

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 662.215.5

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗРЫВООПАСНОСТИ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ МОЩНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

© 2019 г. Н. И. Акинин¹, А. В. Дубовик^{2*}, А. А. Матвеев¹

¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

²Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: a-dubovik@mail.ru

Поступила в редакцию 04.02.2019;

после доработки 11.03.2019;

принята в печать 20.03.2019

Приводятся экспериментальные результаты комплексных исследований чувствительности к механическим воздействиям и параметров детонации металлизированных взрывчатых составов на основе слабо флегматизированных октогена и гексогена. В качестве наполнителей использовались порошки титана, циркония, их гидридов и дейтеридов. Установлено, что введение указанных компонентов в количестве до 20 мас.% способствует некоторому возрастанию пожароопасности и чувствительности составов в обращении с ними. Оценки показывают, что наблюдаемое в ряде случаев возрастание параметров детонации смесей может быть связано с участием добавок в химических реакциях с продуктами взрыва во фронте детонационной волны.

Ключевые слова: удар, взрыв, детонация, взрывчатые составы.

DOI: 10.1134/S0207401X19080028

ВВЕДЕНИЕ

Задача увеличения фугасного и метательного действия взрыва имеет давнюю историю и традиционные методы решения. Одним из распространенных способов повышения энергетических свойств взрывчатых составов (ВС) является использование в них металлизированных компонентов. Как показано в ряде работ, обобщенных в работе [1], кинематические параметры детонационных волн при этом, как правило, снижаются, а чувствительность к механическим воздействиям возрастает. Тем не менее поиск новых компонентов активно проводится в надежде на положительный во всех отношениях результат [2, 3]. В данной работе рассматривается опыт использования микроструктурных порошков титана и циркония, их соединений с водородом и дейтерием в составах на основе окфола-3,5 и гекфола А-IX-1. Предполагается, что в результате протекания различных физико-химических превращений в детонационной волне освобождающиеся металлы и легкогазовые продукты, вступая в химические взаимодействия с продуктами детонации (ПД) и изменяя таким образом структуру фронтного потока, будут способствовать не только увеличению параметров детонации, но и общего действия взрыва. При этом особое внимание уделено вопросам безопасности в обращении с ме-

таллизированными ВС и практическом их использовании.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Формулы гидридов титана и циркония $TiH_{1,95}$, $ZrH_{1,92}$, а также их дейтеридов, $TiD_{1,95}$ и $ZrD_{1,84}$, установлены в Центре коллективного пользования РХТУ им. Д.И. Менделеева с помощью рентгенофазного анализа, а размер частиц (≈ 10 мкм) — методом сканирующей электронной микроскопии. Окфол-3,5 и гекфол А-IX-1 исследовались в состоянии поставки (размер частиц ~ 30 мкм). Испытания индивидуальных веществ и смесей проводились по приведенным ниже направлениям.

1. Исследование чувствительности к удару

В работе использовались лабораторные методы испытаний ВС на чувствительность к удару в приборе № 2 — метод критических давлений (КД) и метод критических энергий (КЭ), которые детально описаны в работах [4, 5]. В обоих методах удару на копре подвергаются спрессованные (давление — 0.3–0.5 ГПа) заряды ВС различной толщины h_0 . В методе КД определяются значения давления удара P_0 , при которых происходят первые акты разрушений зарядов ВВ (плохо воспро-

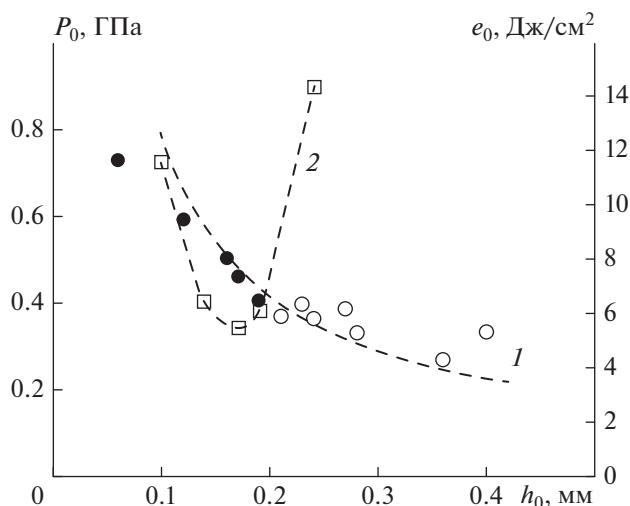


Рис. 1. Зависимости давления разрушения P_0 (кривая 1) и энергий инициирования $e_{кр}$ (кривая 2) окфола-3,5 от толщины зарядов h_0 .

