

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 536.46:662.61

ЗАЖИГАНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА, СОДЕРЖАЩЕГО УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЙ ПОРОШОК Al/V

© 2022 г. А. Г. Коротких^{1, 2*}, И. В. Сорокин^{1, 3}, В. А. Архипов²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

³Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского, Новосибирск, Россия

*E-mail: korotkikh@tpu.ru

Поступила в редакцию 08.06.2021;

после доработки 16.07.2021;

принята в печать 20.07.2021

В работе приведены характеристики окисления ультрадисперсных порошков алюминия марки Alex и механической смеси борсодержащего порошка Alex/V. Изучены особенности зажигания высокоэнергетических материалов, содержащих перхлорат аммония, бутадиеновый каучук и ультрадисперсные порошки металла, при их нагреве лучистым потоком тепла. Методом термического анализа установлено, что скорость изменения массы образца и суммарное удельное тепловыделение при окислении порошкообразного диборида алюминия (Alex/V) на воздухе значительно превосходят значения порошка алюминия (Alex). Измерения на экспериментальной установке на основе непрерывного CO₂-лазера, высокоскоростная визуализация стадий реагирования и развития пламенных процессов показали, что применение Alex/V в составе высокоэнергетического материала не приводит к существенному изменению временных характеристик зажигания при одинаковых условиях нагрева. При этом интенсивность оттока газообразных продуктов разложения с частицами металла от поверхности горения топливной композиции растёт благодаря увеличению теплового потока в зоне газофазных реакций и на поверхности реакционного слоя топлива при окислении частиц алюминия и бора.

Ключевые слова: высокоэнергетический материал, ультрадисперсный алюминий, бор, время задержки зажигания, температура зажигания, разложение, окисление.

DOI: 10.31857/S0207401X22030074

ВВЕДЕНИЕ

Основными характеристиками горения применительно к энергосиловым установкам являются зависимость линейной скорости горения от давления, температура горения топлива, единичный импульс, а также химический и гранулометрический состав конденсированных продуктов сгорания. Одним из способов увеличения реакционной способности, температуры и скорости горения высокоэнергетических материалов (ВЭМ) является применение в составе твердых топлив катализаторов горения, порошков металлов или их оксидов, а также веществ с низкой температурой воспламенения и высокой плотностью энергии (например, нитрамина) [1–6]. Эффективным методом повышения энергетических характеристик ВЭМ для силовых установок на базе прямоточных воздушно-реактивных двигателей с внешним окислителем является использование порошков бора и боридов металлов, которые обладают высокими значениями удельной энергии, выделяемой в

процессе их окисления и горения [7–12]. Однако практическое применение порошка бора осложнено из-за формирования инертного оксидного слоя на поверхности частиц бора, что приводит к увеличению времени их воспламенения и горения. Для улучшения характеристик горения частиц бора применяют различные добавки металлов и их оксиды (Mg, Al, Fe, Cu, Bi, Ce) [9, 13–17], которые снижают времена зажигания бора до двух раз [13], а температуру зажигания – на 10% [14]. Кроме того, введение такого рода добавок повышает полноту конверсии бора [13, 14, 16], что делает использование металлических горючих в ВЭМ одним из наиболее перспективных направлений исследования.

В работе [18] исследовано влияние длительности механической активации смеси порошков Ni/Al (авторы использовали никель разных марок – карбонильный Ni марки ПНК и электролитический – марки ПНЭ-1) на скорость горения. Показано, что с увеличением времени механоактивации с 1 до 8 мин скорость горения спрессованных смеси-

вых образцов Ni/Al увеличивается с 0.5–1.0 до 2.5–5.0 см/с.

В работах [8, 19] по исследованию характеристик металлических порошковых систем отмечается, что для смесей Me/V характерны короткие времена воспламенения и более низкие температуры воспламенения по сравнению с порошками боридов металла, которые соответствуют компонентному составу Me/V. В работе [20] отмечается, что температура воспламенения композиции на основе V/MgB₂ и необходимый для этого тепловой поток имеют меньшие значения, чем для смеси V/Mg или бора. Кроме того, смесь V/Mg горит быстрее бора или композиции V/MgB₂ в продуктах сгорания воздушно-ацетиленового пламени, что объясняется легким окислением элементарного Mg в углекислом газе. В данной работе приведены характеристики термического окисления ультрадисперсного порошка (УДП) на основе алюминия марки Alex (далее – УДП Alex) и аморфного бора; также установлены особенности зажигания образцов ВЭМ на основе перхлората аммония (ПХА), бутадиенового каучука (БК), которые содержат УДП Alex и механическую смесь Alex/V (далее – Alex/V).

1. ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

Для приготовления механической смеси Alex/V применялись исходные УДП алюминия и аморфного бора, средний диаметр частиц и удельная площадь поверхности которых составляли $d = 90\text{--}100$ нм и $S_{sp} = 15.5$ м²/г; $d = 210\text{--}240$ нм и $S_{sp} = 8.6$ м²/г соответственно. Согласно данным производителя “Передовые порошковые технологии” (Россия), содержание активного металла в УДП Alex составляло 90 мас. %.

Ультрадисперсную смесь Alex/V изготавливали методом механического перемешивания алюминия с бором в заданном массовом соотношении компонентов Al/B = 55.5/44.5, что соответствовало фазовому составу сплава диборида алюминия AlB₂. Для обеспечения равномерного распределения частиц в композиции металл/бор порошки тщательно перемешивались в течение ~10 мин.

Исследование характеристик зажигания ВЭМ проводилось на экспериментальном стенде, включающем СО₂-лазер, с применением систем визуализации и регистрации параметров. Образцы ВЭМ цилиндрической формы на основе окислителя, горючего связующего вещества и металла изготавливали методом перемешивания исходных компонентов с последующим прессованием. Исследуемый состав ВЭМ содержал: 64.6 мас. % перхлората аммония двух фракций (размеры частиц меньше 50 мкм и 160–315 мкм в соотношении фракций 40/60), 19.7 мас. % бутадиенового каучука марки СКДМ-80 и 15.7 мас. % УДП Alex

или Alex/V. Полимеризация цилиндрических образцов ВЭМ осуществлялась при постоянной температуре 70°C в течение двух суток.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Окисление УДП Alex и Alex/V

Термический анализ УДП Alex и Alex/V проводили на совмещенном ТГА/ДСК/ДТА-анализаторе STA 449 F3 Jupiter (Netzsch, Германия) в воздухе при постоянной скорости нагрева 10°C/мин. Мы использовали навески порошка массой ~7–8 мг, которые помещали в керамический Al₂O₃-тигель и затем устанавливали в нагревательную печь. Нагрев навески УДП металла осуществляли в диапазоне температур 30–1200°C при постоянном объеме расхода воздуха 150 мл/мин. Полученные экспериментальные данные термогравиметрического (ТГ) анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) для УДП Alex и Alex/V представлены на рис. 1.

На основании измеренных данных определены значения характерных температур начала T_{on} и интенсивного окисления T_{int} , суммарного теплового потока Q , увеличения массы Δm , максимальной скорости $v_{ок}$ порошков металлов (табл. 1). Для значения максимальной скорости изменения массы порошка металла в таблице указан диапазон температур, который соответствует 10%-ному изменению от максимального значения $v_{ок}$.

Ультрадисперсный порошок Al марки Alex начинает окисляться в воздухе при температуре ~570°C за счет диффузии окислителя через аморфный оксидный слой. Величина максимального удельного теплового потока в первом пике составляет $Q_{max} = 14.6$ Вт/г при температуре 600°C. Окисление частиц алюминия происходит в две стадии, разделенные эндотермическим плавлением алюминия при температуре ~660°C. При температуре ~720°C скорость окисления УДП Alex снижается за счет накопления оксидного слоя на поверхности частиц и фазового перехода Al₂O₃ и наступает вторая стадия окисления, характеризующаяся менее интенсивным увеличением массы образца (на ~30%) с максимальным удельным тепловым потоком $Q_{max} = 5.2$ Вт/г при температуре ~800°C.

Смесь УДП Alex/V имеет два экзотермических пика с максимальными значениями удельного тепловыделения 21.5 и 43.9 Вт/г, которые значительно превосходят значения Q_{max} для УДП Alex. Первый экзотермический пик соответствует первой стадии окисления алюминия и начальной стадии окисления бора, для которого характерны большие времена окисления частиц и удельная теплота сгорания. Благодаря высокой теплоте сгорания бора, второй, экзотермический пик имеет максималь-

