

УДК 662.215.4+534.222.2

ИНИЦИИРОВАНИЕ НАНОТЕРМИТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИСКРОЙ

А. Ю. Долгобородов^{1,2,3}, Б. Д. Янковский¹, П. А. Арсёнов¹,
С. Ю. Ананьев¹, Л. И. Гришин^{1,3}, Г. Е. Вальяно¹,
Т. И. Бородин¹, Г. С. Вакорина¹

¹Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, aldol@ihed.ras.ru

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 119991 Москва

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 125412 Москва

Проведено исследование электроискрового инициирования термитных смесей на основе наноразмерных порошков алюминия и оксида меди. Получены данные о влиянии энергии электроискрового разряда на задержку воспламенения. При инициировании длинных цилиндрических образцов смеси искрой с малыми значениями тока зафиксированы два вида нестационарного горения. Первый вид определяется экспоненциальным характером достижения постоянной скорости горения. Второй вид характеризуется участками с неполным завершением реакции вдоль основного направления распространения. Для получения стационарных режимов с минимальным временем задержки воспламенения термитной смеси необходимо использовать разряд с энергией более 5 мДж на 1 мм² поверхности смеси.

Ключевые слова: термитные составы, нанотермиты, электроискровое инициирование, горение, плотность энергии.

DOI 10.15372/FGV2022.9272

ВВЕДЕНИЕ

Нанотермиты — сравнительно новый тип энергетических материалов, представляющий собой смесь наноразмерных порошков металлов и твердых окислителей. За счет большой поверхности контакта реагентов нанотермиты (НТ) обладают существенно более высокой реакционной способностью по сравнению с микронными аналогами. Обзор результатов последних исследований по способу получения и характеристикам НТ приведен в ряде статей (см., например, [1–3]). Скорость распространения фронта реакций при горении пористых НТ находится на уровне 1000 м/с и сравнима со скоростью неидеальной детонации взрывчатых веществ, а температура воспламенения (300 ÷ 500 °С) существенно ниже температуры воспламенения обычных термитных смесей, что позволяет рассматривать НТ в качестве компонентов различных инициирующих

устройств [4]. Для оценки возможности использования того или иного НТ в инициирующих составах необходимы исследования начальной стадии развития реакций при различных типах импульсного воздействия. Ранее нами были проведены исследования ударно-волнового и лазерного инициирования [5–7]. В данной работе рассматриваются разные аспекты электроискрового инициирования.

Исторически исследования инициирования химических реакций электрической искрой были обусловлены обеспечением безопасности производства химически активных веществ в условиях риска генерации статического электричества [8]. Целью исследований являлось определение минимальных значений энергии электростатического разряда, приводящего к аварии на производстве.

Другим направлением исследований было определение энергетических параметров искры для зажигания бедных газовых смесей, в том числе в интересах совершенствования двигателей внутреннего сгорания [9].

В данной работе определены параметры электрической искры в ограниченном объеме и по регистрации оптического излучения продуктов реакции оценено влияние плотности энергии искры на воспламенение НТ.

Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании УНУ «Сфера» ОИВТ РАН в рамках государственного задания № 075-01056-22-00. Работы по подготовке и анализу образцов выполнены в ФИЦ ХФ РАН в рамках государственного задания № FFZE-2022-007.

© Долгобородов А. Ю., Янковский Б. Д., Арсёнов П. А., Ананьев С. Ю., Гришин Л. И., Вальяно Г. Е., Бородин Т. И., Вакорина Г. С., 2023.

Электрическая искра, образующаяся вследствие пробоя межэлектродного промежутка в объеме пористой термитной смеси, является тепловым посредником в переносе энергии источника к компонентам смеси. Энергия, выделяющаяся в искровом промежутке, стимулирует образование первичных очагов реакции. В работе [10] рекомендовано определять энергию искры W по разнице напряжений на конденсаторе источника до (U_0) и после разряда (U_1): $W = (U_1^2 - U_0^2)/2$. Такой способ является весьма грубым, поскольку не учитывает потери в элементах схемы. В работах [11–13] для определения энергии использовали измеренные параметры импульса тока $I(t)$ и значение эквивалентного сопротивления разряда R_{eq} : $W = R_{eq} \int I(t)^2 dt$. При

этом эквивалентное сопротивление принимали постоянным за время разряда, а его значение находили при сопоставлении результатов расчетного моделирования электрической схемы разряда с результатами измерения импульса тока. Однако формирование токопроводящего канала искры является сложным многостадийным процессом [14] и характеризуется переменным сопротивлением.

