

УДК 544.452.2

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ОКСИДА МАГНИЯ НА СОСТАВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ НАНОПОРОШКА АЛЮМИНИЯ В ВОЗДУХЕ

Ильин Александр Петрович,

д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры общей и неорганической химии Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: ilyin@tpu.ru

Роот Людмила Олеговна,

канд. техн. наук, доцент кафедры общей и неорганической химии Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: tolbanova@mail.ru

Кривошеина Виктория Валерьевна,

аспирант кафедры общей и неорганической химии Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: genchem@mail.ru

В настоящее время разработка новых методов получения нитридов является актуальным вопросом. Это связано с их использованием в разных областях промышленности.

Цель работы: определение закономерностей фазообразования продуктов сгорания в воздухе смесей нанопорошка алюминия с добавками оксида магния.

Методы исследования. Для выполнения качественного и количественного фазового анализа использовали рентгенофазовый анализ (дифрактометр ДРОН-3,0); для расчетов параметров химической активности смесей и определения их пирофорности использовали дифференциально-термический анализ (термоанализатор SDT Q600 Научно-аналитического центра ТПУ); для определения микроструктуры исходных материалов и продуктов синтеза использовали электронный микроскопический анализ (электронные микроскопы Jeol-840 и Hitachi SU8000).

Результаты. Исследование параметров химической активности смесей показало, что смеси не пирофорны в воздухе и не требуют дополнительных мер предосторожности. На рентгенограммах интенсивность 100%-го рефлекса нитрида алюминия повышалась с 75 % для продуктов сгорания в воздухе нанопорошка алюминия до 100% для продуктов сгорания в воздухе нанопорошка алюминия с добавкой 12,5 мас. % оксида магния. При увеличении добавки оксида в исходной смеси магния до 25 мас. % содержание нитрида в продуктах сгорания снижалось, но усиливались рефлексы шпинели $MgAl_2O_4$ и непрореагировавшего MgO . Дальнейшее увеличение MgO в смеси до 50 мас. % приводило к существенному снижению 100%-го рефлекса нитрида алюминия и повышению содержания фаз шпинели $MgAl_2O_4$ и несгоревшего оксида магния. Продукты сгорания смеси нанопорошка алюминия в смеси с 75 мас. % оксида магния в основном были представлены фазами непрореагировавшего оксида магния и шпинели $MgAl_2O_4$, в то время как остальные фазы имели интенсивность максимальных рефлексов менее 20 %.

Ключевые слова:

Нанопорошок алюминия, оксид магния, параметры химической активности, продукты сгорания, синтез сжиганием, нитрид алюминия.

Введение

При сгорании нанопорошка алюминия в воздухе конечные продукты содержат более 30 мас. % нитрида алюминия [1], что не соответствует термодинамическим расчетам: нитрид должен доокисляться [2]. Исследование продуктов сгорания нанопорошка алюминия в воздухе с добавками оксидов TiO_2 , ZrO_2 , HfO_2 , Ta_2O_5 и других показало, что в продуктах сгорания стабилизируются соответствующие нитриды [3–5]. Образование нитридов из оксидов при горении нанопорошка алюминия предполагает восстановление оксидов, по крайней мере, до субоксидов алюминием при высокой температуре с последующим взаимодействием субоксидов (металлов) с азотом воздуха и образованием нитридов [3].

В работе [6] были изучены конечные продукты сгорания нанопорошка алюминия с добавками оксида кальция – оксида элемента II-ой группы Периодической системы Д.И. Менделеева. Показано, что на рентгенограмме, кроме известных продуктов сгорания, присутствовали отдельные рефлексы фазы Ca_3N_2 , что может объясняться анизотропной структурой кристаллов, образующихся в неравновесных условиях горения. Магний, в отличие от кальция, при сгорании в воздухе образует нитрид магния (Mg_3N_2) [7], данные о формировании нитрида магния из его оксида при высокой температуре при горении нанопорошка алюминия в воздухе в литературе отсутствуют [7, 8]. В то же время ранее было показано, что при сгорании смесей НП

алюминия с диоксидами элементов IV группы побочной подгруппы образуются соответствующие нитриды (MeN), что является следствием восстановления диоксидов и взаимодействия продуктов восстановления с азотом воздуха [3].

Целью настоящей работы являлось определение закономерностей фазообразования продуктов сгорания в воздухе смесей нанопорошка алюминия с добавками оксида магния.

