

УДК 536.46

Д. А. Ягодников, А. В. Игнатов,
Е. И. Гусаченко

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВАХ

Проведены химический и дисперсный анализы конденсированных продуктов сгорания пиротехнических составов на основе алюминия микронного и нанодиапазонов. Установлено увеличение на 9% полноты сгорания алюминия и уменьшение дисперсности к-фазы: массовая доля фракции 0...400 мкм составляет $\approx 31\%$ для нано- и ультрадисперсного и $\approx 3,2\%$ для микродисперсного алюминия.

Актуальным направлением совершенствования энергобаллистических характеристик пиротехнических составов (ПС) является использование нанодисперсных компонентов, позволяющих повысить полноту сгорания и снизить дисперсность конденсированных продуктов сгорания.

Цель настоящей работы состоит в исследовании влияния добавления нанодисперсного алюминия в ПС на химический и дисперсный составы конденсированных продуктов сгорания.

В качестве объектов исследования были приняты образцы ПС, полученные по технологии, разработанной в НИИ прикладной химии [1], на основе магния и алюминия и отличающиеся дисперсностью последнего, для чего были использованы промышленный порошкообразный алюминий ПА-4 со среднемассовым диаметром 0,335 мм (состав 2Г01) и нанодисперсный алюминий со среднемассовым диаметром 300 нм (состав 2Г02).

Конденсированные продукты сгорания были отобраны после сжигания образцов в камере сгорания (КС) постоянного объема в воздушной среде. В процессе эксперимента давление в КС увеличивалось до наибольших значений 0,5...1,5 МПа. Время горения зарядов составляло приблизительно 3...3,5 с.

Методики химического, дисперсного анализа состава конденсированных продуктов сгорания разработаны в ИПХФ РАН и подробно изложены в работе [2]. Образцы к-фазы разделяли на пять фракций с помощью четырех сит с ячейками 0,4; 0,8; 1,6 и 3,15 мм. Массовые

доли частиц фракций представлены в табл. 1. В результате сопоставления выявили, что нанодисперсный алюминий (состав 2Г02) имеет более мелкие частицы.

Таблица 1

Массовые доли фракций, %

Состав образцов	Исходная масса, г	Рассеянная масса, мг	Размеры частиц фракции, мм				
			0...0,4	0,4...0,8	0,8...1,6	1,6...3,15	Крупнее 3,15
2Г01	39,47	18,75	3,2	2,3	11,9	53,4	29,2
2Г02	55,85	15,92	31,8	23,7	36,4	4,2	3,9

Для удаления активного алюминия образцы помещали в тефлоновый стакан, заливали дистиллированной водой, по каплям добавляли раствор соляной кислоты. Как правило, наличие активного алюминия в пробе фиксируется газовой выделением. Процесс выделения пузырьков из образца состава 2Г01 в присутствии кислоты закончился через 20 суток, из второго образца — на трое суток раньше. Взвешивание после этой операции показало снижение массы образцов на 70 и 61 % соответственно для образцов 2Г01 и 2Г02 (табл. 2). Уменьшение массы, по мнению авторов, связано, в основном с растворением активного металла соляной кислотой. Скорость реагирования алюминия намного больше скорости реагирования оксидов, поэтому можно считать, что потери массы связаны с химическим превращением активного алюминия. Таким образом, можно сделать вывод, что использование в качестве горючего нанодисперсного алюминия приводит к повышению полноты сгорания ПС.

