

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА МЕТАЛЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ ВЭМ

^{1,2}КОРОТКИХ А. Г., ²АРХИПОВ В. А., ³ГЛОТОВ О. Г., ¹СОРОКИН И. В.

¹Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

²Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

³Институт химической кинетики и горения Сибирского отделения РАН им. В.В. Воеводского, 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

АННОТАЦИЯ. В работе представлены результаты термодинамического расчета и экспериментального исследования влияния добавок металла на характеристики горения высокоэнергетических материалов на основе перхлората аммония, бутадиенового каучука и порошка алюминия. Установлено, что частичная или полная замена алюминия на добавки металлов (В, Mg, AlB₂, Al/Mg, Cu, Fe, Ti и Zr) в составе ВЭМ приводит к снижению значений удельного импульса и температуры горения. Экспериментально показано, что частичная замена алюминия Alex на УДП железа в составе ВЭМ приводит к увеличению скорости горения топлива в 1,3 – 1,4 раза в диапазоне давления 2,2 – 7,5 МПа. При этом агломерация металлического горючего несколько усиливается: средний диаметр частиц-агломератов увеличивается максимум в 1,2 раза, а содержание агломератов в составе КПС увеличивается в 1,4 раза. При частичной замене Alex на УДП бора в составе ВЭМ скорость горения по отношению к базовому топливу практически не изменяется. Однако агломерация металлического горючего на поверхности горения образца значительно усиливается, которая проявляется в увеличении содержания частиц-агломератов в составе КПС в 1,8 – 2,2 раза, в увеличении среднего диаметра агломератов в 1,6 – 1,7 раза, в увеличении доли металла, вовлеченного в агломераты в 1,6 – 1,9 раза. При этом содержание и средний диаметр оксидных частиц в составе КПС уменьшаются более значительно, чем при введении железа на 20 – 30 % и 30 – 40 %, соответственно.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высокоэнергетический материал, порошок металла, температура горения, скорость горения, конденсированные продукты сгорания.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время воспламенение и горение высокоэнергетических материалов (ВЭМ) с ультрадисперсным порошком (УДП) алюминия интенсивно исследуются в ряде стран [1 – 5], т.к. добавки УДП металлов могут существенно модифицировать основные характеристики горения топлив. Так, например, заменой порошка алюминия марок АСД со средним диаметром частиц 4 – 10 мкм в составе ВЭМ на ультрадисперсный со средним диаметром частиц 0,1 – 0,2 мкм можно достичь увеличения линейной скорости горения ВЭМ на порядок. При этом химический состав топлива остается неизменным, т.е. УДП металлов играют роль модификаторов скорости горения. Одновременно, добавки УДП металлов позволяют существенно улучшить воспламеняемость ВЭМ [6 – 8]. При этом может меняться гранулометрический состав конденсированных продуктов сгорания (КПС) [9].

Основными характеристиками горения применительно к энергосиловым установкам являются зависимость линейной скорости горения от давления, температура горения топлива, единичный импульс [10], равный приросту величины тяги, реализуемому при сгорании единицы массы твердого топлива, а также химический и гранулометрический состав конденсированных продуктов сгорания.

Одним из способов увеличения характеристик горения ВЭМ является использование в составе топлив катализаторов горения или порошков металлов и их оксидов. Целью работы является определение возможных добавок металла в ВЭМ, позволяющих увеличить основные параметры горения топлива и снизить количество, размер частиц конденсированных продуктов сгорания.

ПАРАМЕТРЫ ГОРЕНИЯ

Для определения круга возможных добавок металлов и их эффективности использования с помощью программы термодинамического расчета Терра [11] проведена серия расчетов параметров горения и равновесного состава КПС модельного состава ВЭМ, содержащего 64,6 масс. % перхлората аммония (ПХА), 19,7 масс. % бутадиенового каучука и 15,7 масс.% порошка алюминия. В модельном составе ВЭМ дисперсность порошка алюминия варьировалась, при этом массовая доля активного алюминия в составе используемых порошков алюминия (марок АСД и Alex) изменялась от 0,85 до 0,99 в зависимости от размера частиц. На основе анализа результатов проведенных экспериментальных исследований по горению ВЭМ, опубликованных в открытой литературе, в качестве добавок были отобраны порошки металлов: бора, магния, титана, железа, меди, циркония, бориды алюминия и алюмино-магниевый сплав. Первоначальное окисление используемых металлических добавок считалось равным нулю. Массовое отношение компонентов в сплаве принималось равным $Al/B = 0,55/0,45$ и $Al/Mg = 0,50/0,50$. Предполагалось, что добавка металла вводится в модельный состав ВЭМ путем частичной или полной замены порошка алюминия.