Методики эксперимента и характеристики объекта исследований

В работе использовали нанопорошок (НП) алюминия, полученный с помощью электрического взрыва проводников в аргоне [9].

Нанопорошок алюминия, полученный в среде аргона, является пирофорным, т. е. воспламеняется при контакте с воздухом. Его пассивировали медленным окислением малыми добавками воздуха [10, 11]. Смесей нанопорошка алюминия с порошком оксида магния (реактив марки ХЧ) готовили перемешиванием компонентов в сухом воздухе.

Навески нанопорошка алюминия и оксида магния смешивали в металлическом боксе на кальке с использованием пробки, обернутой в кальку, так как неизвестны характеристики смесей, связанные с трением и электростатическим электричеством. Смешивание проводили до тех пор, пока не исчезала неравномерность в окраске смеси. Было приготовлено 4 образца, содержащих 12,5; 25; 50 и 75 мас. % оксида магния, и один образец нанопорошка алюминия без добавок, который использовали в качестве образца для сравнения.

Иницирование процесса горения осуществляли с помощью нихромовой спирали, через которую пропускали электрический ток, при этом навеске старались придать коническую форму. Процесс горения проходил на подложке из нержавеющей стали толщиной 2 мм.

Для выполнения качественного и количественного фазового анализа использовали дифрактометр ДРОН-3,0. Диапазон сканирования углов составлял 20–90 град. В работе применяли излучение медной трубки $Cu_{K\alpha}$. Предварительно продукты сгорания дезагрегировали и просеивали через сито с размером ячеек 63 мкм. Для идентификации кристаллических фаз использовали карту-теку PDF-4.

Дифференциальный термический анализ (ДТА) проводили с использованием термоанализатора SDT Q-600 Научно-аналитического центра Томского политехнического университета. Точность измерения температуры составляла 0,001 град. Исходные смеси нанопорошка алюминия с оксидом магния проверяли на пирофорность путем расчета по ДТА четырех параметров активности [12, 13]: температура начала окисления ($t_{н.о.}, ^\circ C$), максимальная скорость окисления (V_{max}), степень окисленности (α), удельный тепловой эффект (ΔH).

Электронный микроскопический анализ продуктов сгорания смеси нанопорошка алюминия с оксидом магния проводили с использованием электронных микроскопов Jeol-840 и Hitachi SU8000. Перед съемкой образцы помещали на поверхность алюминиевого столика диаметром 25 мм, фиксировали при помощи электропроводящего клея. Морфологию образцов исследовали без нанесения проводящего слоя, чтобы исключить поверхностные эффекты. Съемку изображений вели в режиме регистрации вторичных электронов при ускоряющем напряжении 2 кВ и рабочем расстоянии 4–5 мм [14, 15].

Результаты экспериментов и их обсуждение

Для проверки нанопорошка алюминия и его смесей с оксидом магния на пирофорность была исследована их термическая устойчивость [11]. Образцы нагревали в воздухе до 900 $^\circ C$ со скоростью 10 град/мин.

На рис. 1 и 2 приведены типичные термограммы смесей нанопорошка алюминия с оксидом магния.

В табл. 1 приведены параметры активности смесей нанопорошка алюминия с оксидом магния.

Таблица 1. Параметры активности смесей нанопорошка алюминия с оксидом магния*

Table 1. Activity parameters of aluminum nanopowder mixtures with magnesium oxide*

Содержание оксида магния в образце, мас. % Magnesium oxide content in a sample, wt. %	Параметры активности смесей Activity parameters of the mixtures			
	Температура начала окисления, $T_{н.о.}, ^\circ C$ Temperature of oxidation beginning, $T_{об.}, ^\circ C$	Максимальная скорость окисления, V_{max} , мг/мин Oxidation peak velocity, V_{max} , mg/min	Степень окисленности, α , % Oxidation level, α , %	Удельный тепловой эффект, ΔH , Дж/г Specific heat effect, ΔH , J/g
0	400	0,19	24,9	5384
12,5	430	0,18	24,0	5211
25	420	0,21	17,2	5145
50	430	0,22	33,0	5204
75	460	0,20	20,4	5192

*При расчетах α и ΔH введена поправка на содержание НП алюминия в смесях с MgO.

*When calculating α and ΔH the authors had made a correction for aluminum nanopowder in mixtures with MgO.

