

УДК 536.46

ГОРЕНИЕ СВОБОДНО ПАДАЮЩИХ В ВОЗДУХЕ АГЛОМЕРАТОВ ИЗ АЛЮМИНИЯ И БОРА. I. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОДХОД

О. Г. Глотов, Г. С. Суродин

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090 Новосибирск
glotov@kinetics.nsc.ru, surodin83@yandex.ru

Дан обзор исследований горения смесевых топлив, содержащих комбинированное горючее на основе алюминия и бора. Представлена методика исследования горения крупных частиц комбинированного горючего Al + B в воздухе. Горящие частицы Al/B диаметром $300 \div 700$ мкм агломерационного происхождения получали посредством воспламенения помещенных в сгорающий безметалльный образец миниатюрных кусочков смесевой композиции, содержащей 32 % связующего и 68 % порошков алюминия и бора микронных размеров в соотношении $Al/B = 81/19$. Образованные в результате слияния множества мелких частиц агломераты горели в воздухе в свободном падении. Описаны процедуры обработки видеозаписи процесса горения и исследования конденсированных продуктов горения — остатков горения агломератов с целью определения времени горения и анализа особенностей превращения комбинированного горючего в оксид.

Ключевые слова: алюминий, бор, частица, агломерат, горение, время горения, конденсированные продукты горения, сканирующий электронный микроскоп, энергодисперсионный анализ (EDS).

DOI 10.15372/FGV20190311

ВВЕДЕНИЕ

Сравнительно высокая (более 2 ккал/г) теплота сгорания таких элементов, как Be, Li, Al, Mg, B, Ti, Zr, служит предпосылкой для их использования в качестве металлического горючего в смесевых и газодисперсных системах энергетического, технологического или иного назначения [1–3]. В традиционных смесевых ракетных топливах из перечисленных элементов наиболее широкое распространение получил алюминий [3–5]. Однако возможности повышения параметров топлива при использовании обычного порошкообразного алюминия микронных размеров практически исчерпаны. Поэтому предпринимаются попытки модифицировать алюминий, чтобы улучшить его характеристики горения (облегчить воспламенение, понизить агломерацию в волне горения, увеличить полноту сгорания и т. п.). Известные способы модификации металлических горючих — повышение дисперсности [6]; легирование металла (введение добавок в объем

частиц, приготовление сплавов или механосплавов [7–9]); нанесение покрытий на поверхность частиц [10–16]; введение дополнительного горючего, каталитического или иного активного компонента в состав смесевой системы [3, 17, 18]. Некоторые энергоемкие соединения металла (гидрид алюминия, бориды алюминия и магния) также можно рассматривать как «улучшенные» или модифицированные металлические горючие [3, 4, 19–21]. Перечисленные способы воздействуют на свойства металла и/или его оксидной оболочки и влияют на физико-химические процессы взаимодействия частиц между собой и с реагентами, поставляемыми другими компонентами смесевой системы или с реагентами газообразной среды сжигания, что в результате определяет особенности воспламенения, окисления, агломерации частиц металлического горючего в активном слое конденсированной фазы и горение частиц в газовой фазе. Следует отметить, что описанные в литературе попытки изменить поведение алюминия к лучшему хотя и не привели к революционным результатам, но позволили обнаружить некоторые полезные эффекты, которые упомянуты ниже.

В качестве дополнительного горючего компонента энергетических смесевых систем

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-03-04321 «Воспламенение и горение частиц комбинированного металлического горючего на основе алюминия и бора»).

особое внимание привлекает бор. По сравнению с алюминием бор характеризуется более высокой теплотой сгорания, воспламеняется при более низкой температуре и при определенных условиях дает меньше конденсированных продуктов горения [3, 22–24]. Но при этом имеются и недостатки. Бору требуется для окисления гораздо больше кислорода, чем алюминию; горение бора затруднено и протекает медленно из-за высокой температуры плавления бора и способности жидкого оксида бора покрывать поверхность частицы [23]. Тем не менее, считается [20], что применение бора в композиции с алюминием может повысить полноту сгорания бора.

Можно ожидать, что сочетание полезных свойств обоих компонентов приведет к синергетическому эффекту, и это побуждает исследовать смесевые системы и частицы, включающие Al и B.

Литературные данные о горении смесевых систем с Al и B скудны.

В [17] измеряли скорость горения и исследовали конденсированные продукты горения модельных смесевых топлив на основе перхлората аммония (ПХА), инертного связующего и механической смеси наноразмерного алюминия типа Alex и аморфного бора при давлениях $2 \div 8$ МПа. Удельная площадь поверхности порошков составляла $7.04 \text{ м}^2/\text{г}$ для Alex и $8.63 \text{ м}^2/\text{г}$ для бора, что соответствует условному размеру частиц приблизительно 300 нм. Массовая доля горючего в топливе 15.7 %. В базовом топливе все 15.7 % горючего — это Alex, в модифицированном топливе 2 % Alex заменено бором, так что топливо содержит 13.7 % Alex и 2 % B. Соответственно соотношение Alex/B составляет 100/0 или 87/13. Установлено, что введение бора в указанном количестве практически не влияет на закон скорости горения, но проявляется в усилении агломерации металлического горючего (увеличение массы, доли и размеров агломератов). Агломераты Al/B при соотношении Alex/B = 87/13 внешне не отличались от агломератов Al при Alex/B = 100/0. Предположительно присутствие бора приводит к более активному реагированию комбинированного металлического горючего в конденсированной фазе, но затрудняет отрыв агломератов. Косвенным подтверждением более активного реагирования борсодержащего горючего служит снижение времени задержки зажигания в $1.2 \div 1.4$ раза при

плотности теплового потока $55 \div 220 \text{ Вт}/\text{см}^2$ (эксперименты [25] в воздухе при давлении 1 атм). Положительным эффектом введения бора было снижение среднеобъемного диаметра D_{30} оксидных частиц на ≈ 25 %.

