

ЭВОЛЮЦИЯ 100-МИКРОННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ АГЛОМЕРАТОВ И ИЗНАЧАЛЬНО СПЛОШНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ЧАСТИЦ В ПЛАМЕНИ МОДЕЛЬНОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА.

I. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОДХОД

О. Г. Глотов, В. А. Жуков

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск, glotov@kinetics.nsc.ru

Представлена методика исследования эволюции монодисперсных частиц методом гашения/отбора, основанная на сопоставлении параметров совокупности частиц до и после горения. Для создания горящих 100-микронных алюминиевых агломератов использовали включения металлизированного топлива в форме цилиндров $\varnothing 130 \times 150$ мкм, внедренные в безметалльное топливо. В экспериментах со 100-микронными частицами алюминия последние также были внедрены в безметалльное топливо. Описаны процедуры гранулометрического и морфологического анализов частиц, определения их плотности, расчетов времени горения и времени пребывания в пламени.

Ключевые слова: частица алюминия, агломерат, распределение по размерам, горение, эволюция, метод отбора, определение плотности частиц, расчет времени пребывания частиц.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Особенность процесса горения частицы алюминия по сравнению с частицей угля и/или капель углеводородного топлива — образование конденсированного оксида, который частично удаляется в окружающую среду в виде «дыма», частично накапливается на горячей частице в форме колпачка. В процессе горения массовое соотношение алюминия и оксида в частице изменяется. Для описания эволюции горячей частицы, т. е. для описания макрокинетики выгорания в виде зависимостей ее массы и массы несгоревшего алюминия от времени, необходима информация о массовом соотношении удаленного и накопленного оксида. Указанные зависимости определяют текущую массу оксидного колпачка и в конечном итоге массу и размер финальной оксидной частицы, образующейся в результате стягивания оксидного колпачка в сферу силами поверхностного натяжения после полного выгорания алюминия. Диаметр финальной оксидной частицы сопоставим с начальным диаметром горячей частицы, в то время как размеры частиц оксидного дыма на 2 ÷ 4 порядка меньше. Поэтому финальные частицы часто называют «крупным» оксидом, чтобы подчеркнуть их отличие от частиц дымообразного оксида.

Многие исследователи наблюдали нарушение сферической симметрии горения, внезапные изменения направления движения частиц, выбросы струй из-под колпачка, вращение частиц (колебания яркости свечения, спиралевидные треки) [1–5]. Как правило, такие явления происходят ближе к концу горения, когда выгорание частицы значительно и размер колпачка относительно велик. На заключительной стадии горения также наблюдалась фрагментация (дробление) частиц [1–5]. Количественные данные о процессе фрагментации, такие как условия ее наступления, доля фрагментирующих частиц, размеры фрагментов и т. п., весьма ограничены. Вследствие этого отсутствуют детальные представления о механизме явления. Вместе с тем, очевидно, что фрагментация может играть важную роль в макрокинетике выгорания как отдельных частиц, так и их совокупности, поскольку мелкие частицы, возникшие в результате фрагментации, сгорают весьма быстро и не образуют финальной частицы оксида, сопоставимой по размеру с начальной горячей частицей.

В прошлом основное внимание исследователей было сосредоточено на определении времени сгорания алюминиевых частиц варьируемого размера в зависимости от внешних условий (температура, давление, среда сжигания) [6]. Литературные данные о динамике горения алюминиевых частиц в модельных условиях, а

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ (проекты № 2358 и 3305).

также о горении алюминиевых агломератов в факеле твердого топлива весьма немногочисленны [7–13].

Информация о финальных оксидных частицах также ограничена. Количественные данные о размере и плотности имеются в [14, 15], однако они получены для сравнительно крупных ($200 \div 500$ мкм) частиц алюминия, горящих в среде $0.2\text{O}_2 + 0.8\text{Ar}$, $0.2\text{O}_2 + 0.8\text{N}_2$ или CO_2 при комнатной температуре. Имеются отрывочные сведения о зависимости размера колпачка от среды горения [3, 14–16].

К сказанному остается добавить, что горение индивидуальных частиц алюминия в контролируемых газовых средах часто рассматривают как физическую модель горения алюминиевого агломерата в факеле твердого топлива. При этом до сих пор не доказано (но и не опровергнуто) предположение о том, что горение агломерата и алюминиевой частицы, одинаковых по размеру, подчиняется одним и тем же закономерностям.

Таким образом, несмотря на значительные усилия, затраченные учеными разных стран на исследование процесса горения алюминиевых частиц на протяжении более чем 50 лет, остается ряд нерешенных вопросов, а именно:

1. Каковы закономерности накопления оксида в форме колпачка и как размер и масса финальной оксидной частицы зависят от размера горячей частицы и условий горения?

