

УДК 536.46

В.А. АРХИПОВ, А.Г. КОРОТКИХ**, А.А. ГРОМОВ***, В.Т. КУЗНЕЦОВ*, А.В. ПЕСТЕРЕВ*, И.А. ЕВСЕЕНКО**

ВЛИЯНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ДОБАВОК ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ НА ЗАЖИГАНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ¹

Представлены результаты экспериментального исследования процессов зажигания лучистым потоком тепла и горения при атмосферном давлении высокоэнергетических материалов, содержащих в качестве каталитических добавок порошки металлов. Установлено, что устойчивость зажигания и последующего горения при введении добавки ультрадисперсного порошка (УДП) металлов в состав исследуемых высокоэнергетических материалов возрастает с увеличением интенсивности лазерного излучения. Средняя температура на поверхности горения в момент воспламенения исследуемых составов высокоэнергетических материалов зависит от дисперсности металлического горючего в составе материалов и находится в диапазоне 550–820 °С. Добавка УДП металлов в количестве 1 мас. % в качестве катализатора в состав модельных высокоэнергетических материалов позволяет снизить время задержки воспламенения в 1,2–2,3 раза по сравнению с базовой композицией.

Ключевые слова: процессы зажигания, горение, порошки металлов.

Введение

Порошки металлов, применяемые в составе высокоэнергетических материалов (ВЭМ) в качестве горючих, рассматриваются не только как компоненты, существенно повышающие энергомассовые характеристики высокоэнергетических материалов, но и как модификаторы быстропротекающих процессов горения и взрыва. При этом в зависимости от дисперсности компонентов, состава смеси, давления в камере сгорания, температуры горения и других факторов введение, например, порошкообразного алюминия в состав ВЭМ может привести как к повышению скорости горения топлива, так и к ее снижению [1, 2]. Существенное ускорение процесса скорости горения происходит лишь при применении ультрадисперсных порошков (УДП) металлов, в частности, применение порошка алюминия с размером частиц менее 1 мкм, когда тепловыделение при его окислении на ранних стадиях горения превышает затраты тепла, идущие на прогрев частиц.

Введение УДП алюминия в состав модельных ВЭМ вызывает, как правило, увеличение скорости горения [3–5]. При этом полная замена порошка алюминия микронного размера (типа АСД) на УДП алюминия со среднемассовым размером частиц $d < 0,15$ мкм приводила как к незначительному (не более 25–30 %) приращению скорости горения, так и к существенному (в 2,0–2,5 раза) ее увеличению. Причину неоднозначного влияния УДП на скорость горения топлив, полученного разными исследователями, следует искать в свойствах и распределении по размерам порошка, обусловленных способом его получения, а также в химической природе основных компонентов и их соотношении.

Среди свойств, определяющих эффективность УДП-металлов как компонента высокоэнергетических систем, наиболее важными являются максимальное содержание активного металла, форма частиц, близкая к сферической, их узкофракционное распределение по дисперсности. Содержание активного металла непосредственно определяет уровень энергетических характеристик ВЭМ. Снижение содержания, например, активного алюминия в порошке на 1 мас. %, приводит к уменьшению термодинамического удельного импульса современных высокоэнергетических топлив на 4–5 с [5]. Узкофракционное распределение частиц обеспечивает воспроизводимость баллистических характеристик различных партий топлива при одной и той же компонентной основе.

Повышение эффективности применения порошкообразных металлических горючих как модификаторов процесса зажигания, горения и взрыва, используемых для увеличения скорости горения топлив и детонации взрывчатых веществ, снижения агломерации металлического горючего, может быть обеспечено переводом частиц в ультрадисперсное состояние, введением в их структу-

¹ Работа выполнена при поддержке государственного контракта № 2011-1.9-519-001-020 по теме «Применение нанопорошков металлов в энергетических и керамических технологиях», выполняемой в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

ру различных металлов другой природы, в том числе каталитически активных или снижающих температуру и время задержки воспламенения (например, медь, хром, железо, никель, цинк).

Наряду с эффективным регулированием баллистических характеристик, применение УДП-металлов в составе ВЭМ позволяет существенно снизить двухфазные потери удельного импульса тяги двигателя. Экспериментально показано, что при переводе порошков алюминия в ультрадисперсное состояние изменяется характер горения частиц в пределах конденсированной фазы ВЭМ. Это выражается в раннем воспламенении отдельных частиц алюминия, изменении теплового баланса в конденсированной фазе и увеличении скорости и полноты тепловыделения в зоне, непосредственно примыкающей к ней, что приводит, в конечном итоге, к изменению закономерностей горения ВЭМ, в том числе агломерации частиц алюминия на горячей поверхности.