В [26, 27] при давлениях $2 \div 8$ МПа исследовали характеристики горения смесевых топлив, содержащих ПХА (или ПХА и октоген), инертное или энергетическое связующее и механосплавы Al/B. Было изучено более 15 модельных топлив с массовой долей горючего $18 \div 20$ %. Частицы сплавов, являющиеся механоактивированным комбинированным горючим, имели размер $D_{30} = 3 \div 20 \text{ мкм}$ и соотношения Al/B = 10/90, 16/84, 30/70, 50/50 и 100/0. Установлено, что отношение Al/B, режим приготовления механосплавов, распределение частиц сплава по размерам и компонентный состав топлива существенно влияют на скорость горения; температуру пламени; размеры, морфологию и химический состав частиц конденсированных продуктов горения. Для топлив с инертным связующим замена алюминия на механосплав с Al/B = 50/50 приводила к снижению показателя степени в зависимости скорости горения от давления с 0.56 до 0.41 в диапазоне $4 \div 8$ МПа. Аналогичный эффект имел место и для топлива с механической смесью Al и B в соотношении 50/50. Присутствие октогена и энергетического связующего в рецептуре топлив обеспечивало более высокую полноту сгорания сплава Al/B.

Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что комбинированные горючие на основе Al и B в волне горения смесевых систем агломерируют подобно частицам Al в традиционных алюминизированных топливах. В результате агломерации с поверхности горения топлива в газовую фазу выходят преимущественно частицы-агломераты, существенно отличающиеся от начальных частиц в топливе по множеству параметров — составу, размеру, структуре, степени окисленности и др. Реализация потенциальных возможностей и преимуществ, предоставляемых комбинированным металлическим горючим, как и в случае алюминизированных топлив, определяется процессами окисления и агломерации частиц горючего в конденсированной фазе и последующим выгоранием агломератов в газовой фазе. Под выгоранием подразумеваем расходование Al и B. В [26, 27] агломераты Al/B имели широкое распределение по размерам и достигали 1 000 мкм

(при давлении 4.2 МПа). Отметим, что при соотношении $Al/B \leq 50/50$ морфология агломератов имела специфические особенности. Наряду с «классическими» агломератами сферической или желудеобразной формами (сфера с одним включением), типичными для агломератов Al, имеются агломераты в форме каплевидного осесимметричного тела с многочисленными вкраплениями.

Данные о динамике горения комбинированных агломератов Al/B отсутствуют. Между тем очевидно, что внутрикамерные процессы в энергетических установках во многом определяются макрокинетикой превращения горючего в оксид и временем пребывания частиц в камере сгорания. Иными словами, эффективность использования горючего, в частности полнота сгорания, зависит от размера и структуры горящих частиц, от механизма реализации реакции окисления, от параметров движения (таких как коэффициент аэродинамического сопротивления и скорость частиц относительно газа). Конечные продукты окисления Al и B — конденсированные оксиды, их поведение в процессе горения агломерата во многом обуславливает макрокинетику реагирования, которую в общем случае следует характеризовать временными зависимостями масс отдельных реагентов (компонентов горючего и их оксидов) в горячей частице-агломерате. Значительно упрощая картину, необходимо, как минимум, регистрировать изменение общей массы частицы за время горения.

Целью данной работы было получение информации о структуре, времени горения и изменении массы модельных агломератов Al/B при их горении в условиях свободного падения в воздухе при атмосферном давлении. Проведение экспериментов в воздухе оправдано двумя обстоятельствами. Во-первых, воздух является удобной модельной средой определенного состава и температуры. Во-вторых, полученные данные представляют интерес в плане использования комбинированного Al/B-горючего в прямоточных ракетных двигателях, где сгорание горючего происходит в основном в воздухе [2, 20, 28] при умеренном давлении.

Данная работа состоит из двух частей. В первой части описаны методики проведения и обработки экспериментов, во второй — результаты. Некоторые материалы частично опубликованы в [29–32], настоящее изложение является более полным и завершенным.

КОМПОНЕНТЫ И ОБРАЗЦЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГОРЯЩИХ ЧАСТИЦ Al/B

Для получения данных о параметрах горения агломератов определенного размера нами развивается оригинальный подход с использованием образцов, генерирующих монодисперсные частицы агломерационного происхождения. Образцы представляют собой безметалльное топливо-матрицу, в которое помещено определенное количество «зародышей агломератов» — одинаковых миниатюрных кусочков-включений, изготовленных из металлизированного топлива. В состав металлизированного топлива входят частицы микронных размеров. В волне горения матрицы образца каждое включение превращается в горящую частицу-агломерат. В идеале агломераты имеют одинаковые размеры, массу, состав и структуру, которые предопределены рецептурой и размером включений. Этот подход был успешно применен для создания и исследования агломератов алюминия диаметров 100, 340, 470 мкм [33–36] и титана диаметров 300, 390, 480 мкм [37, 38], горящих либо в продуктах горения топлива-матрицы при повышенном давлении, либо в воздухе при атмосферном давлении. В данной работе подход развит для создания агломератов Al/B. Специфические физико-химические свойства бора потребовали разработки специальной композиции включений в топливо и новых приемов их изготовления. Температура плавления бора выше, чем алюминия (2348 и 933 К соответственно), что затрудняет слияние частиц и образование агломератов. При выборе состава включений руководствовались следующими требованиями: (1) композиция должна содержать, наряду с алюминием, значимое количество бора; (2) консистенция композиции должна позволять формовать миниатюрные включения, которые держат форму; (3) включения должны воспламеняться в пламени матрицы без разрушения и фрагментации и затем формировать устойчиво горящие агломераты. После опробования множества композиций мы остановились на составе с соотношением $Al:B = 4.23:1 = 81/19$. Фактически, 81 % — это минимальное содержание алюминия во включениях, обеспечивающее при данных условиях «связывание» частиц в агломераты. Составы матрицы и включений приведены в табл. 1. Для того чтобы оценить влияние дисперсности алюминия на параметры горения