2. Почему происходит фрагментация горящих алюминиевых частиц и каковы количественные закономерности этого явления?

3. Есть ли отличия в процессах горения изначально сплошной алюминиевой частицы и алюминиевого агломерата того же размера?

Отсутствие ответов на эти вопросы препятствует созданию полной модели горения алюминиевой частицы/агломерата, описывающей макрокинетику выгорания металла и образование оксидных частиц. В предлагаемой серии из двух работ мы пытаемся дать ответы на часть поставленных вопросов. В первой части статьи описана методика экспериментов, во второй представлены экспериментальные данные об изменении морфологии, количества, размера, плотности и массы 100-микронных агломератов и алюминиевых частиц в процессе их эволюции от начального состояния до финальной частицы оксида в окислительной среде. Состав, давление и температура среды в определенной степени моделиру-

ют условия горения в ракетном двигателе.

ОБРАЗЦЫ И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводили на установке с отбором конденсированных продуктов горения [17]. Суть методики — сжигание образцов топлива при заданном давлении в проточной бомбе, гашение частиц в спутном потоке инертного газа на заданном расстоянии от образца, улавливание погашенных частиц на металлические сетки и аэрозольный фильтр и последующие анализы отобранных частиц различными методами. Использован оригинальный подход [12, 18], основанный на экспериментировании с модельным топливом, генерирующим монодисперсные горящие агломераты. Модельное топливо представляет собой безметалльное топливо-матрицу, в которую помещено известное количество одинаковых миниатюрных кусочков-включений, изготовленных из металлизированного топлива. В волне горения топлива-матрицы каждый кусочек-включение превращается в горящий агломерат, размер и масса которого предопределены составом и размером включений. Продукты горения топлива-матрицы создают высокотемпературную окислительную среду известного состава, в которой происходит горение агломератов до момента гашения. Топлива матрицы и включений были те же, что и в [12, 18]. Массовый состав матрицы: 34 % ПХА, 39 % октогена, 27 % связующего. Состав включений: 14.8 % ПХА, 42.6 % алюминия, 42.6 % связующего. Размер частиц всех порошкообразных компонентов $D_{30} < 7$ мкм, что позволяет считать матрицу гомогенной. В [12] приведены расчетные теплофизические параметры и равновесный состав продуктов горения матрицы в зависимости от давления. Данная работа является продолжением исследований [12, 18] с использованием частиц меньшего размера. Включения имели форму, близкую к цилиндрической (номинальный размер $\varnothing 130 \times 150$ мкм), и в волне горения превращались в агломераты диаметром около 110 мкм. Для сравнения проводили эксперименты с изначально сплошными сферическими частицами алюминия диаметром около 110 мкм, которые вручную выбирали из силовой фракции $100 \div 120$ мкм.

Образцы готовили следующим образом. Кварцевый стаканчик с внутренним диаметром около 10 мм и высотой $13 \div 15$ мм заполняли топливом-матрицей на $\approx 1/3$ глубины.

Затем формировали слой матрицы с включениями или алюминиевыми частицами, закладывая их поштучно и перемежая мелкими порциями матрицы. Толщина слоя с частицами также составляла $\approx 1/3$ глубины стаканчика. Номинальное количество включений/частиц в образце — 480 шт. При закладке частицы располагали на расстоянии не менее 0.5 мм друг от друга и не менее 1 мм от боковой стенки стаканчика. Последнюю треть стаканчика заполняли матрицей без частиц. В итоге включения/частицы были локализованы в центральной части образца в цилиндрическом объеме $\varnothing 8 \times 5$ мм, что позволило сузить интервал времени выхода частиц в газовую фазу и уменьшить различия в условиях горения. Масса топлива в стаканчике ≈ 2 г, массовая доля металлизированных включений/частиц менее 0.1 %. Напомним, что в [12] проведены эксперименты с включениями в форме куба с ребром 500 мкм и цилиндра размером $\varnothing 500 \times 500$ мкм, которые порождали агломераты диаметром 470 и 340 мкм соответственно. Было показано, что 340-микронные агломераты выгорают быстрее, чем 470-микронные (в одинаковых условиях по времени и давлению достигают большей глубины превращения). Однако даже в условиях, наиболее способствующих выгоранию, и те и другие агломераты в экспериментах [12] полностью не выгорали и содержали до 30 % несгоревшего алюминия. Забегая вперед, укажем, что в данной работе для 100-микронных агломератов достигнуто полное выгорание алюминия.