Из проведенного обзора можно сделать выводы, что для составов ВЭМ на основе перхлората аммония (ПХА) и полимерного горючего уменьшение размера частиц порошка алюминия от 15 до 0,1 мкм приводит к снижению времени задержки воспламенения в 1,3–3,0 раза как в условиях лучистого, так и кондуктивного нагрева [6, 7]. С ростом интенсивности светового потока роль дисперсности порошка алюминия в процессе зажигания составов ВЭМ повышается, что, по-видимому, вызвано снижением прозрачности образца, уменьшением глубины прогретого слоя и повышенной активностью ультрадисперсного порошка алюминия. При нагреве горячим блоком обнаружен взрывной режим зажигания смесевых композиций ВЭМ, содержащих УДП алюминия, который проявляется резким звуковым эффектом, растрескиванием прогретого слоя, дроблением и разлетом фрагментов образца ВЭМ [6]. Механизм взрывного зажигания определяется высокой химической активностью компонентов ВЭМ и наличием твердой стенки, затрудняющей отток продуктов газификации от поверхности образца. Возможность проявления взрывного режима зажигания необходимо учитывать при обеспечении взрывоопасности технологического процесса изготовления зарядов ВЭМ, а также при формировании рабочего процесса в камере ракетного двигателя твердого топлива. УДП железа и меди в количестве до 1 мас. % могут быть использованы в качестве катализаторов в процессе зажигания и горения ВЭМ. Добавки УДП металлов ускоряют процесс разложения окислителя в прогретом слое конденсированной фазы ВЭМ [8]. Не исключается возможность предварительного окисления металлических добавок, оксиды которых являются широко известными катализаторами процесса горения смесевых композиций на основе перхлората аммония. Частичная замена микроразмерного порошка алюминия на УДП алюминий Alex приводит к уменьшению времени задержки воспламенения от 2 до 1,5 с (в 1,3 раза), на УДП бора приводит к уменьшению времени задержки воспламенения до 0,7 с (в 2,9 раза) для ВЭМ на основе нитрата калия от 1,8 до 1,2 с (в 1,5 раза) для ВЭМ на основе нитрата бария [9].

Методика эксперимента

Порошки алюминия

Дисперсность порошков металлов является одной из важнейших характеристик рассматриваемых систем, определяющей их свойства и поведение в конкретных явлениях, процессах зажигания и горения ВЭМ. В связи с интенсивным развитием порошковых нанотехнологий, механики многофазных потоков, методов диагностики актуальными являются задачи адекватного описания спектра размеров полидисперсных систем, идентификации экспериментально полученных распределений частиц по размерам (как правило, опытных гистограмм) и аппроксимации их подходящей функцией плотности вероятности. В работе [10] был предложен метод идентификации унимодальных распределений частиц порошков алюминия по размерам с использованием экспериментальных гистограмм, основанный на постановке и решении обратной задачи поиска экстремума соответствующего функционала с использованием технологии прямого поиска. С помощью данного подхода получены функции массового $g(d)$ и счетного $f(d)$ распределения (табл. 1) для микронных порошков алюминия марок АСД-4, АСД-6, АСД-8, широко используемых в современных составах ВЭМ, а также для ультрадисперсного порошка алюминия марки Alex, полученного методом электрического взрыва проводников. На основе счетного распределения рассчитывались среднестатистические диаметры порошков.

Параметры активности порошков алюминия по данным дифференциального термического анализа [11] представлены в табл. 2. С уменьшением диаметра частиц алюминия снижается содержание активного металла и насыпная плотность порошка. Температура начала интенсивного разложения микронных порошков алюминия марок АСД-1, АСД-4 значительно превышает темпе-

ратуру плавления алюминия 660 °С, ультрадисперсного порошка алюминия марки Alex – меньше. Степень окисления до температуры плавления микронного порошка алюминия марок АСД не превышает 2,5 %, для УДП алюминия степень окисления составляет 50,1 %. Максимальная скорость окисления порошков алюминия имеет одинаковое значение, но в разных диапазонах температур: 920–980 °С – для порошка марок АСД-1, АСД-4, 550–605 °С – для УДП алюминия марки Alex. Расчетная толщина оксидной пленки частицы алюминия $d_{32} = 0,1$ мкм в 18 раз меньше, чем микронной частицы алюминия $d_{32} = 10$ мкм. По данным электронно-микроскопических исследований реальная толщина оксидной пленки частиц УДП алюминия примерно в 2 раза больше расчетной, что обусловлено рыхлостью и рельефностью пассивирующих пленок.

