- 2. В. Розинг, Ю. Харитон. Прекращение детонации взрывчатых веществ при малых диаметрах заряда //ДАН СССР. 1940.Т.26. № 4.С.360.
- **3.** Ю.Б. Харитон. О детонационной способности взрывчатых веществ. В сб. Проблемы химической кинетики, горения и взрывов. Вып. 1, М.-Л.:Изд.АН СССР, 1947, с.7-29.
- H.A. Jones. Theory of the dependence of the Rate of Detonation of Solid Explosives on the Diameter of the Charge // Proc. Roy. Soc.1947. A 189. P. 415- 426.
- 5. А.Н. Дремин, С.Д. Савров, В.Ф. Трофимов, К.К. Шведов. Детонационные волны в конденсированных средах. Москва, Наука, 1970, 164 с.
- 6. В.Ф. Трофимов, А.Н. Дремин. О структуре фронта неидеальной детонации в твердых ВВ // Физика горения и взрыва. 1971.Т.7. №3 С. 427-428.
- E.L. Lee, C.M. Tarver. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives // Phys. Fluids 23 (12). 1980. P. 2362-2372
- С.Г. Андреев. Оценка скорости детонации при диаметрах зарядов, близких к критическим. Инженерный журнал: наука и инновации, 2017, вып. 3. http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-3-1600
- 9. С.М. Караханов. С.А. Бордзиловский. Динамика изменения давления при инициировании сплава TГ/50/50 расходящейся ударной волной // Физика горения и взрыва. 1985.Т.7. №5 С. 97-104
- 10. С.Г. Андреев, И.А. Перевалов, М.М. Бойко, В.Ю. Клименко. Аналитическая модель неидеальной детонации цилиндрических зарядов. Конференция «Ударные волны в конденсированных средах».Санкт-Петербург.2008. С. 36-45
- И.Ф. Кобылкин, В. С. Соловьев, М. М. Бойко. Природа критического диаметра стационарной детонации в конденсированных ВВ // Труды МВТУ. 1982. №387- Механика импульсных процессов. С 13-22.

ИНИЦИИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ТЕРМОСТОЙКИХ ВВ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

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

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Введение

Все рассматриваемые на сегодняшний день в литературных публикациях механизмы возбуждения взрывчатого превращения в бризантных ВВ под действием лазерного излучения (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 имеющихся публикациях описаны два основных механизма формирования очагов в ВВ под воздействием ЛИ: селективное фотоинициирование и тепловой микроочаговый механизм.

Механизм селективного фотоинициирования предполагает возбуждение молекул ВВ под действием ЛИ с их последующей фрагментацией (т.н. фотодиссоциация). Такой механизм, повидимому, преобладает при инициировании ВВ тэн излучением неодимового лазера на первой гармонике (длина волны 1064 нм) [1]-[7]. Пороговая плотность энергии инициирования тэна неодимовым лазером 90 Дж/см² [8]-[10] В экспериментах, проводившихся ранее во ВНИИЭФ с высокодисперсными ВВ тэн и БТФ, полученными методом термовакуумного напыления, зарегистрированы пороги инициирования неодимовым лазером на уровне 30-40 Дж/см² [11].

Механизм теплового микроочагового инициирования рассматривается в качестве основного при BB светопоглощающими инициировании бризантных со включениями. Считается, что светопоглощающие включения являются компонентами взрывчатого состава, поглощающими энергию ΛV в момент воздействия ΛV и передающими ее в BB в виде теплового импульса [13]. В работах [8-10] для тэна с добавками карбидов Ni-C и Al-C с размером частиц 100 нм пороговая плотность энергии инициирования ЛИ составила ~ 5 Дж/см², а для тэна с добавками Al со средним размером частиц 200 нм [12] пороги инициирования ЛИ находились на уровне 1,4 Дж/см². В проведённых в ИФВ экспериментах для тэна и БТФ с добавкой Al со средним размером частиц 50 нм пороговые плотности энергии инициирования ЛИ составили ~1 Дж/см².