Данные об эволюции агломератов и/или частиц в процессе горения получали путем сравнения начальных характеристик совокупности частиц с характеристиками совокупности частиц, отобранных после известного времени пребывания в продуктах горения матрицы. Для изменения времени пребывания использовали два варианта проведения опытов. В первом варианте струя продуктов горения топлива, истекающая из стаканчика и несущая частицы, сразу смешивалась со спутным потоком азота, продувающего бомбу. Во втором варианте факел топливного образца был заключен в тонкостенную охранную графитовую трубку с внутренним диаметром 19 мм и длиной $L = 18$ см. Внутри трубки частицы находились в продуктах горения топлива, на выходе из трубки происходило смешение продуктов горения с потоком азота и закалка ча-

стиц. Для каждого варианта проведены эксперименты с агломератами и частицами алюминия при давлении ≈ 0.7 , ≈ 2 и ≈ 8 МПа. По оценкам, в экспериментах без охранной трубки ($L = 0$) время пребывания частиц t_{res} в зависимости от давления варьировалось в диапазоне $5 \div 15$ мс, а в экспериментах с трубкой длиной $L = 18$ см — $t_{res} = 70 \div 190$ мс. Для частиц размером 100 мкм расчетное время горения составляло $t_b \approx 25$ мс и слабо зависело от давления. Таким образом, в экспериментах без трубки осуществлялось гашение частично выгоревших частиц, а в экспериментах с трубкой — закалка полностью сгоревших частиц, т. е. финального оксида.

НАЧАЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ ЧАСТИЦ

Агломераты

Процедура определения начальных размеров агломератов основана на измерении геометрических размеров включений и экспериментально определенном коэффициенте трансформации объема включения в объем сферического агломерата. Измерение размеров включений, закладываемых в образец, проводили по цифровым фотографическим изображениям, имеющим разрешение 3.2 мкм/пиксел (см. на рис. 1, а). Для вычисления объема форму включений аппроксимировали круговым цилиндром или усеченным конусом. Измерения проводили в чертежно-графической программе bCad [19] с использованием приложения собственной разработки, в котором реализовано измерение сфер, цилиндров и усеченных конусов. Работа организована следующим образом. Анализируемое изображение загружается в bCAD в качестве фонового. Для измерения диаметра круга (обработка изображений сфер) на нем строится изображение окружности по трем точкам посредством трех кликов мыши на точках контура круга. Параметры окружности автоматически записываются в файл. Подобным образом для цилиндров измеряли высоту и диаметр основания, для усеченных конусов — высоту и два основания. Такой подход сочетает возможности растровой (фоновое изображение) и векторной графики (измеряемые геометрические формы).

Коэффициент трансформации объема включения в объем агломерата был определен в специальных экспериментах с «быстрым

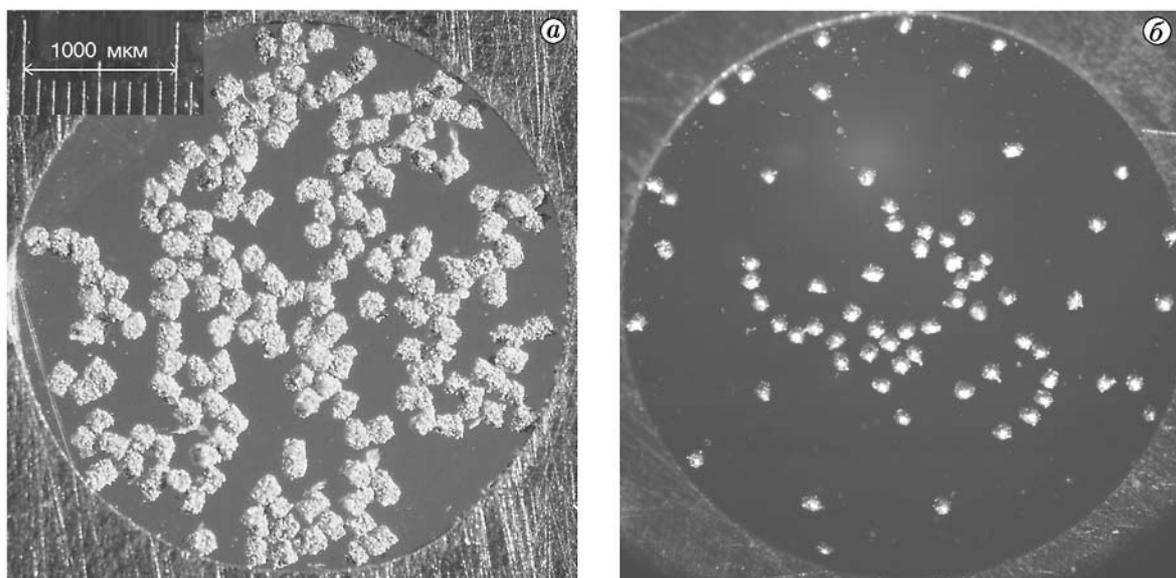


Рис. 1. Вид включений из металлизированного топлива — «зародышей» агломератов (а) и сферических частиц алюминия (б)