Основные расчетные параметры горения модельного состава ВЭМ представлены в табл. 1. Приведены значения энтальпии I , температуры горения T_{ad} топлив, равновесного показателя адиабаты k , молекулярной массы газообразных продуктов сгорания μ , коэффициента избытка окислительных элементов α . Для газодинамической степени расширения потока использовали отношение давлений $p_c/p_a = 4,0/0,1$ МПа. Индексом «с» отмечены параметры в камере сгорания, индексом «а» – на срезе сопла. Также приведены значения скорости истечения продуктов сгорания w и пустотного удельного импульса J .

Таблица 1

Параметры горения ВЭМ с добавками металла

ВЭМ с порошком металла	I , кДж/кг	T_{ad} , К	k	μ , г/моль	α	w , м/с	J , м/с
В*	-1841	2215	1,210	19,09	0,33461	2228	2482
Mg*	-1841	2603	1,171	18,395	0,42210	2289	2509
Al*	-1841	2638	1,184	17,107	0,40637	2351	2590
АСД-1	-1854	2636	1,184	17,097	0,40689	2349	2588
АСД-4	-1893	2631	1,184	17,071	0,40844	2346	2582
АСД-6	-1937	2624	1,183	17,043	0,41020	2341	2575
АСД-10	-1979	2617	1,183	17,018	0,41192	2336	2568
Alex	-2228	2561	1,186	16,947	0,42201	2299	2519
Alex+2 % В	-2179	2366	1,197	18,041	0,40874	2285	2517
АСД-4+2 % В	-1886	2408	1,196	18,207	0,39730	2329	2571
AlB ₂	-1841	2353	1,151	18,967	0,36312	2303	2558
Al/Mg (сплав)	-1841	2567	1,171	18,12	0,41409	2325	2552
Alex+2 % Cu	-2179	2463	1,203	17,481	0,42562	2244	2456
АСД-4+2 % Cu	-1886	2564	1,189	17,319	0,41359	2302	2523
Alex+2 % Fe	-2179	2477	1,201	17,529	0,42404	2244	2455
АСД-4+2 % Fe	-1886	2576	1,186	17,358	0,41206	2303	2523
Alex+2 % Ti	-2179	2530	1,192	17,011	0,42193	2278	2496
АСД-4+2 % Ti	-1886	2608	1,184	17,077	0,41003	2325	2552
Alex+2 % Zr	-2179	2540	1,194	17,012	0,42475	2275	2489
АСД-4+2 % Zr	-1886	2621	1,185	16,99	0,41274	2328	2553

* Примечание: здесь и в табл. 2 В, Mg и Al не содержат оксидный слой.

При повышении дисперсности порошка алюминия по ряду АСД-4→АСД-6→АСД-10→Аlex происходит снижение удельного импульса J и температуры горения T_{ad} топлив за счет уменьшения массовой доли активного алюминия в исходных порошках. Частичная или полная замена алюминия на добавки металлов (В, Mg, AlB₂, Al/Mg, Cu, Fe, Ti и Zr) в составе ВЭМ также приводит к снижению значений J и T_{ad} .

ПАРАМЕТРЫ КПС

В табл. 2 представлены расчетные значения параметров конденсированных продуктов сгорания ВЭМ: массовые доли m_c и m_a , фазовый состав конденсированных частиц, содержащихся в продуктах сгорания при давлениях в камере сгорания $p_c = 4$ МПа и на срезе сопла $p_a = 0,1$ МПа.

По ряду Al → АСД-1 → АСД-4 → АСД-6 → АСД-10 → Alex вследствие предположения о наличии оксида в исходном порошке алюминия, массовая доля к-фазы в продуктах сгорания возрастает. Отметим, что при горении ВЭМ с бором в камере доля конденсированного оксида бора невелика и в продуктах сгорания преобладает нитрид бора. Вследствие особенностей добавок В и Mg (соотношение молярных масс элементов и оксидов, стехиометрических коэффициентов реакций окисления), частичная замена алюминия на В и Mg (как в механической смеси, так и в механосплаве) приводит к снижению массовой доли m_c КПС. Так, для составов ВЭМ с В и AlB₂ m_c уменьшается на 24 и 36 %, соответственно, относительно базового состава ВЭМ с чистым алюминием Al*.