Как видим, в рассмотренных примерах смена механизма инициирования даёт примерно десятикратный энергетический эффект. Кроме того, имеет место существенная разница в эффективности использования металлического алюминия и всех других изученных светопоглощающих добавок. Энергетический эффект в этом случае составляет около половины порядка, что не может не наводить на мысль о наличии существенных особенностей при инициировании алюминизированных бризантных BB.

Разработка в ИФВ лабораторной технологии приготовления алюминизированных ВВ, основанная на смешивании компонентов в среде растворителя с использованием ультразвукового диспергатора, обеспечившая высокую степень однородности распределения компонентов, позволила физико-химических провести ряд исследований характера процессов, происходящих в алюминизированных ВВ на основе тэна и БТФ при воздействии ЛИ, и оценку влияния наноразмерного алюминия на динамику развития взрывчатого превращения в ВВ. Что, в свою механизме позволило сделать выводы 0 возможном инициирования очередь, ЛИ алюминизированных ВВ.

Экспериментальная база

Эксперименты проводили с использованием лабораторной лазерной установки (рисунок 1) на базе твердотельного импульсного лазера на неодиме с энергией ~ 0,3 Дж, длиной волны 1064 нм, длительностью импульса ~ 6 нс (изготовитель НИИ «Полюс» Москва).

Для исследования взаимодействия ЛИ с наноалюминием и алюминизированными ВВ, использовали экспериментальные сборки приведенные на рисунке 2.



Рисунок 1. Лабораторная лазерная установка



ЛИ - лазерное излучение; 1- кварцевое стекло; 2 - алюминиевая трубка Ø 5 мм;
3- нанодисперсный Al- порошок (а), или алюминизированное BB (б);
4 –подложка, 5 - пластинна-свидетель

Рисунок 2. Схема проведения экспериментов по исследованию взаимодействия ЛИ с нанодисперсным Al порошком (а) и алюминизированными BB (б)

Исследование роли алюминия при возбуждении и развитии взрывчатого превращения при инициировании ЛИ алюминизированных ВВ

Расчётные оценки температуры, до которой нагревается наноразмерный алюминий в эксперименте, при воздействии ЛИ с плотностью энергии, близкой к порогу инициирования алюминизированных ВВ (0,5 Дж/см² - уровень отказа, 1 Дж/см² - уровень иницирования) выполняли с использованием изложенной в [13] модели, описывающей нагрев малых частиц Al в предположении, что коэффициент поглощения излучения алюминием составляет 0,3:

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

где Т - температура °C; Н - плотность энергии лазерного импульса, Дж/см²; Q - коэффициент поглощения энергии излучения; r - радиус частицы металла мм; с - объёмная теплоёмкость BB, Дж/см³, h - толщина прогретого слоя, мм, h² пропорциональна длительности импульса лазерного излучения; K=3(c/c1) - коэффициент, определяющийся отношением объёмных теплоёмкостей дисперсионной среды и Al.

В результате экспериментов по воздействию ЛИ на порошок Al со средним размером частиц 50 - 200 нм наблюдали признаки плавления и испарения исследуемого образца Al. Фото характерных результатов экспериментов показаны на рисунке 3. Для сравнения приведено фото образца до воздействия ЛИ (рисунок 3а).



Рисунок 3. Порошок алюминия со средним диаметром частиц 50 - 200 нм до (а) и после воздействия на него через кварцевое стекло ЛИ с плотностью энергии ~ 0,5 Дж/см² (б) и ~ 1 Дж/см² (в)

Как видно на рисунках 3б и 3в, в образце после воздействия ЛИ можно выделить три зоны. В центральной зоне, по-видимому, имело место испарение Al, о чём свидетельствует образование

характерного «кратера», также видны зоны, где Al оплавился, что видно по изменению цвета и структуры, и остался без изменений. При снижении энергии импульса от уровня, при котором происходит инициирование модельного алюминизированного BB (~ 1 Дж/см²) до уровня ниже порога его инициирования (~ 0,5 Дж/см²) площадь «кратера» от испарившегося алюминия уменьшается вдвое (с ~ 0,04 см² до ~ 0,02 см²). При этом площади областей, где Al расплавился практически не изменились (~ 0,05 - 0,06 см²).