замораживанием». Использовали образцы в виде полоски топлива-матрицы, нанесенной на внешнюю поверхность отрезка кварцевой трубки. Ширина полоски 5 мм, длина 15 мм, толщина 2 мм; включения в количестве 160 шт. были вдавлены в поверхность полоски. При горении полоски включения выбрасываются и немедленно оказываются в потоке инертного газа, продувающего бомбу. Некоторые из них даже не успевали воспламениться, воспламенившиеся же превращались в агломераты сферической формы. Размеры этих агломератов и были приняты за начальные. В результате статистической обработки было определено, что включение объемом V трансформируется в сферический агломерат объемом $0.33V$. Или, если мысленно заменить включение сферой эквивалентного объема V с диаметром D , то диаметр порождаемого из этого включения агломерата будет $0.69D$. Полученные коэффициенты использовали для расчетного определения начальных размеров агломератов по измеренным размерам включений, закладываемых в образец.

Частицы алюминия

Вид частиц показан на рис. 1, б. Выбранные для закладки в образец 480 сферических частиц фотографировали в пленочно-слайдо-

вом сканере «Minolta DiMAGE Scan Elite» с разрешением 5 400 dpi (4.7 мкм/пиксел). Для этого частицы зажимали между двумя кусочками прозрачной пленки, которые помещали в слайдовую рамку. Теневые изображения совокупности частиц обрабатывали в программе Scion Image [20] в режиме «Analyze Particle».

Статистические параметры распределения частиц по размерам

Результаты определения начальных размеров агломератов или частиц алюминия для каждого опыта представляли в виде гистограмм распределения числа частиц по диаметрам. По гистограммам вычисляли статистические параметры. Ширина интервала гистограммы 10 мкм соответствует точности измерения размеров по изображениям. На рис. 2 и в таблице приведены функции распределения агломератов/частиц и их гранулометрические характеристики, полученные в результате совместной статистической обработки совокупностей включений/частиц, использованных в нескольких опытах. Как видно из представленных данных, процедура приготовления включений обеспечивала формирование достаточно близких по размеру агломератов. Коэффициент вариации $K_{var} = \sigma/D_{10}$, где $\sigma = \sqrt{D_{20}^2 - D_{10}^2}$ — среднеквадратичное отклоне-

Начальные гранулометрические характеристики агломератов и сферических частиц алюминия

Агломераты и частицы	N, шт.	D ₁₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₃	D ₅₃	σ	K _{var}
		мкм						
Агломераты, образованные из включений размером ≈ Ø130 × 150 мкм	3 587	113	114	115	119	120	15	0.14
Сферические частицы алюминия, выбранные вручную из фракции 100 ÷ 120 мкм	4 752	108	108	109	110	111	9	0.08

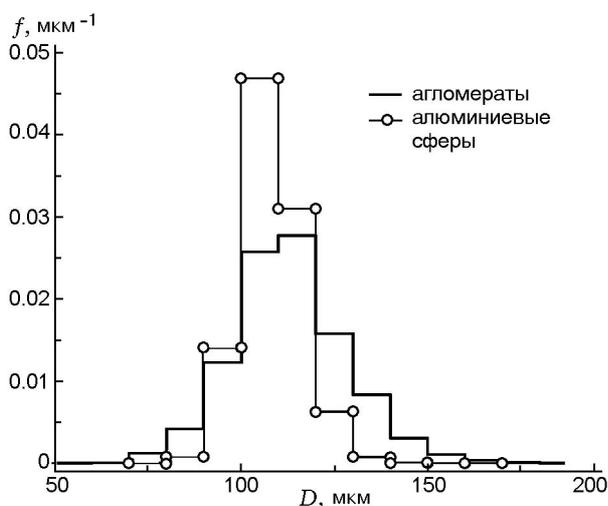


Рис. 2. Обобщенные распределения начальных размеров агломератов и алюминиевых частиц:

представлены нормированные (площадь под кривой равна 1) функции плотности счетного распределения по размерам

ние, во всех опытах был в интервале 0.07 ÷ 0.13, для обобщенного распределения $K_{var} = 0.14$. В практике гранулометрического анализа порошки с $K_{var} < 0.15$ принято считать монодисперсными [21, с. 212]. Фактически каждый эксперимент проведен с монодисперсными агломератами, кроме того, их размеры воспроизводятся от опыта к опыту. Процедура выбора сферических частиц также была достаточно эффективна. Коэффициент вариации начальных размеров частиц алюминия обычно находился в интервале 0.06 ÷ 0.10, для обобщенного распределения $K_{var} = 0.08$. Отметим, что распределение частиц алюминия несколько уже, чем у агломератов. Тем не менее начальные размеры агломератов и алюминиевых частиц весьма близки, что позволяет корректно сравнивать их характеристики горения.

