

УДК 541.126.2

## О МЕХАНИЗМЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ БРИЗАНТНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Ю. В. Шейков, С. М. Батьянов, О. Н. Калашникова, О. М. Луковкин,  
Д. В. Мильченко, С. А. Вахмистров, А. Л. Михайлов

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Институт экспериментальной газодинамики и физики взрыва  
607190 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

Ряд исследований физико-химических процессов, происходящих при воздействии лазерного импульса в наноразмерном алюминии и в алюминизированных взрывчатых веществах (ВВ) на основе высокодисперсных тэна и бензотрифуроксана, и выполненные оценки влияния алюминия на динамику развития взрывчатого превращения в этих ВВ позволили сделать выводы о возможном механизме инициирования алюминизированных ВВ лазерным импульсом. Полученные расчетные и экспериментальные результаты показывают, что основным источником горячих точек, способных вызывать взрывчатое превращение в алюминизированных ВВ под воздействием лазерного импульса, может быть волна сжатия, образующаяся в результате быстрого испарения достаточного количества частиц алюминия. Экспериментально показано, что для инициирования лазерным импульсом алюминизированных ВВ на основе высокодисперсных гексогена и октогена не потребуется более мощного источника лазерного импульса, чем в случае с тэном и бензотрифуроксаном.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, лазерное инициирование, волна сжатия, детонация, тэн, бензотрифуроксан, гексоген, алюминий.

DOI 10.15372/FGV20180508

### ВВЕДЕНИЕ

Все рассматриваемые на сегодняшний день в литературных публикациях механизмы возбуждения взрывчатого превращения в бризантных взрывчатых веществах (ВВ) под действием лазерного импульса (ЛИ) предполагают его зарождение в локальных областях малого размера, что в конечном итоге сводится к общепринятому очаговому механизму. Отличия имеют место при описании механизма формирования очагов.

В литературе описаны два основных механизма формирования очагов в ВВ под воздействием ЛИ: механизм селективного фотоиницирования и тепловой микроочаговый механизм.

Механизм селективного фотоиницирования предполагает возбуждение молекул ВВ под действием ЛИ с их последующей фрагментацией (фотодиссоциация). Такой механизм, по-видимому, преобладает при инициировании тэна излучением неодимового лазера на первой гармонике (длина волны 1064 нм) [1–7].

Пороговая плотность энергии инициирования тэна неодимовым лазером составляет  $H_{thres} \approx 90$  Дж/см<sup>2</sup> [8–10]. В экспериментах, проводившихся ранее во ВНИИЭФ с высокодисперсным ВВ тэном, полученным методом термовакuumной перекристаллизации, зарегистрированы пороги инициирования неодимовым лазером на уровне  $30 \div 40$  Дж/см<sup>2</sup> [11]. Существенный разброс в результатах этих двух групп экспериментов определяется, по-видимому, различием условий проведения эксперимента. В частности, в [12] было показано, что ВВ, переработанные методом термовакuumной перекристаллизации, обладают более высокой детонационной способностью.

Механизм теплового микроочагового инициирования рассматривается в качестве основного при инициировании бризантных ВВ со светопоглощающими включениями. Считается, что такие включения являются компонентами взрывчатого состава, поглощающими энергию ЛИ и передающими ее в ВВ в виде теплового импульса [13]. В работах [8–10] для тэна с добавками карбидов Ni—C и Al—C с размером частиц  $\approx 100$  нм пороговая плотность энергии инициирования составила  $H_{thres} \approx 5$  Дж/см<sup>2</sup>,

©Шейков Ю. В., Батьянов С. М., Калашникова О. Н., Луковкин О. М., Мильченко Д. В., Вахмистров С. А., Михайлов А. Л., 2018.

а для тэна с добавками Al с размером частиц  $\approx 200$  нм —  $H_{thres} \approx 1.4$  Дж/см<sup>2</sup> [14]. В проведенных во ВНИИЭФ экспериментах для тэна и бензотрифуроксана (БТФ) с добавкой Al со средним размером частиц 50 нм пороговые плотности энергии инициирования ЛИ не превышали 1 Дж/см<sup>2</sup> [15].

Как видим, в рассмотренных примерах смена механизма инициирования дает десятикратный энергетический эффект. Кроме того, металлический алюминий и другие изученные светопоглощающие добавки существенно различаются по эффективности использования. Значительное снижение пороговой плотности энергии инициирования при воздействии ЛИ на ВВ с добавками алюминия по сравнению с ВВ, содержащими другие светопоглощающие добавки, наводит на мысль о том, что в каждом случае протекание приводящих к инициированию взрыва физико-химических процессов имеет свои особенности.