В целях удаления из образцов сажи их прокаливали на воздухе при температуре муфельной печи 710 °С. Масса промытых и протравленных образцов после этой процедуры уменьшилась на 7,5 и 4,6 % для составов 2Г01 и 2Г02 соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Изменение массы образца при выполнении операций

Состав образца	Промывание и травление					Прокаливание		
	Исходная масса, мг	Масса после промывания, мг	Изменение массы, мг/%	Масса после травления, мг	Потеря массы, мг/%	Исходная масса, мг	Масса после прокаливания, мг	Потеря массы, мг/%
2Г01	199,1	206,1	+7,0/ +3,6	66,9	-139,3/ -70	63,0	58,3	-4,7/ -7,5
2Г02	198,2	195,4	-2,8/ -1,4	75,4	-120,1/ -61	73,3	69,9	-3,4/ -4,6

Дисперсный анализ травленных конденсированных продуктов сгорания начинался с седиментационного разделения образцов, выполненного многократным повторением циклов осаждения частиц образца из слоя жидкости толщиной 2 см. Для этого использовался промытый, протравленный и прокаленный порошок. Так были получены две фракции частиц размерами до 4 мкм и крупнее.

Ситовое разделение частиц крупнее 4 мкм позволило выделить три фракции частиц. Оно проведено с использованием двух сит с ячейками полотна 0,05 и 0,5 мм, вставленных одно в другое. Таким образом, были получены фракции частиц размерами 4...50 мкм, 0,05...0,5 мм и фракции, крупнее 0,5 мм.

Массовые доли фракций приведены в табл. 3. Суммарные потери частиц фракций при седиментационном и ситовом разделении образцов на фракции составили 1,7 и 4,1 % для образцов составов 2Г01 и 2Г02 соответственно. Этими значениями определяется точность массовой доли.

Таблица 3

Массовая доля частиц фракций

Состав образца	Исходная масса перед седиментацией, мг	Масса частиц фракций, рассчитанная с учетом потерь, мг				Массовая доля фракций, %			
		до 4 мкм	4...50 мкм	50...500 мкм	$D > 500$ мкм	до 4 мкм	4...50 мкм	50...500 мкм	$D > 500$ мкм
2Г01	58,2	15,99	18,92	6,00	17,29	27	33	10	30
2Г02	69,8	10,91	10,42	19,08	29,39	16	15	27	42

Частицы фракции размерами до 4 мкм изучали по негативам, полученным с помощью электронного микроскопа ЭМБ-100БР. Для этого частицы фотографировали с 6000-, 26000-, 36000-, 50000-кратным увеличением, изображение негатива проектировали на экран с общим 20000- и 100000-кратным увеличением изображения частиц, диаметры измеряли трафаретом с шагом 0,05 и 0,01 мкм соответственно.

Диаметр частиц в каждой фракции определяли следующим образом. Диаметр сферической частицы фракций размерами 4...50 мкм, 0,05...0,5 мм и крупнее измеряли на матовом стекле оптического микроскопа МБИ-6 при 1000-, 100- и 27-кратном увеличении соответственно с помощью прозрачного трафарета. Общее число измеренных в каждой фракции частиц составило около 1500. Затем на основе такой первичной информации рассчитывали перечисленные диаметры с погрешностью статистической обработки $\pm 10\%$.

Размер частиц, форма которых отличалась от сферической, определяли подобным же образом, только в этом случае визуально оценивали

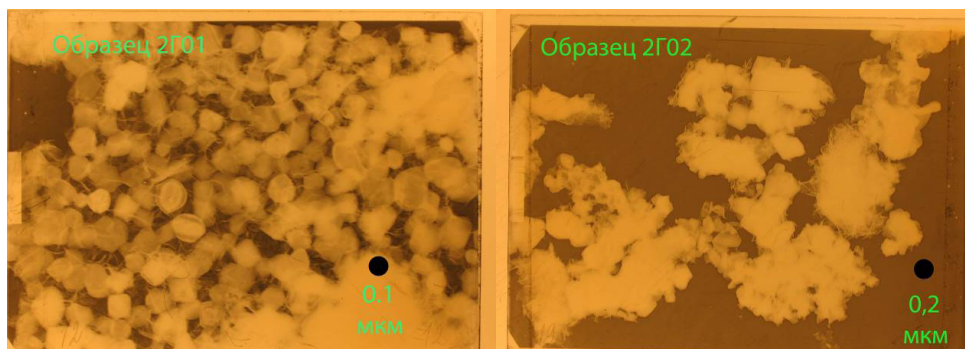


Рис. 1. Фракции частиц размером до 4 мкм (на негативе справа — 36000-кратное увеличение)

соответствие площадей изображения частицы и площадей соседних окружностей трафарета.