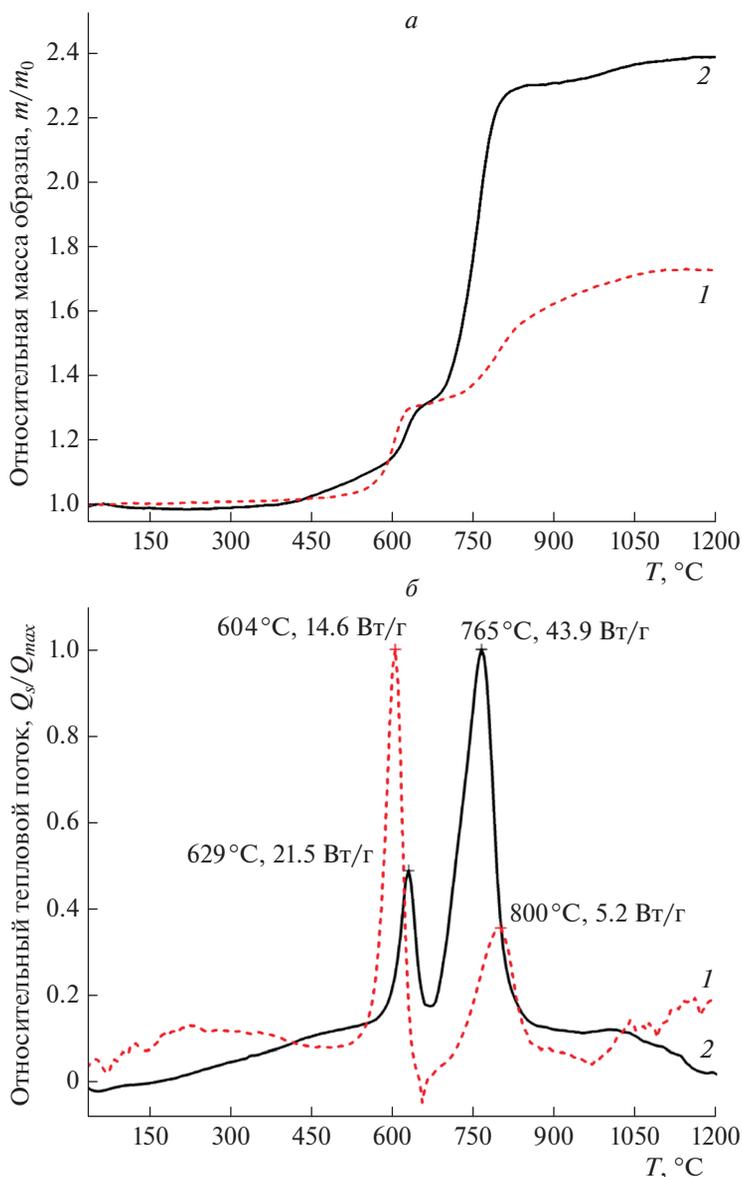


Рис. 1. Данные ТГ- (а) и ДСК-анализов (б) УДП алюминия Alex (1) и Alex/B (2).

ное значение Q_{max} при температуре $\sim 765^\circ\text{C}$. Окисление частиц бора проходит более интенсивно за счет выделения тепла при окислении частиц алюминия. Отметим, что температура интенсивного окисления смеси Alex/B в первой стадии выше на 25°C , а для второй стадии — ниже на 34°C по сравнению с УДП Alex. Суммарное количество выделившегося тепла Q при окислении УДП Alex/B значительно выше удельной теплоты окисления алюминия Alex или диборида алюминия AlB_2 ($Q = 5.23$ кДж/г [21]). Максимальная скорость увеличения массы (окисления) навески УДП Alex/B составляет 5.6 мкг/с при температуре $745\text{--}770^\circ\text{C}$, что в 3.5 раз выше скорости окисления алюминия Alex ($v_{ок} = 1.6$ мкг/с при $T = 590\text{--}610^\circ\text{C}$).

2.2. Зажигание ВЭМ

В исследовании характеристик зажигания ВЭМ, содержащих УДП металла, в качестве внешнего источника нагрева мы использовали непрерывный CO_2 -лазер с регулируемой мощностью от 7 до 200 Вт. Описание и принцип работы экспериментальной установки изложены в работах [9, 17]. Перед опытом отвержденные образцы ВЭМ диаметром 10 мм нарезались на таблетки высотой 5 мм. Диаметр пятна выходного излучения лазера, падающего на торцевую поверхность ВЭМ, был примерно равен диаметру образца. Время задержки зажигания, t_{ign} , ВЭМ, включающего период времени инертного прогрева образца, пиролиза и химических реакций компонентов, опреде-