изводимые взрывы при повторных разрушениях зарядов не учитываются), и отмечаются точками на графике зависимости $P_0(h_0)$. Критические условия инициирования ($P_0 = P_{кр}$, $h_0 = h_{кр}$), в которых наблюдаются переходы от простых разрушений зарядов к разрушениям со взрывом, наступают при толщине заряда, равной критической величине $h_{кр}$, индивидуальной для каждого ВС. Величины $P_{кр}$ и $h_{кр}$ связаны гиперболической зависимостью: $P_{кр} = \sigma_0(1 + 0.19 d/h_{кр})$, где d – диаметр ударника (ролика) и σ_0 – предел прочности зарядов ВС на сжатие ударом. В методе КЭ определяется (способом “вверх–вниз”) наименьшая для всех h_0 энергия удара $E_{кр} = MgH_{кр}$ (M – масса ударника (груза), g – ускорение свободного падения, $H_{кр}$ – критическая высота сбрасывания груза), при которой происходит инициирование ВС с частотой в 50% (учитываются взрывы при всех разрушениях зарядов). Это событие наступает приблизительно при той же толщине зарядов $h_{кр}$, что и в методе КД. В случае индивидуальных ВВ величины $P_{кр}$ и критической энергии инициирования $e_{кр} = E_{кр}/S$ ($S = \pi d^2/4$) связаны параболиче-

Таблица 1. Результаты определений показателей чувствительности к удару окфола-3,5 и его металлизированных составов (20%)

Добавка	$\sigma_{пр}$, МПа	$P_{кр}$, ГПа	$h_{кр}$, мм	$e_{кр}$, Дж/см ²
–	40	0.45	0.20	6.80
TiH _{1,95}	60	0.45	0.30	3.85
TiD _{1,95}	63	0.49	0.28	–

ской зависимостью: $e_{кр} = aP_{кр}^2$ ($a = S/K$, K – механическая жесткость копровой системы нагружения). Многокомпонентные ВС не всегда следуют этой зависимости.

На рис. 1 черными точками отмечены давления разрушений зарядов окфола-3,5 со взрывом, светлыми – без взрыва, по которым определяется величина $P_{кр} = 0.45$ ГПа. По минимуму на кривой зависимости $e(h_0)$ находится значение $e_{кр} = 6.8$ Дж/см². Результаты проведенных испытаний на чувствительность к механическим воздействиям окфола-3,5, А-IX-1 и их смесей с металлами и металлизированными добавками приведены в табл. 1 и 2. Точность определения показателей чувствительности в методах КД и КЭ по оценкам из работ [4, 5] не хуже 10%.

2. Исследование чувствительности к трению при ударном сдвиге

Для окфола-3,5, А-IX-1 и их металлизированных смесей проведено исследование чувствительности к трению при ударном сдвиге в соответствии с ГОСТ Р 50835-95 на маятниковом копре К-44-III. Метод сводится к построению кривой частот взрывов (X) зарядов ВС при различных давлениях их сжатия на прессе копра и определению на ней нижнего и верхнего пределов возбуждения взрывов ВС при быстром сдвиге. Обычно испытания проводят до тех пор, пока будет найден лишь нижний предел чувствительности – максимальное давление прижатия Π , при котором в 25 опытах не происходит ни одного взрыва. Оно принимается за критическое давление возбуждения взрыва ($\Pi = \Pi_{кр}$).

Экспериментальная зависимость частот взрывов от давления прижатия зарядов А-IX-1 представлена на рис. 2. По ней найдена величина критического давления инициирования трением при быстром сдвиге $\Pi_{кр} = 0.45$ ГПа. Результаты определения чувствительности к ударному сдвигу металлизированных составов на основе А-IX-1 приведены в табл. 2.

