

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ СМЕСИ ТЕТРАНИТРОПЕНТАЭРИТРИТА И НАНОЧАСТИЦ Ni—C К ИНИЦИИРОВАНИЮ ВЗРЫВА ИМПУЛЬСАМИ ЛАЗЕРА

Б. П. Адуев¹, Г. М. Белокуров¹, А. Г. Кречетов², Н. В. Нелюбина¹,
Д. Р. Нурмухаметов¹

¹ Кемеровский филиал Института химии твердого тела и механохимии СО РАН, 650099 Кемерово
lira@kemsu.ru

² Кемеровский государственный университет, 650043 Кемерово

Представлены результаты исследования чувствительности прессованных образцов тетранитропентаэритрита, содержащих 5 % (по массе) частиц Ni—C с характерными размерами $60 \div 100$ нм, к инициированию взрыва лазерными импульсами (1.06 мкм, 15 нс). Установлено, что чувствительность образцов плотностью, равной плотности монокристаллов, увеличивается приблизительно в 7 раз относительно образцов, не содержащих наночастицы.

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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальны поиски новых подходов к улучшению эксплуатационных характеристик взрывчатых веществ (ВВ), способных обеспечить большое выделение энергии в процессах горения и взрыва. Одним из перспективных путей является использование ультра- и нанодисперсных энергоемких компонентов (порошкообразных металлов, ВВ). В этом направлении получили развитие исследования влияния добавок алюминия различной дисперсности на скорость детонации, метательную способность, теплоту взрывчатого превращения и другие характеристики металлизированных взрывчатых композиций [1–6].

Для безопасности работы с наноструктурированными взрывчатыми материалами и механическими смесями ВВ с нанодисперсными добавками необходима информация об их чувствительности к внешним воздействиям. Таких работ немного, и посвящены они в основном чувствительности к механическим воздействиям [5, 7, 8]. Представляет интерес расширение исследований в этом направлении с использованием других металлов и углеродных соединений нанометрических размеров в смешанных составах с традиционными ВВ при различных способах воздействия, например при инициировании лазерными импульсами. Такой

способ инициирования ВВ уже применялся в работах [9, 10], где исследовались взрывчатые составы с алюминием и некоторыми другими инертными добавками размером ≥ 1 мкм.

В настоящей работе приведены результаты первых экспериментов по инициированию лазерными импульсами взрыва механической смеси тетранитропентаэритрита с добавкой 5 % (по массе) Ni—C с характерными размерами частиц $60 \div 100$ нм. Частицы Ni—C синтезированы методом механохимических реакций и представляют собой ядра Ni, окруженные оболочкой углерода [11].

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема эксперимента представлена на рис. 1. В качестве источника инициирования применялся лазер на стекле с неодимом, работающий в режиме модуляции добротности на

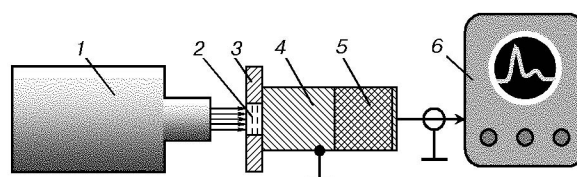


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — лазер, 2 — образец, 3 — пластина, 4 — «акустическая задержка», 5 — пьезопреобразователь, 6 — осциллограф

Работа выполнена при поддержке регионального гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-02-96009).

основной частоте с длиной волны $\lambda = 1.06$ мкм и длительностью импульса 15 нс.

Образцы прессовались из порошка тэна в медной пластине толщиной 1 мм, в центре которой имелось отверстие диаметром 3 мм. В результате в центре пластины получали образец плотностью, равной плотности монокристалла (1.77 г/см³). При подготовке механической смеси в порошок тэна добавлялось 5 % (по массе) частиц Ni—С, смесь помещалась в гексан и перемешивалась в ультразвуковой ванне. После этого проводились испарение гексана, сушка смеси и прессование образца. Равномерность распределения наночастиц по объему контролировали с помощью электронного микроскопа. Масса навески составляла 20 ± 3 мг. Образец находился в акустическом контакте с алюминиевой «акустической задержкой», которая необходима для разделения во времени акустического сигнала и электрических наводок, возникающих при срабатывании лазера и снижении ударной нагрузки на пьезопреобразователь.