В данной работе энергию искры определяли как интеграл по времени от произведения падения напряжения $U(t)$ на искровом промежутке и электрического тока через него: $W = \int I(t)U(t) dt$.

1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования выбран НТ на основе смеси Al/CuO, поскольку по данным [5–7] этот состав показал наибольшие скорость горения и температуру продуктов, а также он характеризуется большим расчетным значением объемного теплового эффекта (более 20 кДж/см³).

В работе использовали два способа приготовления смеси в массовом соотношении 19/81. Первым способом готовили смесь наноразмерных сферических порошков nAl (со среднемассовым размером частиц $\delta = 100$ нм) и nCuO ($\delta = 80$ нм) при ультразвуковом их перемешивании в гексане по технологии, описанной в [7]. Вторым способом получали смесь микронных порошков Al и CuO при совместной ак-

тивации компонентов в шаровой планетарной мельнице «Активатор-2SL». В этом способе использовали алюминиевую пудру ПП-2Л (плоские чешуйки $(30 \div 100) \times (0.5 \div 1)$ мкм) и порошок CuO марки ХЧ ($\delta = 40 \div 80$ мкм). При этом исходные частицы измельчались до субмикронных размеров, а также появлялись дефекты кристаллической структуры [15]. В результате механоактивации микронных порошков получали полидисперсную смесь из довольно крупных конгломератов плоских фрагментов частиц Al ($\approx 1 \div 10$ мкм) с раздробленными субмикронными и наноразмерными частицами CuO. В силу различных прочностных характеристик материала компонентов, разброса в размерах и форме частиц, конгломераты представляли собой неупорядоченные структуры с многочисленными точками контакта компонентов. Процесс активации и данные по структуре и реакционной способности активированных смесей подробно описаны в [15]. На основании этих данных были выбраны оптимальные условия активации (масса шаров, масса порошка, время обработки) для получения композиций с наибольшими скоростями горения.

Полученные смеси представляют собой сложную пористую композицию из диэлектрических и проводящих микро- и наноразмерных компонентов с естественным содержанием воздуха в порах. Основная масса экспериментов проведена со смесями насыпной плотности, пористость которых составляла 60 ÷ 80 %, в ряде случаев использовали прессованные таблетки пористостью 15 ÷ 20 %.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Электрическая искра является источником тепловой энергии, инициирующей первичные очаги реакции в объеме пористой смеси. Материальным носителем энергии искры является плазма газа порового пространства. Параметры плазмы (давление и температура) определяют возможность инициирования и количество первичных очагов реакции. Воспламенение смеси регулируется скоростью фильтрации образующихся продуктов реакции, давлением в области искрового энерговыделения или теплопроводностью и градиентом температуры в случае малопористой таблетки. Поэтому основными критическими параметрами инициирования реакции приняты энергия электрической искры, ее геометрия и объем, а также пористость смеси.

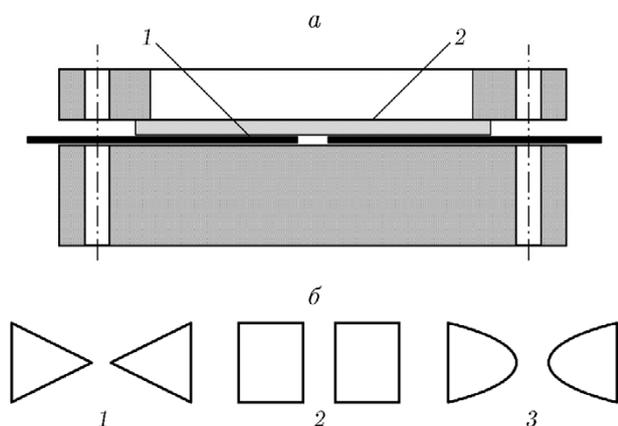


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки с плоскими электродами (*a*) и форма электродов (*б*):

a: 1 — электроды, 2 — стеклянная пластинка;
б — пары плоских электродов толщиной 0.025, 0.1, 0.3 мм, 1 — остроугольные электроды, 2 — прямоугольные, 3 — закругленные электроды