Для составов ВЭМ с добавками Fe и Cu также имеет место снижение m_c на 4 – 10 % в зависимости от дисперсности порошка алюминия. При горении топлива в камере эти соединения не образуют конденсированных продуктов. В результате в КПС содержится меньше Al₂O₃ и массовая доля к-фазы снижается. Соответственно, в составах ВЭМ с добавками Fe, Cu эффект снижения m_c более выражен в случае с Alex, чем с АСД-4, за счет большего содержания оксида Al₂O₃ в Alex. При добавке Ti и Zr в случае состава ВЭМ с АСД-4, напротив, оксиды Ti₃O₅ и ZrO₂ вносят дополнительный вклад в КПС и m_c увеличивается. Анализируя данные расчетов, относящихся к выходному сечению сопла, отметим увеличение m_a на 13 % для состава ВЭМ с AlB₂ за счет образования В₂O₃ в КПС. В случае составов ВЭМ с Alex и АСД-4 добавки металлов снижают массовую долю КПС на выходе из сопла.

Для сравнительного анализа расчетных данных были отобраны составы ВЭМ с Alex, Alex+Fe и Alex+В и проведено экспериментальное исследование горения образцов использованием проточной камеры сгорания с отбором конденсированных частиц продуктов [7]. В результате исследования установлено, что частичная замена Alex на 2 масс.% нанопорошка Fe в составе ВЭМ приводит к увеличению скорости горения топлива в 1,3 – 1,4 раза в диапазоне давления 2,2 – 7,5 МПа (рисунок). При этом агломерация металлического горючего несколько усиливается: средний диаметр частиц-агломератов увеличивается максимум в 1,2 раза, и содержание агломератов в составе КПС увеличивается в 1,4 раза. Содержание и средний диаметр оксидных частиц в составе КПС уменьшаются до 16 % и 13 %, соответственно. При частичной замене Alex на нанопорошок В в составе ВЭМ скорость горения по отношению к базовому топливу практически не изменяется в диапазоне давления 2,2 – 7,5 МПа. Однако агломерация значительно усиливается, что проявляется в увеличении содержания частиц-агломератов в составе КПС в 1,8 – 2,2 раза, в увеличении среднего диаметра агломератов в 1,6 – 1,7 раза, в увеличении доли металла, вовлеченного в агломераты в 1,6 – 1,9 раза. При этом содержание и средний диаметр оксидных частиц в составе КПС уменьшаются более значительно, чем при введении железа, в 1,2 – 1,3 раза и в 1,3 – 1,4 раза, соответственно.