Температура начала окисления смесей выше, чем для нанопорошка алюминия на 20–60 град. Аналогично максимальная скорость окисления ($\Delta m/\Delta t$ на линейном участке увеличения массы на термограмме) смесей при их горении имеет большее значение, чем для нанопорошка алюминия без добавок, максимально на 15,8 %. В условиях линейного нагрева максимальная скорость окисления проходила через максимум: 22,0 мг/мин (для смеси, содержащей 50 мас. % MgO). Для данной смеси максимальна и степень окисленности (33 %). Удель-

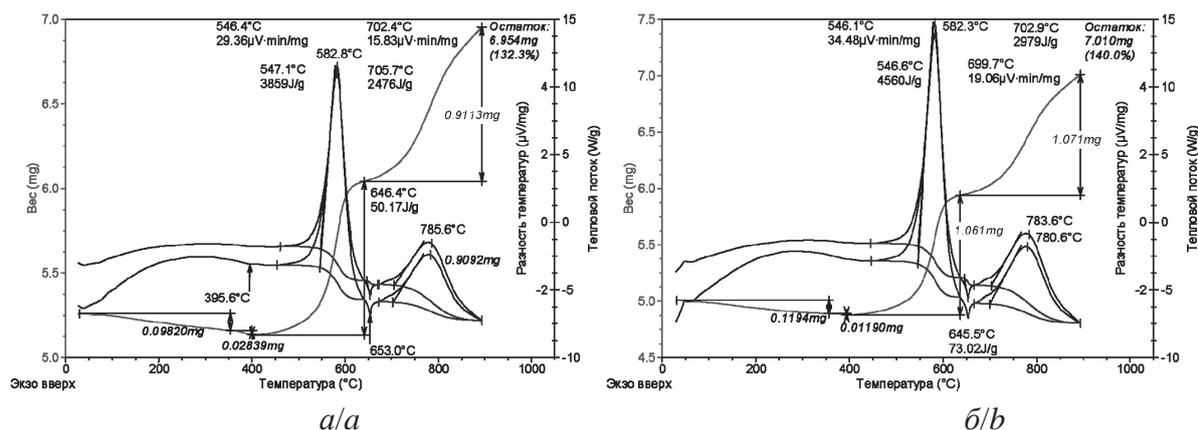


Рис. 1. Термограммы смесей нанопорошка алюминия с добавкой оксида магния: а) 25 мас. %, $m_{\text{образца}}=5,257$ мг; б) 50 мас. %, $m_{\text{образца}}=5,006$ мг

Fig. 1. Thermograms of aluminum nanopowder mixtures with magnesium oxide additive: a) 25 wt. %, $m_{\text{sample}}=5,257$ mg; б) 50 wt. %, $m_{\text{sample}}=5,006$ mg

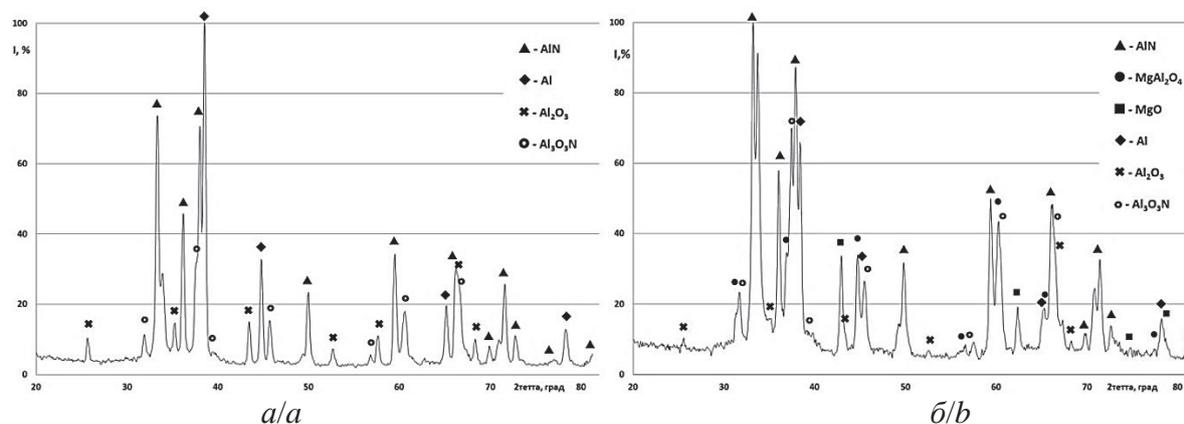


Рис. 2. Рентгенограммы продуктов сгорания нанопорошка алюминия: а) без добавок; б) с добавкой оксида магния 12,5 мас. %

