

УДК 541.124.16:541.126.2:541.128

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ Al—C НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ТЭНА К ЛАЗЕРНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

Б. П. Адуев¹, Д. Р. Нурмухаметов¹, В. П. Ципилев², Р. И. Фурега¹

¹Институт углехимии и химического материаловедения СО РАН, 650000 Кемерово, lesinko-iuxm@yandex.ru

²Томский политехнический университет, 634050 Томск

Измерены пороги взрывчатого разложения тэна (пентаэритриттетранитрата) с добавками ультрадисперсных частиц механокомпозита Al—C в зависимости от концентрации последнего в экспериментальных образцах при воздействии лазерных импульсов (1.064 нм, 12 нс). Плотность образцов 1.73 г/см³, размер частиц Al—C в максимуме распределения 220 нм. Оптимальная концентрация механокомпозита в образцах, при которой достигается минимальный порог взрывчатого превращения, соответствующий 50%-й вероятности взрыва при плотности энергии 4 Дж/см², составила 0.1 ÷ 0.3 %. Проведено сравнение с экспериментальными данными, полученными для образцов с добавками наночастиц алюминия.

Ключевые слова: лазер, инициирование, тэн, наночастицы, взрыв.

ВВЕДЕНИЕ

В наших предыдущих работах [1–4] показана высокая эффективность применения добавок частиц Ni—C и Al размером ≈100 нм для регулирования характеристик взрывчатого разложения при инициировании взрыва тэна (пентаэритриттетранитрата) лазерными импульсами наносекундной длительности с длиной волны излучения 1.06 мкм.

Показано, что для прессованных образцов плотностью, близкой к плотности монокристалла ($\rho = 1.73$ г/см³), минимальный порог взрывчатого разложения H_{cr} , соответствующий 50%-й вероятности взрыва, достигается при относительно небольших концентрациях включений в образцах — 0.1 ÷ 0.3 %. Для Ni—C получено $H_{cr} = 5$ Дж/см², для Al — $H_{cr} = 1.4$ Дж/см². При этом инициировать взрыв аналогичных образцов, не содержащих включения, не удается при максимальной в условиях эксперимента плотности энергии импульса лазера 90 Дж/см². Оценки, выполненные по эмпирической формуле из [5], дают порог инициирования чистого тэна $H_{cr} = 170$ Дж/см² при плотности $\rho = 1.73$ г/см³ [2]. Таким образом, использованные добавки позволяют эффективно регулировать чувствительность тэна к лазерному воздействию при комнатной температуре.

В настоящей работе исследовано влияние добавок механокомпозита Al—C на характеристики взрывного разложения тэна и проведен сравнительный анализ с данными экспериментов, выполненных с образцами с добавками Al.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы были изготовлены из синтезированного нами порошка тэна с характерным размером зерна 1 ÷ 2 мкм. В качестве добавок использовался порошок Al—C, полученный механоактивационным способом в ИХТТМ СО РАН. По данным рентгеноструктурного анализа, проведенного изготовителем, в порошке наблюдались линии Al и Al₄C₃. Исходный механокомпозит подвергался ультразвуковой обработке, после чего регистрировалось распределение частиц по размерам. Размер частиц в максимуме распределения составил 220 нм. Рентгенофлюоресцентный анализ при помощи сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM63901A, оснащенного спектрометром JEOL JED2400, показал, что в порошке содержится ≈47 % углерода, ≈44 % алюминия и ≈9 % кислорода. По-видимому, алюминий, не вошедший в состав карбида Al₄C₃, покрылся оксидной пленкой в процессе хранения, как и в случае порошка алюминия, использованного в нашей работе [4].

Образцы готовили следующим образом. В порошок тэна добавляли частицы Al—C до получения нужной концентрации. Смесь помеща-

ли в гексан и перемешивали в ультразвуковой ванне для получения равномерного распределения частиц в объеме смеси. После этого испаряли гексан и высушивали смесь. Образцы прессовали в специальной пресс-форме — в медной пластине толщиной 1 мм, в центре которой имелось отверстие диаметром 3 мм. При прессовании давление в течение 30 мин поднималось до значения 1.8 ГПа.

Плотность образца рассчитывали по формуле $\rho = 4m/(\pi d^2 h)$, где m — масса, d — диаметр, h — толщина образца. Массу образца измеряли на аналитических весах с точностью 0.1 мг, диаметр — с помощью оптического микроскопа с погрешностью 0.1 мм, высоту — с помощью микрометра с точностью 5 мкм. Рассчитанная погрешность однократного измерения плотности составила менее 1 %. После прессования получались образцы диаметром 3 мм, толщиной 1 мм, плотностью $1.65 \div 1.76 \text{ г/см}^3$. Для эксперимента отбирали образцы плотностью $1.73 \pm 0.03 \text{ г/см}^3$.