В зависимости от цели конкретного эксперимента применяли разные условия формирования искрового разряда и воздействия энергии искры на образцы термитной смеси. Использовались медные, алюминиевые, вольфрамовые или магниевые электроды разной формы с разным размером искрового промежутка. Образование искры происходило в результате подачи на электроды импульса напряжения, достаточного для пробоя промежутка. Формирование токопроводящего канала искры приводит к нарастанию тока и выделению энергии. Форму и амплитуду импульса тока задавали схемой источника и подбором значений ее элементов, а также напряжением заряда конденсатора. Так, значения емкости конденсатора и индуктивности кабеля разрядной цепи обеспечивали длительность переднего фронта импульса тока, а значение сопротивления резистора, параллельного кабелю, обеспечивало длительность спада тока. В результате при максимальном запасе энергии 1 600 мДж был сформирован однополярный импульс тока длительностью по основанию ≈ 0.8 мкс. Амплитуду тока в диапазоне 40 ÷ 800 А меняли за счет изменения зарядного напряжения источника в диапазоне 500 ÷ 4 000 В.

Энергетические параметры разряда и влияние геометрии электродов на объем выделяемой искрой энергии определяли в предварительных опытах без смеси. В конструкциях экспериментальной схемы высоту разряда

ограничивали стеклянной пластинкой толщиной 1.2 мм, помещаемой над плоскими электродами (рис. 1, *a*). Ограничение высоты разряда последовательно составляло 0.025, 0.1 и 0.3 мм. Применяли пары плоских электродов остроугольной, прямоугольной либо закругленной формы (рис. 1, *б*).

В экспериментах по определению критических параметров иницирования НТ электрический разряд формировали на диэлектрической плоскости между плоскими торцами параллельных цилиндрических проводников диаметром 1.5 мм (рис. 2, *a*). Регулировку энергетического воздействия на поверхность образца термитной смеси осуществляли как снижением зарядного напряжения при уменьшении межэлектродного промежутка, так и воздействием через воздушный зазор до 3 мм (рис. 2, *б*).

Формирование волны горения при разных значениях тока искры наблюдали при размещении термитной смеси в стеклянной трубке диаметром 5.5 мм. Для предотвращения раннего разрушения трубки ее помещали в сосуд с водой (рис. 3, *a*). В такой же постановке получали фотографии неоднородности свечения зоны реакции при разных значениях энергии иницирования.

Для выяснения влияния расположения точки иницирования опыты проводили также в непрозрачных трубках длиной 10 ÷ 18 мм и диаметром 4.5 мм. При этом наблюдалось факельное горение смеси на торце трубки.

В качестве диагностических методов в исследованиях использовали:

- осциллографию тока $I(t)$ и падения напряжения $U(t)$ на искре. Осциллограмму $I(t)$ получали с помощью пояса Роговского с LR-интегратором, осциллограмму $U(t)$ — с помощью резистивного делителя, присоединенного к электродам;

- осциллографию яркости оптического излучения искры или области реакции. В качестве приемника излучения использовали ФЭУ Hamamatsu H10720-01 с интерференционным светофильтром 500 нм или без него;

- 16-кадровую киносъемку в интервале 1 ÷ 5 200 мкс с экспозицией 0.2 ÷ 1.0 мкс (скоростной фоторегистратор Cordin 222-4G).

Сигналы оптических и электротехнических преобразователей фиксировали на цифровых осциллографах LeCroy WavePro 7200A и RIGOL 7024 с ограничением полосы сигналов 20 МГц.