Fig. 2. X-ray patterns of aluminum nanopowder combustion products: a) without additives; б) with 12,5 wt. % magnesium oxide additive

ный тепловой эффект 5384 Дж/г получен для НП алюминия без добавок, добавление к нанопорошку алюминия оксида магния привело к незначительному (максимально на 4,4 %) уменьшению удельного теплового эффекта. Все приготовленные смеси имели температуру начала окисления выше 300 °С, поэтому не склонны к пиррофорности.

На рис. 2 и в табл. 2 представлены результаты рентгенофазового анализа продуктов сгорания смеси нанопорошка алюминия с оксидом магния.

Согласно РФА (рис. 2, табл. 2) при введении в нанопорошок алюминия 12,5 мас. % порошка оксида магния увеличился выход нитрида алюминия, в то время как параметры химической активности смеси понизились (табл. 1) в сравнении с параметрами нанопорошка без добавок. При сравнении 100%-х рефлексов кристаллических фаз продуктов сгорания смесей НП алюминия с оксидом магния среди продуктов обнаружена фаза алюмомагнезиальной шпинели $MgAl_2O_4$, которая была синтезирована ранее в работе [16]. Содержание шпинели

было максимально для продуктов сгорания смеси с 50 мас. % оксида магния и превышало содержание нитрида и оксинитрида алюминия, а рефлексы оксида алюминия на рентгенограмме практически отсутствовали. Интенсивность 100%-го рефлекса нитрида алюминия в продуктах сгорания увеличилась при введении в смесь 12,5 мас. % оксида магния, а затем – уменьшалась с повышением содержания оксида магния в исходной смеси. Также снижалась интенсивность 100%-го рефлекса фазы алюминия с увеличением содержания оксида магния в смеси. Начиная с продуктов сгорания смеси, содержащей 25 и более мас. % оксида магния, в продуктах сгорания не обнаруживались рефлексы оксидов алюминия. После добавления оксида магния (12,5 мас. %) интенсивность 100%-го рефлекса оксинитрида алюминия возросла более чем в два раза, а затем для продуктов сгорания исходной смеси с 25 мас. % MgO резко снизилась (в 6 раз), до нуля – для образца, содержащего 75 мас. % MgO .

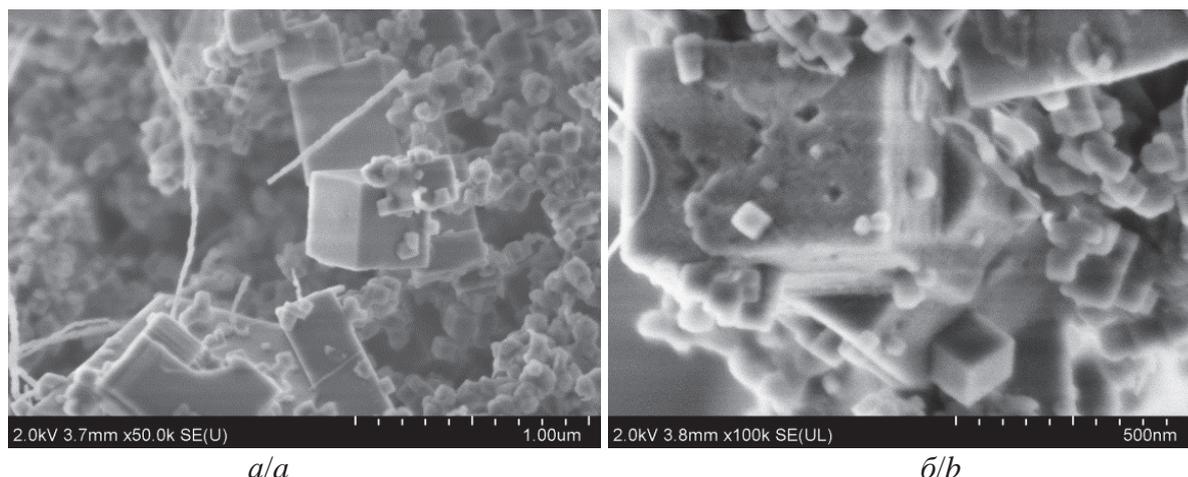


Рис. 3. Микрофотографии продуктов сгорания смесей нанопорошка алюминия с оксидом магния: а) 12,5 мас. % MgO; б) 75 мас. % MgO