Пьезопреобразователь представляет собой плоскопараллельную цилиндрическую пластину из ЦТС-керамики, на противоположные грани которой напылены металлические обкладки, подключенные к сопротивлению нагрузки осциллографа TDS3032b.

Импульс механического напряжения, возникающий в образце в результате воздействия импульса лазера и последующего энерговыделения в ходе развития экзотермической химической реакции, распространяется через «акустическую задержку» и воздействует на пьезопреобразователь. В результате пьезоэлектрического эффекта на обкладках появляется индуцированный заряд и в цепи, соединяющей обкладки, течет электрический ток, который регистрируется в виде падения напряжения U на нагрузке осциллографа R . Регистрируемый сигнал при низкоомной нагрузке (в нашем случае $R = 50$ Ом) пропорционален скорости изменения давления P на пьезопреобразователе, т. е.

$$U = k \frac{dP}{dt}, \quad (1)$$

коэффициент k связан с затуханием волны напряжения в линии задержки, с чувствительностью пьезопреобразователя и подлежит экспериментальному определению для конкретной конструкции детектора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследована кинетика реакции взрывного разложения поликристаллов тэна, чистых и с добавкой 5 % наночастиц Ni—С.

Излучение лазера фокусировалось с помощью линзы на образец в виде пятна диаметром 2.5 мм. Плотность потока энергии варьировалась в пределах $6.5 \div 90$ Дж/см² изменением накачки лазера.

Первая серия экспериментов проводилась с чистыми поликристаллами тэна. При воздействии импульса лазера на образец с открытой со стороны облучения поверхностью видимых повреждений не возникает и акустический сигнал отсутствует даже при максимальной плотности потока энергии. При накрывании образца стеклянной пластинкой толщиной 1 мм воздействие импульса с максимальной плотностью потока энергии приводит к образованию кратера. Полученная при этом осциллограмма представлена на рис. 2, а. Импульс 1 возникает при воздействии на «алюминиевую задержку» лазерного импульса, прошедшего через образец без поглощения, и является репером.

Часть энергии лазерного излучения поглощается вблизи поверхности образца и вызывает формирование и распространение акустического импульса 2, который достигает тыльной поверхности образца через 0.5 мкс. Это время соответствует скорости распространения акустической волны $2 \cdot 10^3$ м/с. Далее изменение сигнала связано с энерговыделением и увеличением давления в результате развития экзотермической химической реакции. Давление достигает максимального значения в момент времени, когда производная dP/dt меняет знак (3 на рис. 2). Отрицательные значения U соответствуют уменьшению давления вследствие разлета продуктов химической реакции.

Иная ситуация наблюдается в образцах, содержащих Ni—С. На рис. 2, б, в представлены осциллограммы акустического сигнала при максимальной и минимальной плотностях потока энергии. Характерно, что образцы непрозрачны для лазерного излучения. Об этом свидетельствует отсутствие пика 1, который является в образцах без добавок Ni—С. На всех осциллограммах присутствует относительно небольшой сигнал (2), возникающий за счет поглощения энергии лазера, затем происходит возрастание давления, обусловленное энерговыделением в результате развития экзотерми-