Разработанная во ВНИИЭФ лабораторная технология приготовления алюминизированных ВВ, основанная на смешивании компонентов в жидкой среде с использованием ультразвукового диспергатора [16], обеспечивает высокую степень однородности распределения компонентов. Приготовление алюминизированных ВВ по такой технологии позволило провести ряд исследований физико-химических процессов, происходящих в алюминизированных ВВ на основе тэна и БТФ при воздействии ЛИ, и оценить влияние наноразмерного алюминия на динамику развития взрывчатого превращения в ВВ. На основе полученных результатов сделаны выводы о возможном механизме формирования очагов при инициировании алюминизированных ВВ лазерным импульсом.

Объектами исследования были алюминизированные ВВ на основе высокодисперсных тэна, БТФ, гексогена и октогена. Средний размер частиц Al составлял  $50 \div 200$  нм.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проводили на лабораторной лазерной установке (рис. 1) с использованием твердотельного импульсного лазера на неодиме с энергией  $\approx 0.3$  Дж, длиной волны излучения 1064 нм, длительностью импульса  $\approx 6$  нс (изготовитель НИИ «Полус», Москва). Для исследования взаимодействия ЛИ с наноалюми-

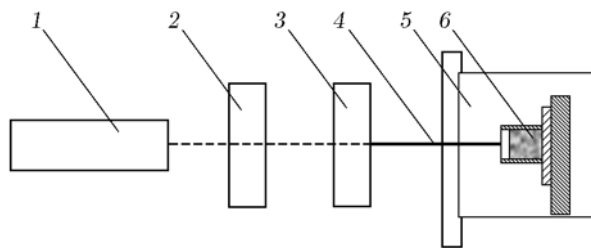


Рис. 1. Схема лабораторной лазерной установки:

1 — лазер, 2 — плавный attenuator, 3 — система ввода ЛИ в оптоволокно, 4 — оптоволокно, 5 — защитная камера, 6 — мишень

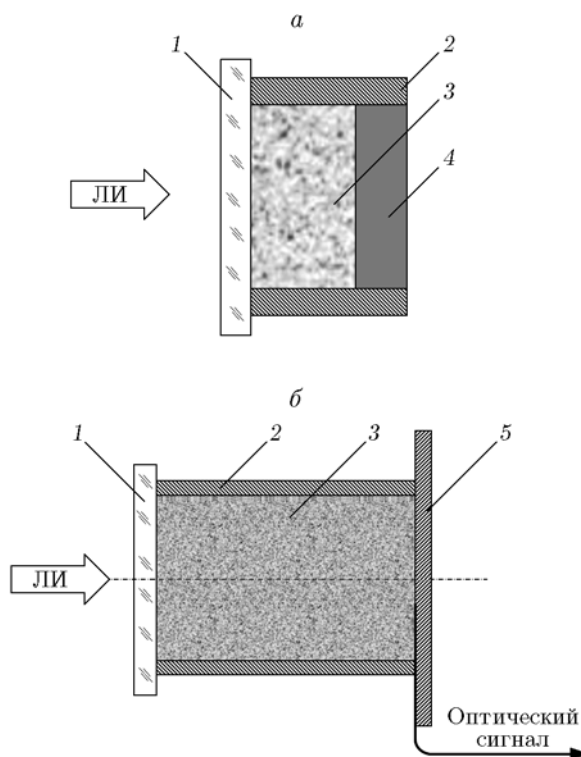


Рис. 2. Схема экспериментальных сборок по исследованию взаимодействия ЛИ с нанодисперсным порошком алюминия (а) и алюминизированными ВВ (б):

ЛИ — лазерное излучение, 1 — кварцевое стекло, 2 — алюминиевая трубка  $\varnothing 5$  мм, 3 — нанодисперсный порошок алюминия (а) или алюминизированное ВВ (б), 4 — подложка, 5 — пластина-свидетель

нием и алюминизированными ВВ использовались экспериментальные сборки, приведенные на рис. 2.