ОБРАБОТКА ОТОБРАННЫХ ЧАСТИЦ

Обработка отобранных частиц включала подсчет их количества, гранулометрический и морфологический анализы, определение плотности.

Для проведения гранулометрического анализа фильтр АФА с уловленными частицами разрезали на 6 фрагментов, которые затем пропитывали глицерином, в результате чего они становились прозрачными. Фрагменты фильтра зажимали между прозрачными пленками в слайдовые рамки и фотографировали вышеупомянутым сканером «Minolta» с разрешением 4.7 мкм/пиксел. Теневые изображения частиц обрабатывали в программе bCad в режиме измерения сфер (кругов). Результаты представляли в виде гистограмм с шириной интервала 10 мкм. В процессе измерения частиц на компьютере соответствующие фрагменты фильтра одновременно рассматривали под микроскопом МБС-10 с целью отнесения каждой анализируемой частицы к одному из двух основных морфологических типов — металл или оксид; для каждого типа строили отдельную гистограмму. Описанным способом регистрировали и измеряли все частицы размером в десятки микрометров, осевшие на фильтре; их общее количество получалось автоматически в процессе обработки. При проведении экспериментов перед фильтром был установлен пакет проволочных ситовых сеток с ячейками, достаточно крупными, чтобы пропустить частицы. Пакет сеток предохраняет фильтр от перегрева. После опыта сетки промывали ацетоном. Ацетоном также промывали съемную футеровку внутренней поверхности цилиндра бомбы (изготовлена из металлической фольги) и внутреннюю поверхность графитовой трубки (если она применялась). Весь ацетон, использованный для промывки элементов внутренней оснастки бомбы, сливали в чашку Петри. После испарения ацетона под микроскопом под-

считывали количество частиц в чашке, т. е. осевших на элементах оснастки, а не на фильтре. Их количество было незначительно (типично $7 \div 20$ шт., максимально 32 шт.), поэтому гранулометрический анализ этих частиц не проводили, считая их распределение по размерам таким же, как у основной массы частиц, уловленных фильтром. Однако количество частиц в смыве учитывали путем соответствующего пересчета функции распределения частиц на фильтре.

Определение плотности частиц основано на измерении скорости их седиментации в воде. Вначале частицы снимали с фильтра и помещали в кюветы, каждую в отдельную лунку, где их фотографировали с разрешением 3.2 мкм/пиксел. Определяли размер каждой частицы и составляли ее морфологическое описание. На этой стадии выделяли три морфологических типа частиц — металлические, комбинированные и оксидные; эти типы будут описаны ниже. Затем поочередно проводили видеорегистрацию «падения» частиц в дистиллированной воде в прозрачном сосуде. Для манипулирования частицами использовали микропипетку на 20 мкл (извлечение частицы из лунки с каплей воды; запуск в сосуд посредством опускания кончика пипетки в воду).

В результате обработки видеозаписей определяли установившуюся скорость движения частиц. Зная скорость и диаметр частицы, а также плотность и вязкость среды, плотность частиц находили по формуле

$$\rho_{part} = \rho_{water} + \frac{3}{4} C_d \frac{\rho_{water} V_{part}^2}{D_{part} g},$$

где ρ_{part} — плотность частицы, ρ_{water} — плотность воды, C_d — коэффициент сопротивления (функция числа Рейнольдса Re), V_{part} — установившаяся скорость движения частицы, D_{part} — диаметр частицы, g — ускорение свободного падения. Формула получена из стационарного решения дифференциального уравнения, описывающего движение сферы под действием сил сопротивления, тяжести и Архимеда. В тестовых опытах с частицами алюминия диаметром $D_{part} \approx 110$ мкм было проведено сравнение трех зависимостей коэффициента сопротивления C_d от числа Рейнольдса Re (формулы Стокса, Клячко, Озеена) и установлено, что наилучшее соответствие экспериментальных и расчетных данных по установившейся скорости движения достигается при использо-