Таблица 1

Среднестатистические диаметры и функции распределения порошков алюминия

Марка порошка	d_{10} , мкм	d_{20} , мкм	d_{30} , мкм	d_{32} , мкм	d_{43} , мкм	Функция распределения, мкм ⁻¹
АСД-4	1,23	1,66	2,28	4,34	7,34	$g(d) = 0,064d^{1,213} \exp(-0,303d)$
АСД-6	0,85	1,17	1,60	3,01	4,72	$g(d) = 0,147d^{1,642} \exp(-0,561d)$
АСД-8	0,72	0,90	1,09	1,60	2,11	$g(d) = 2,286d^{3,149} \exp(-1,968d)$
Alex	0,12	0,13	0,14	0,16	0,18	$f(d) = 28,7 \cdot 10^6 d^{4,49} \exp(-46,8d)$

Примечание. d_{10} , d_{20} , d_{30} , d_{32} , d_{43} – среднесчетный, среднеквадратичный, среднеобъемный, средний объемно-поверхностный и среднемассовый диаметры; $g(d)$, $f(d)$ – массовая и счетная функции распределения.

Таблица 2

Параметры активности порошков алюминия

Марка порошка	$T_{н.и.р}$, °С	α , % (до 660 °С)	α , % (до 1000 °С)	$\nu_{ок}$, мг/с (при T , °С)	C_{Al} , мас. %	ϕ , нм (расчет)	ρ_n , г/см ³
АСД-1	920	0,65	52,2	0,04 (920–950)	99,5	88,1	1,60
АСД-4	820	2,50	41,8	0,05 (970–980)	98,5	17,9	0,87
Alex	540	50,1	78,6	0,05 (550–605)	89,0	0,99	0,11

Примечание. $T_{н.и.р}$ – температура начала интенсивного разложения; α – степень окисления; $\nu_{ок}$ – максимальная скорость окисления; C_{Al} – содержание алюминия; ϕ – толщина оксидного слоя Al_2O_3 ; ρ_n – насыпная плотность порошка.

Составы высокоэнергетических материалов

Влияние дисперсности порошков алюминия на характеристики зажигания исследовалось для двух базовых композиций ВЭМ. Первая композиция (состав А) содержала 24 мас. % энергетического горючего-связующего марки МПВТ-ЛД, 56 мас. % смешанного окислителя (нитрат аммония (НА) и нитрамин (НМХ) в соотношении 50/50) и 20 мас. % порошка алюминия. Вторая композиция (состав В) содержала 12 мас. % инертного каучука марки СКДМ-80, 73 мас. % смешанного окислителя (нитрат аммония, нитрамин, перхлорат аммония в соотношении 40/40/20) и 15 мас. % порошка алюминия. Коэффициент избытка окислителя для этих композиций составлял 0,545. В качестве металлического горючего использовались порошки алюминия марки АСД-4 и Alex. Для каждого из базовых составов ВЭМ варьировалось соотношение содержания порошков алюминия марок АСД-4 и Alex. Дисперсность порошков нитрата аммония, нитрамина и перхлората аммония составляла 160–315 мкм. Компонентные составы исследуемых ВЭМ приведены в табл. 3. Образцы ВЭМ цилиндрической формы диаметром 10 и высотой 30 мм изготавливались методом механического перемешивания исходных компонентов с последующим проходным или глухим прессованием под давлением ~ 215 МПа и вулканизацией. Плотность отвержденных образцов в зависимости от их компонентного содержания составляла $\rho = 1,62$ – $1,65$ г/см³ – для состава А и $\rho = 1,42$ – $1,50$ г/см³ – для состава В. При проведении дублирующих опытов для одинаковых составов разброс плотности образцов не превышал 0,02 г/см³. Пористость образцов не контролировалась и считалась незначительной. Непосредственно перед опытом облучаемую поверхность образца получали путем среза ножом микротомы. Высота образца составляла 5 мм. При этом торцевая поверхность была ровной

без углублений и выступов. Для снижения оптической неоднородности торцевая поверхность исследуемых составов ВЭМ покрывалась ламповой сажей.