## РОЛЬ АЛЮМИНИЯ В ПРОЦЕССЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ ВЗРЫВЧАТОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

Расчетные оценки температуры, до которой нагревается наноразмерный Al в эксперименте, при воздействии ЛИ с плотностью энергии, близкой к порогу инициирования алюминизированных ВВ ( $0.5 \text{ Дж/см}^2$  — уровень отката,  $1 \text{ Дж/см}^2$  — уровень инициирования), выполняли с использованием изложенной в [13] модели, описывающей нагрев малых частиц Al в предположении, что коэффициент поглощения излучения алюминием составляет 0.3:

$$\delta T = Q_{abs}(r) \frac{Hr/4c_v}{rh + h^2 + r^2 + r^2/K^2}, \quad (1)$$

где  $T$  — температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $H$  — плотность энергии ЛИ,  $\text{Дж/см}^2$ ;  $Q_{abs}$  — коэффициент поглощения энергии излучения;  $r$  — радиус частицы металла, мм;  $c_v$  — теплоемкость ВВ при постоянном объеме,  $\text{Дж/см}^3$ ;  $h$  — толщина прогретого слоя, мм (величина  $h^2$  пропорциональна длительности импульса лазерного излучения);  $K = 3(c/c_1)$  — коэффициент, определяющийся отношением объемных теплоемкостей дисперсионной среды и Al.

В экспериментах по воздействию ЛИ на порошок Al со средним размером частиц  $50 \div 200 \text{ нм}$  (см. рис. 2,а) наблюдали признаки плавления и испарения исследуемого образца Al. Фотографии характерных результатов экспериментов показаны на рис. 3. Для сравнения приведена фотография образца до воздействия ЛИ (рис. 3,а).

Как видно на рис. 3,б,в, в образце после воздействия ЛИ можно выделить три зо-

ны. В центральной зоне, по-видимому, имело место испарение Al, о чем свидетельствует образование характерного «кратера», также наблюдаются зоны, где Al оплавился, что видно по изменению цвета и структуры, и где он остался без изменений. При снижении энергии ЛИ от уровня, при котором происходит инициирование алюминизированного ВВ ( $\approx 1 \text{ Дж/см}^2$ ), до уровня ниже порога его инициирования ( $\approx 0.5 \text{ Дж/см}^2$ ) площадь «кратера» от испарившегося алюминия уменьшается вдвое (примерно с  $0.04$  до  $0.02 \text{ см}^2$ ). При этом площади областей, где Al расплавился, практически не изменились ( $\approx 0.05 \div 0.06 \text{ см}^2$ ).

Расчет по формуле (1), проведенный при плотности энергии ЛИ  $\approx 1 \text{ Дж/см}^2$ , длительности ЛИ 6 нс, с учетом распределения плотности энергии по пятну облучения, исследованной ранее в работе [2], показал, что размеры области испарения Al соответствуют расчетной температуре на краях области  $2\,600 \div 3\,000 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (в центре области —  $5\,000 \div 6\,000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). На краях зоны плавления расчетная температура составляет  $650 \div 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Достижение таких значений температуры в алюминии должно неизбежно сопровождаться ростом давления и приводить к формированию волны сжатия.

Исследование зависимости пороговой плотности энергии ЛИ от массовой доли Al ( $m_{Al}$ ) в ВВ (схема эксперимента — рис. 2,б), представленной на рис. 4, показало, что при оптимизации содержания Al пороговая плотность энергии ЛИ, при которой происходит инициирование детонации в исследованных ВВ, находится в интервале  $0.6 \div 0.7 \text{ Дж/см}^2$ . Расчет температуры нагрева включений Al по формуле (1) с учетом теплопроводности

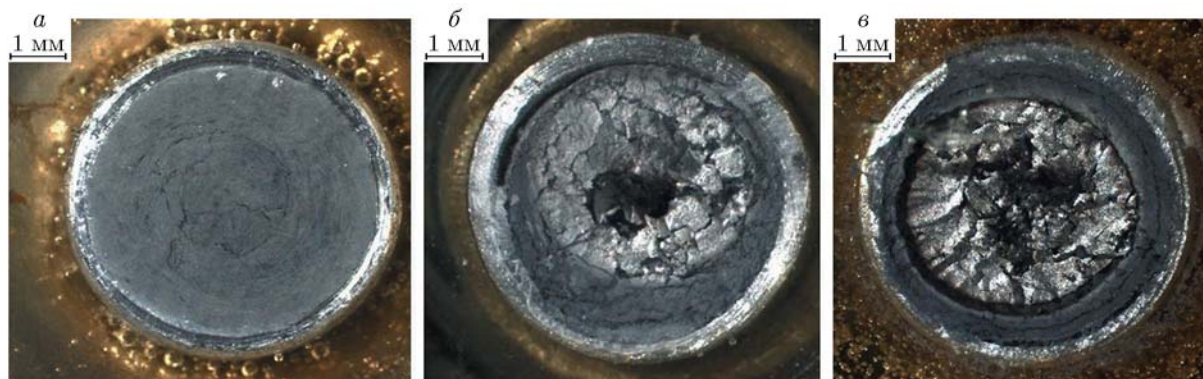


Рис. 3. Порошок алюминия со средним диаметром частиц  $50 \div 200 \text{ нм}$  до (а) и после воздействия на него через кварцевое стекло ЛИ с плотностью энергии  $\approx 0.5$  (б) и  $\approx 1 \text{ Дж/см}^2$  (в)