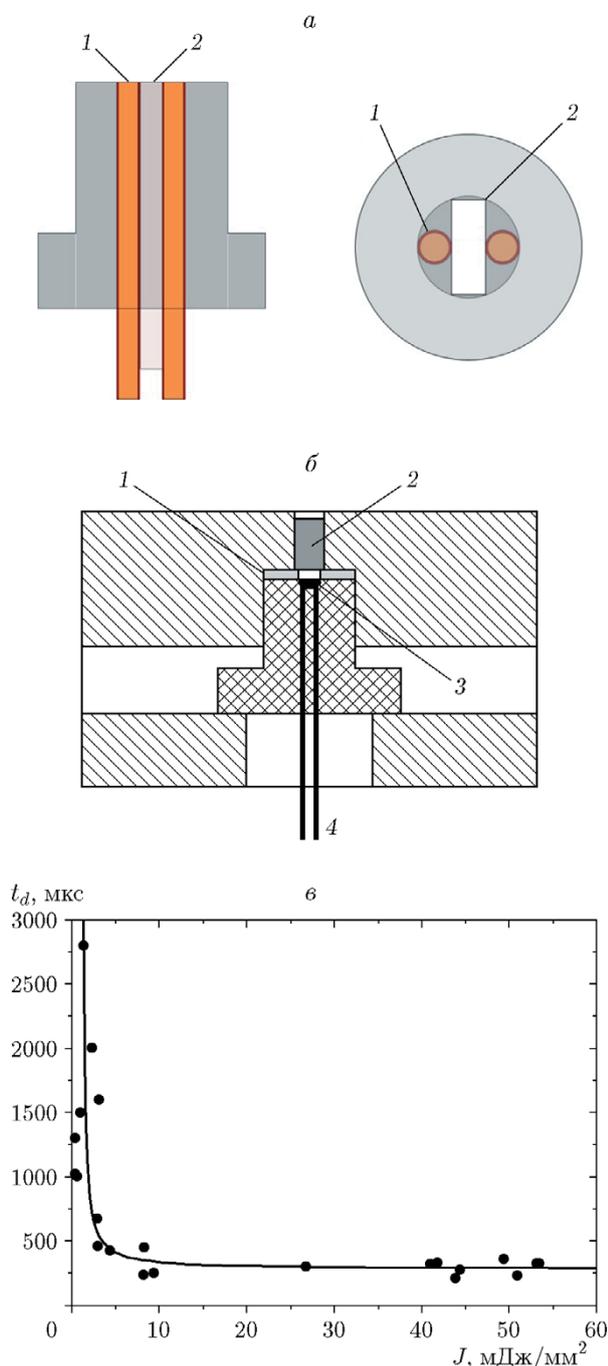


Рис. 2. Схема системы электродов (а) и схема экспериментальной сборки (б). Зависимость задержки появления оптического излучения на свободной поверхности образца смеси от плотности энергии искрового инициирования (в):

а: 1 — электроды, 2 — калиброванная диэлектрическая пластинка толщиной 1.5 мм; б: 1 — диэлектрическая шайба с отверстием, 2 — образец термитной смеси массой 0.1 г, 3 — искровой промежуток 0.06 мм, 4 — электроды

Измерение координат фронта области свечения на фотографиях служило основанием для построения $X-t$ -диаграмм и анализа динамики воспламенения при переходе к стационарному горению. Однородность свечения из объема смеси на фотографиях с экспозицией $100 \div 300$ нс служила качественным показателем полноты химического взаимодействия компонентов смеси.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Энергетическая характеристика искры

Выделение энергии в ограниченном по высоте искровом разряде сопровождается образованием воздушной плазмы и ее расширением в зазоре между плоскими электродами и стеклянной пластинкой. Энергия плоского разряда, ограниченного стеклянной пластинкой, приводит к испарению некоторого количества материала стенок зазора и электродов. После затухания разряда на поверхности стекла остается светлый налет, охватывающий межэлектродный промежуток и часть поверхности электродов. По данным микроскопического анализа поверхность пластинки, охваченная налетом, содержит области деструкции поверхности и конденсата испаренного материала стекла и электродов. Электроды закругленной формы характеризуются большей однородностью электрического поля, что приводит к большей площади образующегося налета. Для формирования искры в промежутке между закругленными электродами определена линейная зависимость объема разряда от вложенной энергии. Среднее значение объемной плотности энергии разряда составило ≈ 30 мДж/мм³.

Замена медных электродов на вольфрамовые, алюминиевые или магниевые не оказала заметного влияния на характер повреждения поверхности стеклянной пластинки и на площадь внутри ореола.

3.2. Воспламенение

Воспламенение пористой смеси регулируется скоростью фильтрации образующихся продуктов реакции и давлением (плотностью энергии) в области первичного энерговыделения. Влияние энергии на воспламенение НТ определяли в экспериментальной сборке (см. рис. 2, б), в которой навеску термитной смеси 0.1 г инициировали через воздушный промежуток диаметром 2.5 мм при изменении его

