

ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО ОКСИДА ПРИ ГОРЕНИИ АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

В. А. Бабук

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова
190005 Санкт-Петербург, babuk@peterlink.ru

Настоящая работа посвящена исследованию свойств высокодисперсного оксида, образующегося у поверхности горящих алюминизированных твердых топлив. Сформулирована общая физическая картина образования данных продуктов. В рамках этой картины показано, что формирование высокодисперсного оксида происходит вследствие реализации двух процессов: горения неагломерирующего металла в надповерхностной зоне газовой фазы и горения агломерирующего металла в поверхностном слое топлива. В первом случае горение осуществляется главным образом в гетерогенном режиме, а во втором — в газофазном режиме.

Ключевые слова: твердое топливо, алюминий, горение, частица, оксид, дисперсность.

ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемой составляющей продуктов горения алюминизированных твердых ракетных топлив являются конденсированные продукты сгорания (КПС), свойства которых в существенной мере определяют качество топлива. В настоящее время можно считать общепринятым утверждение о том, что эти продукты уже у поверхности горящего топлива состоят из двух отличающихся по свойствам фракций: частиц высокодисперсного оксида (ВДОК) и агломератов. Агломераты — это частицы, образующиеся в результате слияния конденсированных веществ в поверхностном слое топлива. ВДОК является продуктом горения металла в этом слое и в надповерхностной зоне газовой фазы. Частицы ВДОК имеют размер порядка одного микрометра, в то время как размер агломератов может достигать сотен и даже тысяч микрометров. Кроме того, агломераты состоят из металла и его оксида и имеют весьма сложное внутреннее строение [1, 2].

В целом число работ, в которых определялись характеристики всей или почти всей совокупности конденсированных продуктов, образующихся при горении топлива, сравнительно невелико. Такие исследования проводились в Институте химической кинетики и горения СО РАН (г. Новосибирск) [3–5], Балтийском государственном техническом университете «Военмех» (БГТУ, г. С.-Петербург) [1, 6–9 и др.], а также в ряде лабораторий США, Франции и других стран (см., например, [10–12]).

Анализ результатов опубликованных работ свидетельствует об отсутствии единых представлений о свойствах КПС и механизме их образования. Причем в существенной мере эта ситуация связана с неопределенностью характеристик ВДОК. Данные разных авторов о массовой доле ВДОК в составе КПС и о распределении этих частиц по размерам не совпадают. Различны и предлагаемые механизмы их образования. Указанные обстоятельства стимулировали появление настоящей работы, цель которой состояла в уточнении и анализе экспериментальных данных о свойствах ВДОК, полученных в БГТУ, и в формулировании общей физической картины образования ВДОК.

ОСНОВЫ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Трудности экспериментального изучения ВДОК связаны с чрезвычайно малыми размерами этих частиц. По своим свойствам они приближаются к наноструктурам [13].

Для экспериментального определения характеристик ВДОК используются бесконтактные и контактные методы [14]. Группа бесконтактных методов основана на анализе взаимодействия зондирующего излучения с двухфазным потоком, что позволяет описывать дисперсные свойства частиц. Контактные методы базируются на отборе и последующем анализе частиц, включающем определение их химического состава, размера, формы и параметров

внутреннего строения. Многообразие характеристик частиц, получаемых при использовании контактных методов, обуславливает их предпочтительность при изучении ВДОК.

Методика, применявшаяся в наших исследованиях, описана в работе [6]. Суть ее заключается в сжигании образцов топлива в установке постоянного объема в среде инертного газа, отборе образующихся конденсированных продуктов сгорания и их последующем анализе. Для отбора мелкой фракции КПС в установке постоянного объема имеется «ледяной» стакан и выпуск газообразных продуктов из установки проводится не менее чем через два часа после сгорания топлива. Методика обеспечивает изучение не менее $94 \div 96$ % (по массе) всех образующихся при горении образца топлива конденсированных продуктов.