Таблица 3

Составы исследуемых образцов ВЭМ, содержащих порошок алюминия

№ состава	Содержание компонентов, мас. %						
	НА	НМХ	ПХА	МПВТ-ЛД	СКДМ-80	Alex	АСД-4
A1	28	28	–	24	–	–	20
A2	28	28	–	24	–	10	10
A3	28	28	–	24	–	20	–
B1	29	29	15	–	12	–	15
B2	29	29	15	–	12	5	10
B3	29	29	15	–	12	15	–

Результаты исследования

Воспламенение составов ВЭМ осуществлялось с помощью лазерной установки на основе одомодового CO₂-лазера непрерывного действия с длиной волны излучения 10,6 мкм и максимальной мощностью 100 Вт. Диаметр пятна выходного излучения 20 мм. Схема установки приведена в работе [7]. Время задержки воспламенения определяли по сигналам двух фотодиодов, один из которых при открытии затвора включал развертку запоминающего осциллографа, второй регистрировал появление пламени образца. Мощность лазерного излучения, падающего на образец ВЭМ, измерялась измерителем средней мощности излучения 5 марки ИМО-2. Время действия импульса лазерного излучения варьировалось в диапазоне 30–1500 мс и определялось из условия устойчивого зажигания и последующего горения образца ВЭМ. Для исследования влияния каталитических добавок порошков металлов использовалась установка «Уран-1» с интегральным световым потоком [6]. Регистрация излучения пламени осуществлялась с помощью фотодиодов типа ФД-9К. Запись электрических сигналов проводилась на осциллографе Н-117/1. Время задержки воспламенения t_{ign} в опытах определяли по появлению пламени, регистрируемого ионизационным датчиком. Электроды ионизационного датчика располагались на расстоянии 3–5 мм от поверхности образца ВЭМ, на которые подавалось напряжение 600 В. При действии светового излучения электрический сигнал фотодиода ФД-9 запускал частотомер электронносчетный ЧЗ-54, а по появлению пламени срабатывал ионизационный датчик, сигнал которого также шел на частотомер. Показания частотомера были равны времени задержки воспламенения.

Измерение температурного поля поверхности исследуемых составов ВЭМ при лазерном зажигании проводили в инфракрасной области спектра 2,5–2,7 мкм с помощью тепловизора марки Jade J 530 SB с цифровой записью на персональном компьютере. Тепловизор укомплектован объективами с фокусным расстоянием 25, 50 и 200 мм. Диапазон измеряемых температур 15–1500 °С. Оптическая ось камеры тепловизора была направлена на поверхность образца под углом 45°. Расстояние от образца ВЭМ до камеры составляло 0,8 м. Съемка проводилась с частотой 100 Гц. Погрешность измерения температуры тепловизором составляла 5 %. Относительная погрешность измерения времени задержки воспламенения t_{ign} при величине доверительной вероятности 95 % составляла 8–18 %. Основная приведенная погрешность измерения мощности излучения составляла 5 %.

Получены времена задержки воспламенения исследуемых составов ВЭМ, содержащих порошок алюминия различной дисперсности, в зависимости от интенсивности лазерного излучения $t_{ign}(q)$. Некоторые результаты измерений, осредненные по трем дублирующим опытам для каждого значения q , представлены на рис. 1. Во всех проведенных экспериментах наблюдалось устойчивое воспламенение и горение ВЭМ.

Аппроксимация опытных данных проводилась методом наименьших квадратов с использованием зависимости в диапазоне $q = 60\text{--}200 \text{ Вт/см}^2$:

$$t_{ign} = b \cdot q^{-n}, \quad (1)$$

где t_{ign} даны в мс, q – в Вт/см².

Полученные при этом значения параметров b , n приведены в табл. 4. Во всех экспериментах наблюдалось уменьшение времени задержки воспламенения ВЭМ с ростом интенсивности теплового излучения.

