

УДК 541.124.16:541.126.2:541.128

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ВКЛЮЧЕНИЙ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ НИКЕЛЯ НА ПОРОГ ЛАЗЕРНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ТЭНА

Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, А. А. Звеков, И. Ю. Лисков

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

Исследована вероятность взрыва тетранитропентаэритрита ($\rho = 1.73 \text{ г/см}^3$), содержащего 0.1 % (по массе) ультрадисперсных частиц никеля размером $270 \div 300$ и $140 \div 175$ нм в максимумах распределения, в зависимости от плотности энергии инициирующего лазерного импульса (1064 нм, 14 нс). Критическая плотность энергии, соответствующая 50%-й вероятности взрыва, в первом случае составила 1.4 Дж/см^2 , во втором — 0.7 Дж/см^2 . В рамках микроочаговой теории лазерного зажигания рассчитаны зависимости сечения поглощения света и коэффициента поглощения от размера частиц включений. Результаты расчетов согласуются с микроочаговой моделью инициирования теплового взрыва.

Ключевые слова: лазер, тэн, наночастицы, коэффициент экстинкции.

DOI 10.15372/FGV20150411

ВВЕДЕНИЕ

Регулирование чувствительности бризантных взрывчатых веществ к воздействию лазерных импульсов с помощью ультрадисперсных включений перспективно в плане получения новых материалов для использования в светодетонаторах. В этом направлении нами проведены соответствующие исследования с включением в тэн ряда нано- и ультрадисперсных частиц [1–4]. Результаты экспериментов показали перспективность такого способа регулирования чувствительности взрывчатых веществ. Наименьший порог взрывчатого разложения получен при включении в тэн частиц алюминия размером 100 нм и инициировании взрыва импульсами лазера на иттрий-алюминиевом гранате с добавками Nd^{3+} , работающего в режиме модулированной добротности. В частности, в работе [4] для образцов тэна плотностью 1.73 г/см^3 с добавкой 0.1 % (масс.) алюминия порог инициирования составил $H_{cr}^{(1)} = 1.15 \text{ Дж/см}^2$ и $H_{cr}^{(2)} = 0.7 \text{ Дж/см}^2$ при воздействии первой (1064 нм) и второй гармониками (532 нм) лазера соответственно.

Для продолжения исследований назрела необходимость в теоретических работах, которые позволили бы направленно выбирать материал для включений. В работе [5] с использованием модифицированной теории Ми рассчитаны относительные сечения поглощения света для ряда металлов. Согласно [5] одним из перспективных материалов для включений являются наночастицы никеля. В настоящей работе проведено измерение порогов взрывчатого разложения тэна с включениями никеля, оптико-акустическим методом определены коэффициенты поглощения этих образцов. При обсуждении полученных результатов использовали данные работы [5].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Образцы тэна с включениями никеля изготавливали методом прессования. Использовался синтезированный нами порошок тэна с размерами зерен в максимуме распределения $1 \div 2$ мкм и порошки никеля, синтезированные в Кемеровском государственном университете. Распределения по размерам наночастиц никеля, построенные по снимкам, сделанным на растровом электронном микроскопе JEOL JSM 63901A, представлены на рис. 1. Максимум распределения частиц по размерам для первого синтезированного порошка $\text{Ni}^{(1)}$ составил $270 \div 300$ нм, второго синтезированного порошка $\text{Ni}^{(2)}$ —

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-03-98032р_сибирь_а).

© Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Звеков А. А., Лисков И. Ю., 2015.

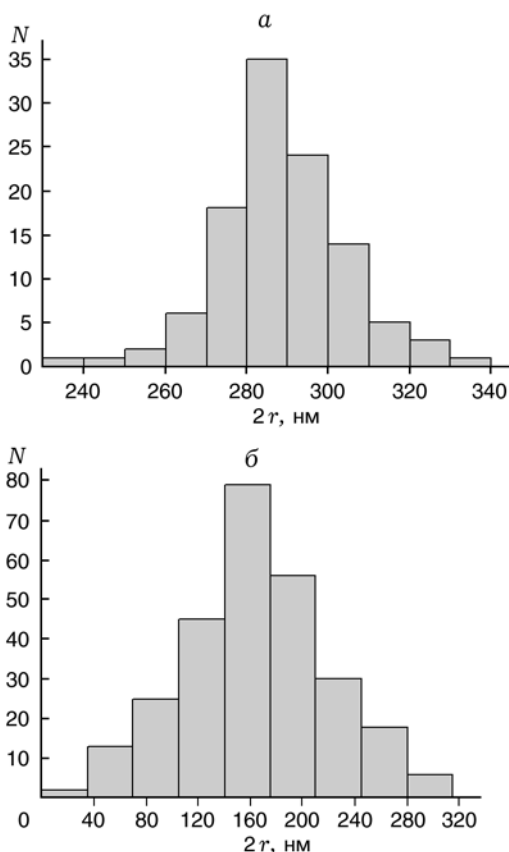


Рис. 1. Гистограммы распределения частиц порошка никеля по размерам:

a — первый синтезированный порошок $\text{Ni}^{(1)}$, *б* — второй синтезированный порошок $\text{Ni}^{(2)}$

140 ÷ 175 нм. Массовое содержание оксидной пленки, рассчитанное по результатам электронно-зондового микроанализа (рентгеновская флуоресценция), проведенного при помощи спектрометра JEOL JED 2400, составило 12 ± 1 %.