Существенной проблемой при разработке методики данного типа является выбор способа определения дисперсности ВДОК. В качестве основного «инструмента» для определения дисперсности выступал прибор «СОULTER 4», который обеспечивает измерение размеров в диапазоне $0.03 \div 10$ мкм. Для подавления процесса коагуляции анализируемых частиц проводилась обработка взвесей ультразвуком и вводилась добавка, уменьшающая коагуляцию (пиррофосфорнокислый натрий). Следствием применения ультразвуковых колебаний является как разрушение коагулятов, так и образование новых. Было принято решение варьировать время обработки ультразвуком (время диспергирования — t_d) и выбирать такое значение $t_{d,opt}$, при котором фиксируемая дисперсность максимальна. Параметры дисперсности, соответствующие этим условиям, принимались как истинные. Однако существует ряд обстоятельств, которые вызывают неудовлетворенность подобным подходом.

Во-первых, сложно определить истинное значение $t_{d,opt}$, поскольку это требует существенного увеличения объема экспериментальных работ. Во-вторых, даже при корректном решении задачи отыскания $t_{d,opt}$ нет абсолютной уверенности в отсутствии коагулятов. Например, при исследовании во времени свойств КПС, когда для изменения времени пребывания продуктов сгорания применяются плексигласовые трубки различной длины, был сделан вывод, что образующаяся дополнительно сажа приводит к интенсификации коагуляции отбираемых частиц ВДОК, которую невозможно

устранить посредством обработки пробы ультразвуком [7]. Для решения описанной проблемы была осуществлена модернизация методики, сущность которой сводится следующему.

Для количественного анализа используются фотографии отобранных частиц ВДОК, полученные с помощью электронного микроскопа [1, 6]. Для ограниченного количества частиц (не более 1000), фиксируемых индивидуально или в составе коагулятов как сферические частицы, определяются параметры закона распределения их по размерам. Естественно, что это распределение носит случайный характер. Случайными являются и моменты, отвечающие данному закону.

В основе процедуры определения функции распределения этих случайных величин лежит многократное «моделирование» размера частиц, которое проводится при использовании метода Монте-Карло. Моделирование базируется на функции распределения по размерам, полученной по результатам визуализации частиц. Эта функция отыскивается посредством разбиения интервала размеров частиц на некоторое число разрядов и нахождения точечных оценок вероятности попадания размеров в эти разряды. Количество разрядов определяется точностью отыскания этих вероятностей. Предполагается, что в пределах этих разрядов распределение частиц по размерам соответствует закону равномерной плотности.

Функция распределения среднемассового размера, отвечающего экспериментальному закону, позволяет определить математическое ожидание этой случайной величины и границы доверительного интервала в окрестности данной числовой характеристики, соответствующего вероятности γ . Если среднемассовый размер, полученный при использовании прибора «СОULTER 4», попадает в пределы доверительного интервала, то принимается, что коагуляты несущественно искажают размер частиц ВДОК. В противном случае вывод противоположный. Предложенный подход позволяет формализовать определение параметров дисперсности частиц ВДОК и обеспечить объективное сравнение (в пределах заданной вероятности γ) полученных в различных условиях результатов.

Описанная процедура была применена для анализа всех ранее проведенных экспериментов по определению дисперсности ВДОК, в которых была получена информация визуально-

го характера. Значение вероятности γ принято равным 0.1. Подобный анализ обеспечил проведение своеобразной «ревизии» ранее полученных результатов. Эти результаты принимались либо близкими к истинным, либо считались искаженными коагулятами и отбрасывались.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проанализируем данные о характеристиках ВДОК у поверхности горящего топлива [1, 2, 6–9].

Нам не удалось выявить особенности внутреннего строения частиц ВДОК в соответствии с методикой, используемой для исследования агломератов [1, 6]. Однако косвенные признаки (правильная сферическая форма, белый цвет, высокая твердость) дают основания считать их сплошными. Результаты химического анализа свидетельствуют о практически полном отсутствии других веществ, кроме оксида алюминия, в составе ВДОК.