Таблица 1. Значения температур, удельной теплоты, максимальной скорости окисления и изменения массы УДП Alex и Alex/B

УДП Me	$T_{on}, ^\circ\text{C}$	$T_{int}, ^\circ\text{C}$	$T_{end}, ^\circ\text{C}$	$Q, \text{кДж/г}$	$\Delta m, \%$	$v_{ок}, \text{мкг/с}$ (диапазон температур, $^\circ\text{C}$)
Alex	570	604	628	4.1	71	1.6 (590–610)
	724	799	842			
Alex/B (состава 55.5/44.5)	600	629	655	18.8	135	5.6 (745–770)
	675	765	807			

Примечание: T_{on} – температура начала окисления; T_{int} – температура интенсивного окисления; T_{end} – температура окончания окисления; Q – суммарное удельное тепловыделение; Δm – суммарное изменение массы; $v_{ок}$ – максимальная скорость изменения массы.

ляли по разности электрических сигналов фотодиодов, регистрирующих времена начала инициирования образца ВЭМ (открытия электромагнитного затвора) и появления свечения на поверхности образца. Результаты измерений времени задержки зажигания ВЭМ в зависимости от плотности теплового потока, падающего на образец, представлены в виде экспериментальных точек на рис. 2. Относительная погрешность измерения значений t_{ign} составляла 7–15% при величине доверительной вероятности 0.95.

Экспериментальные значения времени задержки зажигания ВЭМ аппроксимированы степенной функцией и представлены в виде прямых линий на рис. 2:

$$t_{ign} = Aq^{-B},$$

где t_{ign} – время задержки зажигания образца, мс; q – плотность теплового потока излучения, Вт/м²; A, B – константы аппроксимации. Рассчитанные значения констант аппроксимации и коэффициента детерминации R^2 экспериментальных данных для образцов ВЭМ приведены в табл. 2.

Экспериментальные значения t_{ign} ВЭМ снижаются с 136 до 20 мс при увеличении плотности теплового потока от 67 до 209 Вт/см². Сравнительный анализ экспериментальных значений времени задержки зажигания топливных композиций показал, что применение УДП Alex/B в составе ВЭМ-2 снижает время задержки зажигания на 9–17% в диапазоне плотности теплового потока 65–100 Вт/см² по сравнению с составом ВЭМ-1, содержащим УДП Alex. При увеличении значений q до 150–210 Вт/см² время зажигания увели-

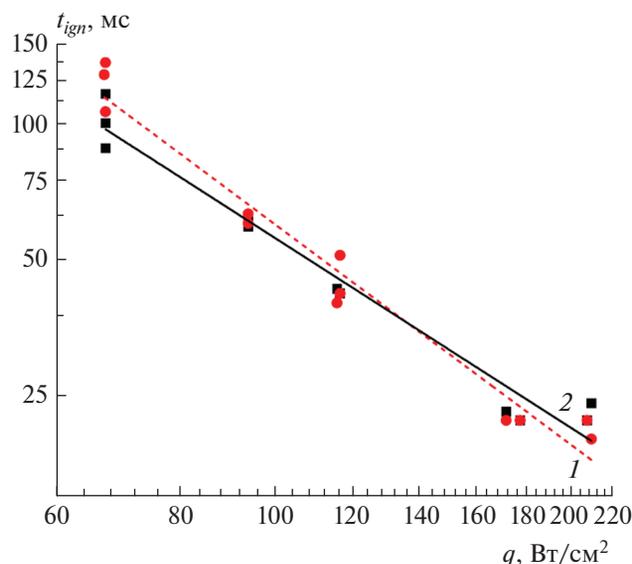


Рис. 2. Время задержки зажигания, t_{ign} , образцов ВЭМ, содержащих УДП Alex (1) и Alex/B (2) в зависимости от плотности q теплового потока излучения.

чивается на 3–12% и эффективность применения УДП Alex/B в ВЭМ-2 снижается. Таким образом, в диапазоне значений $q = 65–210$ Вт/см² изменение t_{ign} состава ВЭМ-2, содержащего Alex/B, не существенное и находится в пределах погрешности измерения.