Процедура подготовки образцов подробно описана в работах [2, 3]. Как и в предыдущих работах, в экспериментах использовали образцы диаметром 3 мм, толщиной 1 мм и плотностью $\rho = 1.73 \pm 0.03$ г/см³.

Источником инициирования служил YAG:Nd³⁺-лазер, работающий в режиме модулированной добротности на основной частоте 1064 нм с длительностью импульса на половине амплитуды 14 нс. Излучение с помощью линзы фокусировалось на образец в виде пятна диаметром 2.5 мм. Предварительные измерения показали, что нестабильность энергии лазера в серии из 50 импульсов составляет ± 3 %, поэтому в эксперименте не контроли-

ровали энергию единичных импульсов. Для изменения энергии импульсов использовали набор нейтральных светофильтров.

В первой серии экспериментов исследовали зависимость вероятности взрыва от плотности энергии импульса лазера. Образцы прижимали к алюминиевой подложке, которая служила пластиной-свидетелем. Облучаемая поверхность экранировалась оптическим стеклом толщиной 1 мм, затрудняющим газодинамическую разгрузку зоны повышенного давления. Фактом взрыва образца считались громкий звуковой сигнал и наличие следа на пластине-свидетеле диаметром, равным диаметру образца.

Во второй серии экспериментов с такими же образцами измеряли коэффициент экстинкции оптико-акустическим методом [6, 7]. Образцы находились в акустическом контакте с пьезопреобразователем на основе керамики ЦТС-19. Плотность энергии в импульсе на поверхности образцов составляла $H = 100$ мДж/см², что достаточно для регистрации сигнала с пьезопреобразователя и не вызывает повреждения образца. Сигнал с пьезопреобразователя регистрировался цифровым осциллографом TekTronix TDS7404B.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В первой серии экспериментов образцы последовательно облучали единичным импульсом при фиксированной плотности энергии и определяли вероятность взрыва:

$$p = n/N,$$

где n — число взорвавшихся образцов, N — общее количество образцов, в данном случае $N = 10$. Эксперимент повторяли при различной плотности энергии лазера с образцами, включающими в себя различные по размеру частицы Ni. Результаты представлены на рис. 2. Критическая энергия, соответствующая 50%-й вероятности взрыва, для образцов с более крупными частицами $\text{Ni}^{(1)}$ составила $H_{cr}^{(1)} = 1.4$ Дж/см², а с более мелкими частицами $\text{Ni}^{(2)}$ — $H_{cr}^{(2)} = 0.7$ Дж/см².

Во второй серии экспериментов оптико-акустическим методом измерены коэффициенты экстинкции k_{eff} исследуемых образцов. Известно, что при поглощении энергии лазерного импульса в образце возникает акустический

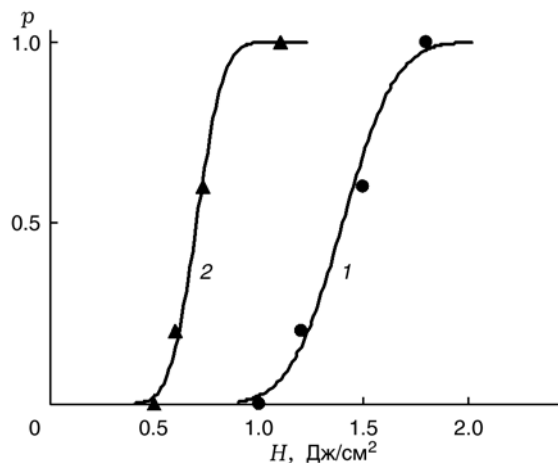


Рис. 2. Зависимость вероятности взрыва от плотности энергии лазерного импульса: массовое содержание никеля в образцах тэна 0.1 %, 1 — порошок Ni⁽¹⁾, 2 — порошок Ni⁽²⁾

импульс, который можно преобразовать в электрический, например, с помощью пьезопреобразователя [6, 7] и зарегистрировать на осциллографе. При этом форма осциллограммы соответствует распределению тепловых источников в образце, а по экспоненциальной части осциллограммы можно определить зависимость

$$\tau = (k_{eff} c_0)^{-1}$$

(c_0 — скорость звука в образце [6]) и из этой формулы рассчитать k_{eff} .