Наиболее важными характеристиками ВДОК являются массовая доля в составе всей совокупности конденсированных продуктов и распределение частиц по размерам.

Первая характеристика описывалась параметром $Z_{ВДОК}$, который равен отношению массы металла, формирующего ВДОК, к массе исходного металла в топливе. Для описания второй характеристики использовались массовая функция плотности распределения частиц по размерам ($f(d)$) и среднemasсовый размер частиц (d_{43}).

Рассмотрим характер влияния рецептурных факторов и условий горения топлива на параметры ВДОК.

Параметр $Z_{ВДОК}$ существенно зависит от степени вовлеченности металлического горючего в агломерационный процесс и уменьшается по мере увеличения последней. Доля исходного металлического горючего (МГ), формирующего агломераты (параметр Z_a), в свою очередь, зависит от характеристик каркасного слоя — структуры поверхностного слоя топлива, которая определяет возможность образования агломератов [1].

Для топлив на основе неактивного связующего, а также таких окислителей, как перхлорат аммония (ПХА), аммонийный динитроазот (АДНА), октоген (НМХ) (составы первого типа), каркасный слой образуется в пределах только таких структурных формирований

топлива, как «карман», и не охватывает «межкарманные мостики», т. е. этот процесс определяется структурой топлива. Поэтому по мере увеличения содержания дисперсного окислителя в топливе и его дисперсности значение параметра Z_a уменьшается и, как следствие, увеличивается значение $Z_{ВДОК}$. Кроме того, для данных топлив начиная с некоторого давления зафиксировано дробление агломератов в надповерхностной зоне газовой фазы, что приводит к дополнительному росту количества ВДОК.

Для исследованных топлив на основе активного связующего (составы второго типа) с ростом давления исчезают предпосылки для образования каркасного слоя, в том числе и в пределах «карманов», в результате этого в области высоких давлений агломераты практически не формируются.

При горении топлив на основе нитрата аммония (составы третьего типа) образуется сплошной расплавленный слой нитрата аммония (НА), который покрывает как частицы окислителя, так и композицию связующее — МГ. Вследствие этого исчезают отличия в условиях горения в традиционно определяемых структурных образованиях: «карманах» и «межкарманных мостиках», и в формировании каркасного слоя участвует все исходное МГ. Значение параметра Z_a достаточно высокое (0.65 ÷ 0.8), его отличие от единицы объясняется эволюцией агломерирующих частиц на верхней поверхности каркасного слоя. Одним из проявлений этого процесса является горение агломерирующих частиц в газофазном режиме с образованием ВДОК, который поставляется в газовую фазу.

Таким образом, количество ВДОК определяется как степенью вовлеченности МГ в агломерационный процесс, так и характеристиками эволюционного процесса агломерирующих частиц на поверхности каркасного слоя и в надповерхностной зоне газовой фазы.

Из анализа данных наших экспериментов по влиянию рецептурных факторов на количество ВДОК следует, что диапазон значений параметра $Z_{ВДОК}$ весьма широк — 0.2 ÷ 0.98. Подчеркнем принципиальное отличие этих данных от результатов работ [3–6], в соответствии с которыми сделан общий вывод о том, что массовая доля частиц с размерами менее 10 мкм в составе КПС невелика.

На рис. 1 приведена схема, иллюстрирующая влияние указанных факторов на количество ВДОК.