Таблица 1

Компонентный состав включений и матрицы

Компонент, размер частиц	Включения, % (мас.)			Матрица, % (мас.)
	рецептура Al9B	рецептура Al1B	рецептура Al05B	
Al, $D_{43} = 8.7$ мкм	55	—	—	—
Al, $0.5 \div 1.5$ мкм	—	55	—	—
Al, $0.3 \div 0.7$ мкм	—	—	55	—
B, $D_{43} = 5.4$ мкм*	13	13	13	—
ПХА, $D_{43} = 13$ мкм	—	—	—	34
Октоген, $D_{43} = 8.9$ мкм	—	—	—	39
Связующее	32	32	32	27

Примечание. Среднемассовый диаметр компонентов D_{43} определен с использованием гранулометра Malvern 3600E, кроме случая, помеченного *, в котором использовался гранулометр Analysette 22.

Таблица 2

Данные химического анализа исходных порошков алюминия и бора и результаты расчета числа RN для включений

Компонент	n	Al ⁰ (металлический), %	B ⁰ (активный), %	RN, %
Al, $D_{43} = 8.7$ мкм	7	95.0 ± 2.0	—	10.6 ± 0.2
Al, $0.5 \div 1.5$ мкм	6	96.0 ± 0.9	—	—
Al, $0.3 \div 0.7$ мкм	6	89.9 ± 0.7	—	—
B	9	—	90.8 ± 0.8	25.2 ± 0.2
RN для рецептуры включений Al9B (расчет с учетом массовых долей компонентов)				13.4

агломератов Al/B, варьировали гранулометрический состав алюминия во включениях. Варианты рецептур включений обозначены Al9B, Al1B и Al05B, где цифры между символами Al и B соответствуют характерному размеру частиц алюминия — 9, 1 или 0.5 мкм. Композиции для включений и матрицы имеют консистенцию пластилина, легко формуются и держат форму.

Описание компонентов: Al, $D_{43} = 8.7$ мкм — алюминиевый порошок марки АСД-4. Al размеров $0.5 \div 1.5$ мкм и $0.3 \div 0.7$ мкм — фракции, выделенные из АСД-4. B — бор аморфный. ПХА — перхлорат аммония с удельной площадью поверхности $5600 \text{ см}^2/\text{г}$. Октоген — перекристаллизованный. Связующее — метилполивинил-тетразольный полимер, пластифицированный нитросодержащими соединениями [39].

Компоненты комбинированного горючего анализировали перманганатометрическим [40]

и цериметрическим [41] методами. Результаты представлены в табл. 2. Здесь n — количество параллельных определений. Верхний индекс 0 означает степень окисления 0. RN — восстановительное число, характеризующее способность материала присоединять кислород [41], т. е. способность материала к окислению.

Геометрия образцов была та же, что и в экспериментах с титановыми агломератами в [37, 38]. Композиция-матрица наносится в форме полоски размеров $2 \times 30 \times 1$ мм на кварцевую трубку диаметром 12 мм. Трубка играет роль держателя образца и используется многократно. На полоску матрицы в предварительно приготовленные лунки помещали включения — одинаковые миниатюрные кусочки металлизированной композиции, $8 \div 12$ штук, сформованные в виде шариков (рис. 1). Опыт показал, что достаточно надежное воспламенение обеспечивают лунки цилиндрической формы диаметром $\approx (1.3 \div 1.5)D_{incl}$ и глу-

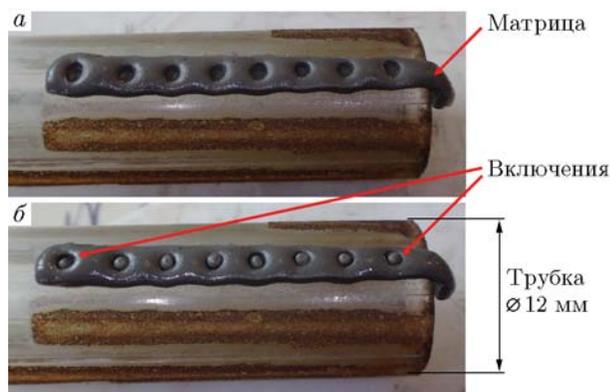


Рис. 1. Приготовление образца:

a — полоска матрицы с пустыми лунками, подготовленными для включений, *б* — та же полоска с вложенными в лунки включениями, справа — выступающий кончик полоски матрицы, который служит для поджигания

биной, примерно равной начальному диаметру включения D_{incl} .

Типичная процедура изготовления включений (рис. 2) представляет собой следующую последовательность операций. На аналитических весах (МВ 210-А производства ЗАО «Сартогосм», Россия, погрешность ± 0.0001 г) взвешивается порция композиции для изготовления включений. Масса порции определяется желаемым размером агломератов и их количеством и обычно соответствует объему вещества в несколько кубических миллиметров, которым

легко оперировать. Отмеренную порцию вещества — материала включений скатывают в шарик, сплющивают в диск и разрезают на 8 секторов. Каждую из 8 частей снова скатывают в шарик, расплющивают в диск и разрезают на 4 части. Из этих частей скатывают шарики-включения для закладки в образец. В [30] в результате гранулометрического анализа 25 сферических остатков горения включений «из одной нарезки» определен их среднесчетный диаметр $D_{10} = 683$ мкм, стандартное отклонение $Sd = 52$ мкм и стандартное отклонение среднего $Se = 10$ мкм. Коэффициент вариации диаметра $K_{var} = Sd/D_{10} = 0.08$, что позволяет считать остатки и включения монодисперсными. Согласно [42, с. 212] монодисперсными являются системы с $K_{var} < 0.15$.