3. Измерение параметров детонации

Измерения скорости детонации D , массовой скорости продуктов взрыва U и давления детонации $P = \rho_0 DU$ проводились с помощью электромагнитной установки, снабженной цифровым осциллографом. Она позволяет фиксировать на экране персонального компьютера интервал времени прохождения детонационной волной заданного базового расстояния в заряде ВС и временной профиль $u(t)$ массовой скорости в детонационной волне (параметры установки и регистрирующих приборов подробно описаны в работе [6]). Датчик массовой скорости с длиной перекладки 5 мм и

шириной 3 мм изготавливался из алюминиевой фольги толщиной 0.12 мм. По оценкам из работы [6] точность определения параметров детонации в химпике и точке Чепмена–Жуге не хуже 5%.

На рис. 3 приведены осциллограммы записей профиля массовой скорости $u(t)$ в установившихся детонационных волнах в спрессованных (под давлением 1.0 ГПа) зарядах окфола-3,5 и его смесей с 20% титана, гидроксида и дейтерида титана (диаметр зарядов – 20 мм). Отметим, что в данных условиях опытов датчики скоростей фиксируют реальную картину течений только за время $t \leq 2$ мкс, поскольку при больших временах регистрации происходит разрушение датчика, который утрачивает П-образную форму вследствие воздействия на него волн боковой разгрузки. В табл. 3 представлены результаты обработки осциллограмм записей массовой скорости при детонации окфола-3,5, А-IX-1 и металлизированных смесей на их основе. Данные усреднены по 3–5 параллельным опытам.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Параметры механического инициирования

1.1. Как следует из представленных в табл. 1 результатов, величины $P_{кр}$ для всех исследованных составов на основе окфола-3,5 приблизительно одинаковы, поскольку во всех случаях взрывная реакция в них начинается с распада базового компонента ВС – октогена и полученные давления практически характеризуют его чувствительность в данных составах. Однако с введением в состав окфола 20% гидроксида или дейтерида титана прочность смесей увеличивается в 1.5 раза и, следовательно, величина $h_{кр}$ увеличивается также 1.5 раза. Заметим, что введение в состав окфола прочного компонента приводит к его сенсбилизации в смысле увеличения числа взрывов, включая взрывы при повторных разрушениях зарядов. В результате уменьшается величина $e_{кр}$. Опираясь на этот показатель, можно сделать вывод о несколько большей чувствительности к удару составов окфол/гидрид (дейтерид) титана по сравнению с чистым окфолом. Этот вывод подтверждается расчетом критической величины объемной энергии инициирования $W_{кр} = e_{кр}/h_{кр}$. Ее значения составили 0.13 Дж/мм³ для исследуемых составов и 0.34 Дж/мм³ для чистого окфола.

Представленные в табл. 2 данные по чувствительности А-IX-1 к удару и трению в целом согласуются с ранее опубликованными материалами по чувствительности этого ВС [7]. Несколько пониженная по сравнению с гексогеном величина $P_{кр}$ гекфола (0.67 ГПа в сравнении с 0.7 ГПа) объясняется слабой сенсбилизацией гексогена вследствие введения малого количества (5–6%) жировой добавки в состав А-IX-1, снижающей

Таблица 2. Результаты определения показателей чувствительности А-IX-1 и его металлизированных составов при ударе и трении

α , %	$\sigma_{пр}$, МПа	$P_{кр}$, ГПа	$h_{кр}$, мм	$P_{кр}/\sigma_{пр}$	$P_{кр}$, ГПа
0	51	0.67	0.16	13.1	0.45
+ Zr					
10	63	0.54	0.17	8.6	0.38
20	62	0.38	0.37	6.1	0.4
30	59	0.38	0.33	6.4	0.45
+ ZrH _{1.92}					
10	46	0.45	0.22	9.8	0.38
20	50	0.37	0.30	7.4	0.4
30	52	0.55	0.20	10.6	0.45
40	–	–	–	–	0.5
+ ZrD _{1.84}					
10	55	0.49	0.31	8.9	0.38
20	54	0.42	0.28	7.8	0.4
30	53	0.45	0.27	8.5	0.45