Рис. 1. Влияние рецептурных факторов на количество ВДОК

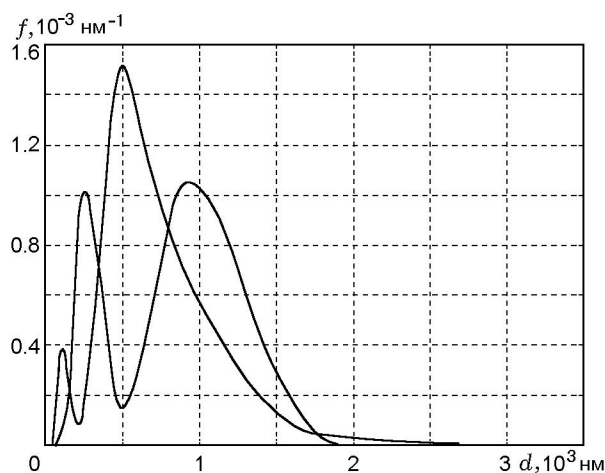
Функция плотности распределения частиц ВДОК по размерам в общем случае является двухмодальной. Размер частиц, формирующих первую моду, находится в диапазоне $20 \div 250$ нм, в то время как для второй моды характерна область размеров $300 \div 2000$ нм. Доля частиц, соответствующих второй моде, как правило, преобладает. Достаточно часто первая мода не фиксируется, и функция $f(d)$ является практически одномодальной. Следует подчеркнуть, что наблюдается ярко выраженная локализация по размерам частиц ВДОК: отсутствуют частицы с размером более ≈ 2 мкм.

Количественные данные по дисперсности КПС можно обобщить следующим образом. При горении различных составов первого типа в диапазоне давлений $1.0 \div 6.0$ МПа имеют место две ситуации. Применительно к первой среднемассовый размер частиц находится в сравнительно узком интервале — $350 \div 450$ нм; что касается второй ситуации, здесь диапазон значительно шире $400 \div 850$ нм. Отличие в условиях реализации этих ситуаций можно связать с различным характером сгорания агломерирующего МГ. Первая ситуация имеет место в том случае, когда есть основания полагать, что степень выгорания агломерирующих частиц в газофазном режиме в пределах поверхностного слоя невелика, т. е. при уменьшении размера и количества этих частиц. В противном случае реализуется вторая ситуация (см. таблицу).

При горении топлив с активным связующим (составы второго типа), как правило,

среднемассовый размер частиц ВДОК находится в интервале $d_{43} = 700 \div 800$ нм в условиях весьма низкой интенсивности процесса агломерации в области высоких давлений. При этом характер функции плотности распределения частиц ВДОК по размерам близок к одномодальному (см. таблицу). На рис. 2 приведены функции $f(d)$ для составов на основе активного и неактивного связующих [9]. Несмотря на близость среднемассового размера, эти функции существенно отличаются по виду.

В случае горения составов третьего типа диаметр d_{43} принимает значения в интервале $700 \div 1000$ нм, при этом характер функции $f(d)$ близок к одномодальному (см. таблицу).

Рис. 2. Функции $f(d)$ для двух топливных композиций на основе неактивного (1) и активного (2) связующих при давлении 6.0 МПа [9]

Характер влияния состава и условий горения на дисперсность ВДОК

Составы	Условия горения	d_{43} , мкм	Вид функции $f(d)$
Тип I: неактивное связующее; окислители: ПХА, АДНА, НМХ	Высокий уровень агломерации	350 ÷ 450	Двухмодальная
	Низкий уровень агломерации	400 ÷ 850	— // —
Тип II: активное связующее; окислители: ПХА, НМХ	Область высоких давлений	700 ÷ 800	Одномодальная
Тип III: неактивное связующее; окислитель: НА	Давление ≈ 6.0 МПа	700 ÷ 1 000	— // —

ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА ОБРАЗОВАНИЯ ВДОК

Формирование у поверхности горящего топлива частиц, существенно отличающихся по своим свойствам (ВДОК и агломераты), связано с особенностями горения металлического горючего в составе топлива. Только часть исходного МГ участвует в процессе агломерации. Неагломерирующий металл сгорает в надповерхностной зоне газовой фазы, т. е. зоне, непосредственно примыкающей к конденсированной фазе горящего топлива, с образованием ВДОК. Кроме того, формирование ВДОК происходит и при горении агломерирующего металла в каркасном слое в газофазном режиме и в надповерхностной зоне газовой фазы. Таким образом, можно говорить о трех источниках образования ВДОК.

В общем случае образование ВДОК в существенной мере определяется закономерностями горения неагломерирующего МГ. К числу исключений следует отнести ситуацию горения топлив на основе нитрата аммония.