ПРОВЕДЕНИЕ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводили в постановке, аналогичной описанной в [37, 38]. Кварцевую трубку-держатель образца закрепляли горизонтально над поддоном таким образом, чтобы полоска матрицы находилась на боковой поверхности трубки, обращенной книзу. Полоску матрицы поджигали с конца, выступающего за торец трубки-держателя. По мере того как волна горения проходит по полоске матрицы, включения воспламеняются и выбрасываются из матрицы. Вылетевшие частицы пре-

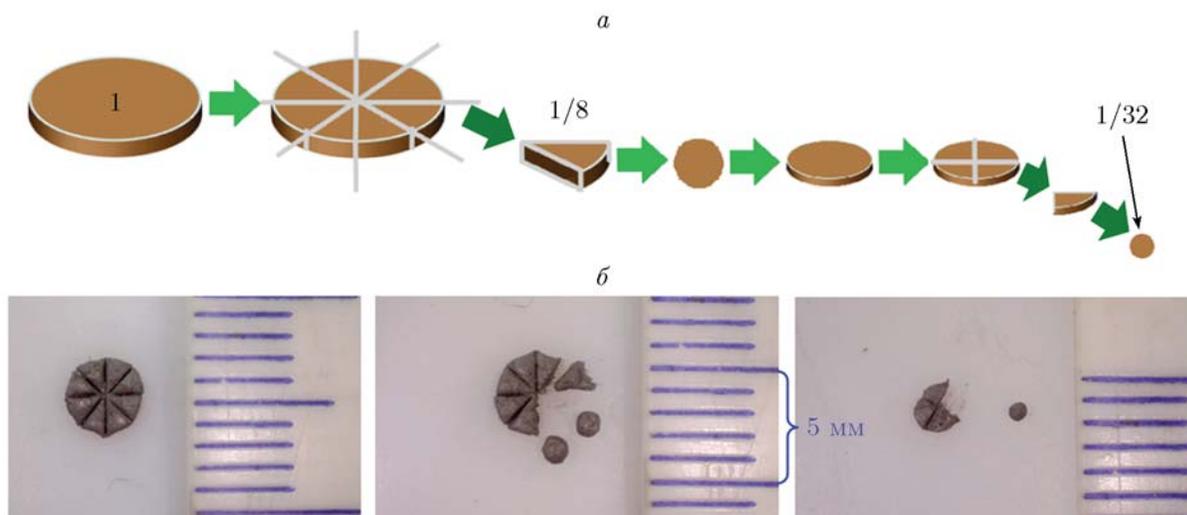


Рис. 2. Приготовление 32 включений заданной массы:

a — схема нарезки, *б* — реальные фотоснимки отдельных стадий процесса деления порции вещества 0.01016 г на 32 части массой по 0.00032 г

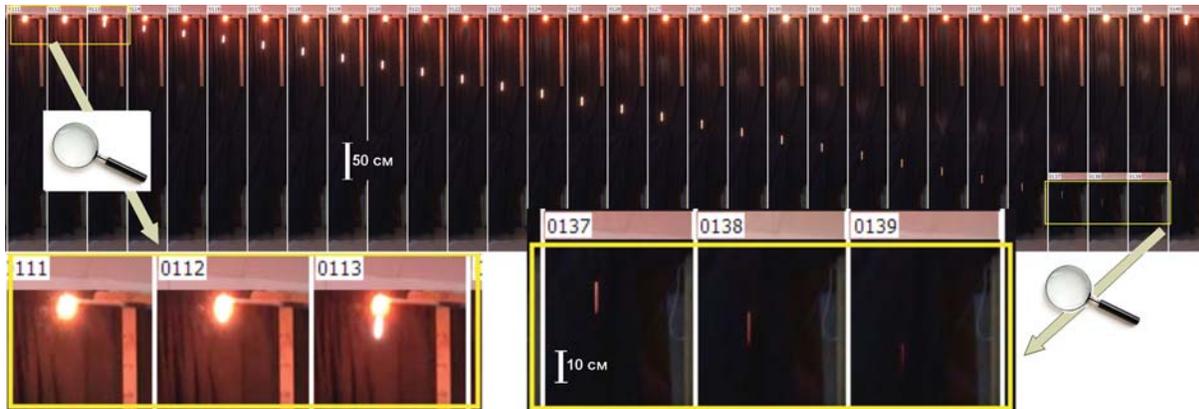


Рис. 3. Определение времени горения агломератов Al/B:

видеограмма процесса горения агломерата в свободном падении в воздухе и два ее увеличенных фрагмента, кадр 112 на левом фрагменте — выход агломерата из образца, кадр 139 на правом фрагменте — последний, на котором агломерат еще заметен, этот кадр соответствует моменту окончания горения, т. е. времени горения t_b данного агломерата