прочность гексогена с номинальных 82 МПа [4] до 51 МПа. Соответственно уменьшению σ_0 снижается значение $h_{кр}$ (для гексогена $h_{кр} = 0.25$ мм). Однако эффект снижения σ_0 в данном случае оказался более весомым по сравнению с уменьшением $h_{кр}$, чем и объясняется наблюдаемое снижение $P_{кр}$ [5]. Но сказанное отнюдь не свиде-

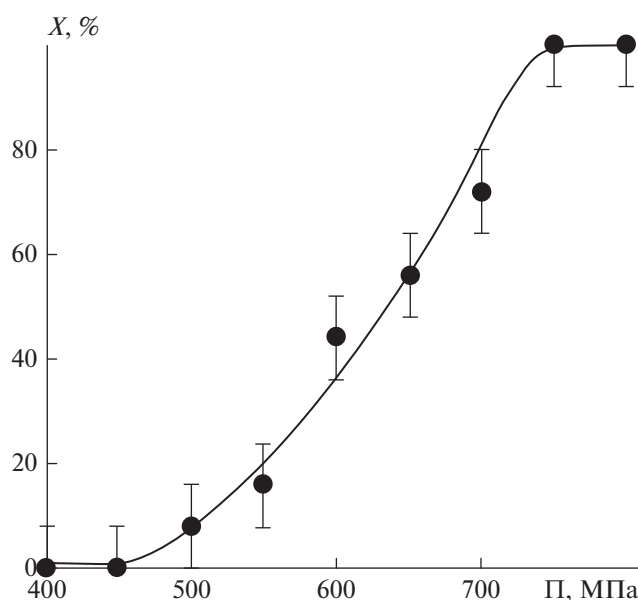


Рис. 2. Зависимость частоты взрывов X от давления прижатия зарядов А-IX-1. Верхний предел – $P_B = 750$ МПа, нижний – $P_{кр} = 450$ МПа.

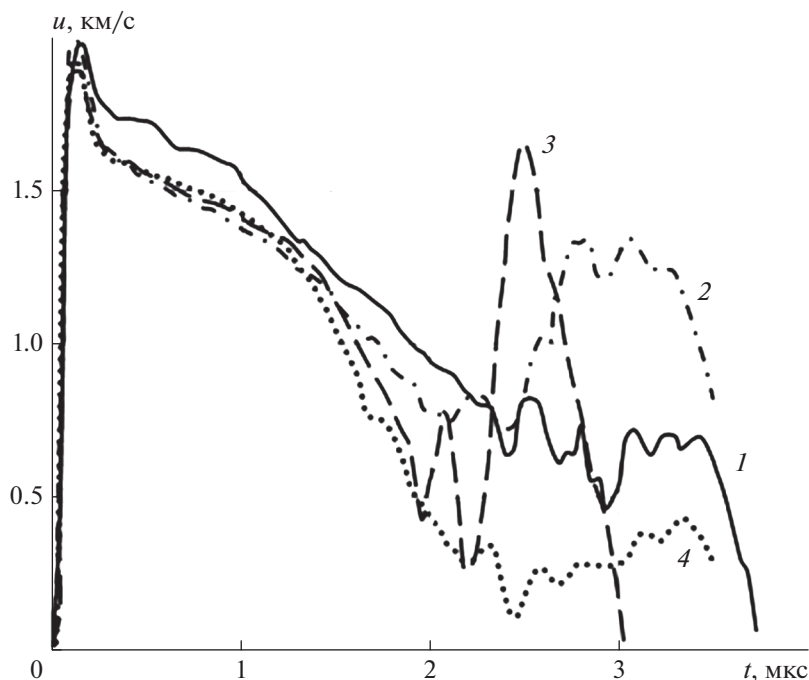


Рис. 3. Осциллограммы записи массовой скорости в заряде окфола-3,5 (1), его смеси с 20% титана (2), гидрида (3) и дейтерида титана (4).

тельствует об увеличении чувствительности А-IX-1 по сравнению с гексогеном, поскольку величина $P_{кр}$, характеризующая способность к возбуждению взрыва, не учитывает способность ВС к развитию взрыва из очага инициирования, т.е. не учитывает второй составляющей механической чувствительности ВС. Именно указанная способность ВС к развитию взрыва, характеризующая значения критических диаметров горения и детонации, более выражена у гексогена, чем и объясняется его более высокая, по сравнению с А-IX-1, чувствительность в широком смысле определения этой характеристики ВС, т.е. с учетом возбуждения и развития взрыва при механических воздействиях.