вании формулы Озеена $C_d = 24/Re + 4.5$. Поэтому при обработке экспериментальных данных применяли именно эту формулу. Максимальная относительная погрешность определения плотности указанным методом составляет $\approx 12\%$ и обусловлена в основном погрешностью измерения диаметра частицы. Для увеличения точности применяли статистический подход, определяя в каждом опыте значения плотности для возможно большего числа частиц (максимум 281 шт.). В этом случае в качестве характеристики погрешности определения плотности выступает стандартное отклонение среднего S_e , которое убывает при увеличении количества измерений N как $S_e \sim 1/\sqrt{N}$ [22]. Количество измеренных частиц ограничено числом частиц правильной сферической формы (только такие частицы использовались для определения плотности).

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ПРЕБЫВАНИЯ ЧАСТИЦ В ПРОДУКТАХ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

За основу взята методика расчета времени пребывания из работ [12, 17, 18].

В экспериментах без охранной трубки ($L = 0$) полагали, что время пребывания частицы в горячих продуктах горения топливматрицы t_{res} равно времени движения частицы от точки старта до точки пересечения траектории частицы с условной «поверхностью гашения» — боковой поверхностью конуса с основанием, совпадающим со срезом стаканчика, и высотой, равной длине L_{mix} начального участка смешения струи продуктов горения топлива со спутным потоком газа-разбавителя. Точку старта частицы варьировали в пределах центральной части объема образца, в которой располагали металлизированные включения при заполнении стаканчика. Как и в [12], расчеты времени проводили для четырех характерных точек старта, для остальных точек использовали линейную интерполяцию. Времена осредняли в предположении равномерного расположения частиц в пределах центральной части объема образца. В отличие от [12], задачу решали в одномерной постановке, т. е. радиальную составляющую скорости частиц не учитывали.

В экспериментах с охранной трубкой ($L = 18$ см) полагали, что частица после прохождения трубки «забывает» свое начальное положение в объеме образца и может пересечь «поверхность замораживания» (боковую поверхность конуса с основанием, совпадающим со

срезом трубки, и высотой L_{mix}) в произвольной точке с радиальной координатой от 0 до R_{tube} (R_{tube} — радиус трубки). Поскольку длина трубки много больше длины начального участка смешения ($L \gg L_{mix}$), различиями в начальной осевой координате пренебрегали и считали, что все частицы стартуют из плоскости, расположенной на половине глубины стаканчика. Время пребывания t_{res} рассчитывали как среднее арифметическое значений времени, затраченного на прохождение дистанций $L_1 = L_{sp}/2 + L + L_{mix}$ и $L_2 = L_{sp}/2 + L$, где L_{sp} — длина образца (глубина стаканчика). При расчете скорости газообразных продуктов горения учитывали изменение сечения, обусловленное различием диаметров образца (≈ 10 мм) и трубки (19 мм).

Движение горящих агломератов/частиц рассчитывали с использованием коэффициента сопротивления в форме $C_d = 45/Re$ и начальной скорости частиц 0.4 м/с [18]. Параметры газового потока — температуру, молярную массу газообразных продуктов горения и динамическую вязкость — брали из термодинамического расчета по программе АСТРА [23] при соответствующем давлении. Плотность частиц принимали равной 2.7 г/см³, диаметр частиц считали неизменным, равным начальному.

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ СГОРАНИЯ ЧАСТИЦ

Для оценки времени сгорания частиц использовали корреляционную зависимость из

[6]: $t_b = \frac{aD^n}{X_{eff} p^{0.1} T^{0.2}}$. Здесь где t_b — время сгорания, мс; D — диаметр частиц, мкм; p — давление, атм; T — температура среды, К; $a = 0.00735$ и $n = 1.8$ — параметры; $X_{eff} = C_{O_2} + 0.6C_{H_2O} + 0.22C_{CO_2}$ — концентрация эффективного окислителя, где C_{O_2} , C_{H_2O} и C_{CO_2} — концентрации кислорода, воды и углекислого газа соответственно. Значения температуры и концентраций также брали из термодинамического расчета.

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Резюмируем особенности экспериментального подхода.

Начальные размеры агломератов определяли расчетным путем по геометрическим размерам включений.

Начальные размеры частиц алюминия определяли путем прямых измерений по микрофотографиям.