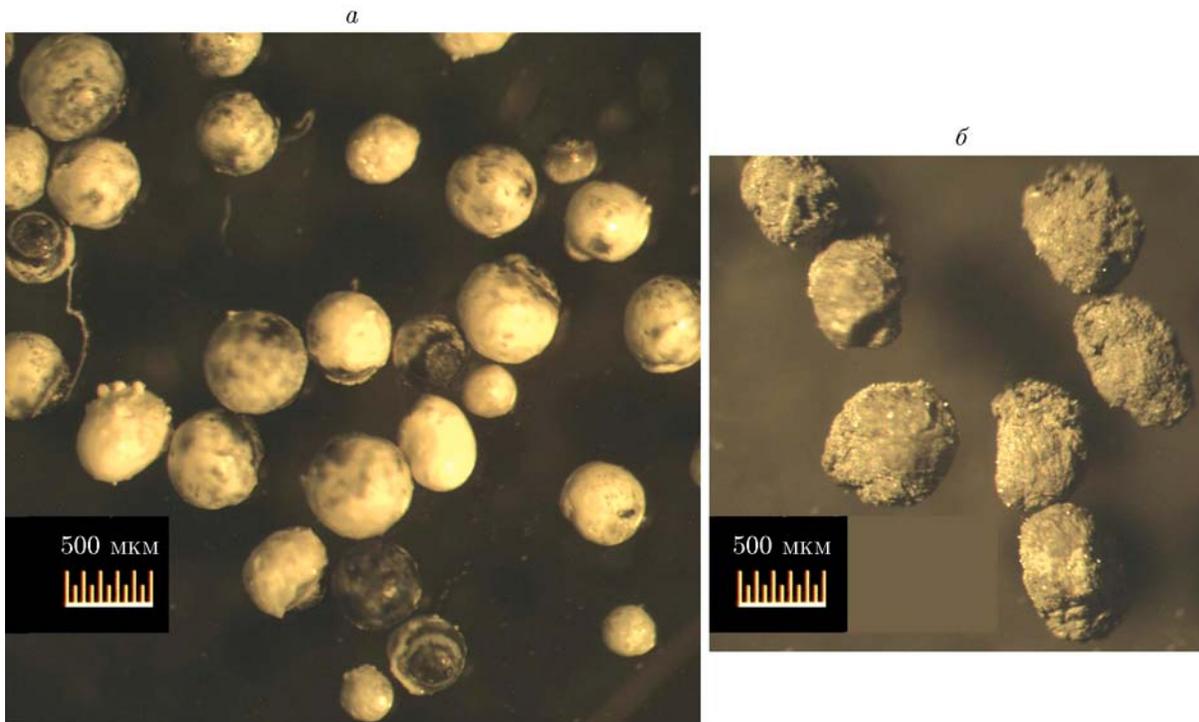


Рис. 4. Вид собранных с поддона остатков горения Al/B-агломератов под оптическим микроскопом:

a — основной морфологический тип, представленный сферическими или желудеобразными частицами, *б* — остатки «неполноценного» горения, представленные пористыми частицами неправильной или близкой к сферической формы; частицы для фотографирования взяты из разных опытов, поэтому их размеры отличаются

вращаются в горящие сферы, свободно падающие в воздухе. Видеосъемку падающих горящих частиц проводили цифровой фотокамерой со скоростью 25 кадр/с. Принудительное гаше-

ние частиц в аргоновой ловушке [37] не применяли, сгорание частиц вплоть до прекращения свечения обеспечивала большая высота падения (до 5 м).