Воспользуемся часто употребляемой [4] характеристикой чувствительности ВС к возбуждению взрыва при ударе — отношением $P_{кр}/\sigma_0$ (чем оно меньше, тем выше склонность к возбуждению взрыва) и проследим за изменением этой характеристики для смесей А-IX-1 с металлизированными компонентами в зависимости от величины α — содержания вводимой добавки. Из табл. 2 видно, что показатель $P_{кр}/\sigma_0$ для всех смесей имеет слабый минимум при $\alpha \approx 0,2$, который свидетельствует о некотором локальном увеличении чувствительности смесей к удару по сравнению с А-IX-1. Этого и следовало ожидать, поскольку малое введение в ВВ твердой высокопрочной добавки сенсibiliзирует его в опытах на чувствительность к удару вследствие

Таблица 3. Параметры детонации смесей на основе окфола-3,5 и А-IX-1 с металлизированными компонентами в количестве 20%

Состав	$\rho_{см}$, г/см ³	ρ_0 , г/см ³	D , км/с	U , км/с	P , ГПа	k	Q , МДж/кг	γ	E , МДж/кг
Окфол		1.75	8.51	1.93	28.6	3.42	3.72	1.87	5.58
+ Ti	1.96	1.72	7.94	1.94	30.3	3.10	3.97	1.66	5.84
+ TiH _{1,95}	1.96	1.75	8.16	1.88	30.0	3.34	3.58	1.82	5.35
+ TiD _{1,95}	1.96	1.76	8.18	1.91	30.7	3.28	3.73	1.78	5.56
А-IX-1		1.68	8.52	1.91	27.3	3.46	3.63	1.90	5.46
+ Zr	1.96	1.67	7.80	1.79	27.4	3.36	3.24	1.83	4.84
+ ZrH _{1,92}	1.91	1.64	7.67	1.74	25.5	3.41	3.04	1.87	4.55
+ ZrD _{1,84}	1.87	1.60	7.95	1.77	26.3	3.49	3.11	1.92	4.67

повышенного фрикционного разогрева ВС во время прочностного разрушения заряда (увеличивается поверхностная плотность пятен фрикционного контакта [4, 8]). С дальнейшим увеличением содержания инертного металлизированного компонента, обладающего высокой теплопроводностью, теплосодержание взрывчатой смеси снижается и его чувствительность к удару существенно уменьшается [9].

Как следует из табл. 2, отмеченный немонотонный ход зависимости $P_{кр}/\sigma_0(\alpha)$, как в целом и зависимости $P_{кр}(\alpha)$, коррелирует с зависимостью $\Pi_{кр}(\alpha)$. Здесь также имеет место минимум при $\alpha \approx 0.2$, свидетельствующий о локальном увеличении чувствительности ВС к трению. Происхождение этого минимума следует признать таким же, как и в опытах на чувствительность к удару. Он связан с влиянием двух конкурирующих факторов — увеличения тепловыделения вследствие возрастания эффективности трения и, с другой стороны, увеличения теплопотерь вследствие роста доли инертного компонента. Заметим также, что введение в А-IX-1 одинаковых количеств циркония, его гидрида и дейтерида практически не влияет на величины критических показателей инициирования смесей трением, физико-механические характеристики которых приблизительно одинаковы.

Отметим, что явное различие между значениями $P_{кр}$ и $\Pi_{кр}$ наблюдается только для самого состава А-IX-1. Указанное различие связано с особенностями в механизмах инициирования зарядов А-IX-1 при ударе и трении. В испытаниях на чувствительность к удару происходит прочностное разрушение заряда как целого. Запасенная в копровой системе нагружения упругая энергия удара, сбрасываемая за короткое время (≈ 10 мкс) в разрушающийся заряд с помощью серии волновых возмущений, трансформируется в тепло в разрушаемом заряде. Причем основную роль в инициировании взрыва играет внутреннее трение (пластичность, динамическая вязкость) в растекающемся заряде ВС. В испытаниях на быстрый сдвиг основную роль в инициировании взрыва играет длительное (≈ 100 мкс) внешнее трение между зарядом ВС и роликом-ползуном, причем прочностное разрушение заряда, вызванное ударом маятника копра по ролику-ползуну, также имеет значение, но не решающее.