Изучая фракции частиц размерами до 4 мкм с помощью электронного микроскопа при 20000- и 100000-кратном увеличении, выявили, что частиц сферической формы практически нет. В образцах присутствуют в основном частицы произвольной формы (рис. 1).

В образце также наблюдались частицы кубической формы размерами 0,2... 0,8 мкм. Этих частиц больше в образце 2Г02, частицы кубической формы которого составляли 9,8 и 4,3 % по количеству и объему частиц фракции соответственно. Для образца 2Г01 эти значения составляли 0,6 и 0,2% соответственно.

Средние размеры частиц фракций, измеренных при 100000-кратном увеличении, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Среднестатистические размеры частиц, мкм

Состав образца	Размер частиц фракции, мкм														
	до 4					4... 50					50... 500				
	D ₁₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₃₂	D ₄₃	D ₁₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₃₂	D ₄₃	D ₁₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₃₂	D ₄₃
2Г01	0,10	0,11	0,12	0,14	0,16	11,9	13,1	14,6	17,9	21,9	110	125	145	195	260
2Г02	0,15	0,16	0,17	0,20	0,23	12,0	13,6	15,5	20,2	25,6	210	225	240	280	310

Фракции частиц размерами 4... 50 мкм. Образцы в основном были представлены частицами произвольной формы с округлыми или острыми гранями, ребрами и углами. Большинство частиц прозрачны. Два образца по внешнему виду частиц оказались подобными (рис. 2). Средние размеры частиц приведены в табл. 4.

Фракции частиц размерами 0,05... 0,5 мм. В этом диапазоне размеров встречались в основном частицы произвольной формы из пористого прозрачного материала (рис. 3, см. табл. 4). На поверхности