Типичные осциллограммы представлены на рис. 3. Рассчитанные значения τ , осредненные для пяти образцов, составили $\tau_1 = 70 \pm 5$ нс при добавлении в образец крупных порошков Ni⁽¹⁾ и $\tau_2 = 40 \pm 2$ нс в случае порошков Ni⁽²⁾. Скорость звука в образцах определяли по формуле

$$c_0 = 2l/t,$$

где l — толщина образца, t — время между основным и отраженным сигналами с пьезодетектора. В измерениях получено $c_0 = 2500 \pm 200$ м/с. Расчетные значения коэффициента экстинкции для образцов с добавлением крупных и мелких порошков Ni составили $k_{eff}^{(1)} = 57 \pm 5$ см⁻¹ и $k_{eff}^{(2)} = 105 \pm 7$ см⁻¹ соответственно.

Большему коэффициенту поглощения должен соответствовать меньший порог инициирования взрыва H_{cr} . Из экспериментальных измерений следует

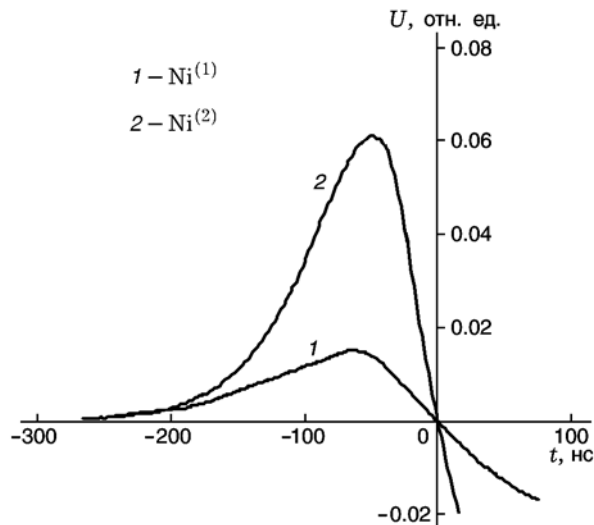


Рис. 3. Типичные регистрируемые опико-акустические сигналы для включений порошка Ni различного синтеза в образце

$$\frac{H_{cr}^{(1)}}{H_{cr}^{(2)}} \approx \frac{k_{eff}^{(2)}}{k_{eff}^{(1)}} \approx 2, \quad (1)$$

откуда вытекает, что $H_{cr}^{(1)} k_{eff}^{(1)} = H_{cr}^{(2)} k_{eff}^{(2)}$.

Критическую объемную плотность поглощенной энергии определяли по выражению

$$W_{cr} = RH_{cr} k_{eff},$$

где R — коэффициент отражения. Оказалось, что значения W_{cr} близки (с точностью до коэффициентов отражения) для включений порошков обоих размеров и составляют $W_{cr} < 75$ Дж/см³. (Для определения точного значения W_{cr} необходимо измерение R .)

Дальнейшее обсуждение результатов проведем в рамках микроочаговой модели инициирования теплового взрыва при лазерном воздействии, полагая, что при поглощении света наночастицы металлов нагреваются и образуют «горячие точки» — очаги химического разложения, что приводит к взрыву при достижении критической плотности энергии лазера.

Как уже говорилось, в работе [5] предложена модель и проведен расчет коэффициента эффективности поглощения света Q_{abs} включений металлов в матрице тэна в зависимости от их размера. Согласно [5]

$$Q_{abs} = \sigma/\sigma_g, \quad (2)$$

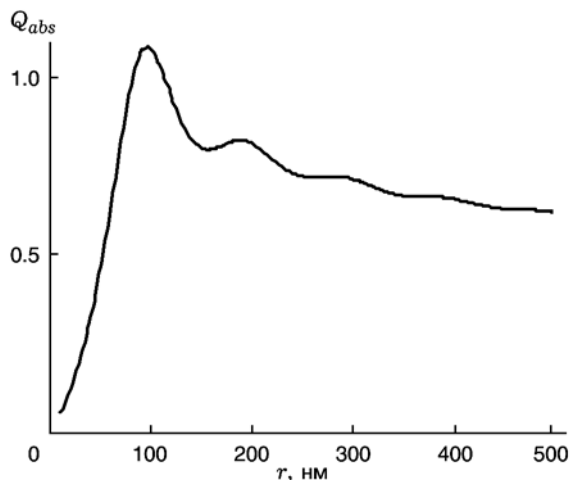


Рис. 4. Зависимость коэффициента эффективности поглощения света от радиуса включений частиц никеля в матрице тэна