1.2. В заключение этого раздела приведем факты, свидетельствующие об отсутствии химического взаимодействия между продуктами распада ВС и металлизированными компонентами при разрушении заряда от удара, и факты, доказывающие наличие взаимодействия между кислородом воздуха и выброшенными в него нагретыми при ударе металлизированными компонентами ВС.

1.2.1. Для получения конденсированных продуктов взрыва металлизированного ВС с целью их последующего рентгенофазного анализа проведены эксперименты по удару на копре в приборе № 1 (с затрудненным истечением вещества). Масса навески взрывчатой смеси в каждом эксперименте составляла 50 мг. Груз массой 10 кг сбрасывался на прибор с высоты 50 см. Конденсированные продукты взрыва после удара извлекали из прибора и проводили их рентгенофазовый анализ на монокристаллизованном $\text{Cu}(K_{\alpha 1})$ -излучении в камере “Huber Imaging Plate Guiner Camera”.

Со смесью окфола с гидридом титана проведено 10 опытов (масса навесок составляла 50 мг). Во всех из них наблюдались взрывы, сопровождавшиеся сильным звуковым эффектом и появлением яркого пламени (продукты взрыва истекают из узкого зазора (20 мкм) между роликами и муфтой прибора № 1). Результаты рентгенофазного анализа оставшихся в межроликовом промежутке прибора металлизированных продуктов взрыва показали, что их состав полностью идентичен исходному порошку гидрида титана с формулой $\text{TiH}_{1.971}$. Таким образом, при взрыве от удара гидрид титана действительно не реагирует с продуктами взрыва окфола, для которого он в энергетическом отношении является балластом. Аналогичные данные получены в опытах со смесью гекфола с гидридом циркония состава 80/20.

1.2.2. С помощью цифровой камеры Casio Exilim Pro Ex-F1 выполнена скоростная фоторегистрация процесса удара на копре по зарядам окфола и смесей на его основе. Видеосъемка со скоростью 1200 кадр/с проводилась с боковой поверхности роликовой сборки. На рис. 4 приведены серии кадров, на которых показана картина разлета продуктов разрушения и взрыва зарядов окфола-3,5 (рис. 4а) и смеси окфола с гидридом титана состава 80/20 (рис. 4б). Видно, что в случае взрыва окфола наблюдается лишь слабое свечение продуктов разрушения и взрыва заряда, окрашенное в розовый цвет флегматизирующим компонентом состава. Иная картина наблюдается в случае удара и взрыва заряда окфола с гидридом титана. На представленных кадрах видеосъемки последовательно видны выброс раскаленных металлизированных продуктов из межроликового пространства испытательного прибора и их яркое воспламенение на воздухе. Очевидно, что разогрев металлизированных компонентов смесей обусловлен исключительно их высокоскоростным трением на контактных поверхностях испытательного прибора вследствие механического разрушения заряда как целого.

2. Параметры детонации

Анализируя данные табл. 3, отметим некоторое снижение кинематических параметров дето-

