

УДК 535.341,544.454

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ТЭНА С ВКЛЮЧЕНИЯМИ ЖЕЛЕЗА

Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, И. Ю. Лисков, Р. Ю. Ковалёв,
Я. В. Крафт

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, 650000 Кемерово
lesinko-iuxm@yandex.ru

В реальном масштабе времени измерены спектрально-кинетические характеристики свечения тэна с включениями наночастиц железа при лазерном инициировании взрыва (длина волны 1064 нм, длительность импульса 14 нс). Во время действия импульса лазерного излучения наблюдается свечение образцов, в микросекундном временном интервале происходит взрывчатое разложение. Методом спектральной пирометрии установлена тепловая природа взрывчатого свечения. Оценка температуры взрыва дала значение 3400 ± 100 К.

Ключевые слова: лазерное инициирование, тэн, продукты взрыва, спектральная пирометрия, стрик-камера.

DOI 10.15372/FGV20170313

ВВЕДЕНИЕ

Включение нано- и ультрадисперсных частиц металлов в состав тэна (тетранитропентаэритрита) снижает порог лазерного инициирования композитного материала в десятки раз [1–5]. Это открывает перспективу применения таких материалов в качестве детонаторов для штатных взрывчатых веществ, инициируемых лазерным излучением.

Ранее нами в работе [6] были исследованы пороги лазерного инициирования композита на основе тэна с включениями наночастиц железа размером 75 нм в максимуме распределения при инициировании первой (1064 нм) и второй (532 нм) гармониками YAG:Nd³⁺-лазера, работающего в режиме модуляции добротности. Определены критические плотности энергии излучения, соответствующие 50%-й вероятности взрыва: для первой гармоники $H_{cr} = 0.6 \pm 0.1$ Дж/см² при массовой концентрации включений 0.4 %, для второй гармоники $H_{cr} = 0.5 \pm 0.1$ Дж/см² при концентрации 0.15 %.

В настоящей работе проведены измерения спектрально-кинетических характеристик взрывчатого разложения таких же, как в [6], образцов при инициировании первой гармоникой лазера и определена температура продуктов взрыва методом спектральной пирометрии [7].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изготовления образцов использовался порошок тэна с узким гранулометрическим распределением. Размер зерен в максимуме распределения составлял $1 \div 2$ мкм. В качестве добавок применялся порошок железа с размером частиц 75 нм в максимуме распределения, изготовленный электровзрывным способом. Частицы железа были покрыты пленкой FeO толщиной ≈ 5 нм и устойчивы к дальнейшему окислению [6].

Методика подготовки смеси порошков и прессования экспериментальных образцов подробно описана в [3–5]. Образцы запрессовывались в отверстие диаметром 3 мм в центре медной пластины толщиной 1 мм. Плотность образцов после прессования $\rho = 1.7$ г/см³.

Для измерения спектра свечения, возникающего при взрыве образца в реальном масштабе времени, использовался спектрофотохронограф, основными элементами которого являются полихроматор, разлагающий свечение на спектральные составляющие, и фотохронограф ВЗГЛЯД-2А на базе электронно-оптического преобразователя (ЭОП), работающего в режиме линейной развертки (стрик-камера).

Схема установки представлена на рис. 1. Излучение лазера с помощью поворотного зеркала и линзы ($F = 25$ см) фокусируется на сборку с образцом. Сборка устроена следующим образом. Пластина с образцом помеща-

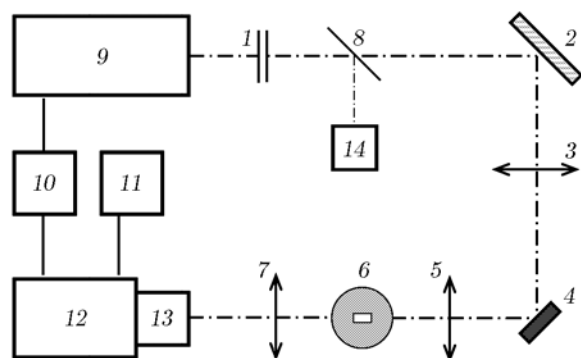


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки:

1 — нейтральные светофильтры, 2 — поворотное зеркало, 3 — линза (25 см), 4 — экспериментальная сборка с образцом, 5, 7 — линзы (10 см), 6 — пространственно-временная щель (на рисунке повернута на 90°), 8 — светоделительная пластина, 9 — импульсный Nd:YAG-лазер, 10 — блок синхронизации, 11 — компьютер, 12 — стрик-камера, 13 — полихроматор, 14 — фотодиод

лась на алюминиевую подложку и накрывалась со стороны облучения пластиной из оптического стекла толщиной 2 мм. На конструкцию накладывалась медная пластина с отверстием в центре для ввода излучения, которая плотно прижимала стеклянную пластину к поверхности образца с помощью винтов. Сборка располагалась под углом 45° к лазерному лучу и оптической оси измерительной схемы. В результате такой геометрии на образце формируется эллиптическое пятно с осями 2 и 2.8 мм, облучение медной пластины исключается.