Отсутствие возможности прямого наблюдения закономерностей горения частиц неагломерирующего металла методами визуализации в существенной мере затрудняет их описание. Однако анализ экспериментальных данных о дисперсности ВДОК вблизи поверхности горящего топлива и общих представлений о горении частиц металла в активных средах позволяет предложить общую физическую картину формирования ВДОК при горении неагломерирующего металла.

Достаточно очевидно, что первой стадией горения любых частиц, в том числе и достаточно малого размера, является горение в гетерогенном режиме [15, 16]. Для этого режима характерны следующие особенности.

Окисляющие газы взаимодействуют с металлом, находящимся в конденсированном состоянии, на поверхности частиц. В результате образуется оксид, который может накапливаться на частицах. Первоначально (непосредственно после воспламенения) взаимодействие осуществляется по местам растрескивания исходной (твердой) оксидной пленки. После плавления оксида (2 300 К) частица покрывается сплошной расплавленной пленкой оксида, и процессом, определяющим кинетику взаимодействия, становится диффузия реагирующих компонентов через эту пленку. Взаимодействие носит ярко выраженный нестационарный характер: происходит изменение во времени температуры частиц. Следует подчеркнуть, что описанная картина процесса горения сформулирована на основе прямых экспериментальных данных по визуализации частиц на поверхности горящего топлива, совмещенной с измерением их температуры с использованием методов пирометрии [17]. Яркой иллюстрацией роли гетерогенного режима горения может служить ситуация, имеющая место при горении топлив на основе нитрата аммония [2]. Образующиеся при их горении агломераты в основном состоят из оксида алюминия — продукта гетерогенного режима горения (его массовая доля $\approx 0.6 \div 0.85$).

Рассмотренная стадия завершается вскипанием частиц. Это явление возможно при условии достижения определенного уровня перегрева. Процесс вскипания приводит к тому, что образующиеся газообразные продукты разрывают сплошную, жидкую оксидную пленку и горение металла переходит в газовую фазу. Характер разрушения зависит от скорости нагружения. (При высоких скоростях внешнего силового воздействия жидкости приобретают

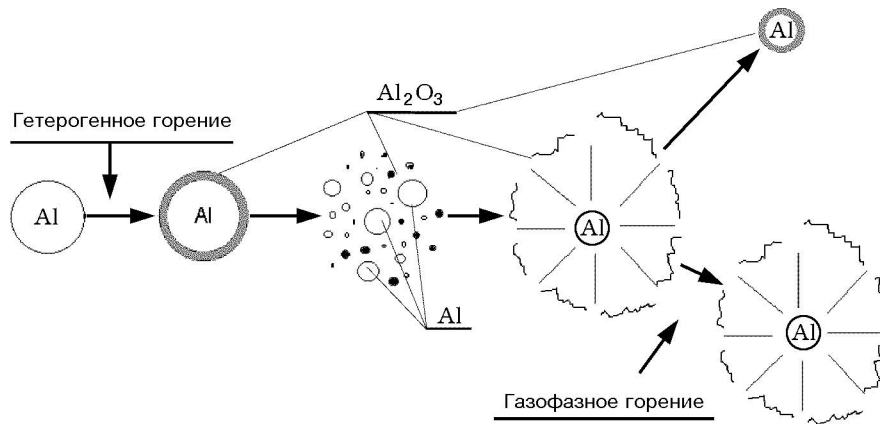


Рис. 3. Схема горения неагломерирующего металла

свойства твердых тел. Высокая скорость воздействия реализуется, когда время нагружения становится меньше времени «оседлой жизни» молекулы жидкости.) Малые размеры частиц приводят в момент вскипания к высоким скоростям нагружения капли металла и оксидной пленки, что делает чрезвычайно вероятным дробление частиц [16]. Отметим, что дробление горящих частиц неоднократно фиксировалось экспериментально [18]. Можно говорить о различных факторах, которые могут вызвать реализацию указанного явления. В данном случае речь идет о гипотезе, в соответствии с которой дробление становится возможным в момент перехода горения частиц в газофазный режим.