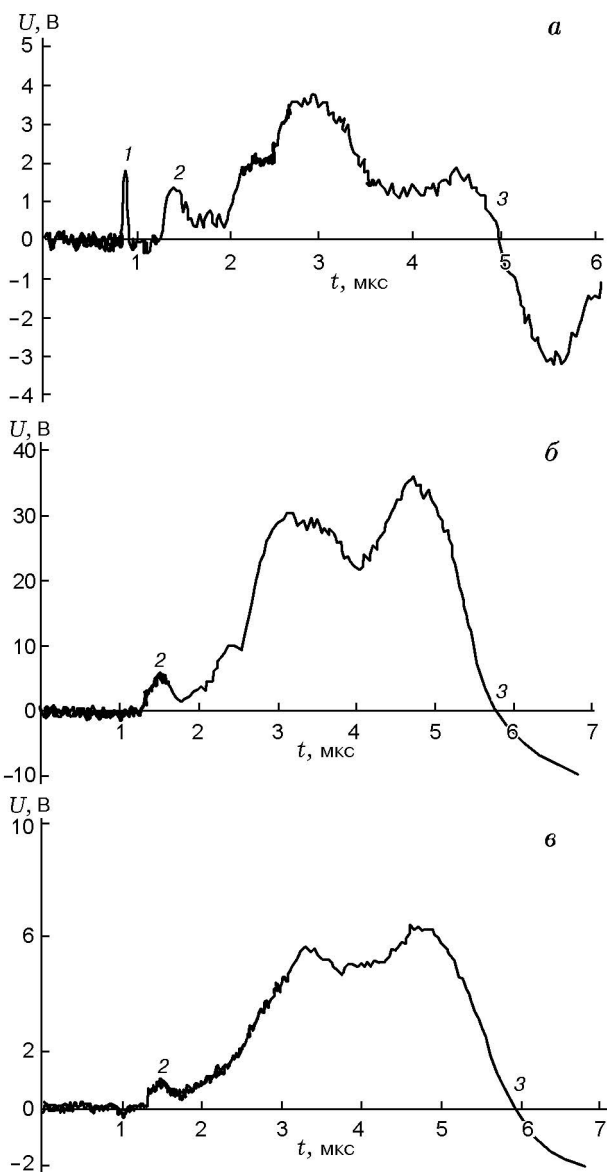


Рис. 2. Осциллограммы акустического сигнала:

a — чистый тэна при $W = 90$ Дж/см², *б* — механическая смесь тэна и 5 % Ni—C при $W = 90$ Дж/см², *в* — механическая смесь тэна и 5 % Ni—C при $W = 6.5$ Дж/см²

ческой химической реакции до момента времени 3.

Отметим, что для всего массива зарегистрированных осциллограмм в образцах, содержащих Ni—C при различных плотностях потока энергии, давление достигает максимального значения (момент времени 3) через 4.4 ± 0.1 мкс при доверительной вероятности $\alpha = 0.95$.

При этом в интервале плотностей энергии $W = 30 \div 90$ Дж/см² образцы взрываются, о чем свидетельствуют звуковой сигнал, деформация медной пластины и отрыв материала по краям отверстия. При $W = 6.5$ Дж/см² наблюдается только кратерообразование, при этом акустический сигнал близок по амплитуде сигналу в опытах с чистым образцом при $W = 90$ Дж/см² (см. рис. 2, *a, в*).

Зависимость $P(t)$ находили с помощью численного интегрирования осциллограмм типа приведенных на рис. 2 в интервале времени, соответствующем росту давления. Результаты расчета при различных плотностях энергии импульсов лазера представлены на рис. 3. Поскольку чувствительность детектора (коэффициент k в формуле (1)) в настоящее время неизвестна, зависимость $P(t)$ приводится в относительных единицах. При этом за $P = 1$ на рис. 3 принято максимальное давление продуктов химической реакции при воздействии на образец потока энергии лазерного импульса максимальной плотности.

Аналогично обрабатывались все осциллограммы, полученные при различных плотностях потока энергии, и определялась амплитуда давления продуктов химической реакции в относительных единицах (точки 1 на рис. 4). Каждая точка на рис. 4 представляет собой среднее значение пяти измерений. Интервал погрешности эксперимента указан при $\alpha = 0.95$. Рассчитанные значения аппроксими-

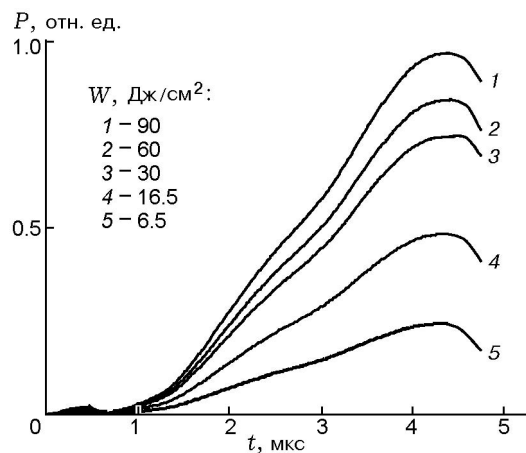


Рис. 3. Изменение давления после воздействия импульса лазера:

$t = 0$ — время прихода на пьезопреобразователь акустического импульса, возникающего в результате поглощения импульса лазера

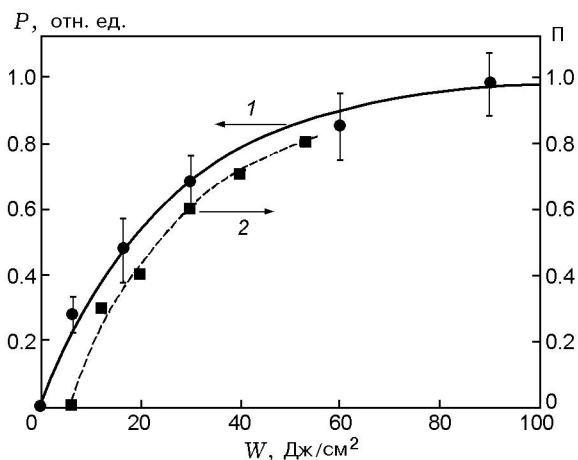


Рис. 4. Зависимость амплитуды давления (1), создаваемого продуктами взрывного разложения, и вероятности инициирования тэна (2) от плотности энергии инициирующего импульса: кружки — результат численного интегрирования осциллограмм, представленных на рис. 2; сплошная линия — аппроксимация формулой (2); штриховая линия — линия тренда по экспериментальным точкам (квадраты)

рованы эмпирической зависимостью (сплошная кривая 1 на рис. 4)

$$P(W) = P_{\infty} \left[1 - \exp \left(- \frac{W}{W_0} \right) \right] \quad (2)$$

при $W_0 = 24 \pm 2$ Дж/см² и коэффициенте корреляции 0.98. При этом нормирование рассчитанных точек проводилось на значение $P_{\infty} = 1$, которое в формуле (2) имеет смысл максимального давления продуктов взрыва при $W \rightarrow \infty$.

Поскольку временной интервал, в котором наблюдается возрастание давления в результате развития химической реакции, одинаков при различных значениях W (см. рис. 3), но при этом меняется его амплитуда (см. рис. 3, 4), то наблюдаемую зависимость $P(W)$ можно трактовать следующим образом. При воздействии импульса лазера с конкретной плотностью потока излучения W_i часть массы образца в результате химической реакции превращается в продукты, создающие давление $P(W_i)$. При $W \rightarrow \infty$ происходит полное превращение массы образца в продукты взрыва. Таким образом, кривая 1 на рис. 4 характеризует массовую долю образца, которая в результате химической реакции превращается в продукты, создающие давление, т. е. полноту взрыва.

Помимо вышеописанных экспериментов проводилось также измерение частоты взры-

вов (вероятности взрыва в зависимости от плотности энергии инициирующего импульса). Образцы прессовались по той же методике, как и в вышеописанных экспериментах. Далее пластина с образцом прижималась к массивной медной подложке, которая являлась пластиной-свидетелем. За факт взрыва принималось наличие следа на пластине-свидетеле диаметром, равным диаметру образца. Результаты измерений представлены на рис. 4 (точки 2). Каждая точка получена осреднением результатов измерений для 10 образцов. (Отсутствие точек при $W > 56$ Дж/см² связано с ухудшением параметров лазера.) Примечательно, что критическая плотность излучения $W_{0.5} = 24 \pm 3$ Дж/см², соответствующая 50%-й вероятности взрыва, при доверительной вероятности $\alpha = 0.95$ в погрешности эксперимента совпадает с величиной W_0 для кривой 1 на рис. 4. (Погрешность измерения $W_{0.5}$ связана с нестабильностью энергии лазера.)