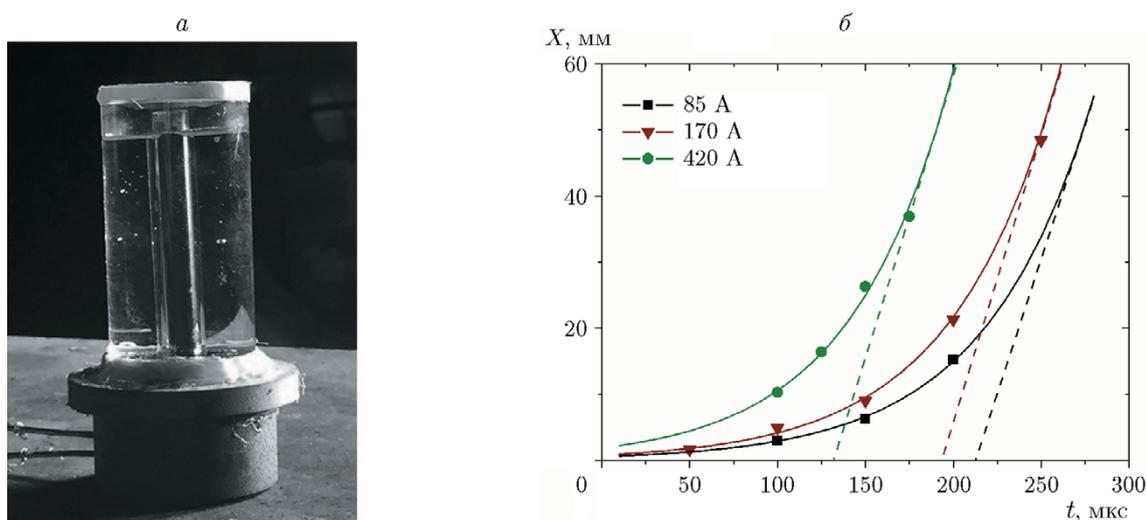


Рис. 3. Постановка опытов (а) и $X-t$ -диаграммы (б) фронта свечения при горении нанотермита Al/CuO в стеклянной трубке при разных значениях тока инициирующей искры

высоты в диапазоне $0 \div 3$ мм. Энергетическое воздействие на смесь оценивали как отношение энергии искры к внутренней поверхности воздушного объема: $J = W/S$ [мДж/мм²]. Момент появления сигнала ФЭУ (t_d) при контроле оптического излучения на свободной поверхности образца НТ служил основанием для заключения о влиянии энергии искры на воспламенение. Разброс экспериментальных значений при определении момента появления сигнала ФЭУ не превышал 10 %.

Полученная зависимость момента появления излучения от энергии воздействия (см. рис. 2, в) содержит участки сильной и слабой зависимости. Стоит отметить, что эта зависимость построена в основном по данным для НТ nAl/nCuO, результаты отдельных опытов для механоактивированного состава Al/CuO также укладываются на эту зависимость.

Начало участка слабой зависимости времени появления излучения ($J > 5$ мДж/мм²) представляет собой нижнюю границу энергии воздействия инициирующей искры, после которой увеличение энергии практически не влияет на уменьшение времени появления излучения t_d . В этом случае регистрируемый момент появления излучения обусловлен только временем распространения реакции по высоте образца смеси.

Это заключение соотносится с результатами по воспламенению механоактивированного состава Al/CuO в стеклянной трубке диаметром 5.5 мм с использованием трех схем иници-

ирования [16]. В первой схеме иницирование у открытого торца трубки сопровождалось разгрузкой давления в первичных очагах реакции, что, видимо, служило причиной фиксируемого отказа в воспламенении смеси. Во второй схеме иницирование проводилось при заглушенном торце трубки и смесь воспламенялась. В обеих схемах ток искры был одинаковым и составлял ≈ 50 А. В третьей схеме иницирование осуществляли у открытого торца трубки, но почти при вдвое большем токе искры. В этом случае смесь воспламенялась, но с замедленным распространением реакции и значительным увеличением периода индукции. Эти результаты косвенно свидетельствуют о влиянии давления в области иницирования на осуществление воспламенения и указывают на фильтрационный механизм распространения реакции и диффузионно-конвективный перенос энергии.

3.3. Формирование волны горения

По фоторегистрации волны горения образца НТ Al/CuO пористостью $75 \div 80$ % в стеклянной трубке диаметром 5.5 мм (см. рис. 3, а) зафиксировано экспоненциальное изменение координаты фронта свечения во времени вплоть до достижения квазистационарного значения скорости (рис. 3, б):

$$X(t) = L_0 \exp(Bt).$$

Такой характер распространения фронта свечения наблюдали при разных токах электроискрового инициирования. Множитель L_0 при экспоненте может быть интерпретирован как размер очага воспламенения смеси в начальный момент распространения волны горения смеси. Множитель B в показателе степени экспоненты характеризует прирост скорости фронта Δu на единице длины трубки Δl : $B = \Delta u / \Delta l$ [мкс⁻¹]. При разных энергиях инициирования темп прироста скорости фронта практически одинаков: $\Delta u \approx 0.0167$ мм/мкс. Отношение значения этого прироста $\Delta u / \Delta l$ к интервалу времени смещения фронта $\Delta t_i = \Delta l / u(t_i)$ в момент времени t_i указывает на ускорение образования газообразных продуктов реакции в объеме горения. Формальным образом это ускорение можно связать с ростом давления в объеме смеси за фронтом свечения при экстенсивном образовании промежуточных газообразных продуктов горения:

$$\Delta p(t_i) = \eta_i \rho L(t_i) \frac{\Delta u}{\Delta t_i},$$

где η_i и $L(t_i)$ — степень завершения реакции и линейный размер области реакции за фронтом свечения к моменту времени t_i , ρ — плотность термитной смеси. Достижение квазистационарного распространения волны реакции реализуется при компенсации давления в области реакции потерями энергии продуктов при их фильтрации сквозь холодные компоненты.

Отметим, что стационарная скорость распространения реакции в НТ Al/CuO достигает значения ≈ 800 м/с. Похожее изменение координаты фронта свечения наблюдали при горении наноразмерной смеси Al/CuO состава в микротрубках [17].

3.4. Полнота сгорания

Хронографическая регистрация свечения области реакции при различных значениях энергии (тока) искры позволяет не только характеризовать динамику волны горения, но и судить о характере процесса горения [18]. При низкой энергии искры область свечения за фронтом содержит множественные темные участки (рис. 4,а). В этом случае в трубках остается твердый остаток из смеси твердых продуктов реакции и исходных компонентов, имеющий неровный (ноздреватый) характер поверхности, что может свидетельствовать

о неравномерном переносе реакции не только по длине, но и по сечению образца. Полнота завершения реакции и, соответственно, выделяющаяся энергия сказываются на характере и объеме разрушений экспериментальной сборки (рис. 4,б). Фотографии разрушений получены в разных экспериментах с НТ Al/CuO, отличающихся только током искры в диапазоне $40 \div 100$ А. При этом разброс значений стационарной скорости сохраняется в пределах ≈ 10 %.

3.5. Факельное горение

В зависимости от цели применения термитного состава точка инициирования может быть размещена как внутри смеси, так и на контактной границе со стенкой или с воздухом, что в значительной мере определяет объем выделяемой энергии и степень воздействия на термитную смесь. В работах [19, 20] были проведены эксперименты по проверке возможности использования НТ Al/CuO для зажигания горючих газовых смесей факелом разлетающихся продуктов горения. При этом за счет повышения или уменьшения расширения плазмы разряда в поры смеси регулировали начальное давление газа в порах. Результаты по факельному горению термитной смеси при ее догорании в свободном объеме позволяют сделать заключение о существенном влиянии начального давления в объеме искры на процесс формирования факела.

Так, например, размещение точки инициирования в середине объема образца, ограниченного боковыми стенками, задерживает образование факела во времени, но приводит к росту скорости его развития. Это может быть связано с увеличением объема выделения энергии в зоне реакции вследствие двустороннего распространения реакции. Плотность энергии инициирования при этом падает, но увеличивается поверхность реагирования при внутреннем воспламенении.

Расположение точки инициирования на открытой поверхности смеси приводит к ускоренному зарождению факела, но не отражается в дальнейшем на линейной скорости его формирования. Те же эффекты наблюдаются и при увеличении энергии инициирования на свободной поверхности смеси. Это происходит за счет ускорения выброса компонентов при истечении продуктов горения из объема инициирования смеси.