После дробления частицы металла перегреты (химический потенциал жидкого металла существенно превышает химический потенциал его паров). Это приводит к интенсивному испарению металла и взаимодействию его паров с окислителем в газовой фазе, т. е. к газофазному горению. Данный процесс может сопровождаться падением температуры частицы. Поскольку интенсивность теплообмена частицы с окружающей средой высока, возможно повторное перемещение зоны горения на поверхность частицы. В зависимости от уровня падения температуры в дальнейшем горение будет осуществляться либо в гетерогенном режиме аналогично первой стадии горения со всеми описанными эффектами, либо в газофазном режиме при значительной роли кинетических факторов. Следует отметить, что при малых размерах частиц зависимость химического потенциала от размера становится существенной, при этом квазистационарный характер газо-

фазного горения маловероятен. В соответствии с приведенным описанием образование ВДОК возможно в двух режимах горения — гетерогенном и газофазном, следствием этого и является двухмодальный характер функции плотности распределения частиц ВДОК по размерам у поверхности горящего топлива. Схематично механизм горения неагломерирующего металла показан на рис. 3.

Очевидна роль газофазного горения агломерирующих частиц, т. е. частиц, которые образуются агломерирующим МГ и находятся на верхней поверхности каркасного слоя, в формировании частиц ВДОК. В зоне горения этих частиц происходят «рождение» частиц оксида и дальнейшая их эволюция в «шлейфе» горящих частиц [19]. Под «рождением» понимается конденсация паров субоксидов алюминия на зародышах новой фазы, в качестве которых наиболее вероятно выступают продукты горения неагломерирующего металла, а также частицы сажи. Эволюция включает дальнейшую конденсацию и коагуляцию частиц. По мере увеличения времени пребывания частиц в «шлейфе» растет их размер. Дисперсность частиц оксида, образующихся подобным образом, зависит от размера горящих частиц и скорости их обдува [19].

Рассмотрим в рамках предложенного описания полученные результаты. При горении в составе топлива температура воспламенения металлического горючего (Al) сравнительно низка. Этот факт чрезвычайно важен для понимания механизма горения МГ в составе твердых топлив. Благоприятные условия для воспламенения частиц связаны с высоким темпом нагрева частиц, что приводит к механиче-

скому разрушению (растрескиванию) исходной защитной оксидной пленки. Можно назвать ряд работ, результаты которых позволяют с уверенностью говорить о реализации данного явления (например, [20, 21]). Первое количественное определение этой температуры применительно к условиям горения в составе топлива (≈ 1300 К) было выполнено российскими учеными [22]. Очевидно, что в зависимости от свойств топлива и исходного металлического горючего значение температуры воспламенения последнего может несколько изменяться [1, 23].

Низкое значение температуры воспламенения приводит к тому, что стадия гетерогенного горения частиц металла, которая обеспечивает разогрев до температуры перехода в газофазное горение, осуществляется в условиях значительных тепловых потерь. В результате этого возрастает доля металла, сгорающего в этом режиме. Малые размеры частиц неагломерирующего металла обуславливают, с одной стороны, высокую интенсивность теплообмена с окружающей средой, а с другой — сравнительно высокую скорость горения при наличии сплошной оксидной пленки (абсолютное значение ее толщины невелико). Таким образом, возникают предпосылки для сгорания значительной доли неагломерирующего металла в гетерогенном режиме, что и фиксируется экспериментально. При горении топлив на основе активного связующего, когда исчезают предпосылки для формирования каркасного слоя, температура зоны, в которой осуществляется горение неагломерирующего металла, уменьшается в сравнении с аналогичными условиями топлив на базе неактивного связующего. Это приводит к росту тепловых потерь горящих частиц. В таких условиях происходит практически полное исчезновение газофазного режима горения неагломерирующего металла и снижение дисперсности образующихся частиц оксида.

