

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ, ХИМИЧЕСКИЙ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ МИКРО- И НАНОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ БОРИДОВ АЛЮМИНИЯ

Д. А. Ягодников^{2,*}, Ш. Л. Гусейнов¹, член-корреспондент РАН П. А. Стороженко¹,
А. П. Шпара², А. В. Сухов², С. Г. Федоров^{1,**}

Поступило 25.06.2018 г.

Представлены результаты исследования распространения пламени в аэрозвеси нанодисперсных частиц порошкообразного полиборида алюминия. Выполнены спектральный, морфологический и масс-спектрометрический анализы конденсированных продуктов сгорания, образующихся при горении аэрозвеси указанного порошка.

Ключевые слова: аэрозвесь, наночастицы, полиборид алюминия, продукты сгорания, спектральный морфологический, дисперсный анализ.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652484144-47>

ВВЕДЕНИЕ

В ракетно-космической промышленности используются порошкообразные металлы и соединения на их основе в качестве компонентов топлива. В частности, рассматриваются высокоэнергетические добавки бора и его химических соединений с алюминием или магнием к горючему для ракетно-прямоточных двигателей (РПД) [1, 2]. В связи с этим для разработки эффективных РПД необходимо располагать базой данных по макрокинетическим характеристикам процессов воспламенения и горения как одиночных частиц боридов, например диборида алюминия, так и их совокупности в условиях, соответствующих или моделирующих натурные.

Однако в данной области имеется ограниченное число публикаций, в которых приведены экспериментальные значения времён горения одиночных частиц диборида алюминия [3], а также внутрибаллистические характеристики горения смесевых конденсированных систем [4–6] (СКС) на основе диборида алюминия. При этом в данных работах не выполнены химический, рентгенофазный, морфологический анализы продуктов сгорания, что

не даёт возможность выявить отдельные стадии физико-химических превращений AlB_2 .

Целью данной работы является экспериментальное подтверждение возможности распространения пламени в аэрозвеси нанодисперсных частиц полиборида алюминия и определение характеристик процесса горения полиборида алюминия на основе спектрального, морфологического и химического анализов продуктов сгорания.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМЫХ ЧАСТИЦ БОРИДОВ АЛЮМИНИЯ

Нанодисперсный порошок полиборида алюминия (ПБА) был получен методом плазменного синтеза с последующей конденсацией в аргоне высокой чистоты в ГНЦ РФ АО “ГНИИХТЭОС” [5]. Удельная поверхность нанодисперсного легкосыпучего порошка (рис. 1) цвета моренго составляет $S_{уд} = 19,1 \text{ м}^2/\text{г}$ при насыпной плотности $\sim 150 \text{ кг/м}^3$.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования проводили при атмосферном давлении на установке постоянного объёма УПО-1500СВ, рабочий участок которой длиной 1500 мм и квадратного поперечного сечения ($80 \times 80 \text{ мм}$) оснащён плоской прозрачной передней стенкой из ПММА [7] для визуализации распространения пламени и регистрации с помощью призматического спектрографа ИСП-51 и спектрографической электронной приставки МОРС-1 спектра излучения продуктов сгорания ПБА в воздухе.

¹ Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений, Москва

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

* E-mail: daj@bmstu.ru

** E-mail: stan-fed2011@yandex.ru

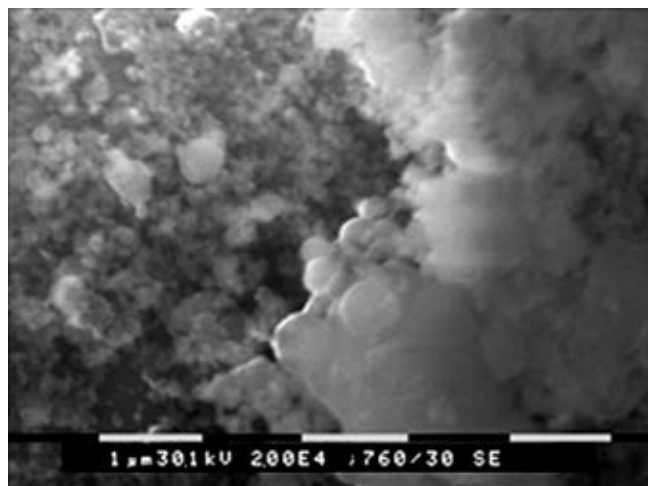


Рис. 1. Изображения в СЭМ частиц полиборида алюминия.