Fig. 3. Microphotograph of combustion products of aluminum nanopowder mixtures with magnesium oxide: a) 12,5 wt. % MgO; b) 75 wt. % MgO

Таблица 2. Результаты рентгенофазового анализа продуктов сгорания смесей нанопорошка алюминия с оксидом магния

Table 2. Results of X-ray analysis of combustion products of aluminum nanopowder mixtures with magnesium oxide

Содержание оксида магния в исходном образце, мас. % Magnesium oxide content in the original sample, wt. %	Интенсивность 100%-го рефлекса, % Intensity of 100% reflex, %					
	MgAl ₂ O ₄	MgO	AlN	Al	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ N
0	0,00	0,00	73,62	100,00	15,02	31,87
12,5	34,65	33,69	100,00	65,94	15,92	69,88
25	53,37	52,00	78,37	27,44	0,00	62,82
50	93,90	100,00	48,53	29,26	0,00	10,49
75	34,02	100,00	5,69	11,30	0,00	0,00

Микрофотографии продуктов сгорания смесей нанопорошка алюминия с оксидом магния представлены на рис. 3.

Продукты сгорания НП алюминия в воздухе содержат в качестве основной кристаллической фазы нитрид алюминия, а также оксид и оксинитрид алюминия. При этом продукты, согласно электронной микроскопии, представляют собой агрегаты частиц и нитевидные кристаллы нитрида алюминия [17].

Согласно полученным в работе данным (рис. 3), при добавлении к нанопорошку алюминия оксида магния наряду с продуктами сгорания типичной морфологии на микрофотографии видны микронные кристаллы кубической формы, наиболее вероятно, относящиеся к фазам оксида магния и алюмомагнезиальной шпинели MgAl₂O₄.

При высоком содержании оксида магния (75 мас. %) в продуктах сгорания присутствовали преимущественно кристаллические структуры без нитевидных кристаллов (рис. 3, б), что согласуется с данными РФА (табл. 2): в продуктах сгорания данной смеси интенсивность 100%-го рефлекса нитрида алюминия составляла 5,7 %.

Выводы

1. Смесей нанопорошка алюминия с оксидом магния не пирофорны: их температура начала окисления на 20–60 град выше, чем для нанопорошка алюминия без добавок (400 °С).
2. Максимальная скорость окисления и степень окисленности максимальны для смеси нанопорошка алюминия, содержавшего 50 мас. % оксида магния, но последний снижает тепловой эффект сгорания для всех смесей.
3. Добавка оксида магния к нанопорошку алюминия (12,5 мас. %) приводит к повышению выхода нитрида и оксинитрида алюминия и к появлению в продуктах сгорания кристаллической фазы алюмомагнезиальной шпинели MgAl₂O₄, выход которой максимален в продуктах сгорания смеси с 50 мас. % оксида магния.
4. При сгорании смеси нанопорошка алюминия с 50 мас. % оксида магния максимальную интенсивность имеет 100%-й рефлекс фазы шпинели (не считая 100%-го рефлекса фазы MgO), в то же время фазы оксидов алюминия в продуктах сгорания отсутствуют.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-03-05385.