Изображение образца с помощью линзы строится в плоскости щели. Щель размерами 0.1×0.2 мм определяет спектральное и временное разрешение регистрирующей системы 10 нм и 10 нс на используемой развертке стрик-камеры. Изображение пространственно-временной щели передается на вход полихроматора, который разворачивает свечение на спектральные составляющие. Полоска спектра шириной 0.2 мм попадает на фотокатод ЭОП фотохронографа. На выходном экране ЭОП спектр с помощью развертки фотохронографа разворачивается во времени. Световая матрица с выходного экрана ЭОП считывается ПЗС-матрицей и передается на запоминающее устройство в компьютер для последующей цифровой обработки. Запуск лазера и развертки стрик-камеры в соответствующие моменты времени осуществляется с помощью импульс-

ного генератора Г5-56.

Зарегистрированный сигнал представляет собой матрицу, вертикальные элементы которой позволяют построить спектр свечения образца в интервале длин волн $350 \div 750$ нм в определенный момент времени, а горизонтальные элементы — кинетику свечения образца на выбранной длине волны в пределах указанного выше спектра.

Восстановление истинного спектра люминесценции образцов проводилось методом эталонной лампы [8]. Использовалась лампа ТРШ 2850-3000. В режиме развертки регистрировался наблюдаемый спектр, по известной цветовой температуре можно рассчитать ее истинный спектр по формуле Планка (с учетом коэффициента серости вольфрама) и определить чувствительность оптического тракта в любой точке экспериментального спектра лампы. Для восстановления истинного спектра зарегистрированную интенсивность свечения образца нужно разделить на чувствительность тракта в соответствующих точках спектра в данный момент времени или в разные моменты времени на данной длине волны.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рис. 2 иллюстрирует кинетику свечения, которая сопровождается взрывчатое разложение образца при различных плотностях энергии лазерного излучения H . Первый пик свечения возникает в момент воздействия импульса лазера, когда образец еще находится в конденсированной фазе. Свечение в микросекундном диапазоне возникает в результате развития химической реакции и сопровождается взрывчатое разложение образца, т. е. происходит превращение конденсированной фазы в газообразные продукты.

Цель данной работы — установить природу свечения, возникающего на этапе взрыва. Спектры свечения в моменты времени $t = 0.7$ мкс (для кривых *a* и *b* на рис. 2) и $t = 3.5$ мкс (для кривой *b* на рис. 2) представлены на рис. 3. Интенсивность свечения монотонно нарастает в направлении длинноволновой области.

Природа свечения может быть связана с двумя процессами: неравновесным свечением возбужденных осколков молекул тэна, образующихся при взрыве, т. е. люминесценцией; равновесным (в данном случае — квазиравновесным) тепловым свечением продуктов взрыва в

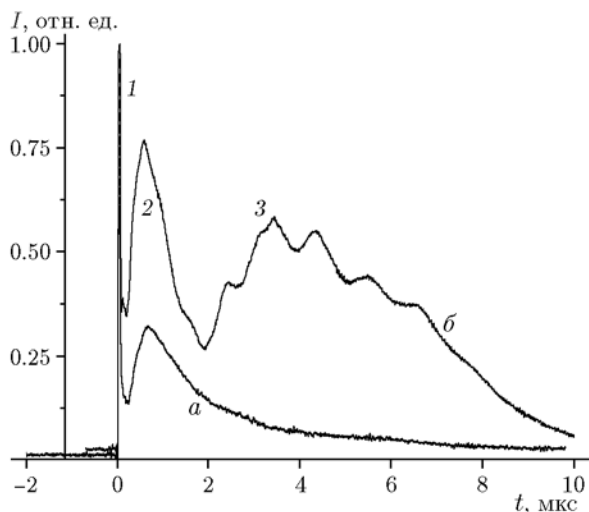


Рис. 2. Зависимость интенсивности свечения, возникающего при взрыве образца, от времени:

1 — пик свечения, возникающий в момент воздействия лазерного импульса, 2 — пик свечения в период времени $0.5 \div 0.8$ мкс, 3 — пики свечения в период времени $2 \div 10$ мкс; а — плотность энергии лазерного излучения $H = 0.7$ Дж/см², б — $H = 1.3$ Дж/см²

ходе экзотермической реакции. В общем случае в спектрах могут присутствовать оба вида свечения, если их вклады соизмеримы.