Исследуемую навеску ПБА массой 9–12 г помещали в питатель, расположенный в верхней части установки, а затем вытесняли поршнем в зону распыливания, куда подаётся воздух для псевдоожижения ПБА. Под действием силы тяжести аэровзвесь оседала и в момент достижения нижнего торца подавали команду на зажигание, осуществляемое с помощью навески микронного алюминия марки АСД-1. В этом случае наблюдается близкий к ламинарному режим распространения пламени снизу вверх по оседающей аэровзвеси.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рисунке 2 представлены видеогаммы, иллюстрирующие распространение пламени в момент стабилизации, обеспечиваемой равенством скоростей оседания частиц и распространения пламени, равных ~0,5 м/с. Причём в аэровзвеси микронных частиц борида алюминия распространения пламени добиться не удалось, что свидетельствует об увеличении скорости распространения пламени за счёт использования нанодисперсных частиц.

Также выявлена характерная особенность, связанная с практически плоской куполообразной формой поверхности пламени, которая в отличие от более вытянутой поверхности пламени в аэровзвеси алюминия имеет меньшее отношение высоты купола к основанию.

С помощью визуализации зафиксировано интенсивное зелёное свечение, свидетельствующее о присутствии и продуктах сгорания молекул VO_2 , образующихся в результате газофазного горения бора, являющегося наиболее эффективным для обеспечения высоких значений полноты сгорания топлива на его основе. На спектре излучения, полученного с помощью МОРС-1, зарегистрирова-



Рис. 2. Видеогаммы распространения пламени в аэровзвеси нанодисперсных частиц ПБА.

ны системы неразрешённых молекулярных полос с наиболее интенсивными кантами в диапазоне длин волн 493, 518, 545, 580 нм (рис. 3).

Отобранные с нижнего фланца рабочего участка образцы конденсированных продуктов сгорания (к-фазы) анализировали на электронном микроскопе Philips. Изображения, приведённые на рис. 4, свидетельствуют, что в процессе взаимодействия ПБА с окислительной средой воздухом в к-фазе присутствуют как нанодисперсные частицы, так и частицы микронного размера, появление которых может быть обусловлено процессом агломерации, который характерен и в наибольшей степени проявляется при горении СКС с добавками порошкообразного алюминия или магния.

В процессе химических реакций исходные частицы ПБА могут претерпевать химические и фазовые превращения, например с образованием свободного бора и алюминия. Подтверждением этого являются результаты элементного анализа, полученные с помощью микроанализатора Edax-32, показывающие различное содержание алюминия, бора и кислорода в разных пробах (данные приведены в табл. 1). Заметим, что в случае изменения анализируемой области элементный состав может изменяться, например, указывая на наличие азота

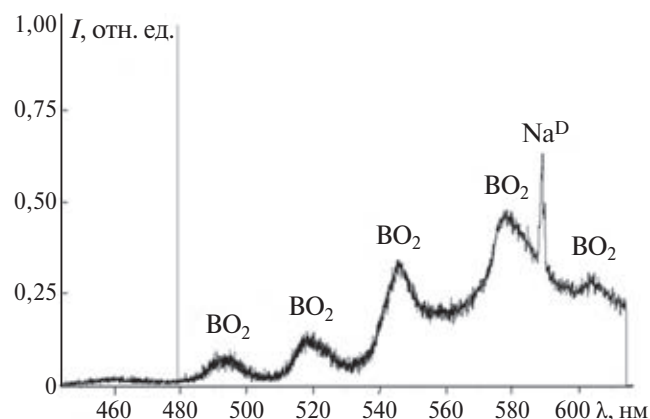


Рис. 3. Спектр излучения продуктов сгорания аэрозвеси полиборида алюминия.

Таблица 1. Элементный химический состав образцов конденсированных продуктов сгорания, относительная массовая концентрация, %

Проба	B	N	O	Al
1	36,11	10,81	28,55	24,53
2	84,34	нет	3,63	11,99

в к-фазе, что свидетельствует о реакции азотирования, возможность которой при распространении пламени в рабочем участке установки УПО-1500 СВ в переобогащённой аэрозвеси подтверждена экспериментальными исследованиями [7, 8].