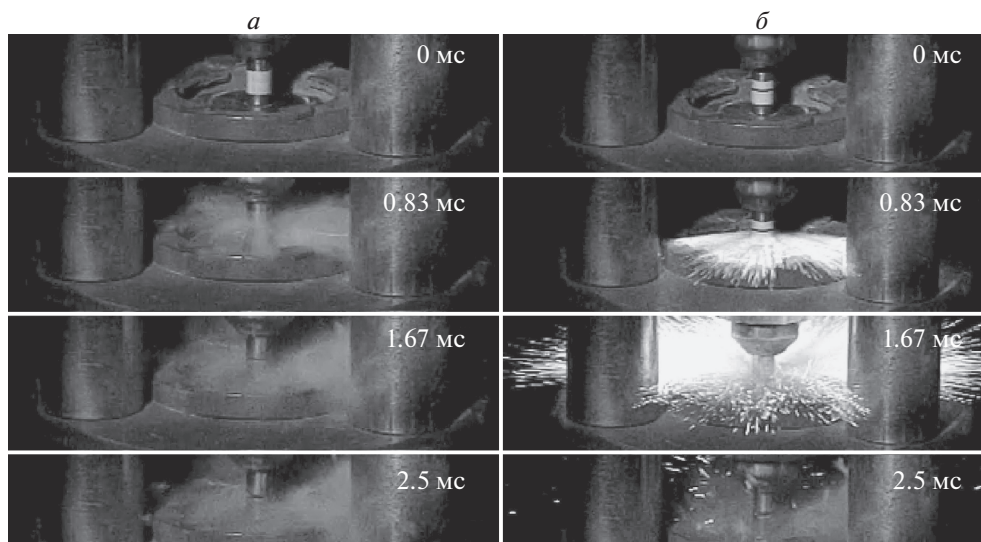


Рис. 4. Кадры регистрации удара по зарядам окфола (а) и его смеси (80/20) с гидридом титана (б). Цифра на кадрах — время в мс от начала удара.

рации ВС при введении в них 20% порошкообразных компонентов. Однако динамические параметры даже несколько возрастают. Это может быть связано как с увеличением плотности металлизированных составов, так и с протеканием химических реакций добавочных компонентов смеси с ПД базового ВВ. Для подтверждения последней версии обратимся к количественным оценкам величины максимального тепловыделения Q во фронте детонационной волны, выполненным по методу, разработанному в работах [10, 11]. Он основан на знании кинематических параметров детонации, по которым вычисляется показатель полноты продуктов $k = D/U - 1$. Далее с использованием аналитической связи тепловыделением $q(k)$ с параметром задачи k и коэффициентом Грюнайзена ПД, γ , определяется значение $\gamma(k)$, при котором величина q достигает максимума Q . Если Q смеси ($Q_{см}$) превышает Q базового ВВ (Q_0), то это означает, что добавка реагирует во фронте детонационной волны с тепловым эффектом. В противном случае она ведет себя как инертное тело. Заметим, что при использовании экспериментальных значений D и U в расчетах неявно учитываются все возможные потери энергии в детонационной волне.

Для корректного сравнения величин Q в смесях и в базовом ВВ необходимо, чтобы в обоих случаях заряды содержали одинаковое количество молей базового компонента. При этом достаточно, чтобы плотность заряда базы, ρ_0 , равнялась собственной плотности базового компонента в смеси, ρ_6 [1, 12]. Очевидно, что $\rho_6 < \rho_{см}$ ($\rho_{см}$ — плотность смеси). Результаты проведенных расчетов приведены в табл. 3. Из них следует, что корректные сравнения ука-

занных величин тепловыделений могут быть выполнены определенно со смесями на основе окфола ($\rho_6 \approx \rho_0$) и с некоторым приближением — на основе гекфола ($\rho_6 \leq \rho_0$). Тогда получается, что титан действительно реагирует с ПД окфола во фронте волны и вносит свой вклад в суммарное тепловыделение, смесь с $TiD_{1.95}$ демонстрирует некое пограничное состояние, а $TiH_{1.95}$ в данном приближении ведет себя в смеси как балласт. Как о балласте можно сказать о всех добавочных компонентах при детонации смесей на гекфоле. Возможно, что затраты энергии на диссоциацию молекул гидридов и дейтеридов столь значительны, что ограничивают их способность реагировать с ПД базовых ВВ во фронте волны.

В табл. 3 приведены значения внутренней энергии E продуктов детонации ВС, рассчитанные по методике, указанной в [10, 11]. Здесь также можно указать на вклад реакции Ti с ПД окфола в суммарное увеличение E смеси. Сравнивая полученные значения E с величинами Q , находим, что $Q/E \approx 2/3$. Это означает, что детонационное тепловыделение приблизительно равно тепловой компоненте внутренней энергии ПД. Представленные в табл. 3 значения E меньше calorimetric (фугасных) теплот взрыва ВС [3], поскольку в них не учитывается тепловыделение от экзотермических реакций, протекающих в зафронтном потоке детонационной волны. Для учета этих реакций необходимо знать состав продуктов распада базового ВВ и добавок, а также характер их взаимодействий между собой. Определить глубину превращения Ti на фронте волны также нельзя, поскольку для этого необ-

ходимо располагать уравнением взрывчатого разложения ВС.