Некоторая доля МГ сгорает в газофазном режиме в пределах каркасного слоя. Величина этой доли зависит от времени пребывания агломерирующих частиц на верхней поверхности слоя. Образующиеся при этом частицы оксида способствуют снижению дисперсности ВДОК. Фиксируемое увеличение размера частиц ВДОК при уменьшении дисперсности агломератов, по-видимому, обусловлено данным явлением. Снижение дисперсности ВДОК при горении топлив на основе неактивного связую-

щего является следствием сгорания агломерирующего металла.

При горении топлив на основе нитрата аммония высокодисперсный оксид образуется, по-видимому, исключительно за счет горения в газофазном режиме агломерирующих частиц на верхней поверхности каркасного слоя. Весьма значительные размеры подобных частиц (≈ 1000 мкм) приводят к росту времени пребывания частиц оксида в «шлейфе» и, как следствие, к увеличению их размера. Единообразие механизма образования ВДОК обуславливает одномодальность функции плотности распределения по размерам частиц ВДОК.

Представляет интерес сравнить полученные данные с результатами исследования горения аэрозвесей частиц алюминия [24–26]. Эти результаты свидетельствуют о более высокой дисперсности образующихся конденсированных продуктов сгорания и очевидной преобладающей роли газофазного режима горения частиц металла. Данное отличие, по-видимому, связано с более высоким значением температуры воспламенения частиц металла. Эта температура близка к температуре, при которой осуществляется переход к парофазному горению. Указанное обстоятельство приводит к существенному снижению влияния гетерогенного режима горения на характеристики процесса горения частиц металла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа результатов экспериментального исследования сформулированы представления о свойствах высокодисперсного оксида вблизи поверхности горящего топлива и механизме его образования. Очевидна целесообразность дальнейшего накопления экспериментального материала и, в частности, для составов на основе наноалюминия, а также создания средств для математического моделирования процесса формирования мелкой фракции конденсированных продуктов сгорания алюминизированных твердых топлив.