Для проверки принадлежности наблюдаемого свечения к тепловому можно воспользоваться методом спектральной пирометрии с применением координат Вина [7]. Спектральная интенсивность теплового излучения реального объекта описывается формулой Планка

$$I = \epsilon C_1 \lambda^{-5} / [\exp(C_2 / \lambda T) - 1], \quad (1)$$

где ϵ — степень черноты, λ — длина волны, $C_1 = 37\,418$ Вт · мкм⁴/см², $C_2 = 14\,388$ мкм · К. В области Вина при $C_2 / \lambda T \gg 1$ формулу (1) можно представить в виде

$$\ln(\lambda^5 I) - \ln(\epsilon C_1) = -C_2 / \lambda T. \quad (2)$$

Если по оси абсцисс взять значение $x = C_2 / \lambda$, а по оси ординат — $\ln(\lambda^5 I)$, в случае теплового свечения должен выполняться линейный закон. Причем по наклону прямой можно определить температуру светящегося тела [7].

На рис. 4 представлены спектры рис. 3 в координатах Вина. Линейность наблюдаемых спектров с большой вероятностью позволяет идентифицировать свечение, появляюще-

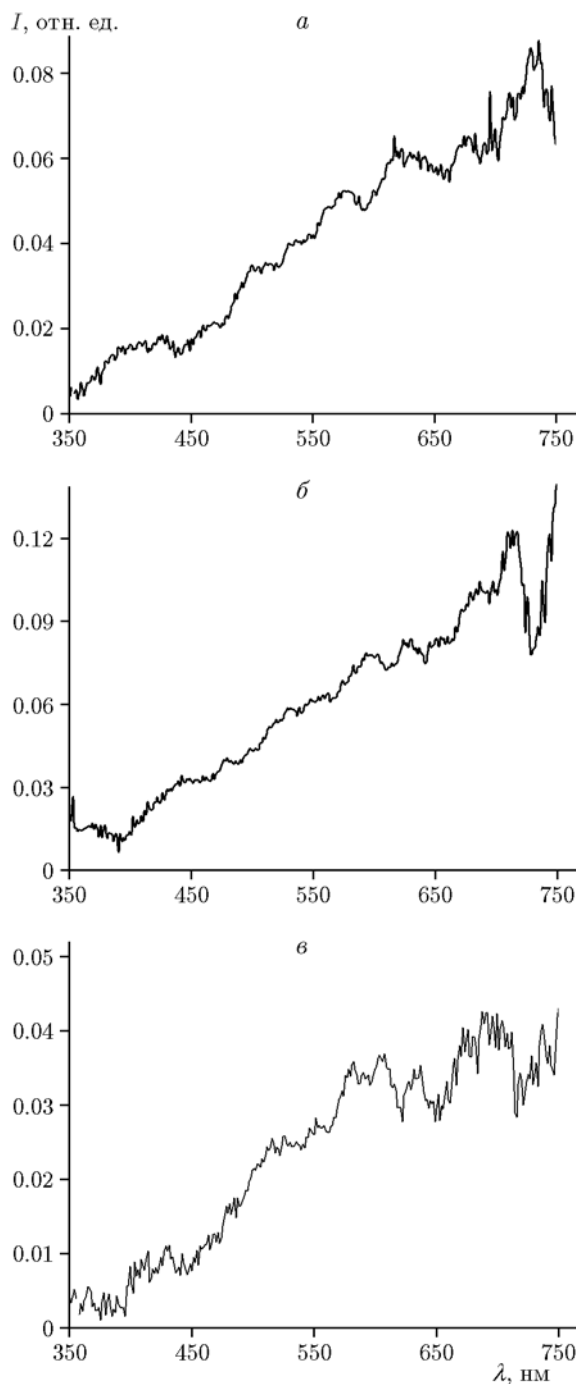


Рис. 3. Спектры свечения:

а — $t = 0.7$ мкс, $H = 0.7$ Дж/см²; б — $t = 0.7$ мкс, $H = 1.3$ Дж/см² (см. рис. 2); в — $t = 3.5$ мкс, $H = 1.3$ Дж/см² (см. рис. 2)

ся при взрыве образца, как тепловое. Определяемая по наклону прямой температура на участке спектра $430 \div 730$ нм равна $3\,400 \pm 100$ К для всех трех представленных спектров.