Анализ осциллограмм на рис. 3 показывает, что в отличие от записей кривых зависимости $u(t)$ при детонации окфола, на записях аналогичных кривых при детонации смесей окфола с титаном, гидридом и с дейтеридом титана отчетливо наблюдается выпуклость кривых вверх в зафронтных потоках детонационной волны. Это свидетельствует о том, что в данных областях потоков, охваченных волнами тыловой (тэйлоровской) разгрузки (время регистрации $t \leq 2$ мкс), происходят активные физико-химические превращения с дополнительным тепловыделением. Они могут быть инициированы диссоциативными процессами в гидридах и дейтеридах с последующими высокоэнтальпийными реакциями синтеза оксидов и нитридов металлов с активным участием продуктов детонации ВВ. Не исключено, что образование легкогазовых продуктов, снижая среднюю мольную массу продуктов детонации ВС, способствует ускорению зафронтного потока. Очевидно, что протекание перечисленных реакций обусловлено сильным нагревом добавок во фронте детонации ВС. Указанные энергоемкие превращения в зафронтных потоках детонирующих ВС в целом способствуют увеличению их фугасного и метательного действия.

ВЫВОДЫ

1. Инструментальные исследования чувствительности к механическим воздействиям металлизированных смесей на основе окфола и гекфола показали, что наблюдаемые изменения показателей чувствительности ВС при введении в них добавочных компонентов объясняются изменением физико-механических характеристик получающихся композиций (прочность на сжатие, фрикционные параметры и пр.). Исследованные добавочные компоненты при ударе на копке не вступают в химическое взаимодействие с продуктами взрыва окфола и флегматизированного гексогена.

2. Разлетающиеся продукты разрушения и взрыва металлизированных зарядов смесевых составов при ударе представляют определенную пожароопасность для окружающих объектов и кон-

струкций, воспламеняясь при контакте с воздушной средой.

3. При исследовании параметров детонации металлизированных смесей с окфолом-3,5 и А-IX-1 установлено, что за исключением композиции окфол + 20% Ti добавочные компоненты в количестве до 20% не реагируют во фронте волны, но проявляют себя в структуре зафронтного потока и тем самым способствуют увеличению фугасного и метательного действия взрыва.

Научно-исследовательская работа выполнена за счет субсидии, выделенной ИХФ РАН на выполнение государственного задания по теме 0082-2014-0012 “Фундаментальные исследования процессов превращения энергоемких материалов и разработка научных основ управления этими процессами” (номер госрегистрации АААА-А17-117040610346-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика взрыва / Под ред. Орленко Л.П. В 2-х т. Т. 1. М.: Физматлит, 2002.
2. Губин А.С., Акинин Н.И., Давыдов В.Ю. и др. // Успехи в химии и хим. технологии. 2014. Т. 28. № 1. С. 57.
3. Махов М.Н. // Горение и взрыв. Вып. 8 / Под ред. Фролова С.М. М.: Торус Пресс, 2015. № 2. С. 256.
4. Афанасьев Г.Т., Боболев В.К. Инициирование твердых ВВ ударом. М.: Наука, 1968.
5. Дубовик А.В. Чувствительность твердых взрывчатых систем к удару. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2011.
6. Акинин Н.И. Снижение взрывоопасности мощных энергоемких материалов. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2005.
7. Энергетические конденсированные системы. Справочник / Под ред. акад. Жукова Б.П. М.: Янус-К, 2000.
8. Боуден Ф., Иоффе А. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких ВВ. М.: Инлитиздат, 1955.
9. Дубовик А.В., Понафидин Р.В. // Горение и взрыв, 2018. Т. 11. № 4. С. 68.
10. Дубовик А.В. // Взрывное дело. 2018. № 119/76. С. 107.
11. Дубовик А.В. // Там же. № 121/78. С. 78.
12. Анискин А.И., Шведов К.К. // Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах, 1978. Черноголовка: ИХФ РАН. С. 26.