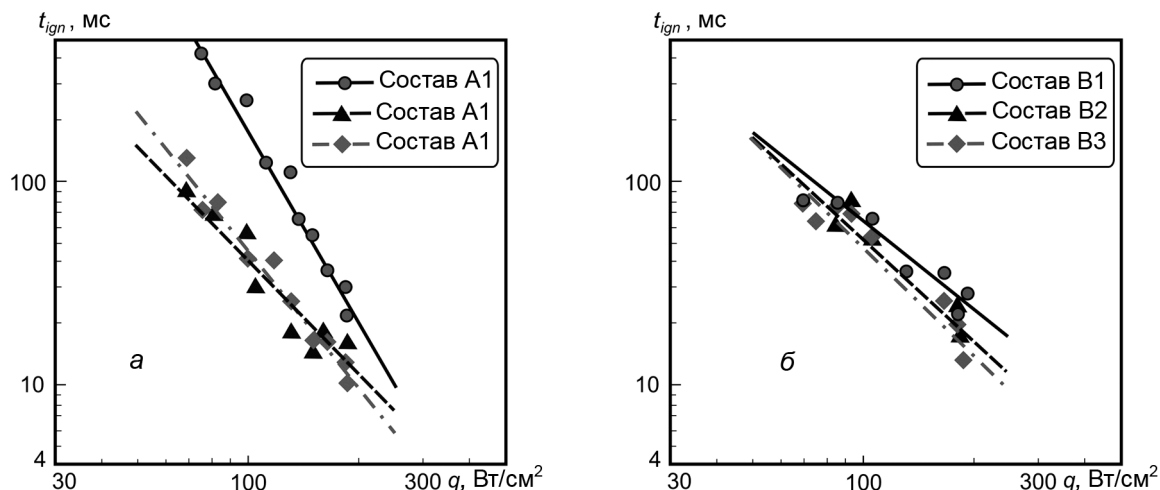


Рис. 1. Время задержки воспламенения составов А (а) и В (б) ВЭМ, содержащих порошок алюминия в зависимости от интенсивности лазерного излучения

Таблица 4
Значения b и n зависимости (1) в диапазоне $q = 60\text{--}200 \text{ Вт/см}^2$

№ состава	$b \cdot 10^{-6}$	n
A1	375	3,16
A2	0,25	1,89
A3	1,59	2,27
B1	0,044	1,42
B2	0,11	1,66
B3	0,17	1,77

Эффективность влияния дисперсности порошка алюминия на процесс воспламенения ВЭМ оценивалась коэффициентом эффективности K , определяемым отношением времени задержки воспламенения базового состава ВЭМ, содержащего микронный порошок алюминия марки АСД-4 (A1 или B1), к времени задержки воспламенения ВЭМ с добавкой УДП алюминия Alex. С увеличением дисперсности порошка алюминия в базовом составе А воспламеняемость ВЭМ существенно улучшается при низких и средних значениях интенсивности теплового излучения. Время задержки воспламенения составов, содержащих УДП алюминия, в 4–6 раз меньше, чем состава A1 с микронным порошком алюминия. При более высоких значениях интенсивности теплового излучения эффективность влияния дисперсности порошка алюминия уменьшается ($K = 1,3\text{--}2,1$). Для базового состава В эффективность влияния дисперсности порошка алюминия незначительна ($K = 1,0\text{--}2,1$), по сравнению с базовым составом А. В диапазоне низких и средних значений интенсивности излучения дисперсность порошка алюминия не влияет на задержку воспламенения, значительное влияние дисперсности порошка алюминия наблюдается при интенсивности теплового излучения 190 Вт/см^2 . Таким образом, наиболее эффективно влияет на снижение времени задержки воспламенения введение добавки УДП алюминия в состав А при значениях интенсивности теплового излучения менее 130 Вт/см^2 , а в состав В при значениях $q > 130 \text{ Вт/см}^2$.

С помощью видеосъемки тепловизором марки Jade J 530 SB определены профили температур на поверхности горения и динамика развития процесса воспламенения базового состава А при значении интенсивности теплового излучения 60 Вт/см^2 . На рис. 2 представлено распределение температуры по поверхности горения базового состава А ВЭМ на основе НА, НМХ и активного горючего-связующего МПВТ-ЛД. Воспламенение составов А2–А3, содержащего УДП алюминия, происходит при температуре $\sim 550\text{--}670^\circ\text{C}$ (рис. 2, r – радиальная координата образца). Развитие процесса горения составов А2–А3 происходит с большими амплитудами температуры на поверхности горения в диапазоне $480\text{--}880^\circ\text{C}$ (рис. 3).