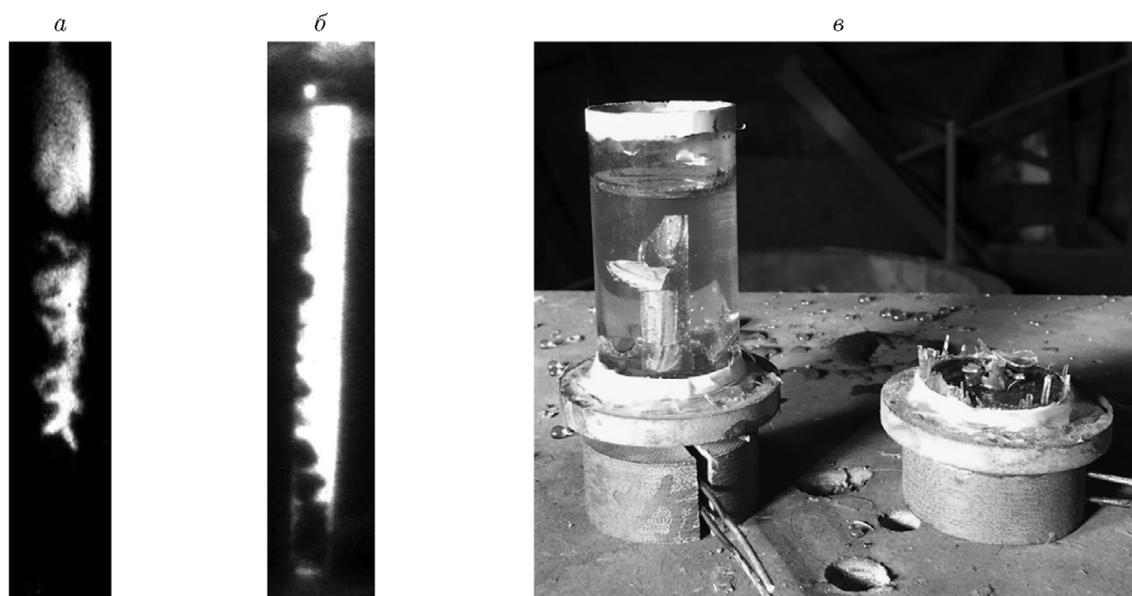


Рис. 4. Фотографии типичных неоднородностей свечения при инициировании нанотермита Al/CuO 20/80 (диаметр трубки 5.5 мм, пористость 75 %) искрой 20 (а) и 100 мДж (б) и вид сборок после горения с разной полнотой реакции (в)

Расположение же точки инициирования у стенки оболочки со смесью приводит и к более позднему образованию факела, и к меньшей скорости развития его объема.

Использование электродов остроугольной формы сопровождается, вследствие усиления напряженности электрического поля, уменьшением объема энерговыделения и, соответственно, увеличением давления в канале искры. Это в большей степени способствует фильтрации нагретого газа сквозь поры смеси. Поэтому для НТ с высокой пористостью (60 ÷ 80 %) зафиксировано более раннее образование факела продуктов горения по сравнению с составами НТ с низкой пористостью (20 %). Образование факела продуктов горения при инициировании пресованной смеси с применением остроугольных электродов происходит с большей скоростью по сравнению с образованием факела при инициировании такой же смеси с применением закругленных электродов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены новые экспериментальные данные по импульсному электроискровому инициированию наноразмерных термитных смесей Al/CuO с использованием электрического разряда с объемной плотностью энергии ≈ 30 мДж/мм³.

Определены критические условия электроискрового инициирования НТ Al/CuO. При низкой энергии искры формируется нестационарный пульсирующий режим горения. Для получения стационарных режимов сгорания образцов с минимальным временем задержки необходим электрический разряд с энергией более 5 мДж на 1 мм² поверхности образца смеси. Увеличение тока (энергии) искры позволяет быстрее достигать стационарного режима распространения волны горения.

Увеличение пористости смеси приводит к более быстрому воспламенению и распространению горения, а снижение пористости до 15 ÷ 20 % — к существенному уменьшению скорости реакции (≤ 10 м/с), что указывает, по видимому, на смену механизма переноса энергии.