Пластина с образцом прижималась к алюминиевой подложке, которая являлась пластиной-свидетелем. Последняя находилась в акустическом контакте с линией задержки пьезоакустического преобразователя. Облучаемая поверхность экранировалась оптическим стеклом толщиной 1 мм, затрудняющим газодинамическую разгрузку зоны повышенного давления. Кроме того, вблизи образца помещался световод, с помощью которого свечение, возникающее при взрыве образца, выводилось на фотоэлектронный умножитель Hamamatsu H5773-20. За факт взрывного превращения образца принималось наличие отпечатка на пластине-свидетеле, диаметр которого равнялся диаметру образца, а также наличие пиков акустического и светового сигналов в микросекундном временном интервале.

В качестве источника инициирования взрыва использовался YAG:Nd³⁺-лазер, работающий в режиме модуляции добротности на основной частоте ($\lambda = 1064 \text{ нм}$) с длительностью импульса на половине амплитуды 12 нс. Излучение фокусировалось на образец с помощью линзы. Диаметр облучаемого пятна составлял 2 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерялась зависимость вероятности взрыва образцов, содержащих 0.025, 0.05,

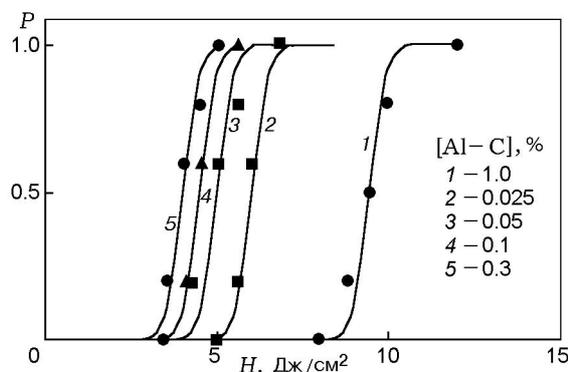


Рис. 1. Зависимость вероятности взрыва от плотности энергии инициирующего импульса при различных массовых концентрациях ультрадисперсных частиц Al—C в образце

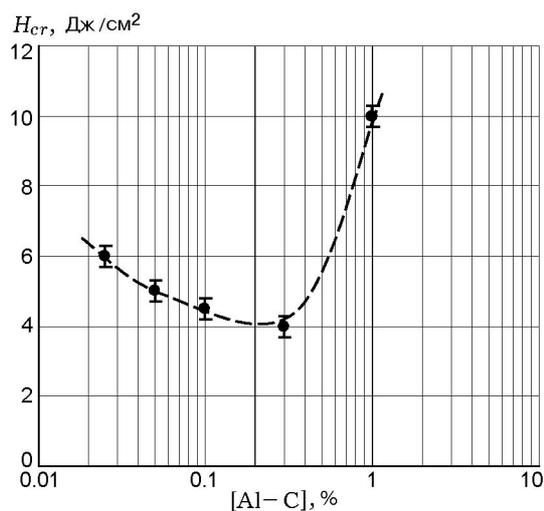


Рис. 2. Пороги инициирования взрыва при различных концентрациях наночастиц Al—C в образце

0.1, 0.3, 1 % Al—C, от плотности энергии инициирующего импульса. Последовательно облучалось 10 образцов единичным импульсом с фиксированной плотностью энергии аналогично тому, как это делалось в работах [2, 4]. Результаты представлены на рис. 1. По кривым вероятности взрывов определялась критическая плотность энергии, соответствующая 50%-й вероятности взрыва H_{cr} (рис. 2). Согласно рис. 2 оптимальная концентрация частиц, при которой чувствительность к лазерному излучению максимальна, составляет $0.1 \div 0.3 \%$, а порог взрывного разложения $H_{cr} \approx 4 \text{ Дж/см}^2$.

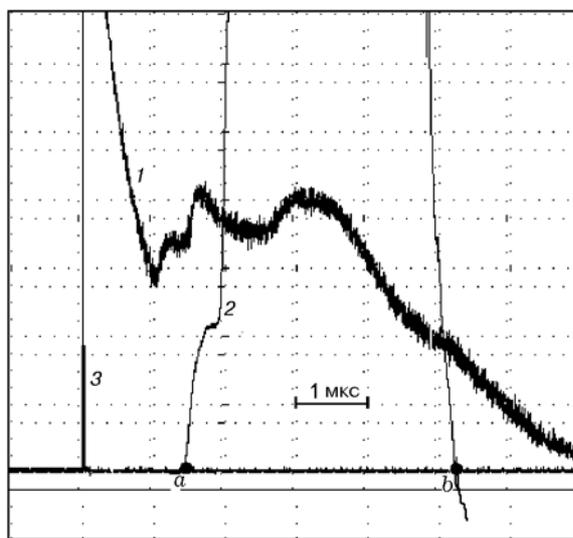


Рис. 3. Осциллограммы светового (1) и акустического (2) сигналов смеси тэна и ультрадисперсных частиц Al—C при лазерном воздействии (сигнал 3 — лазерный импульс)