Анализируемые частицы

Гранулометрическому и морфологическому анализам подвергали только крупные остатки — неполностью сгоревшие частицы алюминия/агломераты или финальные частицы оксида (рис. 3). Именно эти частицы представляют наибольший интерес, в то время как характеристики дымообразного оксида сравни-

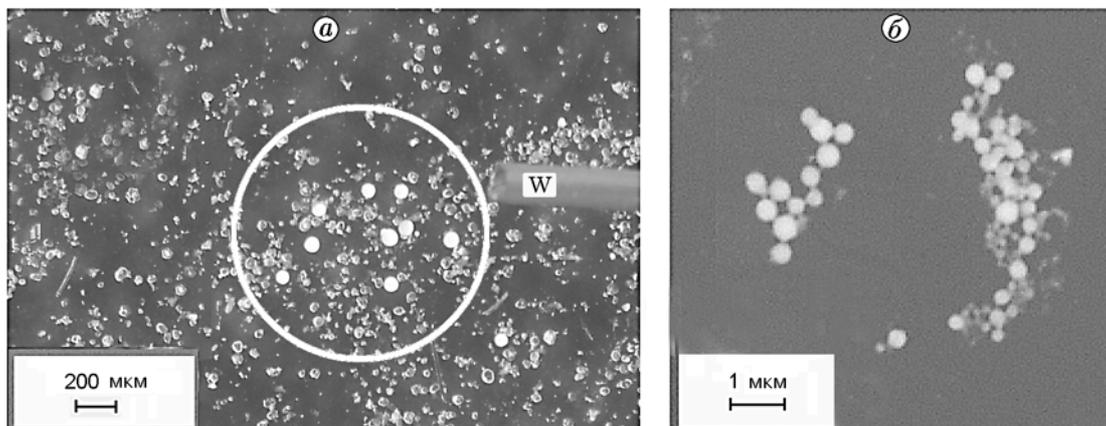


Рис. 3. Конденсированные продукты горения

тельно хорошо изучены. Для получения снимка, приведенного на рис. 3,а, фильтр АФА с уловленными частицами вначале был растворен в ацетоне, а затем высушен на чашке Петри. Обработке подвергали только крупные остатки горения, в данном случае это финальные оксидные частицы диаметром около 70 мкм. Несколько таких частиц (на рисунке очерчены окружностью) специально перемещены к кончику проволоки (помечен буквой W) диаметром 200 мкм, помещенной в кадр в качестве целеуказателя. Как видно, эти частицы визуально легко отличимы от частиц дымообразного оксида размером в единицы-десятки микрон, которые имеются в огромном количестве. Фотографирование этого же объекта под электронным микроскопом (фрагмент такой фотографии приведен на рис. 3,б) показало, что частицы субмикронного размера также представлены в большом количестве. Снимки (а) и (б) носят иллюстративный характер. При проведении количественного гранулометрического анализа фильтры не растворяли, а фотографировали «на просвет».

Эволюция совокупности частиц

В предшествующих работах [12, 18] макрокинетику горения агломератов размером 470 и 340 мкм описывали в форме зависимостей неполноты сгорания алюминия от времени и давления; количество несгоревшего алюминия определяли посредством химического анализа отобранных частиц. В данной работе получение таких зависимостей было невозможно, так как масса частиц недостаточна для проведения химического анализа с требуемой точностью. Поэтому эволюцию совокупности частиц оценивали на основе морфологического описания отобранных частиц. В процессе выгорания частицы вначале выглядят как металлические, затем как комбинированные, у которых отчетливо виден металл и оксид в форме колпачка, и, наконец, как чисто оксидные. Количество частиц разных типов служит мерой выгорания совокупности.

Условия проведения экспериментов, такие как давление и длина охранной трубки, обеспечили вариацию времени пребывания частиц в среде продуктов горения топлива от 6 до 190 мс, что позволило получить информацию о различных стадиях горения. В опытах при низком давлении (≈ 0.7 МПа) без трубки происходит гашение недогоревших частиц, в опы-

тах при высоком давлении (≈ 8 МПа) с трубкой длиной 18 см — закалка и отбор финальных частиц, оставшихся после полного выгорания алюминия.

Изменение массы частиц

Поскольку частицы были монодисперсными, проведенные эксперименты подобны экспериментам с индивидуальными, предварительно охарактеризованными частицами. В то же время количество частиц в образце составляло 480 шт., и поэтому наши эксперименты подобны обычным экспериментам по отбору конденсированных продуктов горения топлив [10, 11, 13], в которых исследуют параметры совокупности отобранных частиц. Это позволяет использовать статистические методы анализа, и потому применяемый подход сочетает преимущества обеих технологий получения информации. В частности, определив статистически достоверно плотность и размер для совокупности частиц, можно расчетным путем найти массу индивидуальной частицы «в среднем». Совместное использование средних значений плотности и размера частиц для вычисления массы учитывает возможные изменения плотности частиц при гашении. Напомним, речь идет о частицах размером ≈ 100 мкм, прямое взвешивание которых практически неосуществимо.