Параметры КПС

ВЭМ с порошком металла	m_c , m_a	Фазовый состав и массовая доля к-фазы
В*	0,17175 0,37286	$[B_2O_3]_c = 0,01904$; $[BN]_c = 0,13587$; $[B_4C]_c = 0,01684$ $[B_2O_3]_a = 0,19266$; $[BN]_a = 0,13643$; $[B_4C]_a = 0,02746$; $[C]_a = 0,01631$
Mg*	0,19665 0,25803	$[MgO]_c = 0,19665$ $[MgO]_a = 0,25803$
Al*	0,25272 0,29605	$[Al_2O_3]_c = 0,25272$ $[Al_2O_3]_a = 0,28825$; $[C]_a = 0,00780$
АСД-1	0,25325 0,29575	$[Al_2O_3]_c = 0,25325$ $[Al_2O_3]_a = 0,28823$; $[C]_a = 0,00752$
АСД-4	0,25478 0,29460	$[Al_2O_3]_c = 0,25478$ $[Al_2O_3]_a = 0,28798$; $[C]_a = 0,00662$
АСД-6	0,25642 0,29283	$[Al_2O_3]_c = 0,25642$ $[Al_2O_3]_a = 0,28735$; $[C]_a = 0,00548$
АСД-10	0,25787 0,29062	$[Al_2O_3]_c = 0,25787$ $[Al_2O_3]_a = 0,28638$; $[C]_a = 0,00424$
Alex	0,26253 0,27569	$[Al_2O_3]_c = 0,26253$ $[Al_2O_3]_a = 0,27569$
Alex+2 % В	0,20036 0,29253	$[Al_2O_3]_c = 0,20036$ $[Al_2O_3]_a = 0,24039$; $[B_2O_3]_a = 0,02685$; $[BN]_a = 0,02529$
АСД-4+2 % В	0,19089 0,29821	$[Al_2O_3]_c = 0,19089$ $[Al_2O_3]_a = 0,25594$; $[B_2O_3]_a = 0,00045$; $[BN]_a = 0,04182$
AlB ₂	0,16798 0,33444	$[Al_2O_3]_c = 0,07914$; $[BN]_c = 0,08884$ $[Al_2O_3]_a = 0,12644$; $[BN]_a = 0,13171$; $[B_2O_3]_a = 0,07629$
Al/Mg (сплав)	0,20855 0,26815	$[MgAl_2O_4]_c = 0,20611$; $[MgO]_c = 0,00244$ $[MgAl_2O_4]_a = 0,20695$; $[MgO]_a = 0,06120$
Alex+2 % Cu	0,23721 0,25903	$[Al_2O_3]_c = 0,23721$ $[Al_2O_3]_a = 0,24057$; $[Cu]_a = 0,01846$
АСД-4+2 % Cu	0,24307 0,27369	$[Al_2O_3]_c = 0,24307$ $[Al_2O_3]_a = 0,25641$; $[Cu]_a = 0,01728$
Alex+2 % Fe	0,23744 0,24058	$[Al_2O_3]_c = 0,23744$ $[Al_2O_3]_a = 0,24058$
АСД-4+2 % Fe	0,24355 0,25641	$[Al_2O_3]_c = 0,24355$ $[Al_2O_3]_a = 0,25641$
Alex+2 % Ti	0,26037 0,27392	$[Al_2O_3]_c = 0,23207$; $[Ti_3O_5]_c = 0,02830$ $[Al_2O_3]_a = 0,24057$; $[TiO_2]_a = 0,03335$
АСД-4+2 % Ti	0,25617 0,28128	$[Al_2O_3]_c = 0,23146$; $[Ti_3O_5]_c = 0,02471$ $[Al_2O_3]_a = 0,25541$; $[Ti_2O_3]_a = 0,02442$; $[C]_a = 0,00145$
Alex+2 % Zr	0,26008 0,26759	$[Al_2O_3]_c = 0,23317$; $[ZrO_2]_c = 0,02691$ $[Al_2O_3]_a = 0,24057$; $[ZrO_2]_a = 0,02702$
АСД-4+2 % Zr	0,25954 0,28274	$[Al_2O_3]_c = 0,23283$; $[ZrO_2]_c = 0,02671$ $[Al_2O_3]_a = 0,25555$; $[ZrO_2]_a = 0,02660$; $[C]_a = 0,00059$