Возможно, это обусловлено значительным уносом теплоты с поверхности горения образца агломерированными частицами порошка алюминия, конденсированной фазой и продуктами сгорания. Воспламенение состава А1, содержащего 20 мас. % порошка алюминия марки АСД-4,

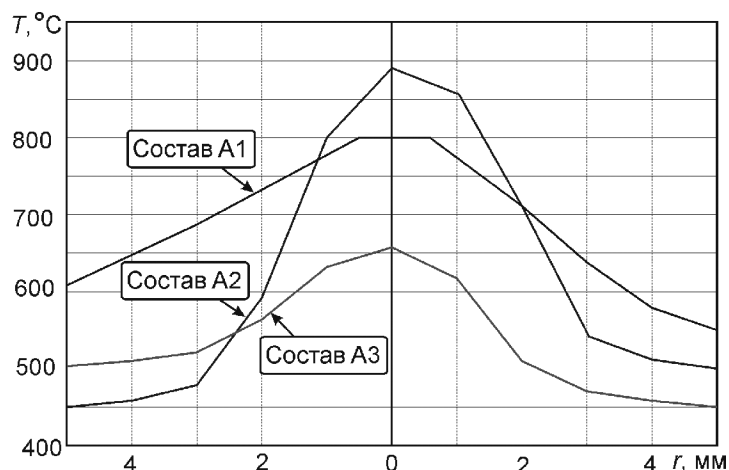


Рис. 2. Профиль температуры по поверхности горения базового состава А ВЭМ в момент воспламенения при $q = 60 \text{ Вт/см}^2$

происходит при значительно более высоких значениях температуры $\sim 713\text{--}820^\circ\text{C}$. Тепловизионная съемка процесса воспламенения состава А1 показала, что в начальный период времени наблюдается слабое свечение пламени продуктов сгорания, происходит прогрев поверхности образца, при этом температура поверхности горения увеличивается от 440 до 720°C . Возможно, реакционный слой состава А1 имеет большую толщину, чем для составов А2–А3, и развитие химической реакции с выделением теплоты и продуктов разложения происходит в глубинных слоях. При достижении температуры $\sim 720^\circ\text{C}$ происходит интенсивное выделение теплоты и продуктов разложения с выбросом поверхностного конденсированного слоя. При этом температура на оголенной поверхности образца резко возрастает до $\sim 950^\circ\text{C}$ за счет аккумулированного тепла в глубинных слоях. Амплитуда и частота колебаний температуры на поверхности горения состава А1 меньше, чем для составов А2–А3. Возможно, это связано с размером и частотой отрыва агломерированных частиц порошка алюминия с поверхности горения.

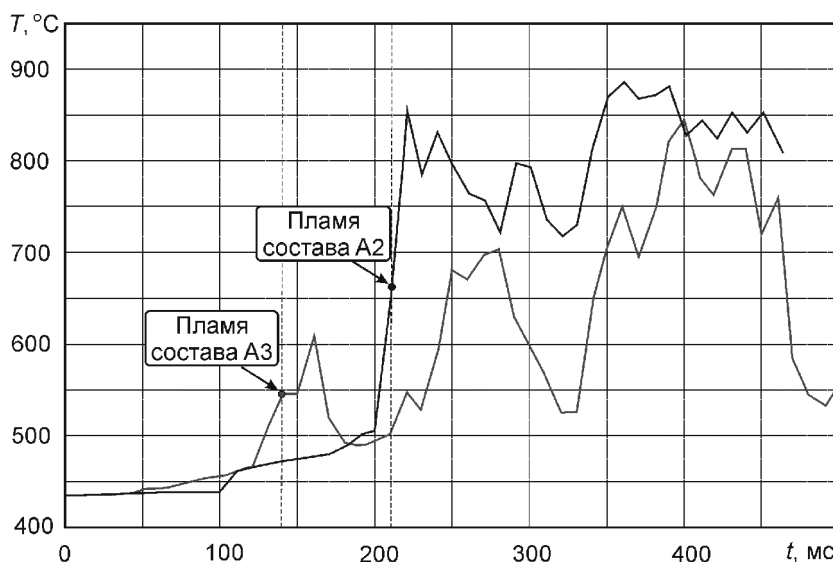


Рис. 3. Термограмма процесса воспламенения смесевых составов А2–А3 ВЭМ

Исследовано влияние металлических порошков в количестве $1 \text{ мас. \%}$ на воспламенение модельных составов ВЭМ на основе смешанного окислителя нитрата аммония, нитрамина и инертного горючего-связующего каучука марки СКДМ-80 интегральным световым потоком на установке «Уран-1» (рис. 4). В качестве металлического горючего использовались порошок алюминия марки АСД-4 ($d = 4,3 \text{ мкм}$), наноразмерный порошок марки Alex ($d = 0,12 \text{ мкм}$), полученный методом электрического взрыва проводников, в качестве каталитических добавок – нанопорошки меди,