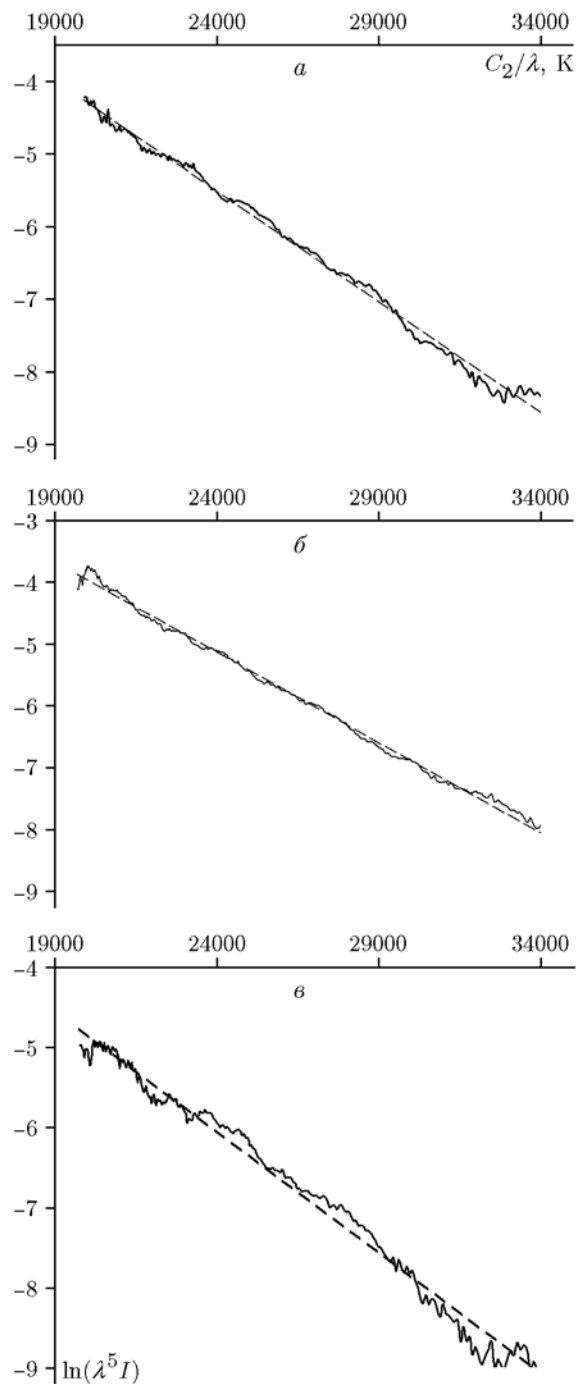


Рис. 4. Спектры свечения, представленные на рис. 3, в координатах Вина:

сплошная кривая — эксперимент, штриховая линия — линейная регрессия

(Стандартная ошибка измерения температуры определяется среднеквадратичным отклонением линейной аппроксимации от экспериментальных данных, измерением средней тем-

пературы по пяти образцам.)

Отметим, что аналогичный результат мы получили при инициировании монокристаллов гексогена электронным пучком, где было также установлено, что свечение на этапе взрыва имеет тепловую природу [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Иоффе В. Б., Долголаптев А. В., Александров В. Е., Образцов А. П. Воспламенение алюминийсодержащих конденсированных систем лазерным моноимпульсным излучением // Физика горения и взрыва. — 1985. — Т. 21, № 3. — С. 51–55.
2. Александров В. Е., Долголаптев А. В., Иоффе В. Б., Ковальчук В. М., Левин Б. В., Образцов А. П. Исследование особенностей воспламенения конденсированных сред с поглощающими добавками при концентрированном подводе лучистой энергии // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 4. — С. 17–20.
3. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Фурега Р. И., Звекон А. А. Регулирование чувствительности пентаэритриттетранитрата к лазерному воздействию с помощью добавок наночастиц металлов никеля и алюминия // Хим. физика. — 2014. — Т. 33, № 6. — С. 37–41.
4. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Фурега Р. И. Иницирование взрывного разложения тетранитропентаэритрита с добавками ультрадисперсных частиц лазерными импульсами // Химия твердого топлива. — 2012. — № 6. — С. 41–45.
5. Адуев Б. П., Белокуров Г. М., Нурмухаметов Д. Р., Нелюбина Н. В. Светочувствительный материал на основе смеси тэна и наночастиц алюминия // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 127–132.
6. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Звекон А. А., Никитин А. П., Ковалев Р. Ю. Лазерное инициирование композитных материалов на основе тэна и наночастиц железа // Хим. физика. — 2016. — Т. 35, № 7. — С. 38–43.
7. Магунов А. Н. Спектральная пирометрия (обзор) // Приборы и техника эксперимента. — 2009. — № 4. — С. 5–28.
8. Левшин Л. В., Салецкий А. М. Люминесценция и ее измерения. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989.
9. Адуев Б. П., Белокуров Г. М., Гречин С. С., Лисков И. Ю. Взрывчатое разложение монокристаллов гексогена, инициированное импульсным электронным пучком // Письма в ЖТФ. — 2014. — Т. 40, № 23. — С. 16–20.

Поступила в редакцию 20/VIII 2016 г.