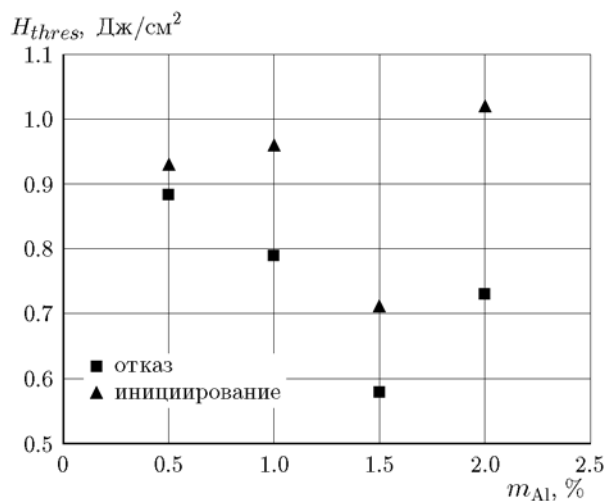


Рис. 4. Зависимость порогов инициирования и отказа при воздействии ЛИ на заряд из алюминизированного ВВ на основе БТФ от массовой доли Al в ВВ

и плотности заряда привел к заключению, что при этих значениях энергии температура частиц Al может достигать  $2500 \div 2800$  °С, что существенно выше температуры кипения.

Таким образом, логично предположить, что источником горячих точек, способных вызывать взрывчатое превращение алюминизированных бризантных ВВ, являются именно испарившиеся частицы Al и возникающая при этом волна сжатия. При этом вероятность перехода процесса в детонацию, по-видимому, определяется количеством испарившегося Al.

Анализ кинетики развития взрывчатого превращения в ВВ в такой же постановке при различном содержании Al (рис. 5) показал, что во всем исследованном диапазоне плотностей энергии ЛИ время работы заряда алюминизированных ВВ экспоненциально уменьшается с ростом плотности энергии. При этом с увеличением плотности энергии ЛИ выше  $\approx 2$  Дж/см<sup>2</sup> разница во времени работы зарядов ВВ для всех исследованных массовых долей Al уменьшается, и при плотности энергии более  $\approx 3$  Дж/см<sup>2</sup> время срабатывания ВВ с содержанием Al  $0.25 \div 3$  % при длине заряда 3 мм находится в диапазоне  $1.15 \div 1.25$  мкс. Таким образом, время работы заряда меняется менее чем на 10 % при изменении массовой доли Al практически на порядок.

Кроме того, получена оценка задержки детонации по результатам экстраполяции  $x-t$ -диаграмм работы зарядов ВВ, эта величина со-

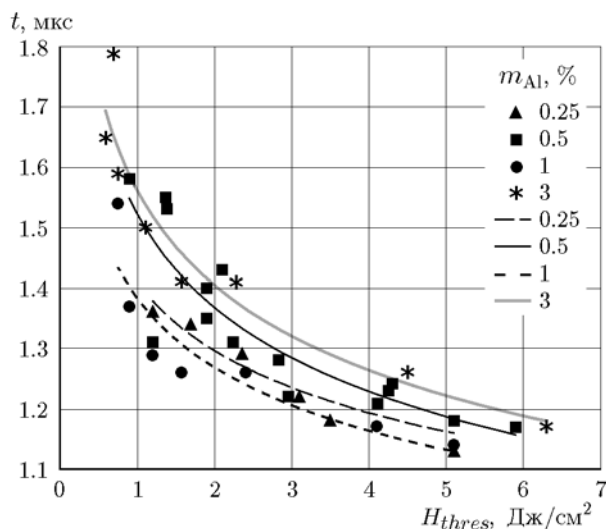


Рис. 5. Зависимость времени работы заряда алюминизированного ВВ на основе БТФ от плотности энергии ЛИ при различных массовых долях Al в ВВ

ставляет  $\approx 0.2 \div 0.6$  мкс.