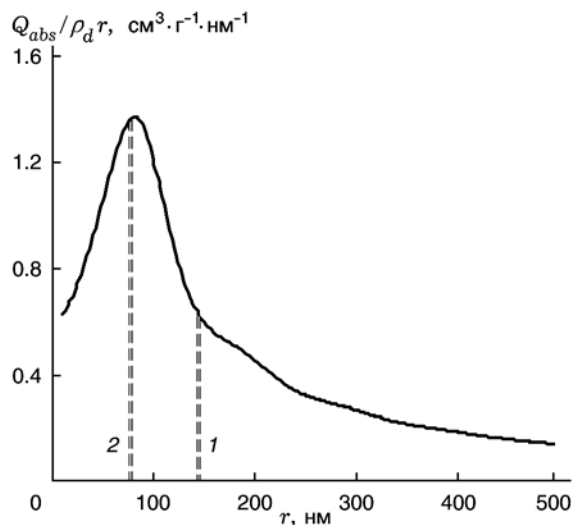


Рис. 5. Зависимость $Q_{abs}/\rho_d r$ от радиуса включений частиц никеля в матрице тэна:

1 — размеры порошка Ni⁽¹⁾ в максимуме распределения, 2 — размеры порошка Ni⁽²⁾ в максимуме распределения

где σ — истинное сечение поглощения света, σ_g — геометрическое сечение поглощающего включения.

Для включений Ni в матрице тэна расчетная зависимость $Q_{abs}(r)$ на длине волны 1064 нм представлена на рис. 4. Для коэффициента поглощения света образцом используем выражение

$$K = \sigma C,$$

где C — концентрация включений в образце.

Из (2) следует

$$\sigma = Q_{abs} \sigma_g = Q_{abs} \pi r^2.$$

Здесь, как и в [5], считаем частицы сферическими.

Концентрацию включений можно рассчитать по формуле [8]

$$C = \frac{1}{V_d} \frac{\rho_0}{\rho_d} \frac{\chi}{1 - \chi(1 - \rho_0/\rho_d)},$$

где V_d — объем включения, ρ_0 — плотность образца, ρ_d — плотность включения, χ — массовая доля включения. В наших экспериментах $\chi = 10^{-3}$.

С учетом малости χ и принимая $V_d = \frac{4}{3} \pi r^3$, получаем

$$K = \frac{3}{4} \chi \frac{\rho_0}{\rho_d} \frac{Q_{abs}(r)}{r}. \quad (3)$$

Таким образом, зависимость K от размера частиц включений определяется соотношением $Q_{abs}/\rho_d r$ (рис. 5). Основываясь на выражении (3), для максимальных размеров используемых включений можно записать $\frac{K^{(2)}}{K^{(1)}} = \frac{Q_{abs}(r_2)/r_2}{Q_{abs}(r_1)/r_1}$. Используя соответствующие значения $Q_{abs}(r)/\rho_d r$ из рис. 5, находим $K^{(2)}/K^{(1)} \approx 2.1$, что практически совпадает с вышеприведенными экспериментальными измерениями оптико-акустическим методом (выражение (1)).

Из результатов работы следует, что для выбора металлов для дальнейших экспериментов, которые могут дать наименьшие значения H_{cr} , необходимо проводить расчеты $Q_{abs}(r)/\rho_d r$ для определения максимальных значений этой величины, выполнять синтез наночастиц соответствующих размеров и далее экспериментально находить величину массовой добавки χ , дающей наименьшую критическую энергию иницирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Ципилев В. П., Фурега Р. И. Влияние добавок ультрадисперсных частиц Al—C на чувствительность тэна к лазерному воздействию // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 2. — С. 102–105.
3. Aduев В. Р., Nurmukhametov D. R., Furega R. I. Investigation of the threshold explosive decomposition of PETN with additives aluminum nanoparticles under laser irradiation of different wavelengths // Изв. вузов. Физика. — 2012. — № 11/3. — С. 137–138.
4. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Фурега Р. И., Звеков А. А., Каленский А. В. Взрывчатое разложение тэна с нанодобавками алюминия при воздействии импульсного лазерного излучения различной длины волны // Хим. физика. — 2013. — Т. 32, № 8. — С. 39–44.
5. Кригер В. Г., Каленский А. В., Звеков 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. 51, № 6. — С. 54–58.
6. Гусев В. Э., Карабутов А. А. Лазерная оптоакустика. — М.: Наука, 1991.
7. Карабутов А. А., Пеливанов И. М., Подымова Н. Б., Скипетров С. Е. Измерение оптических характеристик рассеивающих сред лазерным оптико-акустическим методом // Квант. электроника. — 1999. — Т. 29, № 3. — С. 215–220.
8. Физика взрыва / под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2004. — Т. 1.

Поступила в редакцию 28/XII 2013 г.
