

Международная конференция ФизикА.СПб 21–25 октября 2024 г., Санкт-Петербург

Зажигание неомогенных нанотермитных смесей

© О.Б. Кудряшова¹, Н.Е. Торопков^{1,2}, М.И. Лернер^{1,2}

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

E-mail: olgakudr@inbox.ru

Поступило в Редакцию 12 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 22 июня 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Для оценки реакционной способности нанотермитов математическая модель зажигания таблетки нанотермита горячим телом или потоком излучения расширена с учетом неполной однородности смеси. Приведено аппроксимационное выражение для времени зажигания в зависимости от условий и степени гомогенности.

Ключевые слова: нанотермит, степень гомогенности, зажигание, реакционная способность.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.24.59426.6263k

Нанотермиты — композитные материалы, в которых металлические частицы размером от нескольких нанометров до нескольких микрометров смешиваются с оксидами металлов. Они отличаются высокой энергетической плотностью, что делает их эффективными для применения в различных областях, включая пиротехнику, взрывчатые вещества и сварку [1]. Благодаря малому размеру частиц нанотермиты могут быть легко интегрированы в различные изделия, в том числе с помощью аддитивных технологий. Но использование этих перспективных материалов сталкивается с трудностями, связанными с безопасностью их использования и сложностями в производстве. В частности, проблемой является создание гомогенных смесей для контроля времени воспламенения и скорости горения таких материалов [2]. Достижение однородности смеси нанопорошков — непростая задача из-за малых размеров частиц и их склонности к агрегации. Для лучшего перемешивания применяются специальные технологии: ультразвуковая обработка, использование химических реагентов для микрокапсулирования.

В работе [3] предлагается методика оценки однородности нанотермитной смеси на основе анализа изображений, полученных методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Предложена математическая модель зажигания гомогенной нанотермитной смеси горячим телом. Математическая модель позволяет предсказать время воспламенения и определяет критические условия.

Цель настоящей работы — расширить математическую модель зажигания нанотермита на случай неполной гомогенности смеси.

В общей постановке рассматривается задача о зажигании таблетки взрывчатого вещества горячим телом и потоком тепла. Для безразмерного времени зажигания

получены интерполяционные выражения, обобщающие результаты численных расчетов. В случае зажигания таблетки горячим телом температуры T_s [4]:

$$\tau_i \approx 1.18|\theta_n|^{1.5}. \quad (1)$$

Для случая зажигания потоком тепла (конвективный или световой поток q_s)

$$\tau_i \approx 1 + 2\beta + 0.5|\theta_n|, \quad |\theta_n| = \frac{2q^2}{\pi}. \quad (2)$$

Здесь параметр $\beta = \frac{RT_s}{E}$ выражает степень зависимости скорости химической реакции от температуры; безразмерная начальная температура определяется как $\theta_n = \frac{E}{RT_s^2}(T_n - T_s)$, где T_n — начальная температура. В случае зажигания тепловым потоком температура прогрева T_s определяется величиной плотности теплового потока q_s ; q — безразмерный тепловой поток, $q = q_s \frac{E\sqrt{a t_a}}{\lambda RT_s^2}$. В размерных переменных время зажигания определяется через время адиабатической индукции: $\tau_i = t_i/t_a$, $t_a = \frac{cRT_s^2}{EQz} \exp\left(\frac{E}{RT_s}\right)$. Приняты следующие обозначения: a — температуропроводность, Q — удельный тепловой эффект реакции разложения термита, z — предэкспоненциальный множитель, λ — теплопроводность, c — удельная теплоемкость, E — энергия активации, R — универсальная газовая постоянная.

В предположении гомогенности смеси теория зажигания позволяет определить время зажигания по формулам (1) или (2) в зависимости от условий. В качестве исходных данных для расчетов для медно-алюминиевого нанотермита принято [5,6]:

$$\rho = 5.6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3, E = 3.03 \cdot 10^5 \text{ J/mol},$$