Такие результаты практически исключают в данной постановке эксперимента доминирование механизма возбуждения взрывчатого превращения в алюминизированных ВВ под воздействием ЛИ за счет теплопередачи от частиц Al к ВВ, поскольку в таком случае время срабатывания заряда сильнее зависело бы от содержания алюминия, а задержка детонации составила бы более 1 мкс.

Следовательно, в проведенных экспериментах в качестве доминирующего механизма образования горячих точек при инициировании ЛИ алюминизированных ВВ следует рассматривать образование волны сжатия за счет быстрого испарения Al.

В случае справедливости такого предположения можно прогнозировать, что для инициирования ЛИ алюминизированных ВВ на основе термостойких бризантных ВВ менее чувствительных, чем тэн и БТФ, не потребуется существенно более интенсивного воздействия.

### ИНИЦИИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ ТЕРМОСТОЙКИХ АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Для сборок, аналогичных схеме на рис. 2, б, проведена оценка порогов инициирования ЛИ алюминизированных ВВ на основе высокодисперсных ВВ гексоген и октоген. Использовали порошок Al со средним размером частиц



Рис. 6. Внешний вид пластин-свидетелей после воздействия на мишень ЛИ, вызывающего инициирование алюминизированного ВВ

100 нм, показавший наилучшую эффективность в ранее проведенных исследованиях. Рабочую плотность алюминизированного ВВ в мишени обеспечивали виброуплотнением. Она составляла  $\approx 1 \text{ г/см}^3$ . Массовая доля алюминия была выбрана 1.5 %, исходя из ранее полученных результатов для смесей на основе высокодисперсных тэна и БТФ. За положительный результат принимали возбуждение в экспериментальном заряде детонации, о чем судили после воздействия ЛИ на мишень по состоянию пластин-свидетелей, внешний вид которых представлен на рис. 6. Полученные значения  $H_{thres}$ , обеспечивающие инициирование исследованных ВВ, приведены в табл. 1. Для сравнения в табл. 1 даны значения  $H_{thres}$  алюминизированных ВВ на основе тэна и БТФ в аналогичной постановке. Время работы заряда контролировали, оно составляло  $\approx 2 \div 3 \text{ мкс}$  (длина заряда  $\approx 5 \text{ мм}$ ).

Как видно из табл. 1, все исследованные ВВ имеют сравнимые пороги инициирования ЛИ (на уровне  $\approx 0.5 \div 1.0 \text{ Дж/см}^2$ ). Таким образом, впервые показана возможность создания светочувствительных алюминизированных ВВ на основе гексогена и октогена, обладающих близкой и даже большей чувствительностью

к ЛИ, чем рассматривавшиеся до настоящего времени ВВ тэн и БТФ.

Полученные экспериментальные результаты по чувствительности исследованных алюминизированных ВВ к ЛИ не коррелируют ни по одной из следующих характеристик соответствующих индивидуальных ВВ:

чувствительность к механическим воздействиям,

ударно-волновая чувствительность, термическая стойкость.

Одной из причин, влияющей на уровень чувствительности к ЛИ, по-видимому, является характер распределения наночастиц Al на поверхности кристаллов ВВ (рис. 7).

Хотя есть и ряд других особенностей, которые рассматриваются ниже, совершенно очевидно, что при применении в лазерных системах инициирования алюминизированных ВВ на основе бризантных ВВ, обладающих меньшей чувствительностью к механическим и ударно-волновым воздействиям, чем тэн и БТФ, источника ЛИ существенно большей мощности не потребуется.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как показали результаты расчетно-экспериментальной оценки температуры нагрева нанодисперсных порошков Al, при воздействии ЛИ с плотностью энергии, близкой к порогу инициирования алюминизированных ВВ ( $0.5 \div 1 \text{ Дж/см}^2$ ), источником горячих точек, способных вызывать взрывчатое превращение в них, являются испарившиеся частицы Al.