Приведённые на рис. 4 изображения свидетельствуют о том, что в продуктах сгорания наблюдается образование сложных структур в виде переплетённых нанотрубок, имеющих наружный диаметр 100 нм и длину до 1 мкм, а также игольчатых структур диаметром ~250–1000 нм и длиной несколько микрон, которые могут образовываться в процессе кластеризации наночастиц конденсированных оксидов бора B_2O_3 и алюминия Al_2O_3 . Кроме того, обнаружены микронного размера частицы с плоскими гранями, характерными для кристаллов оксида алюминия, на сколах которых отчётливо видны отдельные наноструктуры, подтверждающие агломерацию наноразмерных частиц оксида алюминия, образующихся в процессе химической конденсации при горении металла.

ВЫВОДЫ

Таким образом, приведённые в данной работе результаты визуализации распространения пламени, спектрального, морфологического и химического анализов продуктов сгорания аэрозвеси ПБА позволяют сделать вывод о возможности распространения аэродисперсного пламени и реализации сложного механизма горения аэрозвеси нанодисперсных частиц полиборида алюминия, сопровождающе-

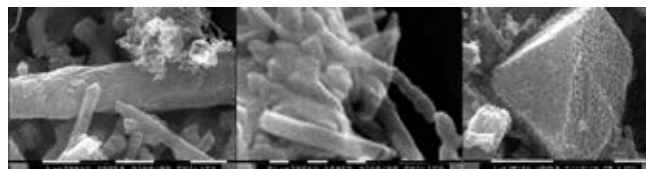


Рис. 4. Фотографии частиц конденсированных продуктов сгорания аэрозвеси частиц ПБА.

гося образованием газообразного оксида BO_2 , агломерацией конденсированных частиц продуктов сгорания, формированием наноразмерных трубок и игольчатых структур, а также химическими реакциями взаимодействия полиборида алюминия не только с кислородом, но и с присутствующим в воздухе азотом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорокин В. А., Яновский Л. С., Францкевич В. П. и др. Ракетно-прямоточные двигатели на твёрдых и пастообразных топливах. М.: Физматлит, 2010. 320 с.
2. Combustion of Boron-Based Solid Propellants and Solid Fuels / Eds. K.K. Kuo, R. Pein. Boca Raton: CRC Press. 1993. 526 p.
3. Яковлева Т. А., Киро С. А., Киро А. Н. и др. Горение частиц диборидов металлов (титана и алюминия) в пламени газовой горелки. Макроскопическая кинетика, химическая и магнитная газовая динамика. Тез. докладов III Всес. школы-семинара. Томск., 1991. Ч. 2. С. 43–44.
4. Федоров С. Г., Гусейнов Ш. Л., Стороженко П. А. Нанодисперсные порошки металлов в энергетических конденсированных системах // Российские нанотехнологии. 2010. Т. 5. № 9/10. С. 27–39. Рос. электрон. наножурнал. 2010. URL: http://issuu.com/tan130/docs/rn_2010_t5_n9-10?viewMode=magazine.
5. Гусейнов Ш. Л., Федоров С. Г. Нанопорошки алюминия, бора, боридов алюминия и кремния в высокоэнергетических материалах. М.: Торус-Пресс, 2015. 256 с.
6. Ягодников Д. А., Воронецкий А. В., Сарбьев В. И. Воспламенение и горение пиротехнических составов на основе микро- и нанодисперсных частиц диборида алюминия в воздушном потоке в двухзонной камере сгорания // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52. № 3. С. 51–58.
7. Ягодников Д. А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 432 с.
8. Ильин А. П., Проскуровская Л. Т. Двухстадийное горение ультрадисперсного порошка алюминия на воздухе // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26. № 2. С. 71–72.

**MORPHOLOGIC, CHEMICAL, AND SPECTRAL ANALYSES
OF COMBUSTION PRODUCTS OF MICRO-
AND NANO-DISPERSED PARTICLES OF ALUMINIUM BORIDES**

**D. A. Yagodnikov, Sh. L. Guseinov, Corresponding Member of the RAS P. A. Storozhenko,
A. P. Shpara, A. V. Sukhov, S. G. Fedorov**

Received June 25, 2018

This study presents the findings of an investigation of flame propagation in air suspension of nanodispersed polyboride particles, and provides spectral, morphological, and mass-spectrometric analyses of condensed combustion products generated during an air suspension combustion.

Keywords: aerosuspension, nanoparticles, aluminum polyboard, combustion products, spectral, morphologic, dispersion analysis.