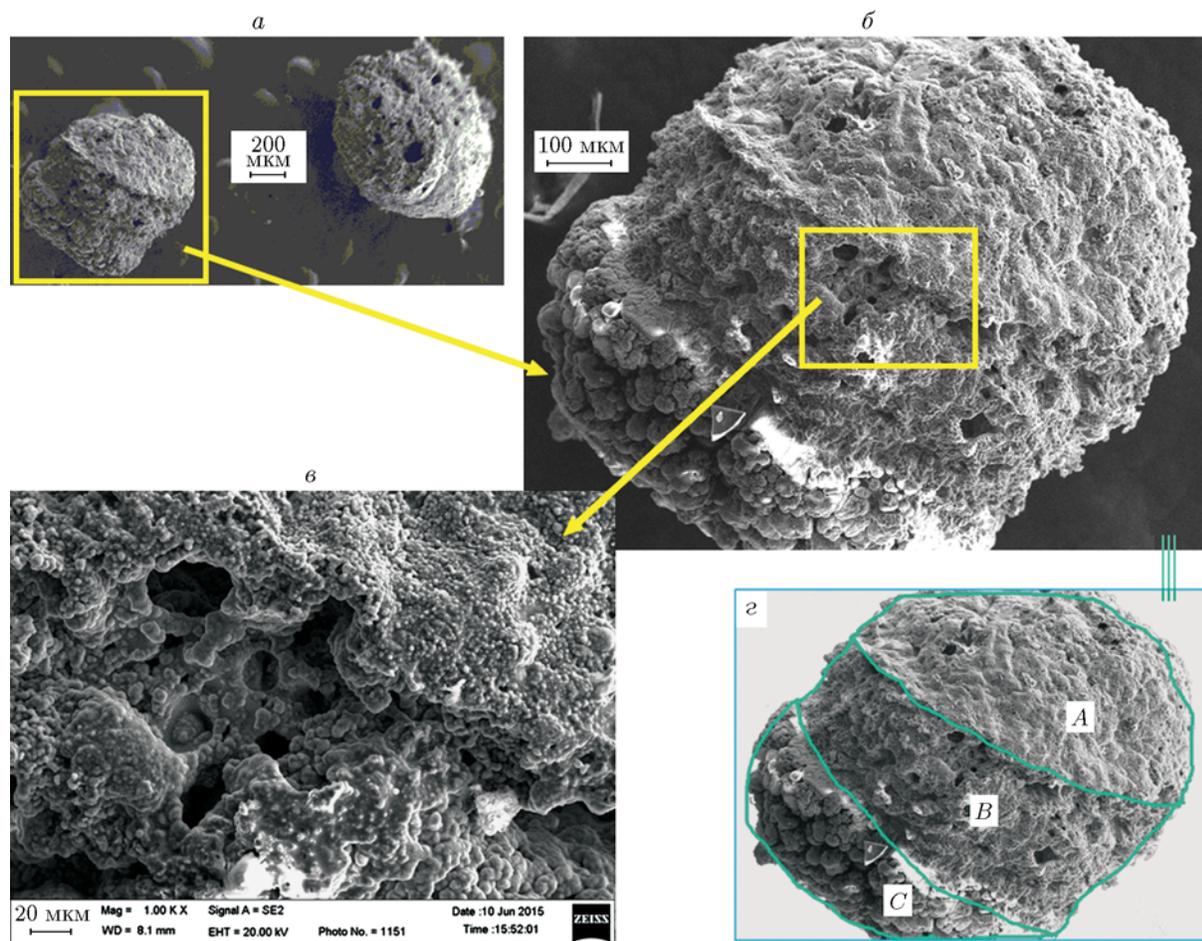


Рис. 5. Вид пористых остатков под электронным микроскопом при разных увеличениях

Поддон для улавливания остатков горения частиц был изготовлен из листа мелованной бумаги формата А1. Собранные остатки взвешивали, затем исследовали и фотографировали под оптическим микроскопом МБС-10 с окулярной камерой DCM-300. Для измерения диаметров частиц использовали программное обеспечение ScopePhoto, а также оригинальное программное обеспечение [43] (режим 5 — добавление окружностей и их интерактивная корректировка путем растяжения/сжатия и перемещения с использованием клавиатуры и мыши). В отдельных случаях частицы-остатки исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) с использованием микроскопа Merlin|VP Compact (Zeiss), снабженного EDS-приставкой X-Max_N (Oxford Instruments) для локального элементного анализа (EDS — спектроскопия энергетического рассеяния).

Обработка экспериментов включала в себя

следующее.

1. Определение средней массы одного включения $m_{incl} = M/N$, где M — масса порции топлива, использованная для изготовления N включений. Типичное значение $N = 32$ (см. рис. 2), полученные включения расходуются в $3 \div 4$ образцах (см. рис. 1).

2. Определение времени горения (сгорания) t_b частицы-агломерата по видеозаписи, время сгорания отождествляли с временем свечения частицы (после прекращения свечения частица не видна, см. рис. 3).

Несмотря на меры, направленные на повышение надежности воспламенения частиц, наблюдались случаи «неполноценного» горения. В таких случаях свечение частицы после выхода из образца длилось около 0.4 с, так что частица была видна на $7 \div 11$ кадрах и успевала удалиться от образца примерно на 50 см. При нормальном горении время и дистанция гораздо больше (см. рис. 3). Остатки «горения»

таких частиц шероховатые, пористые, местами напоминающие застывшую пену. Их форма варьируется от глыбообразной до почти сферической, тогда как остатки нормально горевших частиц гладкие и имеют форму желудя (сферы с включением) (рис. 4). В [36] подобные частицы именовали «комбинированными».

На рис. 5 представлены изображения частицы пористого остатка, полученные на электронном микроскопе при разных увеличениях, рецептура включений Al05B (см. табл. 1).

В момент прекращения горения частица находилась на стадии образования агломерата. На схематичном изображении на рис. 5,а, тождественном изображению на рис. 5,б, выделены три области. В области А, как видно на увеличенном фрагменте на рис. 5,в, находятся спекшиеся или удерживаемые связующим частицы микронных размеров, соответствующие размерам исходных частиц горючего. В области С частицы уже объединились в «субагломераты» размерами в десятки микрометров, и вся область состоит преимущественно из таких близких по форме к сферическим частиц. Область В — промежуточная, характеризуется большим количеством каверн и, по-видимому, представляет собой зону превращения исходного материала в субагломераты, в которой происходит газификация связующего. По данным локального элементного анализа методом EDS, соотношение атомов Al/O в областях А, В, С составляет 2.1, 0.4 и 0.5 соответственно. Это подтверждает, что материал в области А близок к исходному непрореагировавшему.

Эксперименты показали, что масса пористых остатков, подобных показанным на рис. 5, в среднем равна 1.03 от начальной суммарной массы Al и B во включении (статистика по 127 частицам в 27 опытах). Теоретически, после разложения связующего во включении может оставаться некоторое количество углеродистых остатков (максимально 0.10 от массы включения в соответствии с количеством атомов углерода в молекуле полимера). Результаты взвешивания и теоретическая оценка максимального количества углеродных остатков дают основание считать, что еще до полного плавления алюминия и формирования гладкой сферы связующее газифицировалось и покинуло агломерат. Это обосновывает возможность вычисления начальных масс и размеров агломератов, как описано ниже в пп. 3, 4. Заметим, что аналогичная ситуация — полная газифи-

кация связующего в процессе образования агломерата — имела место в случае алюминиевых [34] и титановых [37] агломератов с иным составом композиции для включений.

3. Вычисление начальной массы агломерата $m_{AlB} = m_{incl} \cdot 0.68$, где 0.68 — суммарная массовая доля Al и B во включении (см. табл. 1). Типичные значения m_{AlB} в проведенных экспериментах $0.00010 \div 0.00050$ г.

4. Вычисление начального диаметра агломерата $D_{AlB} = \sqrt[3]{6m_{AlB}/\pi\rho_{AlB}}$, где $\rho_{AlB} = 2.61$ г/см³ — аддитивная плотность смеси 0.81Al + 0.19B, вычисленная с использованием массовых долей и плотностей компонентов по формуле $1/\rho_{AlB} = 0.81/\rho_{Al} + 0.19/\rho_B$, где $\rho_{Al} = 2.7$ г/см³ и $\rho_B = 2.3$ г/см³.

5. Определение средней массы одной частицы-остатка $m_{ox} = M_{ox}/N_{ox}$, где M_{ox} — суммарная масса, N_{ox} — суммарное штучное количество частиц-остатков в опытах с одинаковыми агломератами. В данном случае речь идет только о сферических частицах (см. рис. 4,а). Если все частицы горели нормально, то N_{ox} равно количеству включений, заложенных в образец. Здесь и далее индексом *ox* обозначаем параметры, относящиеся к частицам после горения.