Если считать, что доминирует именно такой механизм, то хорошо объясняется характер зависимости пороговой плотности энергии ЛИ, вызывающей срабатывание заряда алюминизи-

Таблица 1  
Пороги инициирования алюминизированных ВВ лазерным импульсом

Алюминизированное ВВ на основе	$H_{thres}$ , Дж/см <sup>2</sup>
Тэн	0.8
БТФ	0.7
Гексоген	0.4
Октоген	1.0

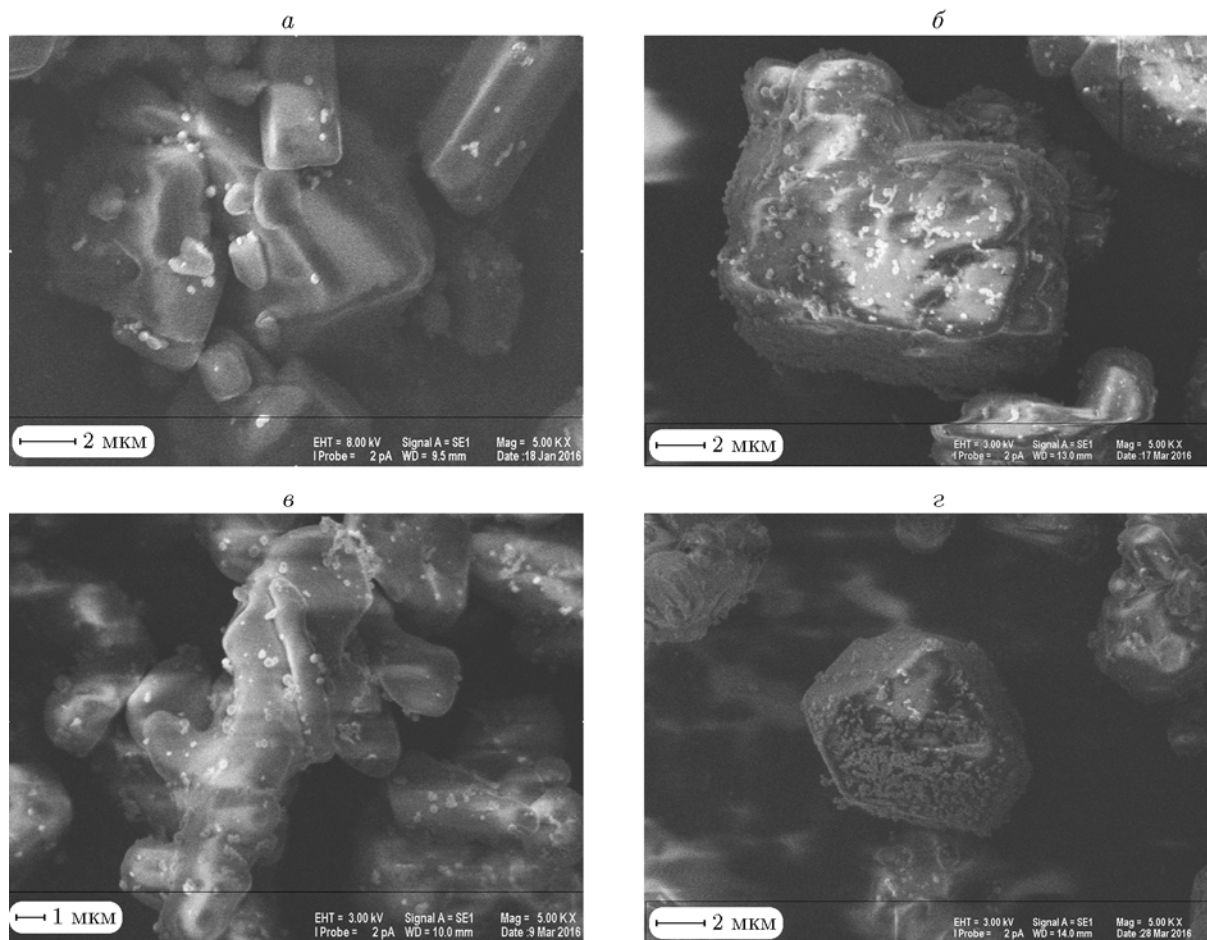


Рис. 7. Типичные электронные изображения образцов алюминизированных ВВ:  
*a* — на основе тэна, *б* — на основе БТФ, *в* — на основе гексогена, *г* — на основе октогена

рованного ВВ, от массовой доли Al.

При таком механизме возникновения взрывчатого превращения плотность пороговой энергии иницирования алюминизированных ВВ ограничена снизу необходимостью достижения температуры кипения достаточным количеством частиц Al и не может быть существенно ниже  $\approx 0.5$  Дж/см<sup>2</sup>, что и показали исследования  $H_{thres}$  алюминизированных ВВ с различными массовыми долями Al.

Для левой ветви экспериментальной зависимости, приведенной на рис. 4,  $H_{thres}$  уменьшается в обратной зависимости от концентрации Al, с ростом которой растет количество очагов разогрева.