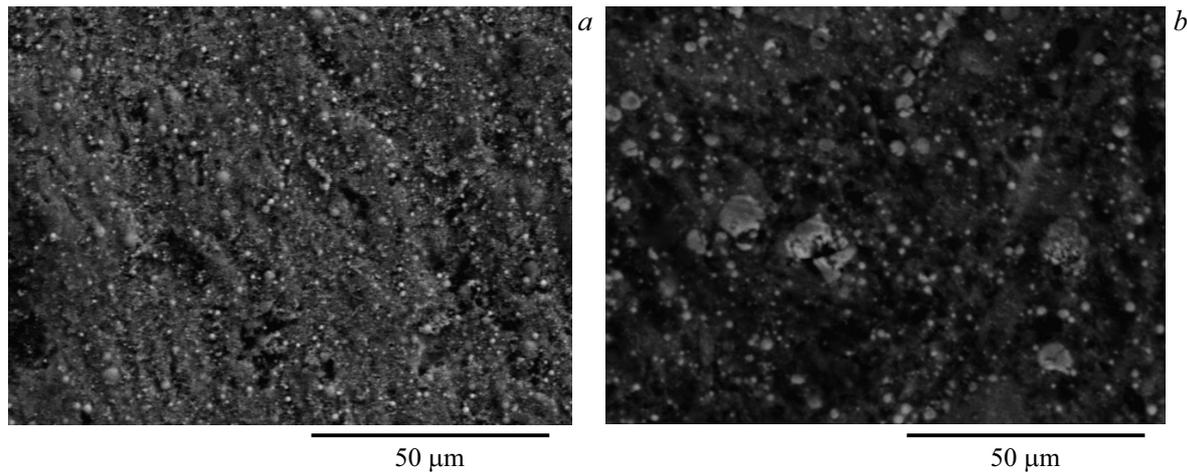


Рис. 1. СЭМ-изображения нанотермитных смесей Al–Fe₂O₃. *a* — алюминиевые частицы, покрытые фторкаучуком, *b* — без использования химического агента.

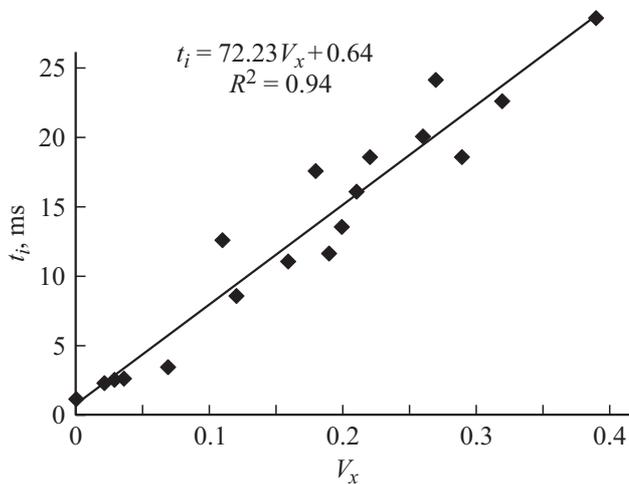


Рис. 2. Время зажигания нанотермитных смесей Al–CuO (ультразвуковая гомогенизация) и Al–Fe₂O₃ (ультразвуковая + химическая обработка частиц) в зависимости от коэффициента вариации (единая аппроксимация).

$$\lambda = 48.5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}, c = 0.61 \cdot 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)},$$

$$Qz = 9.39 \cdot 10^{42} \text{ J/(kg} \cdot \text{s)},$$

а для железо-алюминиевого нанотермита принято [5,7]:

$$\rho = 1.71 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3, E = 4.42 \cdot 10^4 \text{ J/mol},$$

$$\lambda = 0.293 \text{ J/(m} \cdot \text{s} \cdot \text{K)}, c = 1.22 \cdot 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)},$$

$$Qz = 4.39 \cdot 10^{13} \text{ J/(kg} \cdot \text{s)}.$$

В эксперименте использовались термитные смеси, состоящие из порошка nanoалюминия, созданного электро-взрывным способом, и порошка оксида железа (первая смесь), порошка оксида меди (вторая смесь) в стехиометрическом соотношении. Гомогенность смеси улучшалась двумя способами. Медно-алюминиевые порошки обрабатывали в инертной среде (гексан, изопропанол) ультразвуком (интенсивность варьировали от 50 до 150 W, время обработки — от 5 до 30 min).

Для улучшения гомогенности железо-алюминиевых термитов дополнительно к ультразвуковой обработке при 50 W в течение 10 min частицы алюминия обрабатывали с помощью химических агентов (пирокатехин, ацетилацетон, этилсалицилат вместе с триэтаноломином, фторкаучук). Эти вещества способствуют диспергированию агломератов частиц и повышают их реакционную способность. В контрольной серии экспериментов химический агент и ультразвуковая обработка не использовались.

Подготовленную смесь порошков весом 1 g запрессовывали в таблетку под давлением 10 kgf/cm². Площадь таблетки 0.89 cm², высота 0.43 mm. Таблетку нагревали с торца с помощью поджигающей проволоки ($T_s = 190^\circ\text{C}$). Время зажигания t_i определялось из условия достижения температурного максимума. Для визуализации процесса горения использовался лазерный монитор [8].

Для оценки степени гомогенности принята следующая методика. Получали СЭМ-изображение распределения компонентов (пример изображений представлен на рис. 1), разбивали область изображения на десять подобластей. Далее подсчитывали отношение площадей областей, соответствующих компонентам, в каждой подобласти и находили коэффициент вариации этого отношения. Чем больше коэффициент вариации, тем больше отклонение отношения компонентов в подобласти от среднего по всей поверхности. Средний коэффициент вариации V_x был выбран как мера гомогенности смеси.