В начальный период времени прогрева, формирования реакционного слоя и появления видимого пламени наночастицы алюминия, находящиеся на поверхности образца топлива, “вносят” дополнительное тепловыделение и ускоряют процесс разложения окислителя и каучука, что приводит к интенсификации процесса зажигания и выхода на устойчивый режим горения топливной композиции. Частицы бора на данном этапе зажигания инертны и не вносят существенного изменения в характеристики зажигания топлива. Однако мы ожидаем, что при окислении частиц бора в зоне газофазных реакций дополнительное тепловыделение будет существенным (данные ДСК являются подтверждением) и скорость разложения компонентов топлива на поверхности реакционного слоя ВЭМ возрастет.

2.3. Температура зажигания ВЭМ

Для измерения температуры зажигания на облучаемой поверхности ВЭМ мы использовали тепловизионную камеру Jade J530 SB (Франция), которая работает в узкополосном оптическом интервале длин волн 2.5–2.7 мкм и нечувствительна к лазерному излучению. Выбранный оптический фильтр камеры позволяет регистрировать значения температур в диапазоне от 370 до 1800 °С со скоростью 50 кадров/с при относительной погрешности измерения не более 5%. Обработка данных осуществлялась в программном комплексе Altair при постоянном коэффициенте излучения на поверхности образца 0.9.

В экспериментах были определены поля температур по всей площади облучаемой поверхности образцов ВЭМ в периоды времени их нагрева, зажигания и горения при $q = 68$ Вт/см². Максимальные значения температуры T на поверхности образцов ВЭМ (в наиболее горячих локальных точках) в зависимости от времени нагрева и горения топливной композиции даны на рис. 3. В табл. 3 представлены значения температуры T_{ign} на поверхности ВЭМ и максимальной длины фронта пламени l_{max} , соответствующие моменту времени появления видимого пламени с последующим переходом на режим устойчивого зажигания и горения топлива.

Для ВЭМ, содержащего УДП Alex или Alex/B, температура зажигания составляет $T_{ign} = 540–560$ °С при нагреве постоянным лучистым тепловым потоком $q = 68$ Вт/см². В момент появления свечения и оттока воспламенившихся частиц

Таблица 2. Значения констант уравнения для $t_{ign}(q)$ и коэффициент детерминации

Состав образцов ВЭМ	$A, 10^3$	B	R^2
ВЭМ-1, Alex	108.6	1.63 ± 0.16	0.95
ВЭМ-2, Alex/B	35.8	1.40 ± 0.14	0.95

Таблица 3. Максимальные значения температуры зажигания и длины фронта пламени на поверхности образцов ВЭМ

Состав образцов ВЭМ	$T_{ign}, ^\circ\text{C}$	$l_{max}, \text{мм}$
ВЭМ-1, Alex	540 ± 50	220 ± 5
ВЭМ-2, Alex/B	560 ± 30	245 ± 5

алюминия Alex или смеси Alex/B с реакционной поверхности образцов ВЭМ температура резко возрастает до 1215 (ВЭМ-1 с Alex) и 1435 °С (ВЭМ-2 с Alex/B), что подтверждает предположение о том, что частицы бора в процессе окисления “вносят” дополнительный подвод тепла в газофазной зоне химических реакций (факела), что, в свою очередь, приводит к увеличению температуры на поверхности реакционного слоя и скорости оттока продуктов разложения компонентов с поверхности ВЭМ. Длина зоны видимого пламени ВЭМ-2 с УДП Alex/B составляет 245 мм, что на 11% больше длины зоны l_{max} ВЭМ-1 с Alex. При достижении времени ~400 мс нестационарный процесс зажигания переходит в устойчивое горение топливной

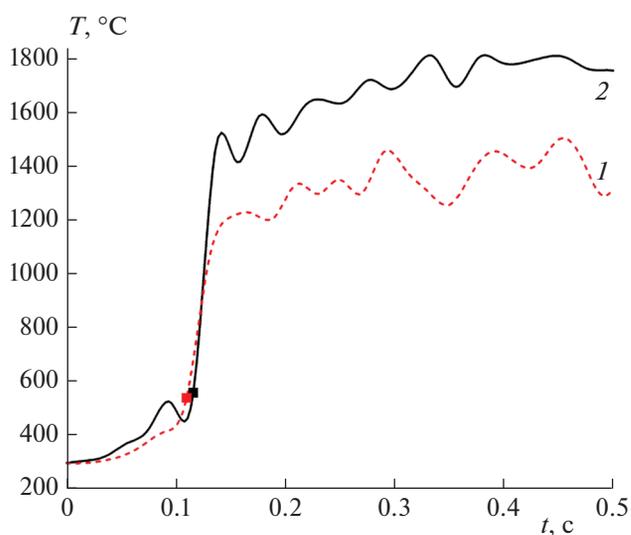


Рис. 3. Зависимость температуры поверхности образцов ВЭМ, содержащих УДП Alex (1) и Alex/B (2), от времени нагрева и горения (точки соответствуют экспериментальным значениям t_{ign}).