При превышении оптимального значения массовой доли Al в ВВ образуются теплопроводящие «мостики» из частиц металла, вследствие чего увеличиваются тепловые потери (правая ветвь зависимости) и температура на-

грева частиц Al при заданной плотности энергии в ЛИ будет быстро падать. Пороговая плотность энергии в этом случае растет пропорционально массовой доле Al.

При этом, по-видимому, следует исключить доминирование механизма образования горячих точек за счет теплопередачи от частиц Al к ВВ, так как при этом задержка взрыва составляла бы более 1 мкс, а не  $\approx 0.2 \div 0.6$  мкс, как получено в экспериментах. В качестве причины малой задержки детонации при иницировании алюминизированных ВВ можно рассматривать возможность образования волны сжатия за счет быстрого (не более  $\approx 10$  нс) испарения большого объема Al. Результаты, показывающие, что испарение твердого вещества под воздействием лазерного излучения большой мощности может приводить к передаче импульса давления, известны давно. Так, при воздействии на ме-

таллические мишени излучения мощного лазера на неодимовом стекле с модулированной добротностью были получены пиковые давления в десятки килобар [15], при этом значения интенсивности ЛИ, обеспечивающего переход Al в низкоплотную плазму, приведенные в [15] ( $2.2 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>), соответствуют пороговым уровням воздействия, реализованным в наших экспериментах ( $\approx 0.8 \div 1.7 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>).

Отдельно следует остановиться на причинах, по которым более стойкое во всех отношениях ВВ гексоген проявляет более высокую чувствительность к ЛИ, чем тэн и БТФ.

Одной из причин, как было указано выше, является характер распределения наночастиц Al на поверхности кристаллов ВВ.

Следует также отметить, что хотя теплообмен между частицами Al и кристаллами ВВ, согласно представленным результатам, не является доминирующим источником возбуждения взрывчатого превращения, тем не менее в пределах длительности ЛИ он оказывает влияние на температуру, достигаемую в алюминии. Вследствие того, что алюминий теряет при этом часть тепловой энергии, его температура снижается, что и учитывается согласно формуле (1) при расчете коэффициента, определяемого отношением объемных теплоемкостей дисперсионной среды и Al. Возможно, по этой причине в случае с гексогеном, теплопроводность и температуропроводность  $\lambda$  которого меньше, чем у тэна и БТФ (табл. 2), достигается более высокая, чем в случае с этими ВВ, температура частиц алюминия и, как следствие, более высокие параметры возникающей волны сжатия и более низкий порог иницирования.

С другой стороны, если обратиться к механизмам иницирования с возбуждением электронных состояний, то, как отмечалось в [18] со ссылкой на расчеты электронной структуры гексогена, выполненные в [19], имеется возможность дополнительного локального сужения запрессованной зоны вблизи дислокаций при сжа-

тии в ударном фронте, которое может привести к повышению вероятности электронного возбуждения. Как следствие, возможно повышение под воздействием волны сжатия от испарившегося Al чувствительности самого гексогена к ЛИ.

## ВЫВОДЫ

Как показала расчетная оценка, основным источником горячих точек, способных вызывать взрывчатое превращение в алюминизированном ВВ под воздействием ЛИ, являются испарившиеся частицы Al и образующаяся при этом волна сжатия. Полученные экспериментальные результаты согласуются с выдвинутым предположением о быстром испарении Al под действием ЛИ как о необходимом условии возникновения взрывного превращения в алюминизированном ВВ. При этом, по видимому, следует исключить доминирование механизма образования горячих точек за счет теплопередачи от частиц Al к ВВ и рассматривать возможность образования волны сжатия за счет быстрого испарения достаточного количества Al. При таком механизме возникновения взрывчатого превращения плотность пороговой энергии иницирования алюминизированных ВВ ограничена снизу необходимостью достижения температуры кипения достаточным количеством частиц Al и не должна быть существенно ниже  $\approx 0.5$  Дж/см<sup>2</sup>.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бриш А. А., Галлеев И. А., Зайцев Б. Н., Сбитнев Е. А., Татаринцев Л. В. О механизме иницирования конденсированных ВВ излучением ОКГ // Физика горения и взрыва. — 1969. — Т. 5, № 4. — С. 475–480.
2. Волкова А. А., Зинченко А. Д., Санин И. В., Таржанов В. И., Токарев Б. Б. Временные характеристик иницирования тэна лазерным излучением // Физика горения и взрыва. — 1977. — Т. 13, № 5. — С. 760–766.
3. Быхало А. И., Жужукало Е. В., Ковальский Н. Г., Коломийский А. И., Коробов В. В., Рожков А. Д., Юдин А. И. Иницирование тэна мощным лазерным излучением // Физика горения и взрыва. — 1985. — Т. 21, № 4. — С. 110–113.
4. Таржанов В. И., Зинченко А. Д., Слобнов В. И., Токарев Б. Б., Погребов А. И., Волкова А. А. Лазерное иницирование тэна // Физика горения и взрыва. — 1996. — Т. 32, № 4. — С. 113–119.