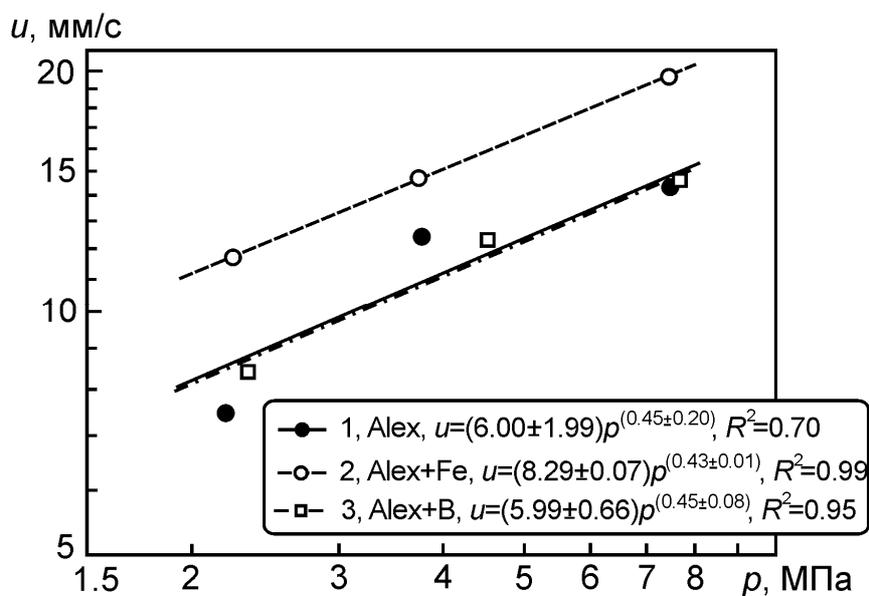


Рис. Скорость горения ВЭМ с металлами от давления среды

Рентгенофазовый анализ отобранных оксидных частиц КПС (менее 80 мкм), с использованием дифрактометра Shimadzu XRD 6000 показал, что содержание аморфных фаз в отобранных КПС для ВЭМ с Alex составляет ~ 35 масс. %, образца ВЭМ с Alex+Fe ~ 30 масс. % и образца ВЭМ с Alex+B ~ 25 масс. % при давлении $p = 2,2$ МПа. При увеличении давления в камере сгорания до 7,5 МПа содержание аморфных фаз в составе КПС уменьшается до ~ 20 % – для ВЭМ с Alex и ~ 15 % – для ВЭМ с Alex+B. Для ВЭМ с Alex+Fe содержание аморфных фаз КПС практически не изменяется и находится в пределах погрешностей измерения. Фазовый состав КПС для исследуемых образцов ВЭМ без учета аморфных фаз представлен в табл. 3.

Таблица 3

Фазовый состав оксидных частиц КПС

ВЭМ с порошком металла	p , МПа	Содержание кристаллической фазы, масс. %					
		α - Al_2O_3	θ - Al_2O_3	γ - Al_2O_3	χ - Al_2O_3	C_3N_4	другие
Alex	2,2	2,7	35,4	–	17,6	44,3	–
	3,8	11,3	32,4	33,7	10,3	12,3	–
	7,5	8,4	42,8	–	12,2	36,6	–
Alex+ 2 % Fe	2,2	5,4	23,0	–	28,6	40,3	2,7 Fe_3C
	3,7	5,4	54,8	16,4	–	23,4	–
	7,5	7,9	17,2	–	35,8	36,0	3,1 Fe_3C
Alex+2 % B	2,3	5,8	30,7	–	17,8	22,5	23,2 $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$
	4,5	35,3	13,3	5,0	–	6,7	39,7 $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{10}(\text{B}_2\text{O}_3)_2$
	7,7	5,6	13,9	–	17,1	12,2	51,2 $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$

Полученные результаты XRD-анализа показывают хорошую сходимость с расчетными значениями (табл. 2). Отметим наличие кристаллической фазы нитрида углерода C_3N_4 в составе КПС для исследуемых составов ВЭМ (до 44 масс. % в случае топлива с Alex при $p = 2,2$ МПа). Частичная замена Alex на бор в составе ВЭМ приводит к уменьшению содержания нитрида углерода C_3N_4 в 2 – 3 раза в составе оксидных частиц КПС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате термодинамического расчета параметров горения ВЭМ установлено, что при повышении дисперсности алюминия по ряду АСД-4→АСД-6→АСД-10→Аlex происходит снижение удельного импульса J и температуры горения T_{ad} топлив за счет уменьшения массовой доли активного алюминия в исходных порошках. Частичная или полная замена алюминия на добавки металлов (В, Mg, AlB₂, Al/Mg, Cu, Fe, Ti и Zr) в составе ВЭМ также приводит к снижению значений удельного импульса и температуры горения. Частичная замена порошка алюминия на В и AlB₂ приводит к снижению массовой доли m_c конденсированных частиц в продуктах сгорания на 24 и 36 %, соответственно, относительно базового состава ВЭМ с Al*.

В результате экспериментального исследования горения составов ВЭМ с Alex, Alex+2 % Fe и Alex+2 % В с использованием проточной камеры сгорания с отбором конденсированных частиц продуктов сгорания установлено, что частичная замена Alex на УДП железа в составе ВЭМ приводит к увеличению скорости горения топлива в 1,3 – 1,4 раза в диапазоне давления 2,2 – 7,5 МПа. При этом агломерация металлического горючего несколько усиливается: средний диаметр частиц-агломератов увеличивается максимум в 1,2 раза, а содержание агломератов в составе КПС увеличивается в 1,4 раза.