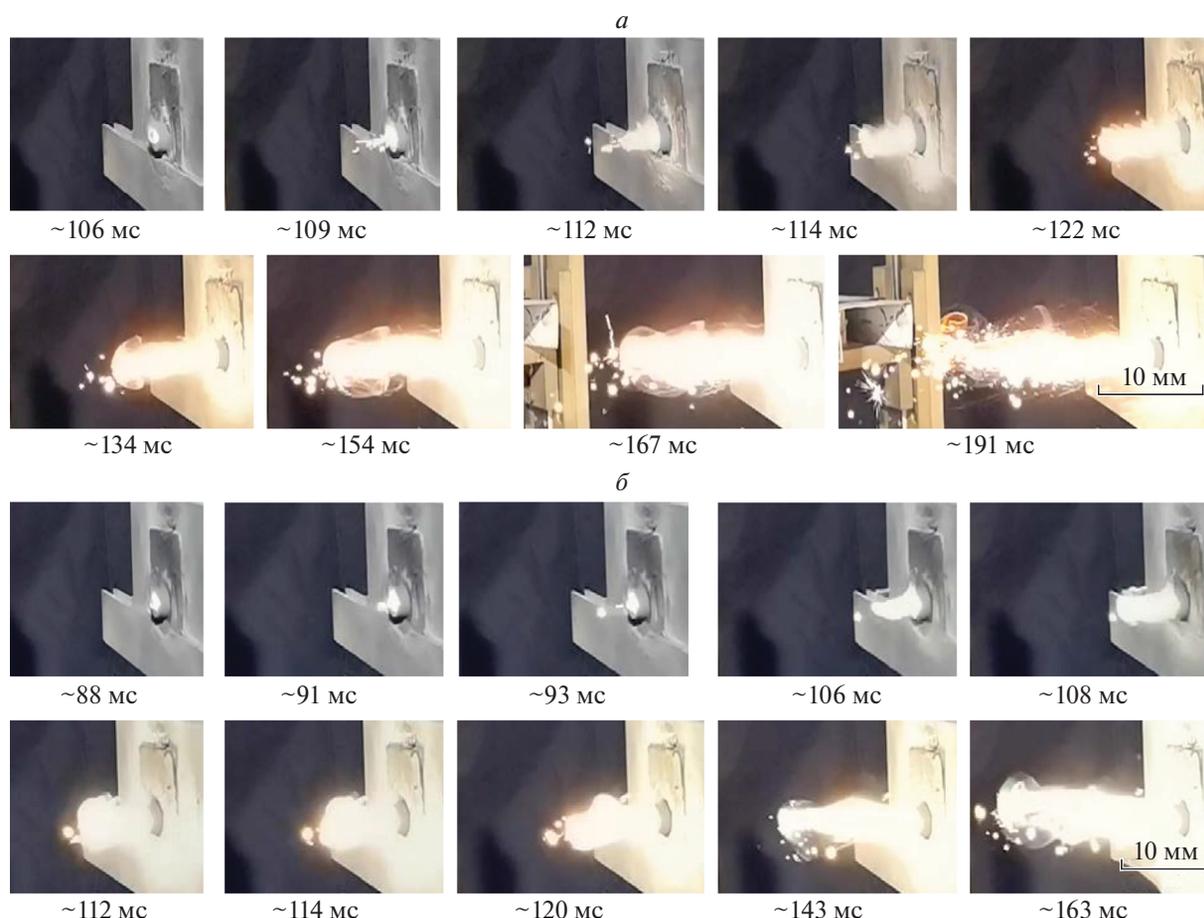


Рис. 4. Кадры скоростной видеосъемки процесса зажигания образцов ВЭМ, содержащих УДП Alex (а) и Alex/V (б).

композиции, при этом температура на поверхности ВЭМ достигает максимальных значений 1400 (ВЭМ-1 с Alex) и 1800 °С (ВЭМ-2 с Alex/V).