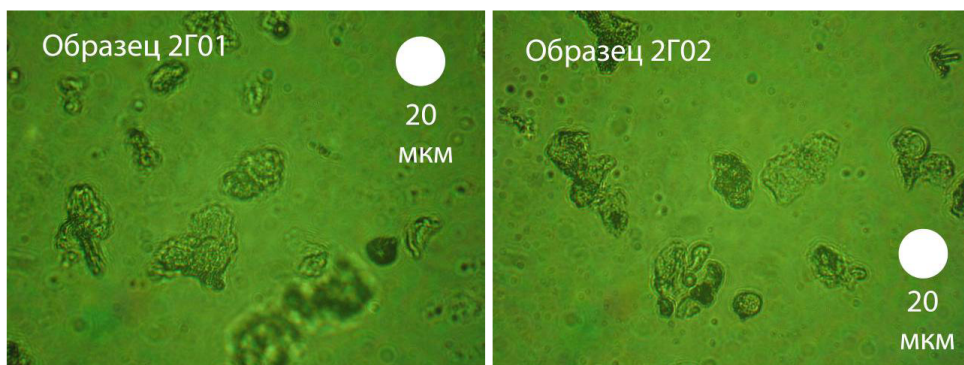


Рис. 2. Фракции частиц размерами 4...50 мкм

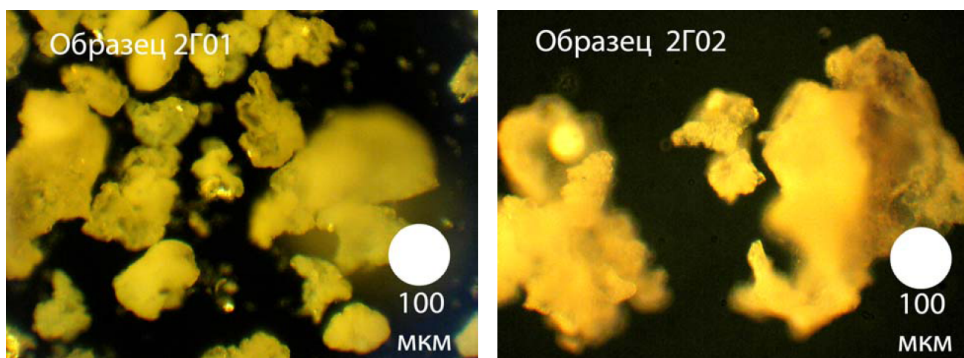


Рис. 3. Фракции частиц размерами 0,050...0,5 мм

частиц видны полуразрушенные скорлупки диаметром 10...20 мкм. Поскольку изучаемые частицы получены после травления и прокаливания в целом крупных исходных частиц, то можно предположить, что большинство частиц произвольной формы состоят именно из такого материала.

Сферические частицы наблюдаются редко, их доля составляет около 15% по количеству и 3...4% по объему. Имеются сферические частицы из белого и темного материалов. Поверхность сферических частиц в целом гладкая и блестящая.

Фракция частиц крупнее 0,5 мм. Данная фракция состояла преимущественно из частиц произвольной формы. Рыхлый материал частиц представлял собой конгломерат скорлупок того же диаметра 10...20 мкм. Среди этих частиц встречались частицы удлиненной формы. Поскольку образование частиц данной фракции обусловлено особенностями процесса сжигания, то дисперсный анализ не проводился.

Резюмируя приведенные результаты многопараметрического анализа конденсированных продуктов сгорания, можно заключить следующее.

1. Частицы всех фракций имеют в большинстве произвольную форму с острыми углами и гранями, что позволяет считать их результатом дробления исходных частиц. В этом образцы 2Г01 и 2Г02 подобны.

2. Установлено увеличение примерно на 9% полноты сгорания ультра- и нанодисперсного алюминия в составе ГРТ по сравнению со штатными составами.

3. Применение нанодисперсного алюминия позволяет уменьшить дисперсность продуктов сгорания ПС (массовая доля фракции до 0,4 мм составляет $\approx 31\%$) по сравнению со штатным ПС (массовая доля фракции до 0,4 мм составляет $\sim 3,2\%$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. П р и м е н е н и е ультра- и нанодисперсных компонентов в пиротехнических системах / Н.М. Вареных, В.Н. Емельянов, В.И. Сарабьев и др. // Энергетические конденсированные системы. Материалы III Всерос. конф. – Черногоровка, 2006. – С. 25–26.
2. Я г о д н и к о в Д. А., Г у с а ч е н к о Е. И. Влияние внешнего электрического поля на дисперсный состав конденсированных продуктов сгорания аэрозвеси частиц алюминия // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38, № 4. – С. 80–86.

Статья поступила в редакцию 30.10.2007

Дмитрий Алексеевич Ягодников родился в 1961 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1984 г. Д-р техн. наук, заведующий кафедрой “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор более 100 научных работ в области экспериментально-теоретических исследований воспламенения и горения газодисперсных систем и бесконтактной диагностики ракетных двигателей.

D.A. Yagodnikov (b. 1961) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1983. D. Sc. (Eng.), head of “Rocket Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of experimental and theoretical studies of inflammation and combustion of gas-dispersed systems and non-contact diagnostics of rocket engines.

Андрей Владиславович Игнатов родился в 1981 г., аспирант кафедры “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор трех научных работ по вопросам горения нанодисперсного горючего в пиротехнических системах.

A.V. Ignatov (b. 1981) — post-graduate of “Rocket Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 3 publications in the field of burning of nanodispersed fuel in pyrotechnic systems.

Евгений Иванович Гусаченко родился в 1945 г. Канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Ин-та проблем химической физики РАН. Автор более 40 научных работ в области исследования воспламенения и горения порошкообразных металлов в активных средах.

Ye.I. Gusachenko (b. 1945) — Ph. D. (Phys.-Math.), senior researcher of the Institute for Problems of Chemical Physics of RAS. Author of more than 40 publications in the field of study of inflammation and burning of powdered metals in active media.