Таблица 2  
Теплофизические характеристики  
исследуемых ВВ

ВВ	$c_p$ , Дж/(моль · К)	$\lambda$ , $10^{-2}$ Вт/(м · К)
Гексоген	277	10.6
БТФ	316.3	29
Тэн	529	25.8

5. Алукер Э. Д., Кречетов А. Г., Лобойко Б. Г. Влияние температуры на лазерное инициирование тетранитрата пентаэритрита // Хим. физика. — 2008. — Т. 27, № 5. — С. 67.
6. Алукер Э. Д., Кречетов А. Г., Митрофанов А. Ю., Нурмухаметов Д. Р., Тупицын А. В. Длительность предвзрывной стадии при лазерном инициировании тетранитрата пентаэритрита // Письма в ЖТФ. — 2009. — Т. 35, вып. 22. — С. 55–61.
7. Алукер Э. Д., Алукер Н. Л., Белокуров Г. М. Эффективность лазерного инициирования и спектры поглощения тэна // Хим. физика. — 2010. — Т. 29, № 1. — С. 49.
8. Адуев Б. П., Белокуров Г. М., Кречетов А. Г., Нелюбина Н. В., Нурмухаметов Д. Р. Исследование чувствительности механической смеси тетранитропентаэритрита и наночастиц Ni—C к инициированию взрыва импульсами лазера // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 1. — С. 68–72.
9. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р. Влияние добавок наночастиц монокарбида никеля на чувствительность тэна к лазерному воздействию // Хим. физика. — 2008. — Т. 28, № 11. — С. 50–53.
10. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р. Давление продуктов взрывного разложения смеси тэна и наночастиц монокарбида никеля при импульсном лазерном инициировании // Хим. физика. — 2010. — Т. 29, № 1. — С. 70–74.
11. German V. N., Fisenko A. K., Khokhlov N. P. Laser radiation induced detonation in HE samples produced by thermovacuum deposition // Life Cycles of Energetic Materials Proc., Fullerton, California, USA. — 1998. — P. 60–77.
12. Мильченко Д. В., Губачев В. А., Андреевских Л. А., Вахмистров С. А., Михайлов А. Л., Бурнашов В. А., Халдеев Е. В., Пятойкина А. И., Журавлев С. С., Герман В. Н. Наноструктурированные ВВ, получаемые методом осаждения из газовой фазы. Особенности структуры и взрывчатых свойств // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 96–101.
13. Кригер В. Г., Каленский А. В., Звекон А. А., Зыков И. Ю., Адуев Б. П. Влияние эффективности поглощения лазерного излучения на температуру разогрева включений в прозрачных средах // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 6. — С. 54–58.
14. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р. Влияние добавок ультрадисперсных частиц Al—C на чувствительность тэна к лазерному воздействию // Хим. физика. — 2011. — Т. 30, № 3. — С. 63–65.
15. Власова Е. В., Батьянов С. М., Шейков Ю. В., Вахмистров С. А., Седов А. А., Родионов А. В., Хворостин В. Н. Результаты исследования светочувствительных взрывчатых составов на основе ВВ БТФ и ВДТ с добавлением наноалюминия при воздействии лазерного излучения // XV Харитоновские тематические научные чтения: сб. тез. докл. — Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 56.
16. Способ изготовления светочувствительных взрывчатых составов и светодетонатор на их основе // Пат. РФ 2637016 от 15.12.2017.
17. Рэди Дж. Ф. Действие мощного лазерного излучения. — М.: Мир, 1974. — С. 210–212, 222.
18. Таржанов В. И. Предвзрывные явления при быстром инициировании бризантных взрывчатых веществ (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 6. — С. 3–11.
19. Kuklya M. M., Stefanovich E. V., Kunz A. V. An exitonic mechanism of detonation initiation in explosives // J. Chem. Phys. — 2000. — V. 112, N 7. — P. 65.

*Поступила в редакцию 20/IV 2018 г.*