ВВ на основе октогена (60–80 МПа) в $\sim 2,5$ раза. Эти данные согласуются с данными для статического сжатия ВВ на основе ТАТБ и для ВВ на основе октогена (31 МПа против 58 МПа).

Относительно отсутствия взрывчатого превращения в ВВ на основе ТАТБ можно отметить следующее. Очевидно, в описанной постановке при скоростях нагружения 22–37 м/с энергии нагружения не хватало на формирование очагов взрывчатого превращения, происходила диссипация энергии в процессе деформирования образца без образования локализованного течения. Далее происходило растрескивание образца и его разрушение на мелкие фрагменты и пылеобразные частицы. Это коррелируется с данными [10], где взрывчатое превращение в ВВ на основе ТАТБ при его нагружении сферическим осколком массой 12гр. достигалось лишь при скоростях не ниже ~ 1000 м/с.

2.3. Эксперименты по изучению локализованного сдвига ВВ на основе ТАТБ

Проведено четыре опыта на образцах размерами $\varnothing 30 \times 20$ мм. Скорости нагружения составили $V_{нагр.} = 38,0\text{--}46,4$ м/с. Амплитуда нагружающих

импульсов давлений составила $\sigma_i = 450\text{--}555$ МПа или усилий $(141,6\text{--}174,6) \cdot 10^3$ Н. Взрывчатого превращения в опытах не происходило, образцы разрушались, разрушение носило вязкий характер. В трех опытах при $V_{нагр.} = 38,4\text{--}44,8$ м/с часть образца вдавливалась в полость опоры обоймы, а часть образца оставалась в корпусе обоймы (схема опоры и корпуса обоймы приведена на рис. 2). Характер разрушения в этих опытах виден на рис. 9.

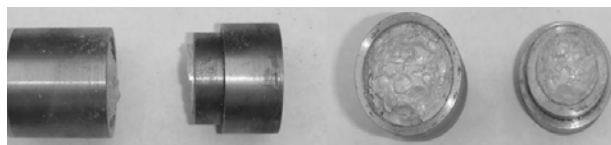


Рис. 9. Характер разрушения ВВ на основе ТАТБ при $V_{нагр.} = 38,4\text{--}44,8$ м/с

На рис. 10 для иллюстрации приведены типичные импульсы деформаций стержней, зарегистрированные в одном из опытов ($V_{нагр.} = 41,0$ м/с).

Известно, что импульс деформации на опорном стержне $\varepsilon_i(t)$ характеризует реакцию ВВ на динамическое нагружение. Исходя из этого, можно отметить следующее. По импульсу $\varepsilon_i(t)$ видно, что процесс деформирования и разрушения имеет сложный характер. После роста сопротивления ВВ сдвиговым

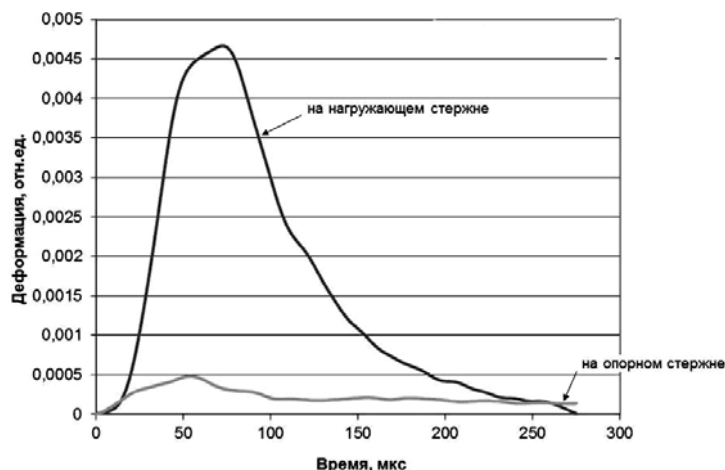


Рис. 10. Деформации, зарегистрированные на стержнях Гопкинсона в опыте при $V_{нагр.} = 41,0$ м/с

напряжениям и достижения максимума (за время 40–60 мкс) начинается разрушение образца. При этом рост сопротивления сдвиговым напряжениям имеет ступенчатый характер (см. рис. 10). Указанные особенности деформирования, по-видимому, связаны со значительной вязкостью ВВ и сложным характером диссипации энергии в узкой зоне деформирования (в зоне сдвига одной части образца относительно другой, смотри рис. 2). Сложный характер диссипации энергии, очевидно, обусловлен тем, что структура ВВ состоит из гранул и связующего материала, повышающего пластичность и вязкость ВВ. В табл. 4 приведены результаты опытов.

Взрывчатого превращения в ВВ на основе ТАТБ в описанных условиях нагружения не происходило, очевидно, по той же причине, что и в опытах на сжатие. Хотя локализованное течение материала и имело место, однако энергии нагружения не хватало на формирование очагов взрывчатого превращения и происходила лишь диссипация энергии в процессе деформирования образца.