Авторы благодарят Отдел структурных исследований ИОХ РАН за исследование образцов с помощью метода электронной микроскопии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин А.П., Громов А.А. Горение порошков алюминия и бора в сверхтонком состоянии. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – 154 с.
2. О влиянии азота на горение алюминия / В.М. Боборыкин, В.М. Гремячкин и др. // Физика горения и взрыва. – 1983. – № 3. – С. 22–30.
3. Синтез нитридов титана и циркония сжиганием в воздухе смесей их оксидов с нанопорошком алюминия / Ю.А. Амелькович, А.П. Астанкова, Л.О. Толбанова, А.П. Ильин // Новые огнеупоры. – 2007. – № 11. – С. 64–67.
4. Шинкевич Е.В., Рот Л.О., Ильин А.П. Синтез нитридов сжиганием нанопорошка алюминия в смеси с диоксидами титана, циркония и гафния в воздухе // Огнеупоры и техническая керамика. – 2013. – № 3. – С. 34–39.
5. Шинкевич Е.В., Рот Л.О., Ильин А.П. Получение нитридов титана, циркония и гафния при горении в воздухе нанопорошка алюминия в смесях с диоксидами // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 3. – С. 60–65.
6. Ильин А.П., Рот Л.О., Кривошеина В.В. Влияние добавки оксида кальция на состав продуктов сгорания нанопорошка алюминия в воздухе // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 3. – С. 137–143.
7. Самсонов Г.В. Нитриды. – Киев: Наукова думка, 1969. – 390 с.
8. Горение нанопорошков металлов / А.А. Громов, Т.А. Хабас, А.П. Ильин и др. – Томск: Дельтаплан, 2008. – 382 с.
9. Назаренко О.Б., Ильин А.П., Тихонов Д.В. Электрический взрыв проводников. Получение нанопорошков металлов и тугоплавких неметаллических соединений. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co/KG, 2012. – 274 с.
10. Громов А.А., Ильин А.П., Тихонов Д.В. Проблемы пассивации ультрадисперсных порошков алюминия // Перспективные материалы. – 2003. – № 2. – С. 95–101.
11. Passivation process for superfine aluminum powders obtained by electrical explosion of wires / Y.S. Kwon, A.A. Gromov, A.P. Ilyin, G.N. Kim // Applied Surface Science. – 2003. – V. 211. – № 1–4. – P. 57–67.
12. Ильин А.П., Громов А.А., Яблуневский Г.В. Об активности порошков алюминия // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37. – № 4. – С. 58–62.
13. Characterization of Aluminum Powders. Parameters of Reactivity of Aluminum Powders / A.P. Ilyin, A.A. Gromov, B. An, F. Faubert et al. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2002. – V. 27. – № 6. – P. 361–364.
14. Комплексное исследование структуры и механизмов получения и превращений газообразных, жидких и твердых химических систем методами масс-спектрометрии, спектроскопии ЯМР и электронной микроскопии / В.В. Качала, Л.Л. Хемчян, А.С. Кашин и др. // Успехи химии. – 2013. – № 82. – С. 648–685.
15. Кашин А.С., Анаников В.П. Формирования наноразмерных покрытий и наночастиц металлов путем магнетронного распыления и их исследование методом сканирующей электронной микроскопии // Изв. академии наук. Сер. Хим. – 2011. – № 12. – С. 2551–2556.
16. Хабас Т.А., Мельников А.Г., Ильин А.П. Синтез керамических материалов на основе оксида магния и алюминия в режиме горения // Огнеупоры и техническая керамика. – 2003. – № 11. – С. 14–19.
17. Ильин А.П., Толбанова Л.О. Продукты горения смесей нанопорошков алюминия и вольфрама в воздухе // Физика горения и взрыва. – 2007. – № 4. – С. 59–65.

Поступила 21.02.2015 г.

UDC 544.452.2

THE INFLUENCE OF MAGNESIUM OXIDE ADDITION ON THE CONTENT OF COMBUSTION PRODUCTS OF ALUMINUM NANOPOWDER IN AIR

Alexander P. Ilyin,

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: ilyin@tpu.ru

Lyudmila O. Root,

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: tolbanova@mail.ru

Viktoria V. Krivosheina,

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: genchem@mail.ru

Currently, the development of new methods for nitrides of alkali and alkaline earth elements is an important issue. It is related to the use of nitrides of these elements in different areas of industry.

The aim of the investigation is to determine the regularities of phase formation of air combustion products of aluminum nanopowder with additions of magnesium oxide mixtures.

The methods of the investigation. To perform the qualitative and quantitative phase analysis the X-ray diffraction (diffractometer DRON-3,0) was used; for calculating chemical activity parameters of mixtures and determining their ignition ability the differential thermal analysis (thermoanalyzer SDT Q600 of Scientific Analytical Center of TPU) was used; to determine the microstructure of the initial materials and products of synthesis the electron microscopic analysis (electron microscopes Jeol-840 and Hitachi SU8000) was used.