Данные высокоскоростной визуализации процесса зажигания исследуемых образцов ВЭМ (скорость видеосъемки – 1920 кадров/с) показали, что свечение на облучаемой торцевой поверхности ВЭМ появляется в местах горячих точек (максимального теплового потока лазерного излучения, имеющего функцию нормального распределения по диаметру образца). Площадь зоны свечения увеличивается сначала в радиальном направлении и затем осевом (рис. 4), охватывая всю площадь торцевой поверхности образца и формируя зону видимого пламени.

Лазерное излучение, попадая на торцевую поверхность образца ВЭМ, поглощается и в результате переноса тепла за счет теплопроводности отводится вглубь образца, формируя прогретый и реакционный слой. Экзотермические реакции, вызванные разложением ПХА и БК, частичным окислением наночастиц алюминия на поверхности реакционного слоя топливной композиции, повышают температуру и способствуют зарожде-

нию свечения в местах горячих точек, увеличивая скорость разложения компонентов топлива. Через короткий промежуток времени (~3 мс) наблюдается отток газообразных продуктов разложения с мелкими частицами алюминия от поверхности ВЭМ-1, образуя вспышку и зону видимого пламени длиной, равной диаметру образца ($\tau = 112$ мс, рис. 4а). Благодаря излучению пламени, температура на поверхности образца резко возрастает (см. рис. 3, кривая 1), вследствие чего интенсивность газовой выделений при термическом разложении компонентов топлива и длина зоны пламени также увеличиваются ($\tau = 134$ мс). Через ~30 мс длина зоны пламени достигает максимального значения. В период формирования пламени наблюдается увеличение концентрации светящихся частиц алюминия, летящих с поверхности топлива.

Воспламенение и горение одиночных частиц алюминия протекает на границе их поверхности за счет диффузии окислителя через оксидный слой, покрывающий частицы. Некоторые крупные частицы-агломераты подвергаются фрагментации при воздействии лазерного излучения и

резкого увеличения температуры в ядре расплавленного алюминия. Температура горения частиц определяется температурой плавления оксидного слоя, которая зависит от диаметра частиц. Известно, что с уменьшением диаметра частиц Al от 100 мкм до 100 нм температура горения на поверхности снижается на 1350 °С и составляет ~1000 °С в кислородсодержащей среде [22].

Механизм зажигания состава ВЭМ-2, содержащего УДП Alex/B (рис. 4б), имеет незначительные отличия по сравнению с ВЭМ-1 с УДП Alex в начальный период формирования зоны видимого пламени. При прогреве образца в локальном очаге (с максимальным тепловым потоком) образуется вспышка при химическом взаимодействии продуктов термического разложения ПХА и БК ($\tau = 88\text{--}93$ мс, рис. 4б). С поверхности образца ВЭМ наблюдается выход крупных одиночных светящихся частиц металла, при этом длина зоны пламени начинает увеличиваться через ~18 мс ($\tau = 96$ мс). Интенсивность оттока газообразных продуктов разложения и крупных частиц металла, состоящих из Al и B ($\tau = 106\text{--}120$ мс), увеличивается из-за выделения тепла в зоне газофазных реакций и на поверхности реакционного слоя топливной композиции при частичном окислении частиц Alex и B и резкого повышения температуры поверхности реакционного слоя (см. рис. 3, кривая 2). Период времени формирования зоны видимого пламени вблизи поверхности образца ВЭМ-2 составляет ~24 мс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного экспериментального исследования процессов термического окисления УДП Alex и Alex/B, а также зажигания образцов ВЭМ на основе ПХА и БК, содержащих 15.7 мас.% металлического горючего, определены основные параметры окисления (характерные температуры, скорость изменения массы, удельная теплота окисления) порошков металлов и характеристики зажигания топливных композиций (температура и время задержки зажигания) при лучистом нагреве.

Значения температуры начала окисления УДП Alex и Alex/B (55.5/44.5) составляют 570 и 600 °С, соответственно, при нагреве в воздухе со скоростью 10 °С/мин, при этом максимальная скорость изменения массы образца смеси Alex/B составляет 5.6 мкг/с в диапазоне температур 745–770 °С (в 3.5 раза выше, чем у УДП Alex).