Как и следует ожидать, с ростом времени и интенсивности ультразвуковой обработки при использовании химических агентов уменьшается коэффициент вариации V_x (увеличивается равномерность распределения компонентов смеси по объему), уменьшается средний размер частиц.

На рис. 2 показана зависимость времени зажигания от коэффициента вариации V_x . Точки на кривых, со-

ответствующие $V_x = 0$ (полная гомогенность смеси), рассчитаны теоретически, остальные получены экспериментально. Зависимости аппроксимируются линейной функцией (степень достоверности 0.94)

$$t_i = AV_x + t_0, \quad (3)$$

где коэффициент $A = 72.23 \text{ ms}$, t_0 соответствует значению времени зажигания гомогенной смеси, $t_0 = 0.64 \text{ ms}$ (в условиях, соответствующих эксперименту).

Эксперименты показывают существенную зависимость времени зажигания нанотермитов от степени гомогенности смеси. Дольше всего (20–30 ms) зажигаются таблетки термитных смесей, не подвергавшихся гомогенизирующей обработке. Значит, компоненты не были достаточно хорошо перемешаны, а агрегаты частиц разбиты. Важно отметить, что единая аппроксимация получена для двух нанотермитов и двух способов гомогенизации. Это означает, что степень гомогенности является важным параметром в оценке реакционной способности независимо от способа ее достижения. Время зажигания можно считать мерой реакционной способности нанотермита, а предложенную нами величину коэффициента вариации соотношения площадей областей на СЭМ-изображении, соответствующих компонентам смеси, — мерой гомогенности.

Таким образом, предложена математическая модель зажигания нанотермита в вариантах с граничным условием первого рода (зажигание горячим телом) и второго рода (зажигание потоком тепла). На основе обработки экспериментальных данных по зажиганию таблеток железо-алюминиевых и медно-алюминиевых нанотермитов математическая модель развита на случай зажигания с учетом неполной однородности смесей. Приведены выражения для времени зажигания в зависимости от условий (температурный напор), свойств взрывчатого вещества (энергия активации, теплота реакции), степени гомогенности смеси.

Результаты работы будут интересны инженерам и исследователям в области новых энергетических материалов и изделий из них. Они позволят провести предварительные оценки реакционной способности разрабатываемых наноструктурированных материалов с учетом степени гомогенности смесей и других физико-химических свойств.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30006, <https://rscf.ru/project/21-79-30006/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] М.К. Бернер, В.Е. Зарко, М.Б. Талавар, Физика горения и взрыва, **49** (6), 3 (2013). [M.K. Berner, V.E. Zarko, M.B. Talawar, Combust. Explos. Shock Waves, **49** (6), 625 (2013). DOI: 10.1134/S0010508213060014].
- [2] А.С. Рогачёв, А.С. Мукасян, Физика горения и взрыва, **46** (3), 3 (2010). [A.S. Rogachev, A.S. Mukasyan, Combust. Explos. Shock Waves, **46** (3), 243 (2010). DOI: 10.1007/s10573-010-0036-2].
- [3] N.E. Toropkov, A.I. Sagun, O.B. Kudryashova, M.I. Lerner, Russ. Phys. J., **66** (9), 978 (2023). DOI: 10.1007/s11182-023-03032-w
- [4] В.Н. Вилонов, Теория зажигания конденсированных веществ (Наука, Новосибирск, 1984).
- [5] Ю.Е. Шелудяк, Л.Я. Кашпоров, Л.А. Малинин, В.Н. Цалков, Теплофизические свойства компонентов горючих систем (НПО „Информ ТЭИ“, М., 1992).
- [6] K.J. Blosbaum, M.E. Reiss, J.M. Plitzko, T.P. Weihs, J. Appl. Phys., **94** (5), 2915 (2003). DOI: 10.1063/1.1598296
- [7] P.C. Буркина, В.В. Медведев, О.В. Хренова, Физика горения и взрыва, **46** (5), 71 (2010). [R.S. Burkina, V.V. Medvedev, O.V. Khrenova, Combust. Explos. Shock Waves, **46** (5), 554 (2010). DOI: 10.1007/s10573-010-0073-x].
- [8] Ф.А. Губарев, А.В. Мостовщиков, А.П. Ильин, Л. Ли, Е.Ю. Буркин, В.В. Свиридов, Письма в ЖТФ, **47** (8), 20 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.08.50848.18519 [F.A. Gubarev, A.V. Mostovshchikov, A.P. P'in, L. Li, E.Yu. Burkin, V.V. Sviridov, Tech. Phys. Lett., **47**, 372 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021040179].