При частичной замене Alex на УДП бора в составе ВЭМ скорость горения по отношению к базовому топливу практически не изменяется в диапазоне давления 2,2 – 7,5 МПа. Однако агломерация металлического горючего на поверхности горения образца значительно усиливается, которая проявляется в увеличении содержания частиц-агломератов в составе КПС в 1,8 – 2,2 раза, в увеличении среднего диаметра агломератов в 1,6 – 1,7 раза, в увеличении доли металла, вовлеченного в агломераты в 1,6 – 1,9 раза. При этом содержание и средний диаметр оксидных частиц в составе КПС уменьшаются более значительно, чем при введении железа, в 1,2 – 1,3 раза и в 1,3 – 1,4 раза, соответственно.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-03-00630а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Де Лука Л. Т., Галфетти Л., Саверини Ф., Меда Л., Марра Ж., Ворожцов А. Б., Седой В. С., Бабук В. А. Горение смесевых твердых топлив с наноразмерным алюминием // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 6. С. 80-94.
2. Архипов В. А., Бондарчук С. С., Коротких А. Г., Кузнецов В. Т., Громов А. А., Волков С. А., Ревягин Л. Н. Влияние дисперсности алюминия на характеристики зажигания и нестационарного горения гетерогенных конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48, № 5. С. 148-159.
3. Jayaraman K., Anand K. V., Chakravarthy S. R., Sarathi R. Effect of nano-aluminium in plateau-burning and catalyzed composite solid propellant combustion // Combustion and Flame, 2009, vol. 156, pp. 1662-1673.
4. Бернер М. К., Зарко В. Е., Талавар М. Б. Наночастицы энергетических материалов: способы получения и свойства (обзор) // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49, № 6. С. 3-30.
5. Комарова М. В., Комаров В. Ф., Вакутин А. Г., Яценко А. В. Влияние наноразмерных биметаллических частиц на характеристики горения смесевоего топлива // Ползуновский вестник. 2010. № 4-1. С. 112-116.
6. Архипов В. А., Коротких А. Г., Кузнецов В. Т., Раздобреев А. А., Евсеенко И. А. Влияние дисперсности порошка алюминия на характеристики зажигания смесевых композиций лазерным излучением // Химическая физика. 2011. Т. 30, № 7. С. 68-76.
7. Arkhipov V. A., Korotkikh A. G. The influence of aluminum powder dispersity on composite solid propellants ignitability by laser radiation // Combustion and Flame, 2012, vol. 159, pp. 409-415.
8. Коротких А. Г., Архипов В. А., Глотов О. Г., Кискин А. Б., Зарко В. Е. Влияние порошка железа на характеристики зажигания и горения смесевых твердых топлив // Химическая физика и мезоскопия. 2015. Т. 17, № 1. С. 12-22.

9. Глотов О. Г., Ягодников Д. А., Воробьев В. С., Зарко В. Е., Симоненко В. Н. Воспламенение, горение и агломерация капсулированных частиц алюминия в составе смесового твердого топлива. II. Экспериментальные исследования агломерации // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 3. С. 83-97.

10. Архипов В. А., Кискин А. Б., Зарко В. Е., Коротких А. Г. Лабораторная методика измерения единичного импульса твердого ракетного топлива // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50, № 5. С. 134-137.

11. Трусов Б. Г. Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высокой температуре // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 1(1). С. 21.

EFFECT OF METAL ULTRAFINE POWDERS ON THE HEM COMBUSTION CHARACTERISTICS

^{1,2}Korotkikh A. G., ²Arkhipov V. A., ³Glotov O. G., ¹Sorokin I. V.

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

²Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russia

³Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences of SB RAS, Novosibirsk, Russia

SUMMARY. The results of thermodynamic calculations and experimental study of metal additive effect on the combustion characteristics of high-energy materials based on ammonium perchlorate, butadiene rubber and aluminum powder are presented in this paper. It is found that partial or complete replacement of aluminum by metal additives (B, Mg, AlB₂, Al/Mg, Cu, Fe, Ti and Zr) in the HEM composition leads to a reduction in the specific impulse values and the combustion temperature. It was shown that the partial replacement of Alex aluminum by iron UFP in HEM leads to 1.3–1.4 fold increase in the burning rate in the pressure range of 2.2–7.5 MPa. Thus some agglomeration of metal fuel is enhanced: the mean particle diameter of agglomerates is increased up to 1.2 fold, and their content is increased up to 1.4 fold. Upon partial replacement of Alex by boron UFP the burning rate is practically unchanged as compared with that for basic propellant with Alex. However the agglomeration is significantly enhanced, which is manifested at the increase in the agglomerate particles content in CCPs by 1.8–2.2 times, increase by 1.6–1.7 times in the agglomerates mean diameter and increase in the unburned metal fraction in agglomerates by 1.6–1.9 times. The content and the mean diameter of the oxide particles are reduced more significantly than in the case of iron introduction, namely, by 20–30 % and 30–40 %, respectively.