Расчет по формуле (1) проведенный при плотности энергии ЛИ 1 Дж/см², длительности ЛИ 6 нс, с учетом распределения плотности энергии по пятну облучения, исследованной ранее в работе [14] и при допущении, что коэффициент поглощения излучения алюминием составляет 0,3 независимо от размера частиц Al, показывает, что размеры области испарения алюминия соответствуют расчетной температуре на краях зоны 2600-3000 °C (в центре зоны – 5000-6000 °C), а на краях зоны плавления расчетная температура составляет 650-900 °C.

Исследования зависимости пороговой плотности энергии ЛИ от массовой доли Al в BB (рисунок 4) показывает, что минимальная пороговая плотность энергии ЛИ, инициирующая детонацию в исследованных BB находится в интервале 0,6 – 0,7 Дж/см². Расчет температур нагрева включений Al по (1), с учетом теплопроводности и плотности заряда показывает, что при этих значениях энергии температура частиц алюминия может достигать 2500-2800 °C, т.е. выше температуры кипения.



Рисунок 4. Зависимость порогов срабатывания и отказа при инициировании ЛИ заряда алюминизарованого ВВ на основе БТФ от массовой доли Al

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

Анализ кинетики развития взрывчатого превращения в ВВ при различных массовых долях Al, (рисунок 5) показывает, что во всём исследованном диапазоне плотностей энергии ЛИ время работы заряда модельных алюминизированных BB экспоненциально уменьшается с ростом плотности энергии. При этом с увеличением плотности энергии ЛИ выше 2 Дж/см² разница во времени работы зарядов BB при всех исследованных массовых долях Al уменьшается и для плотностей энергии более 3 Дж/см² время срабатывания BB с содержанием Al 0,25 – 3 % находится в диапазоне 1,15-1,25 мкс (длина заряда 5 мм). Оценка задержки детонации по результатам экстраполяции x-t диаграмм работы зарядов модельных BB показала, что эта величина составляет ~0,2 - 0,6 мкс. Это исключает в данной постановке механизм возбуждения взрывчатого превращения в алюминизированных BB под воздействием ЛИ за счёт теплопередачи от частиц Al к BB.





на основе БТФ от плотности энергии ЛИ при различных массовых долях Al Следовательно, в проведенных экспериментах в качестве доминирующего механизма образования горячих точек при инициировании ЛИ алюминизированных BB следует рассматривать образование волны сжатия за счёт быстрого испарения Al.

Инициирование ЛИ термостойких алюминизированных ВВ

Полученные расчётные и экспериментальные результаты показывают, что источником горячих точек, способных вызывать взрывчатое превращение в алюминизированных ВВ под воздействием ЛИ, может являться волна сжатия, образующаяся в результате быстрого испарения достаточного количества частиц Al. В случае справедливости такого предположения, можно прогнозировать, что для инициирования ЛИ алюминизированных ВС на основе термостойких бризантных ВВ менее чувствительных, чем тэн и БТФ не потребуется существенно более интенсивного воздействия.