6. Проведение гранулометрического анализа частиц-остатков — определение диаметра частиц по изображениям с оптического микроскопа, как описано выше. Вычисление среднего арифметического диаметра D_{ox} , среднеквадратичного отклонения Sd и стандартного отклонения среднего Se . Вычисление суммарного объема частиц ΣV_{ox} и оценка средней плотности частиц-остатков $\rho_{ox} = M_{ox}/\Sigma V_{ox}$.

7. Вычисление отношений масс и диаметров частиц после и до горения: m_{ox}/m_{AlB} , D_{ox}/D_{AlB} .

В данной статье описаны методики проведения и обработки экспериментов. Результаты экспериментов изложены в следующей статье.

Авторы выражают благодарность Т. Д. Федотовой, Л. Н. Нестеренко и Я. Л. Лукьянову за проведение химических анализов и электронно-микроскопические исследования.

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. **Ягодников Д. А.** Воспламенение и горение порошкообразных металлов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
3. **Энергетические** конденсированные системы: краткий энциклопедический словарь / под. ред. Б. П. Жукова. — М.: Янус-К, 2000.
4. **Ракетные** топлива / под. ред. Я. М. Паушкина, А. З. Чулкова. — М.: Мир, 1975.
5. **Тимнат И.** Ракетные двигатели на химическом топливе. — М.: Мир, 1990.
6. **Glotov O. G., Zarko V. E., Beckstead M. W.** Agglomerate and oxide particles generated in combustion of Alx containing solid propellants // *Energetic Materials. Analysis, Diagnostics and Testing: 31st Int. Annu. Conf. of ICT.* — Karlsruhe, Germany, 2000. — P. 130-(1-14).
7. **Брейтер А. Л., Мальцев В. М., Попов Е. И.** Пути модификации металлического горючего конденсированных систем // *Физика горения и взрыва.* — 1990. — Т. 26, № 1. — С. 97–104.
8. **Попов Е. И., Кашпоров Л. Я., Мальцев В. М., Брейтер А. Л.** О механизме горения частиц алюминиево-магниевого сплава // *Физика горения и взрыва.* — 1973. — Т. 9, № 2. — С. 240–246.
9. **Hori K., Glotov O. G., Zarko V. E., Habu H., Faisal A. M. M., Fedotova T. D.** Study of the combustion residues for Mg/Al solid propellant // *Energetic Materials: Synthesis, Production and Application: 33rd Int. Annu. Conf. of ICT.* — Karlsruhe, Germany, 2002. — P. 71-(1-14).
10. **Ягодников Д. А., Андреев Е. А., Воробьев В. С., Глотов О. Г.** Воспламенение, горение и агломерация капсулированных частиц алюминия в составе смесового твердого топлива. I. Теоретическое исследование воспламенения и горения алюминия с фторсодержащими покрытиями // *Физика горения и взрыва.* — 2006. — Т. 42, № 5. — С. 46–55.
11. **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.
12. **Vummidi S. L., Aly Y., Schoenitz M., Dreizin E. L.** Characterization of fine aluminum powder coated with nickel as a potential fuel additive // *J. Propul. Power.* — 2010. — V. 26, N 3. — P. 454–460.
13. **Andrzejak T. A., Shafirovich E., Varma A.** Ignition mechanism of nickel-coated aluminum particle // *Combust. Flame.* — 2007. — V. 150. — P. 60–70.
14. **Hahma A., Gany A., Palovuori K.** Combustion of activated aluminum // *Combust. Flame.* — 2006. — V. 145, N 3. — P. 464–480.
15. **Shafirovich E., Bocanegra P. E., Chanveau C., Gokalp I., Goldshleger U., Rosenband V., Gany A.** Ignition of single nickel-coated aluminum particles // *Proc. Combust. Inst.* — 2005. — V. 30. — P. 2055–2062.
16. **Rosenband V., Gany A.** Agglomeration and ignition of aluminum particles coated by nickel // *Advancement in Energetic Materials and Chemical Propulsion / J. Rivera, K. K. Kuo (Eds).* — New York: Begell House, 2007. — P. 141–149.
17. **Korotkikh A. G., Glotov O. G., Arkhipov V. A., Zarko V. E., Kiskin A. B.** Effect of iron and boron ultrafine powders on combustion of aluminumized solid propellants // *Combust. Flame.* — 2017. — V. 178. — P. 195–204.
18. **Лю Цз.-Чж., Лян Д.-Л., Сяо Цз.-У, Чэнь Б.-Х., Чжан Я. В., Чжоу Цз.-Х., Цэнь К.-Ф.** Состав и характеристики первичных продуктов горения топлив на основе бора // *Физика горения и взрыва.* — 2017. — Т. 53, № 1. — С. 64–74.
19. **Ягодников Д. А., Воронецкий А. В., Сарабьев В. И.** Воспламенение и горение пиротехнических составов на основе микро- и наночастиц диборида алюминия в воздушном потоке в двухзонной камере сгорания // *Физика горения и взрыва.* — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 51–58.
20. **Сорокин В. А., Яновский Л. С., Козлов В. А., Суриков Е. В., Шаров М. С., Фельдман В. Д., Францевич В. П., Животов Н. П., Абашев В. М., Черваков В. В.** Ракетно-прямоточные двигатели на твердых и пастообразных топливах. Основы проектирования и экспериментальной отработки / под. ред. Ю. М. Милехина, В. А. Сорокина. — М.: Физматлит, 2010.
21. **Розенбанд В., Гани А.** Синтез порошка диборида магния в режиме теплового взрыва // *Физика горения и взрыва.* — 2014. — Т. 50, № 6. — С. 34–39.
22. **Combustion of Boron-Based Solid Propellants and Solid Fuels / K. K. Kuo, R. Pein (Eds).** — Boca Raton: CRC Press, 1993.
23. **Applications of Turbulent and Multi-Phase Combustion / K. K. Kuo, Ragini Acharya (Eds).** — Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
24. **Gany A., Timnat Y. M.** Advantages and drawbacks of boron-fueled propulsion // *Acta Astronaut.* — 1993. — V. 29, N 3. — P. 181–187.
25. **Korotkikh A. G., Arkhipov V. A., Glotov O. G., Zolotarev N. N.** Ignition by laser radiation and combustion of composite solid propellants with bimetal powders // *5th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, 2016.* — J. Phys. — Conf. Ser. — 2017. — V. 830. — 012137. — DOI: 10.1088/1742-6596/830/1/0121372017.
26. **Glotov O. G., Simonenko V. N., Zarko V. E., Tukhtaev R. K., Grigor'yeva T. F., Fedotova T. D.** Combustion characteristics of