Таким образом, разработанные технологии изготовления металлизированных включений-зародышей агломератов и подбора частиц алюминия позволили провести эксперименты с практически монодисперсными частицами со средним размером около 110 мкм и коэффициентом вариации менее 0.14, что обеспечивает корректность сравнения результатов, полученных для агломератов и изначально сплошных частиц алюминия. Эти результаты изложены в следующей части статьи.

Авторы выражают благодарность В. В. Головки за предложенную процедуру просветления фильтров АФА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Логачев В. С., Коротков А. И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972.
2. Гетерогенное горение / Ред. рус. изд. В. А. Ильинский, И. Н. Садовский. М.: Мир, 1967.

3. **Истратов А. Г., Колесников-Свинарев В. И., Кузнецов Г. П., Лейпунский О. И.** Горение одиночной частицы алюминия в состоянии невесомости // Гидромеханика и теплообмен в невесомости / Отв. ред. В. С. Авдучевский. Новосибирск: Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО АН СССР, 1988. С. 123–131.
4. **Колесников-Свинарев В. И., Кузнецов Г. П., Лейпунский О. И.** Методика многопараметрического исследования процесса горения частиц металлов в свободнопадающей камере // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 4. С. 32–36.
5. **Дрейзин Э. Л.** Влияние изменений фазового состава на процесс горения металлической частицы // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 6. С. 82–96.
6. **Бекстед М. В.** Анализ данных по времени горения частиц алюминия // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 5. С. 55–69.
7. **Bartlett R. W., Ong J. N., Fassell W. M., Papp C. A.** Estimating aluminum particle combustion kinetics // Combust. Flame. 1963. V. 7, N 3. P. 227–234.
8. **Price E. W.** Combustion of metalized propellants // Fundamentals of Solid Propellant Combustion / К. К. Kuo, M. Summerfield (Eds). (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 90). New York: Amer. Inst. of Aeronautics and Astronautics, 1984. Ch. 14. P. 479–514.
9. **Melcher J. C., Burton R. L., Krier H.** Combustion of aluminum particles in solid rocket motor flows // Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics / V. Yang, T. B. Brill, Wu-Zhen Ren (Eds). (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 185). Reston, VA: AIAA Inc., 2000. Ch. 2.20. P. 723–747.
10. **Liu T.-K., Hsieh C.-F.** Analysis of agglomerate size from burning aluminized AP/RDX/HTPB propellants in quench bomb // J. Propulsion and Power. 1996. V. 12, N 5. P. 995–998.
11. **Глотов О. Г.** Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив. II. Эволюция частиц при удалении от поверхности горения // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 4. С. 66–78.
12. **Глотов О. Г., Зарко В. Е., Карасев В. В., Федотова Т. Д., Рычков А. Д.** Макрокинетика горения монодисперсных агломератов в факеле модельного твердого топлива // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 5. С. 74–85.
13. **Глотов О. Г.** Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив. IV. Влияние природы нитраминоов на агломерацию и эффективность горения алюминия // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42, № 4. С. 78–92.
14. **Zenin A., Kusnezov G., Kolesnikov V.** Physics of aluminum particle combustion at zero-gravity // AIAA Paper 99-0696. 1999. P. 1–6.
15. **Zenin A., Kusnezov G., Kolesnikov V.** Physics of aluminum particle combustion at convection // AIAA Paper 2000-0849. 2000. P. 1–12.
16. **Dreizin E. L.** On the mechanism of asymmetric aluminum particle combustion // Combust. Flame. 1999. V. 117. P. 841–850.
17. **Глотов О. Г., Зырянов В. Я.** Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив. I. Методика исследования эволюции частиц дисперсной фазы // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 1. С. 74–80.
18. **Glotov O. G., Karasev V. V., Zarko V. E., Fedotova T. D., Beckstead M. W.** Evolution of aluminum agglomerates moving in combustion products of model solid propellant // Combustion of Energetic Materials / К. К. Kuo, L. T. De Luca (Eds). New York: Begell House, 2002. P. 397–406.
19. **Internet** web site <http://www.bcad.ru/>
20. **Internet** web site <http://www.scioncorp.com/>
21. **Градус Л. Я.** Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии. М.: Химия, 1979.
22. **Тейлор Дж.** Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985.
23. **Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов** / Г. Б. Синярев, Н. А. Ватолин, Б. Г. Трусов, Г. К. Моисеев. М.: Наука, 1982.

*Поступила в редакцию 26/XII 2007 г.,
в окончательном варианте — 21/IV 2008 г.*