KEYWORDS: high-energy materials, metal powder, combustion temperature, burning rate, condensed combustion products.

REFERENCES

1. Luka L. T. De, Galfetti L., Saverini F., Meda L., Marra G., Vorozhtsov A. B., Sedoi V. S., Babuk V. A. Burning of nano-aluminized composite rocket propellants. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2005, vol. 41, no. 6, pp. 680-692.

2. Arkhipov V. A., Bondarchuk S. S., Kuznetsov V. T., Korotkikh A. G., Gromov A. A., Volkov S. A., Revyagin L. N. Influence of aluminum particle size on ignition and nonstationary combustion of heterogeneous condensed systems. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2012, vol. 48, no. 5, pp. 625-635.

3. Jayaraman K., Anand K. V., Chakravarthy S. R., Sarathi R. Effect of nano-aluminium in plateau-burning and catalyzed composite solid propellant combustion. *Combustion and Flame*, 2009, vol. 156, pp. 1662-1673.

4. Berner M. K., Talavar M. B., Zarko V. E. Nanoparticles of energetic materials: Synthesis and properties (review). *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2013, vol. 49, no. 6, pp. 625-647.

5. Komarova M. V., Komarov V. F., Vakutin A. G., Yashchenko A. V. Vliyanie nanorazmernykh bimetallicheskiykh chastits na kharakteristiki goreniya smesovogo topliva [Influence of nano-sized particles in the bimetallic composite propellant combustion characteristics]. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovsky Gazette], 2010, no. 4-1, pp. 112-116.

6. Arkhipov V. A., Kuznetsov V. T., Razdobreev A. A., Evseenko I. A., Korotkikh A. G. Influence of the dispersity of aluminum powder on the ignition characteristics of composite formulations by laser radiation. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2011, vol. 5, no. 4, pp. 616-624.

7. Arkhipov V. A., Korotkikh A. G. The influence of aluminum powder dispersity on composite solid propellants ignitability by laser radiation. *Combustion and Flame*, 2012, vol. 159, pp. 409-415.

8. Korotkikh A. G., Arkhipov V. A., Glotov O. G., Kiskin A. B., Zarko V. E. Vliyanie poroshka zheleza na kharakteristiki zazhiganiya i goreniya smesevykh tverdykh topliv [Effect of iron powder in the ignition and combustion characteristics of composite solid propellants]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and mezoskopiya], 2015, vol. 17, no. 1, pp. 12-22.

9. Glotov O. G., Zarko V. E., Simonenko V. N., Yagodnikov D. A., Vorob'ev V. S. Ignition, combustion, and agglomeration of encapsulated aluminum particles in a composite solid propellant. II. Experimental studies of agglomeration. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2007, vol. 43, no. 3, pp. 320-333.

10. Arkhipov V. A., Korotkikh A. G., Kiskin A. B., Zarko V. E. Laboratory method for measurement of the specific impulse of solid propellants. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 622-624.

11. Trusov B. G. Programmная sistema modelirovaniya fazovykh i khimicheskikh ravnovesiy pri vysokoy temperature [Code System for Simulation of Phase and Chemical Equilibriums at Higher Temperatures]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsiy* [Engineering Journal: Science and Innovations], 2012, no. 1(1), pp. 21.

Коротких Александр Геннадьевич, доктор физико-математических наук, профессор энергетического института ТПУ, старший научный сотрудник НИИ прикладной математики и механики ТГУ, тел. (3822)701-777, e-mail: korotkikh@tpu.ru

Архипов Владимир Афанасьевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом НИИ прикладной математики и механики ТГУ, тел. (3822)529-656, e-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Глотов Олег Григорьевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Института химической кинетики и горения СО РАН, тел. (383) 330-4847, e-mail: glotov@kinetics.nsc.ru

Сорокин Иван Викторович, студент энергетического института ТПУ, e-mail: ivans3485@gmail.com