В целом результаты показали преобладание фильтрационного механизма распространения горения в исследованных смесях. Высокая скорость распространения свечения (≈ 800 м/с) обеспечивается опережающим распространением горячих промежуточных продуктов со сверхзвуковыми скоростями. После выхода горения на свободную поверхность догорание смеси протекает в облаке диспергированных компонентов смеси и горячих продуктов с температурой свыше 3000 К.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Energetic Nanomaterials. Synthesis, Characterization, and Application** / V. E. Zarko, A. A. Gromov (Eds). — Amsterdam: Elsevier, 2016.
2. **Yetter R. A.** Progress towards nanoengineered energetic materials // *Proc. Combust. Inst.* — 2021. — V. 38, N 1. — P. 57–81. — DOI: 10.1016/j.proci.2020.09.008.
3. **Polis M., Stolarczyk A., Glosz K., Jarosz T.** Quo vadis, nanothermite? A review of recent progress // *Materials*. — 2022. — V. 15, N 9. — P. 3215. — DOI: 10.3390/ma15093215.
4. **Son S. F., Hiskey M. A., Naud D. L., Busse J. R., Asay B. W.** Lead-free electric matches // *Proc. 29th Int. Pyrotech. Seminar, Westminster, Co, IPSUSA, 2002.* — P. 871–877.
5. **Ananev S. Yu., Dolgoborodov A. Yu., Shiray A. A., Yankovsky B. D.** Shock initiation of exothermic reactions in mechanically activated mixtures // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2016. — V. 774. — P. 012069. — DOI: 10.1088/1742-6596/774/1/012069.
6. **Ананьев С. Ю., Гришин Л. И., Долгобородов А. Ю., Янковский Б. Д.** Ударно-волновое инициирование термитной смеси Al + CuO // *Физика горения и взрыва.* — 2020. — Т. 56, № 2. — С. 107–117. — DOI: 10.15372/FGV20200213.
7. **Dolgoborodov A. Yu., Kirilenko V. G., Brazhnikov M. A., Grishin L. I., Kuskov M. L., Valyano G. E.** Ignition of nanothermites by a laser diode pulse // *Defence Technol.* — 2022. — V. 18, N 2. — P. 194–204. — DOI: 10.1016/j.dt.2021.01.006.
8. **Попов Б. Г., Веревкин В. Н., Бондарь В. А., Горшков В. И.** Статическое электричество в химической промышленности / под ред. Б. И. Сажина. — Л.: Химия, 1977.
9. **Кумагаи С.** Горение / пер. с японского С. К. Орджоникидзе, Б. С. Ермолаева. — М.: Химия, 1980.
10. **Овчаренко А. Г., Раско С. Л.** Оценка зажигающей способности разрядов в процессах электризации // *Ползуновский вест.* — 2011. — № 3/1. — С. 124–129.
11. **Shaw W. L., Dlott D. D., Williams R. A., Dreizin E. L.** Ignition of nanocomposite thermites by electric spark and shock wave // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2014. — V. 39, N 3. — P. 444–453. — DOI: 10.1002/prep.201400027.
12. **Monk I., Schoenitz M., Dreizin E. L.** Modes of ignition of powder layers of nanocomposite thermites by electrostatic discharge // *J. Energ. Mater.* — 2017. — V. 35, N 1. — P. 29–43. — DOI: 10.1080/07370652.2016.1150366.
13. **Баранов М. И.** Приближенный расчет активного сопротивления плазменного канала искрового разряда в высоковольтном воздушном коммутаторе атмосферного давления // *Вісник НТУ «ХПИ».* — 2017. — № 15 (1237). — С. 5–11.
14. **Тарасенко В. Ф., Бакшт Е. Х., Бураченко А. Г., Ломаев М. И., Сорокин Д. А., Шутько Ю. В.** О формировании искрового разряда при пробое азота и воздуха в неоднородном электрическом поле // *ЖТФ.* — 2010. — Т. 80, № 6. — С. 151–154.
15. **Streletskii A. N., Kolbanov I. V., Vorobieva G. A., Dolgoborodov A. Yu., Kirilenko V. G., Yankovskii B. D.** Kinetics of mechanical activation of Al/CuO thermite // *J. Mater. Sci.* — 2018. — V. 53, N 19. — P. 13550–13559. — DOI: 10.1007/s10853-018-2412-3.
16. **Yankovsky B. D., Dolgoborodov A. Yu., Grishin L. I., Ananev S. Yu.** Study of combustion wave propagation in linear charges from mechanically activated thermite mixtures // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2021. — V. 1787. — P. 012017. — DOI: 10.1088/1742-6596/1787/1/012017.
17. **Wang Y., Dai J., Wang C., Shen Y., Xu J., Ye Y.** Study on the combustion mechanism of Al/CuO nanothermites in microtubes // *Proc. 44th Int. Pyrotech. Soc. Seminar Europyro-2019, Tours, June 3–7, 2019.* — P. 20–28.
18. **Ananev A. Yu., Yankovsky B. D., Dolgoborodov A. Yu.** Qualitative characteristics of the results of experimental studies of initiation and combustion of mechanically activated mixtures of aluminum and copper oxide powders // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2019. — V. 1147. — P. 012035. — DOI: 10.1088/1742-6596/1147/1/012035.
19. **Dolgoborodov A., Yankovsky B., Ananev S., Valyano G., Vakorina G.** Explosive burning of a mechanically activated Al and CuO thermite mixture // *Energies.* — 2022. — V. 15, N 2. — P. 489. — DOI: 10.3390/en15020489.
20. **Янковский Б. Д., Ананьев С. Ю., Долгобородов А. Ю., Гришин Л. И., Вакорина Г. С.** Зажигание газовой смеси продуктами горения термитного состава Al/CuO // *Горение и взрыв.* — 2022. — Т. 15, № 1. — С. 72–81. — DOI: 10.30826/CE22150109.

Поступила в редакцию 29.11.2022.
Принята к публикации 14.12.2022.