На сборках, аналогичных, проведённым на рисунке 2(б) провели исследование порогов инициирования ЛИ алюминизированных ВВ на основе высокодисперсных ВВ гексоген и октоген. С учётом значения критического диаметра этих ВВ был увеличен диаметр облучаемой области. Использовали порошок алюминия со средним размером частиц 100 нм, показавший наилучшую эффективность в ранее проведенных исследованиях. Рабочую плотность алюминизированного ВВ в мишени обеспечивали виброуплотнением. Она составляла ≈ 1 г/см³. Массовая доля алюминия была выбрана 1,5%, исходя из ранее полученных результатов для смесей на основе ВДТ и БТФ. За положительный результат принимали возбуждение в экспериментальном заряде детонации, о чём судили после воздействия на мишень ЛИ по состоянию пластин–свидетелей, внешний вид которых представлен на рисунке 6. Полученные значения порогов плотности энергии ЛИ, обеспечивающей инициирование исследованных ВВ приведены в таблице 1, для сравнения в таблице 1 приведены значения пороговой плотности энергии инициирования ЛИ алюминизированных ВВ на основе тэна и БТФ в аналогичной постановке. Также контролировали время работы заряда, которое составляло ~ 2 - 3 мкс.



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

Таблица 1. Результаты исследований порогов инициирования ЛИ алюминизированных ВВ

Алюминизированное ВВ на основе	Пороговая плотность энергии инициирования ЛИ, Дж/см²
Тэн	0,8
БТФ	0,7
Гексоген	0,4
Октоген	1,0

Как видно из таблицы 1, все исследованные ВВ имеют сравнимые пороги инициирования ЛИ (на уровне ~ 0,5 - 1,0 Дж/см²). Впервые показана возможность создания лазерочувствительных 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:

- чувствительности к механическим воздействиям;
- ударно-волновой чувствительности,
- термической стойкости.

Следовательно, ведущий фактором, определяющим уровень чувствительности к ЛИ, повидимому, является характер распределения наночастиц Al на поверхности кристаллов BB (рисунок 7). Таким образом, при применении в лазерных системах инициирования, алюминизированных BC на основе термостойких BB, обладающих меньшей чувствительностью к механическим воздействиям, чем тэн и БТФ, не потребуется более мощного источника ЛИ.



Рисунок 7. Типичные электронные изображения образцов алюминизированных ВВ:

a) – на основе тэна; б) – на основе БТФ; в) – на основе гексогена;

г) – на основе октогена

Резюме

Разработана лабораторная технология приготовления ВВ, чувствительных к ЛИ, на основе бризантных ВВ и наноразмерного алюминия. Технология основана на смешивании компонентов в среде растворителя с использованием ультразвукового диспергатора и обеспечивает высокую степень однородности распределения компонентов.

Исследования по возбуждению детонации в этих ВВ ЛИ показало, что:

- источником горячих точек, способных вызывать взрывчатое превращение в алюминизированном ВВ под воздействием ЛИ являются испарившиеся под его действием частицы Аl. При этом, при инициировании детонации, по-видимому, следует исключить механизм образования горячих точек за счёт теплопередачи от частиц Al к BB и, в качестве доминирующего механизма, рассматривать возможность образования волны сжатия за счёт быстрого испарения достаточного объёма Al;
- пороговая плотность энергии ЛИ при инициировании детонации алюминизированых ВВ, на основе таких взрывчаток, как тэн, БТФ, гексоген, октоген близка и находится на уровне 0,5
 1 Дж/см². При этом чувствительность исследованных алюминизированных ВВ к ЛИ не коррелирует с их термической стойкостью, чувствительностью к механическим воздействиям и ударно-волновой чувствительностью, а определяется, по-видимому, характером распределения наночастиц Al на поверхности кристаллов BB.

Список литературы

1. А.А. Бриш, И.А.Галлеев, Е.А. Сбитнев О механизме инициирования конденсированных ВВ излучением ОКГ. ФГВ. 1969. Т5. №4 - с 474 - 480.