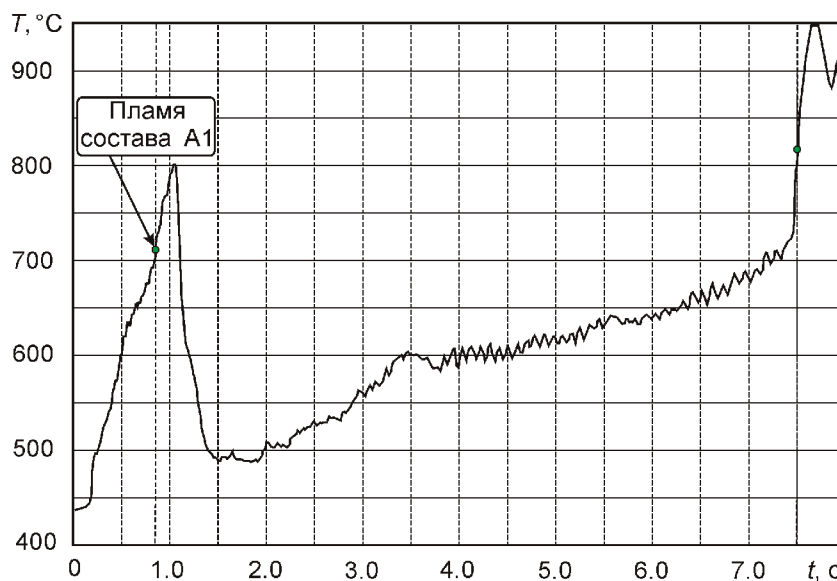


Рис. 4. Термограмма процесса воспламенения смешового состава А1 ВЭМ

никеля, железа и бихромата калия ($K_2Cr_2O_7$). Содержание добавок НП металлов в составе ВЭМ составляло 1 мас. % сверх 100 мас. % состава 1 ВЭМ. Результаты влияния каталитических добавок в составе модельных ВЭМ приведены на рис. 5.

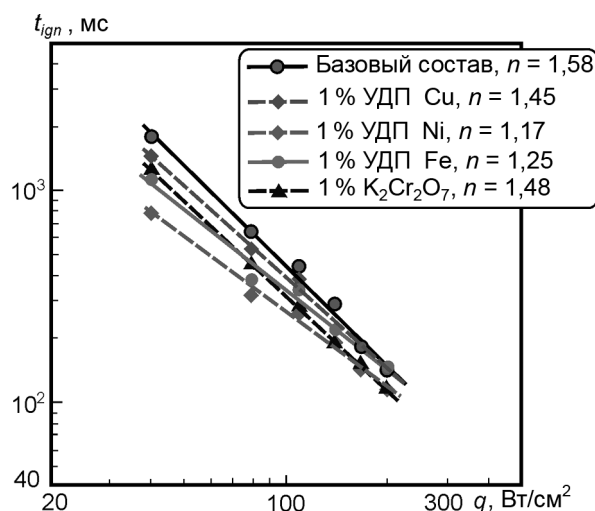


Рис. 5. Влияние добавок катализаторов на воспламенение ВЭМ при различных значениях интенсивности лучистого потока теплоты

Анализ результатов исследования показал, что с увеличением интенсивности теплового потока влияние добавки УДП металлов снижается. По-видимому, это связано с увеличением температуры в прогретом слое конденсированной фазы и с повышением роли газовой фазы в процессе зажигания ВЭМ. Используемые добавки УДП металлов оказывают заметное влияние на химические процессы в конденсированной фазе ВЭМ. Об этом свидетельствуют результаты термического разложения смесей нитрата аммония и нитрамина с добавками УДП металлов, а также данные по снижению зависимости скорости горения от давления, полученные для ВЭМ с добавками УДП алюминия [3]. Уменьшение показателя степени n зависимости (1) связано с каталитической активностью добавок УДП металлов, т.е. чем выше K , тем меньше n зависимости (1). Анализируя полученные зависимости по зажиганию и горению топливных композиций, можно отметить, что ультрадисперсный порошок никеля оказывает наибольшее практическое влияние на процесс зажигания модельных составов ВЭМ, УДП железа и меди ускоряют процесс зажигания ВЭМ. Эффективность добавки зависит от дисперсности порошка металлов. Если время зажигания состава сопоставимо с временем тепловой релаксации в прогретом слое при стационарном горении, то эффективность действия катализатора практически одинакова как в условиях зажигания, так и горения.