На рис. 3 представлены осциллограммы светового и акустического сигналов при вероятности взрыва $P = 0.9$. На осциллограмме 1 светового сигнала в момент воздействия лазерного импульса регистрируется мощный пик. Отметим, что свечение тэна при воздействии лазерными импульсами на открытую поверхность образца исследовалось в работе [6]. Показано, что для «чистых» прессованных порошков тэна при воздействии лазерным импульсом с плотностью энергии в диапазоне от единиц мДж/см² до единиц Дж/см² свечение возникает в результате оптического пробоя в объеме образцов. В нашем случае наличие поглощающих добавок улучшает условия возникновения оптического пробоя в окрестности разогретого включения. Отсюда вполне вероятно, что наблюдаемый первый пик свечения связан с оптическим пробоем в облучаемом объеме взрывчатого вещества. В следующем временном интервале наблюдается свечение, связанное с развитием реакции взрывного разложения в образце. Осциллограмма 2 на рис. 3 представляет собой акустический отклик пьезодетектора на рост давления, связанный с развитием экзотермической химической реакции в образце, приводящей к взрывному разложению.

Отдельными измерениями установлено, что время прохождения акустического сигнала

через образец, пластину-свидетель и акустическую задержку пьезодетектора составляет 1.5 мкс, что дает наблюдаемое временное смещение акустического сигнала относительно светового 1.5 мкс (точка *a* на осциллограмме 2, рис. 3). Следовательно, рост давления в образце в пределах временного разрешения используемой развертки осциллографа начинается сразу после воздействия лазерного импульса. Поскольку по принципу работы пьезодетектора наблюдаемый сигнал пропорционален скорости изменения давления, то давление достигает максимального значения в точке *b* (см. рис. 3). Этот момент времени (с учетом задержки акустического сигнала) соответствует началу спада интенсивности светового сигнала. С учетом вышеизложенного можно сделать вывод, что до начала спада светового сигнала твердая фаза переходит в газообразные продукты, а спад свечения связан с разлетом газообразных продуктов и, возможно, диспергированных фрагментов образца.

Таким образом, продолжительность химической реакции в образце составляет ≈ 4 мкс, что коррелирует с результатами наших измерений на образцах с другими добавками [3].

Представляет интерес сравнение результатов данной работы с результатами, полученными для образцов, в которых добавкой служил порошок алюминия, не содержащий углерода, с характерным размером зерна в максимуме распределения 120 нм [4]. В этом случае порог взрывчатого разложения при лазерном инициировании составлял 1.4 Дж/см² при оптимальном количестве добавки $\approx 0.1 \div 0.2$ %, т. е. был почти в три раза меньше, чем при аналогичном содержании в образцах композита Al—C.

Меньший порог взрывчатого разложения в случае использования включений Al дает основание сделать вывод, что при одинаковой плотности энергии лазерных импульсов нагрев частиц Al в условиях эксперимента должен быть выше, нежели нагрев частиц механокомпозиата Al—C. Этот результат, с нашей точки зрения, нетривиален, поскольку доля поглощенной энергии частицей Al—C должна быть больше за счет сажи, входящей в ее состав, для которой коэффициент отражения $R \approx 0$, в то время как для алюминия $R \approx 0.8$. В связи с этим необходимо проведение эксперимента с добавками углеродных частиц соответствующих размеров, после чего будет возможен более

детальный анализ рамок применимости микроочаговой теории лазерного зажигания.

Авторы выражают благодарность М. А. Корчагину (Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН) за предоставленный механокомпозит Al—C.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Пузынин А. В. Влияние добавок наночастиц монокарбида никеля на чувствительность тетранитропентаэритрита к лазерному воздействию // Хим. физика. — 2008. — Т. 28, № 11. — С. 50–53.
3. Адуев Б. П., Белокуров Г. М., Нурмухаметов Д. Р., Пузынин А. В. Давление продуктов взрывного разложения смеси тетранитропентаэритрита и наночастиц монокарбида никеля при импульсном лазерном инициировании // Хим. физика. — 2010. — Т. 29, № 1. — С. 70–74.
4. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р. Влияние добавок наночастиц алюминия на чувствительность тетранитропентаэритрита к лазерному воздействию // Хим. физика. — 2011. — Т. 30, № 3. — С. 63–65.
5. Таржанов В. И., Зинченко А. Д., Сдобнов В. И., Токарев Б. Б., Погребов А. И., Волкова А. А. Лазерное инициирование тэна // Физика горения и взрыва. — 1996. — Т. 32, № 4. — С. 113–119.
6. Ципилев В. П., Морозова Е. Ю., Скрипин А. С. Иницирование порошка тэна в условиях объемного сжатия // Изв. ТПУ. — 2010. — Т. 317, № 4. — С. 149–155.

*Поступила в редакцию 8/XII 2011 г.,
в окончательном варианте — 5/V 2012 г.*