Автор выражает признательность своим коллегам В. А. Васильеву, М. С. Малахову, П. А. Наследникову за участие в разные годы в отработке элементов методики экспериментального исследования и в проведении экспериментальных работ, а также студентам С. Н. Нечаеву и Н. А. Ерыгину за численный анализ данных по дисперсности ВДОК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Babuk V. A., Vasilyev V. A., Sviridov V. V. Formation of condensed combustion products at the burning surface of solid rocket propellant // Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics / V. Yang, T. B. Brill, W. Z. Ren (Eds). (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 185). Reston, VA: AIAA, 2000. Ch. 2.21. P. 749–776.
2. Babuk V. A., Vasilyev V. A., Glebov A. A., et al. Combustion mechanisms of AN-based aluminized solid rocket propellants // Novel Energetic Materials and Applications / L. T. DeLuca, L. Galfetti, R. A. Pesce-Rodriguez (Eds). Grafiche GSS, Bergamo, Italy, Dec. 2004. Paper 44. P. 44-1–44-20.
3. Глотов О. Г., Зырянов В. Я. Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив. I. Методика исследования частиц дисперсной фазы // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 1. С. 74–80.
4. 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.
5. Глотов О. Г. Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив. III. Влияние инертной газообразной среды сжигания // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 1. С. 105–113.
6. Babuk V. A., Vasilyev V. A., Malakhov M. S. Condensed combustion products at the burning surface of aluminized solid propellant // J. Propulsion and Power. 1999. V. 15, N 6. P. 783–794.
7. Babuk V. A., Vasilyev V. A., Naslednikov P. A. Experimental study of evolution of condensed combustion products in gas phase of burning solid rocket propellant // Combustion of Energetic Materials / K. Kuo, L. De Luca (Eds). New York, 2002. P. 412–426.
8. Babuk V. A., Vasilyev V. A., Sviridov V. V. Propellant formulation factors and metal agglomeration in combustion of aluminized solid rocket propellant // Combust. Sci. Technol. 2001. V. 163. P. 261–289.
9. Babuk V. A., Dolotkazin I. N., Glebov A. A. Burning mechanism of aluminized solid rocket propellants based on energetic binders // Propellants, Explosives and Pyrotechnics. 2005. V. 30, N 4. P. 281–290.
10. Dokhan A., Price E. W., Sigman R. K., Seitzman J. M. The effects of Al particle size on the burning rate and residual oxide in aluminized propellants // AIAA Paper N 01-3581. 2001.
11. Seitzman J. M., Dokhan A., Price E. W., Sigman R. K. The combustion behavior of ultrafine aluminum and its application in bimodal aluminized propellants // Proc. of the 8th Intern. Workshop on Combustion and Propulsion, Pozzuoli, Naples, Italy, 16–21 June, 2002. P. 82–83.
12. Melcher J. C., Burton R. L., Krier H. Combustion of aluminum particles in solid rocket flows // Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics / V. Yang, T. B. Brill, W. Z. Ren (Eds). (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 185). Reston, VA: AIAA, 2000. Ch. 2.21. P. 723–747.
13. Русанов А. И. Удивительный мир наноструктур // Журн. общ. химии. 2002. Т. 72, № 4. С. 532–549.
14. Силин Н. А., Шахиджанов Б. С., Кашпов Б. Я. и др. Агломерация дисперсной фазы при горении гетерогенных конденсированных систем. М.: Машиностроение, 1981.
15. Babuk V. A., Vasilyev V. A., Dolotkazin I. N., Sviridov V. V. Metal fuel as component of high-performance solid rocket propellants: problems and applications perspective // Rocket Propulsion: Present and Future: Book of Proc. of the 8-IWCP held in Pozzuoli, Naples, Italy, 16–21 June 2002 / L. T. De Luca (Ed.). Milan, 2003. P. 26-1–26-18.
16. Бабук В. А. Горение металлического горючего в поверхностном слое твердого ракетного топлива // Сборник лекций Второй Международ. школы-семинара «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем». СПб., 1997. Т. 1. С. 194–219.
17. Бабук В. А., Белов В. А., Шелухин Г. Г. Особенности горения частиц алюминия в составе смесевых конденсированных систем при низких и высоких давлениях // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 3. С. 26–31.
18. Бекстед М. В. Анализ данных по временам горения частиц алюминия // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 5. С. 55–70.
19. Бабук В. А., Васильев В. А., Карпин Д. В. Моделирование горения капель $Al-Al_2O_3$ в активном высокотемпературном газовом потоке // Сборник докл. Третьей Международ. конф. по внутрикамерным процессам и горению в установках на твердом топливе и ствольным системам (ICOC-99). Ижевск, 1999. С. 761–781.
20. Crump J. E., Prentice J. L., Kraeutle K. J. Role of scanning electron microscope in the study of solid propellant combustion: II. Behavior of metal additives // Combust. Sci. Technol. 1969. V. 1, November. P. 205–223.
21. Rosenband V., Gany A. Testing of metal powders behavior in a hot stage microscope // Combustion of Energetic Materials / K. Kuo, L. De Luca (Eds). New York, 2001. P. 377–384.

22. Похил П. М., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972.
23. DeLuca L. T., Galfetti L., Rossettini L., et al. Physical and ballistic characterization of AlH₃-based space propellants // Proc. of the European Conference for Aerospace Science, July 4–7 2005, Moscow. Paper 5.02.07, CD.
24. Ягодников Д. А., Гусаченко 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.
25. Золотко А. Н., Вовчук Я. И., Полетаев Н. И. и др. Синтез наноксидов в двухфазных ламинарных пламенах // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 4. С. 24–33.
26. Золотко А. Н., Вовчук Я. И., Шевчук В. Г., Полетаев Н. И. Воспламенение и горение газовзвесей (обзор) // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 6. С. 3–14.

*Поступила в редакцию 13/IX 2004 г.,
в окончательном варианте — 24/I 2006 г.*