Выводы

1. Влияние УДП алюминия на снижение времени задержки воспламенения составов ВЭМ на основе смешанного окислителя (НА–НМХ) и энергетического горючего-связующего МПВТ-ЛД более существенно при низких значениях интенсивности теплового излучения ($q < 130 \text{ Вт/см}^2$). Для составов ВЭМ на основе тройного окислителя НА–НМХ–ПХА и инертного горючего связующего СКДМ-80 эффективность добавки УДП алюминия на процесс зажигания возрастает с увеличением интенсивности теплового излучения ($q > 130 \text{ Вт/см}^2$).

2. Зажигание ВЭМ на основе НА–НМХ и энергетического горючего-связующего МПВТ-ЛД, содержащего УДП алюминия Alex, происходит в конденсированной фазе на поверхности образца при средней температуре $\sim 550^\circ\text{C}$. Зажигание ВЭМ, содержащего микронный порошок алюминия марки АСД-4, происходит в подповерхностных слоях конденсированной фазы образца в диапазоне температур $720\text{--}820^\circ\text{C}$, при этом время прогрева реакционного слоя и задержки воспламенения увеличивается в 6 раз, по сравнению с ВЭМ, содержащего УДП алюминия Alex, при значении интенсивности теплового излучения 60 Вт/см^2 .

3. Добавка УДП металлов в количестве 1 мас. % в качестве катализатора в состав модельных ВЭМ позволяет снизить время задержки воспламенения в 1,2–2,3 раза по сравнению с базовой композицией. Наиболее эффективной добавкой является УДП никеля, показатель степенной зависимости которого наименьший.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Simonenko V.N. and Zarko V.E. // «Energetic Materials: Production, Processing and Characterization». Proc. 30th Intern. Annual Conf. of ICT. – Karlsruhe, Germany, 1999. – P. 21-1–21-14.
2. DeLuca L.T., Cozzi F., Manenti S., et al. // «Energetic Materials: Production, Processing and Characterization». Proc. 32nd Intern. Annual Conf. of ICT. – Karlsruhe, Germany, 2001. – P. 10-1–10-14.
3. Попенко Е.М., Громов А.А., Шамина Ю.Ю. и др. // ФГВ. – 2007. – Т. 43. – № 1. – С. 54–59.
4. Архипов В.А., Коротких А.Г., Кузнецов В.Т., Савельева Л.А. // Химическая физика. – 2004. – Т. 23. – № 9. – С. 18–21.
5. Mench M.M., Kuo K.K., Yeb C.L., and Lu Y.C. // Comb. Sci. Technol. – 1998. – V. 135. – P. 269–292.
6. Архипов В.А., Коротких А.Г., Кузнецов В.Т., Синогина Е.С. // Химическая физика. – 2007. – Т. 26. – № 6. – С. 58–67.
7. Архипов В.А., Коротких А.Г., Кузнецов В.Т. и др. // Химическая физика. – 2011. – Т. 30. – № 7. – С. 68–76.
8. Atwood A.I., Ford K.P., Bui D.T., et al. // Progress in Propulsion Physics. V. 1 / ed. by L. DeLuca, C. Bonnal, O. Haidn, and S. Frolov. – Moscow: TORUS PRESS, 2009. – P. 121–140.
9. Simonenko V.N., Zarko V.E., Kiskin A.B., et al. // «Energetic Materials: Production, Processing and Characterization». Proc. 32nd Intern. Annual Conf. of ICT. – Karlsruhe, Germany, 2001. – P. 122-1–122-12.
10. Архипов В.А., Бондарчук С.С., Коротких А.Г., Лернер М.И. // Горный журнал. – 2006. – № 4. – С. 58–65.
11. Громов А.А., Ильин А.П., Архипов В.А. и др. Горение нанопорошков металлов. – Томск: Дельтаплан, 2008. – 385 с.

*НИИ прикладной математики и механики, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 20.10.11.

**Энергетический институт Национального исследовательского

Томского политехнического университета, г. Томск, Россия

***Физико-технический институт Национального исследовательского

Томского политехнического университета, г. Томск, Россия

E-mail: leva@niipmm.tsu.ru; korotkikh@tpu.ru

Архипов Владимир Афанасьевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. отделом;
Коротких Александр Геннадьевич, к.ф.-м.н., доцент, доцент каф. АТЭС;
Громов Александр Александрович, д.т.н., профессор, профессор каф. ТСН;
Кузнецов Валерий Тихонович, к.т.н., ст. науч. сотр., зав. лабораторией;
Пестерев Алексей Викторович, мл. науч. сотр.;
Евсеев Иван Анатольевич, аспирант.