- propellants containing aluminum-boron mechanical alloy // *Energetic Materials. Structure and Properties: 35th Int. Annu. Conf. of ICT*. — Karlsruhe, Germany, 2004. — P. 107-(1–16).
27. **Glotov O. G., Zarko V. E., Simonemko V. N., Fedotova T. D., Tukhtaev R. K., Grigor'yeva T. F.** Effect of Al/B mechanical alloy on combustion characteristics of AP/HMX/energetic binder propellants // *36th Int. Annu. Conf. of ICT & 32nd Int. Pyrotechnics Seminar*. — Karlsruhe, Germany, 2005. — P. 102-(1–12).
 28. **Александров В. Н., Быцкевич В. М., Верховоломов В. К., Граменицкий М. Д. и др.** Интегральные прямооточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах (Основы теории и расчета) / под. ред. Л. С. Яновского. — М.: Академкнига, 2006.
 29. **Глотов О. Г., Суродин Г. С., Житницкая О. Н., Кискин А. Б.** Горение монодисперсных агломератов из алюминия и бора в воздухе // *Материалы IX Всерос. конф. с междунар. участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения»*, Новосибирск, 16–18 ноября 2015 г. — Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2015. — URL: <http://www.itp.nsc.ru/conferences/gt-2015/Files/D1LS3-6.pdf>.
 30. **Glotov O. G., Surodin G. S., Zhitnitskaya O. N.** Combustion of aluminum and boron model agglomerates in free fall in air // *Energetic Materials. Synthesis. Characterization and Processing: 47th Int. Annu. Conf. of ICT*. — Karlsruhe, Germany, 2016. — P. 110-(1–12).
 31. **Глотов О. Г., Суродин Г. С., Житницкая О. Н.** Горение модельных агломератов из алюминия и бора при свободном падении в воздухе // *Тез. XII Междунар. конф. «HEMS-2016» «Высокоэнергетические материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение»*, 7–9 сентября 2016 г., Томск. — С. 45–47. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27607279>.
 32. **Глотов О. Г., Суродин Г. С., Житницкая О. Н.** Исследования механизма горения частиц Al, Ti, Al + B: подход с использованием модельных монодисперсных агломератов // *Сб. тез. докл. всерос. школы-конференции с междунар. участием «Химия и физика горения и дисперсных систем», посвященной 110-летию со дня рождения А. А. Ковальского*, г. Новосибирск, Россия, 19–20 сентября 2016. — С. 18. — URL: http://www.kinetics.nsc.ru/kovalsky_110/Book%20of%20abstracts.pdf.
 33. **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* / K. K. Kuo, L. T. De Luca (Eds). — New York: Begell House, 2002. — P. 397–406. — (См. также: *Int. J. Energ. Mater. Chem. Propul.* — 2002. — V. 5, N 1-6. — P. 397–406. — DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v5.i1-6.430.)
 34. **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.
 35. **Глотов О. Г., Жуков В. А.** Эволюция 100-микронных алюминиевых агломератов и изначально сплошных алюминиевых частиц в пламени модельного твердого топлива. I. Экспериментальный подход // *Физика горения и взрыва*. — 2008. — Т. 44, № 6. — С. 52–60.
 36. **Глотов О. Г., Жуков В. А.** Эволюция 100-микронных алюминиевых агломератов и изначально сплошных алюминиевых частиц в пламени модельного твердого топлива. II. Результаты // *Физика горения и взрыва*. — 2008. — Т. 44, № 6. — С. 61–71.
 37. **Глотов О. Г.** Горение сферических титановых агломератов в воздухе. I. Экспериментальный подход // *Физика горения и взрыва*. — 2013. — Т. 49, № 3. — С. 50–57.
 38. **Глотов О. Г.** Горение сферических титановых агломератов в воздухе. II. Результаты // *Физика горения и взрыва*. — 2013. — Т. 49, № 3. — С. 58–71.
 39. **Архипов В. А., Горбенко Т. И., Жуков А. С., Пестерев А. В.** Влияние хлорида олова на скорость горения гетерогенных конденсированных систем // *Хим. физика и мезоскопия*. — 2011. — Т. 13, № 4. — С. 463–469.
 40. **Fedotova T. D., Glotov O. G., Zarko V. E.** Chemical analysis of aluminum as a propellant ingredient and determination of aluminum and aluminum nitride in condensed combustion products // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2000. — V. 25, N 6. — P. 325–332.
 41. **Fedotova T. D., Glotov O. G., Zarko V. E.** Application of cerimetric methods for determining the metallic aluminum content in ultrafine aluminum powders // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2007. — V. 32, N 2. — P. 160–164.
 42. **Градус Л. Я.** Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии. — М.: Химия, 1979.
 43. **Glotov O. G.** Image processing of the fractal aggregates composed of nanoparticles // *Rus. J. Phys. Chem. A*. — 2008. — V. 82, N 13. — P. 49–54. — DOI: 10.1134/S00360244081300982501607030050.

Поступила в редакцию 12.03.2018.

После доработки 20.04.2018.

Принята к публикации 11.07.2018.