Поскольку инициирование взрыва в чистых кристаллах тэна в условиях эксперимента осуществить не удастся, то для оценки влияния используемых добавок на чувствительность тэна к лазерному воздействию мы воспользовались результатами работы [12]. В этой работе исследовались пороги взрывного разложения для образцов тэна при инициировании лазерными импульсами с аналогичными параметрами в интервале плотностей образцов $\rho = 0.6 \div 1.4$ г/см³ при варьировании дисперсности в диапазоне $S = (1.6 \div 2.2) \cdot 10^3$ см²/г. Согласно данным работы [12] при $W_{0.5} \approx 24$ Дж/см² возможно инициирование образцов диаметром 3 мм в интервале плотностей $\rho = 1.05 \div 1.2$ г/см³ в зависимости от дисперсности. Увеличение ρ приводит к резкому возрастанию $W_{0.5}$, поэтому данные для $\rho > 1.4$ г/см³ не получены авторами, по-видимому, по техническим причинам. Однако получены аппроксимирующие функции для $W_{0.5}(\rho)$ в предположении, что зависимости $W_{0.5}(\rho)$ при различных значениях S сходятся в одной точке при $\rho = 1.77$ г/см³, так как при прессовании ВВ до высоких значений плотности он диспергируется и роль начальной дисперсности уменьшается [12]. Базируясь на формуле данной работы, мы получили $W_{0.5} \approx 171$ Дж/см² при $\rho = 1.77$ г/см³. Согласно этой оценке введение 5 % наночастиц Ni—C снижает порог взрывного разложения в ≈ 7 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Зачастую из соображений безопасности работы с ВВ требуется не увеличивать чувствительность ВВ, а, наоборот, флегматизировать их.

Если рассматривать проблему с этой стороны, то увеличение исходной плотности ВВ, по существу, приводит к его флегматизации. Кроме того, увеличение плотности образца ведет к росту калорийности, т. е. к более эффективному использованию ВВ. Отсюда появляется интересная возможность получить требуемую чувствительность при одновременном увеличении калорийности, а именно увеличить плотность образцов до плотности монокристалла, добавляя определенное количество наночастиц для достижения требуемого порога взрывного разложения.

Таким образом, проведенные эксперименты показывают перспективность использования механических смесей традиционных ВВ с добавками инертных наночастиц, по крайней мере при лазерном воздействии, по двум направлениям: регулирование чувствительности ВВ, увеличение калорийности при фиксированной плотности энергии инициирующего импульса путем увеличения плотности образца.

Микромеханизм обнаруженного эффекта требует дальнейшего изучения. На данном этапе можно предположить, что добавка наночастиц увеличивает число «горячих точек», способствующих развитию реакции взрывного разложения.

Авторы благодарны Б. Б. Боханову за предоставленный порошок Ni—С.

ЛИТЕРАТУРА

- Архипов В. И., Махов М. Н., Пепекин В. И., Щетинин В. Г. Исследование детонации алюминизированных ВВ // Хим. физика. 1999. Т. 18, № 12. С. 53–57.
- Makhov M. N. The heat and products of explosion of aluminized high explosives // 31st Intern. Conf. of ICT. Karlsruhe, Germany, 2000. P. 42/1–42/11.
- Miller P. J., Bedford C. D., Davis J. J. Effect of metal particle size on the detonation properties of various metallized explosives // Proc. Eleventh Intern. Detonation Symp., 1998, Snowmass, Colorado, USA / J. Short (Ed.). 2000. P. 214–220.
- Махов М. Н., Гоголя М. Ф., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А., Архипов В. И., Пепекин В. И. Метательная способность и теплота взрывчатого разложения алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 4. С. 96–105.
- Гоголя М. Ф., Махов М. Н., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А., Архипов В. И., Щетинин В. Г. Механическая чувствительность и параметры детонации алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 4. С. 82–95.
- Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. М.: Физматлит, 2004. Т. 1.
- Теселкин В. А. Механическая чувствительность ультрадисперсных металлизированных ВВ // XIII Симпоз. по горению и взрыву: Тез. докл. Черноголовка, 2005. С. 165–167.
- Щетинин В. Г., Теселкин В. А., Жигач А. Н., Лейпунский И. О. Влияние структуры и химико-физических свойств поверхности частиц алюминия на чувствительность взрывчатых композиций // Труды междунар. конф. «III Харитоновские тематические научные чтения». Саров: ВНИИЭФ, 2002. С. 30–34.
- 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.
- 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.
- Vokhanov V., Korchagin M. The formation of graphite encapsulated metal nanoparticles during mechanical activation and annealing of soot with iron and nickel // J. Alloys and Compounds. 2002. V. 333. P. 308–320.
- 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.

Поступила в редакцию 4/XII 2007 г.,
в окончательном варианте — 21/III 2008 г.