Применение УДП Alex/B в составе ВЭМ-2 не приводит к существенному изменению времени задержки зажигания в диапазоне плотности теплового потока 65–210 Вт/см² по сравнению с ВЭМ-1, содержащим УДП Alex. Окисление частиц бора и алюминия в зоне газофазных реакций в период

формирования зоны пламени ВЭМ способствует интенсивному увеличению температуры поверхности реакционного слоя и увеличению скорости оттока газообразных продуктов с поверхности ВЭМ. Максимальная длина зоны видимого пламени ВЭМ-2 с Alex/B составляет 245 мм, что на ~11% больше l_{max} ВЭМ-1 с Alex.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-03-00588.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусейнов Ш.Л., Федоров С.Г. Нанопорошки алюминия, бора, боридов алюминия и кремния в высокоэнергетических материалах. М.: Торус Пресс, 2015.
2. Синдицкий В.П., Чёрный А.Н., Чжо С.Х., Бобылёв Р.С. // Успехи в химии и хим. технологии. 2016. Т. 30. № 8. С. 18.
3. Korotkikh A.G., Glotov O.G., Arkhipov V.A., Zarko V.E., Kiskin A.B. // Combust. and Flame. 2017. V. 178. P. 195; <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.01.004>
4. Дорофеенко Е.М., Шереметев А.Б., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 10. С. 33; <https://doi.org/10.1134/S0207401X19080041>
5. Гудкова И.Ю., Зюзин И.Н., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 3. С. 53; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20030061>
6. Маршаков В.Н., Крупкин В.Г., Рашковский С.А. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 11. С. 23; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20110114>
7. Коротких А.Г., Архипов В.А., Слюсарский К.В., Сорокин И.В. // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54. № 3. С. 109; <https://doi.org/10.15372/FGV20180312>
8. Буланин Ф.К., Сидоров А.Е., Киро С.А., Полетаев Н.И., Шевчук В.Г. // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56. № 1. С. 65; <https://doi.org/10.15372/FGV20200107>
9. Коротких А.Г., Сорокин И.В., Селихова Е.А., Архипов В.А. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 7. С. 32; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20070080>
10. Александров В.Ю., Арефьев К.Ю., Прохоров А.Н., Федотова К.В., Шаров М.С., Яновский Л.С. // Изв. вузов. Машиностроение. 2016. № 2(671). С. 65; <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2016-2-65-75>
11. Ягодников Д.А., Воронежский А.В., Сарбаев В.И. // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52. № 3. С. 51; <https://doi.org/10.15372/FGV20160307>
12. Yagodnikov D.A., Guseinov S.L., Storozhenko P.A., Shpara A.P., Sukhov A.V., Fedorov S.G. // Dokl. Chem. 2019. V. 484. № 1. P. 5; <https://doi.org/10.1134/S0012500819010038>
13. Xi J., Liu J., Wang Y., Hu Y., Zhang Y., Zhou J. // J. Propul. Power. 2014. V. 30. № 1. P. 47; <https://doi.org/10.2514/1.B35037>

14. *Liu J.-Z., Xi J.-F., Yang W.-J., Hu Y.-R., Zhang Y.-W., Wang Y., Zhou J.-H.* // *Acta Astronaut.* 2014. V. 96. P. 89;
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.11.039>
15. *Сюй С., Чень Ю., Чень С., Ву Д., Лю Д.-Б.* // *Физика горения и взрыва.* 2016. Т. 52. № 3. С. 97;
<https://doi.org/10.15372/FGV20160314>
16. *Liu L.-J., He G.-Q., Wang Y.-H.* // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2012. V. 114. № 3. P. 1057;
<https://doi.org/10.1007/s10973-013-3119-y>
17. *Korotkikh A.G., Sorokin I.V., Selikhova E.A., Arkhipov V.A.* // *Combust. and Flame.* 2020. V. 222. P. 103;
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.08.045>
18. *Кочетов Н.А., Сеплярский Б.С.* // *Хим. физика.* 2018. Т. 37. № 10. С. 44;
<https://doi.org/10.1134/S0207401X18100059>
19. *Liang D., Xiao R., Liu J., Wang Y.* // *Aerosp. Sci. Technol.* 2019. V. 84. P. 1081;
<https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.11.046>
20. *Sun Y., Ren H., Jiao Q., Schoenitz M., Dreizin E.L.* // *Combust. and Flame.* 2020. V. 221. P. 11;
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.07.022>
21. *Korotkikh A.G., Sorokin I.V.* // *AIP Conf. Proc.* 2020. V. 2212. P. 020029-1;
<https://doi.org/10.1063/5.0000838>
22. *Sundaram D.S., Puri P., Yang V.* // *Combust. and Flame.* 2016. V. 169. P. 94.