Как отмечено выше, для возникновения взрывчатого превращения в ТАТБ необходима энергия нагружения сферическим осколком массой 12 гр. со скоростью ~1000 м/с [10], что составляет ~12 кДж. В опытах с ВВ на основе ТАТБ на локализованный сдвиг максимальная величина энергии составила лишь ~2 кДж (в опытах на сжатие максимальная величина энергии составила 3,5 кДж).

Заключение

1. По методу ССГ проведены эксперименты по изучению динамического сжатия двух ВВ на основе октогена и на основе ТАТБ в диапазоне амплитуд давлений нагружающих импульсов 45–560 МПа и скоростей деформации $\dot{\epsilon} = (250 \div 3700) \text{ с}^{-1}$. Получены диаграммы «напряжение – деформация» σ – ϵ .

В указанных условиях нагружения ВВ на основе ТАТБ в 3,5 раза пластичнее, чем ВВ на основе окто-

гена (в среднем 5,5 % против 1,5 %) и в 2,5 раза менее прочнее (в среднем 65 МПа против 26 МПа).

В опытах на сжатие ВП не выявлено, что, по-видимому, связано с разрушением образцов по макротрещинам без скольжения берегов трещин в случае с ВВ на основе октогена и диссипацией энергии в вязком материале без образования локализованного течения в процессе деформирования образцов ВВ на основе ТАТБ. В этих условиях энергии нагружения не хватало на формирование очагов ВП.

2. По модернизированному методу ССГ проведены эксперименты по исследованию локализованного сдвига в двух ВВ на основе октогена и на основе ТАТБ при скоростях нагружения 4,0–50 м/с и усилиях 100–625 кН.

В ВВ на основе октогена ВП проявлялось при скоростях нагружения 40–50 м/с. По зарегистрированным сигналам выявлены особенности инициирования ВП. В частности, пред началом ВП происходит деформирование образцов в течение 110–170 мкс, нагружающий стержень внедряется в образец на 5–6,5 мм, амплитуды давления взрывчатого превращения в опытах составили 710–815 МПа, что выше, чем амплитуды нагружающих импульсов. Последние перечисленные данные получены впервые.

Взрывчатого превращения в опытах с ВВ на основе ТАТБ не происходило, образцы разрушались, разрушение носило вязкий характер.

3. Полученные данные будут полезны в деятельности ЯОК, в частности для выработки критериев безопасности в аварийных ситуациях. Полезны они будут и для моделирования поведения ВВ при воздействии динамических нагрузок, а также для дальнейшей расчетно-теоретической разработки механизма развития взрывчатых превращений от очагов реакции, вызванных сдвиговыми деформациями с образованием трещин и скольжением материала ВВ по границе трещины.

Таблица 4

Результаты экспериментов по исследованию локализованного сдвига в ВВ на основе ТАТБ

№ оп.	Давление нагружающего импульса, МПа	Усилие в нагружающем импульсе *10 ³ Н	Скорость нагружения (стержня) м/с	Состояние образца
1	450	141,6	38,4	Разрушение образца (см. рис. 9)
2	505	158,6	41,0	Разрушение образца (см. рис. 9)
3	535	168,0	44,8	Разрушение образца (см. рис. 9)
4	555	174,6	46,4	Разрушение образца с отделением серединой части образца

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 // Сборник тезисов докладов XV Харитоновских Чтений, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013, С. 56.
2. Pushkov V. A., Abakumov A. I., Yurlov A. V., Kal'manov A. V., Sedov A. A. and Rodionov A. V. Response of HMX-based HE to low-velocity loading by steel cylindrical impactor. Proceedings of the AIP Conference, 1426, Part one, 2011, Pp. 418–421.
3. Abakumov A. I. et al. Numerical-experimental research of deformation of energetic materials in conditions of low-velocity loading in tests with split Hopkinson pressure bar. Proceedings of the IX Khariton's Readings. RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia, 2007, Pp. 215–226.
4. Chidester S. K., Tarver C. M., DePiero A. H., and Garza R. G. Single and multiple impact ignition of new and aged high explosives in the Steven impact test. AIP Conf. Proc. 505, 663–666 (2000).
5. Vandersall K. S. et al. Experimental and modeling studies of crush, puncture, and perforation scenarios in the Steven impact test. 12th Int. Det. Sym., 131–139 (2002).
6. Idar, D. J., et al. Low amplitude insult project: PBX 9501 high explosive violent reaction experiments. 11th Int. Det. Sym., 101–110 (1998).
7. Belov G. V. et al. Numerical simulation of experiments on the low-velocity impact on octogen-based HE using the explosive transformation initiation kinetics. Abstracts of 7th International Meeting on New Models and Hydrocodes for Shock Waves Processes in Condensed Matter. Estoril, Portugal, 2008, Pp. 37–38.
8. Джексон Р., Грин Л., Барлетт Р., Хоуфер У., Крамер П., Ли Р., Нидик-мл. Э., Шоу Л., Вейнгарт Р. Закономерности инициирования и распространения детонации во взрывчатом веществе ТАТБ // Сборник «Детонация и взрывчатые вещества». – 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. Pp. 539–542.
10. 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 // Сборник докладов XV Харитоновских Чтений, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. С. 111–118.