- 2. А.А.Волкова, А.Д.Зинченко, И.В.Санин Временные характеристики инициирования ТЭНа лазерным излучением. ФГВ. 1977. Т13. №5 с 760 - 766.
- 3. А.И. Быхало, Ж.В. Ужукало, Н.Г.Ковальский Инициирование тэна мощным лазерным излучением. ФГВ. 1985. Т21. №4. с 110 113.
- 4. В.И. Таржанов, А.Д.Зинченко, В.И. Сдобнов Лазерное инициирование тэна. ФГВ. 1996. Т32. №4. с 113 - 119.
- 5. Э.Д. Алукер, А.Г. Кречетов, Б.Г. Лобойко и др. Хим. физика. 2008. Т27. №5. 67с.
- 6. Э.Д. Алукер, А.Г.Кречетов, Д.Р. Нурмухаметов и др. Письма ЖТФ. 2009. ТЗ5. Вып. 22. 55с.
- 7. Э.Д. Алукер, Н.Л. Алукер, Г.М. Белокуров Хим. физика. 2010. Т29. №1. 49с.
- 8. Б.П. Адуев, Г.М. Белокуров и др. Исследование взрывной чувствительности механической смеси тэна и наночастиц Ni-C при инициировании взрыва импульсом лазера. ФГВ. 2009. Т.45. №1. с 68 72.
- 9. Б.П. Адуев, Д.Р. Нурмухаметов и др. Влияние добавок наночастиц монокарбида никеля на чувствительность тэна к лазерному воздействию. Хим. физика. 2008. Т.28. №11. с 50-53.
- 10. Б.П. Адуев Д.Р. Нурмухаметов и др. Давление продуктов взрывного разложения смеси тэна и наночастиц монокарбида никеля при импульсном лазерном инициировании. Хим. физика. 2010. Т.29. №1. с. 70-74.
- 11. V.N. German, A.K. Fisenko, N.P. Khokhlov. Laser radiation induced detonation in HE samples produced by thermovacuum deposition. 1998 Life Cycles of Energetic Materials Proceedings, Fullerton, California, USA, 1998 p.60-77.
- 12. Б.П. Адуев Д.Р. Нурмухаметов и др. Влияние добавок ултрадисперсных частиц Al-C на чувствительность тэна к лазерному воздействию. Хим. Физика. 2011. Т 30. №3. с63 65.
- 13. В.Г. Кригер, А.В. Каленский, А.А. Звеков, И.Ю. Зыков, Б.П. Адуев. Влияние эффективности поглощения лазерного излучения на температуру разогрева включений в прозрачных средах. ФГВ. 2012. Т.48. № 6. с.54 – 58.
- 14. А.А. Волкова, А.Д. Зинченко, И.В. Санин. Временные характеристики инициирования тэна лазерным излучением. ФГВ. 1977. Т13. №5 с 760 - 766.
- 15. Дж.Ф. Рэди. Действие мощного лазерного излучения. Мир, Москва, 1974, с.210 212.

ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫЙ ТЭН. ПРИНЦИП ГЛЕНСДОРФА-ПРИГОЖИНА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ В МОДЕЛИ "ДЕТОНАЦИЯ КАК ФАЗОВОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ"

И.В. Кузьмицкий

РФЯЦ ВНИИЭФ, Саров, Россия

Уточнены параметры детонации и произведены вычисления неполного выгорания в точке Жуге в рамках модели "Детонация как Фазовое Превращение" (ДФП). Получены параметры для устойчивой детонации при применении принципа Гленсдорфа-Пригожина с точкой Жуге [1-3] и с волновой скоростью *D*_Js, которая при применении констант уравнений состояний фракций ВВ и ПВ пластифицированного ТЭН'а (ПТЭН) на основе последних экспериментов ИФВ оказалась несколько выше обычно регистрируемой экспериментальной волновой скорости *D*_J ≈ 7.8 км/с для этого ВВ.

Приведена интерпретация этого результата как возможного стационарного состояния волны детонации для больших длин зарядов ПТЭН'а. Имеется в виду медленный рост волновой скорости детонации при увеличении длины образца ВВ.