The results of the investigation. The study of chemical activity parameters of the mixtures showed that the mixtures are not pyrophoric in air and do not require extra precautions. The X-ray diffraction data showed that the intensity of 100 % reflex of aluminum nitride increased from 75 % for aluminum nanopowder combustion products in air up to 100 % for products of combustion in air of aluminum nanopowder with the addition 12,5 wt. % of magnesium oxide. After increasing the additive of magnesium oxide in the initial mixture up to 25 wt. % the aluminium nitride content in the combustion products went down, but the reflexes of magnesium-aluminate spinel $MgAl_2O_4$ and unreacted MgO were intensified. Further increase of MgO in the mixture to 50 wt. % led to significant reduction of 100 % reflection of aluminum nitride and enhanced the content of spinel $MgAl_2O_4$ and unburned MgO . The combustion products of aluminum nanopowder with 75 wt. % of magnesium oxide mixture were mainly represented by the phases of unburned MgO and spinel $MgAl_2O_4$, while the reflections of the other phases had the intensity less than 20 %.

Key words:

Aluminum nanopowder, magnesium oxide, chemical activity parameters, combustion products, burning synthesis, aluminum nitride.

The research was partially financially supported by the grant RFBR no. 15-03-05385.

The authors thank the department of structural survey of the Institute of Organic Chemistry of the Russian Academy of Sciences for the samples investigation by the method of electron microscopy.

REFERENCES

- Ilin A.P., Gromov A.A. *Gorenie poroshkov alyuminiya i bora v sverkh-tonkom sostoyanii* [Burning of aluminum and boron in ultrafine state]. Tomsk, Tomsk state Univ. Publ., 2002. 154 p.
- Boborykin V.M., Gremyachkin V.M. O vliyani azota na gorenie alyuminiya [About the influence of nitrogen on aluminum burning]. *Combustion, explosion and shock waves*, 1983, no. 3, pp. 22-30.
- Amelkovich Yu.A., Astankova A.P., Tolbanova L.O., Ilin A.P. Sintez nitridov titana i tsyrkoniya szhiganiem v vozduhe smesey ih oksidov s nanoporoshkom alyuminiya [Synthesis of titanium and zirconium nitrides by combustion mixtures of their oxides with aluminum nanopowder in the air]. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2007, vol. 48, no. 6, pp. 425-428.
- Shinkevich E.V., Root L.O., Ilin A.P. Sintez nitridov szhiganiem nanoporoshka alyuminiya v smesi s dioksidami titana, zirkoniya i gafniya v vozdukh [Synthesis of nitrides at combustion of aluminum nanopowder with titanium, zirconium and hafnium dioxides in air]. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2013, no. 3, pp. 34-39.
- Shinkevich E.V., Root L.O., Ilin A.P. Poluchenie nitridov titana, tsirkoniya i gafniya pri goreнии v vozdukh nanoporoshka alyuminiya v smesyakh s dioksidami [Synthesis of titanium, zirconium and hafnium nitrides at combustion of aluminum nanopowder with dioxides in air]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 3, pp. 60-65.
- Ilin A.P., Root L.O., Krivosheina V.V. Vliyanie dobavki oksida kaltsiya na sostav produktov sgoraniya nanoporoshka alyuminiya v vozdukh [The influence of calcium oxide addition on the content of combustion products of aluminum nanopowder in air]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 3, pp. 137-143.
- Samsonov G.V. *Nitridy* [Nitrides]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1969. 390 p.
- Gromov A.A., Khabas T.A., Ilin A.P., Popenko E.M., Korotkikh A.G., Arkhipov V.A., Ditts A.A., Tolbanova L.O., Stroko-va Yu.I. *Gorenie nanoporoshkov metallov* [Metal nanopowder burning]. Tomsk, Deltaplan Publ., 2008. 382 p.
- Nazarenko O.B., Ilin A.P., Tikhonov D.V. *Elektricheskii vzryv provodnikov. Poluchenie nanoporoshkov metallov i tugoplavkikh nemetallicheskikh soedineniy* [Preparation of nano-metals and refractory non-metallic compounds]. Saarbrucken, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co/KG, 2012. 274 p.
- Gromov A.A., Ilin A.P., Tikhonov D.V. Problemy passivatsii ultradispersnykh poroshkov alyuminiya [The problems of ultradisperse aluminum powders passivation]. *Perspektivnye materialy*, 2003, no. 2, pp. 95-101.
- Kwon Y.S., Gromov A.A., Ilyin A.P., Kim G.H. Passivation process for superfine aluminum powders obtained by electrical explosion of wires. *Applied Surface Science*, 2003, vol. 211, no. 1-4, pp. 57-67.
- Ilin A.P., Gromov A.A., Yablunovskiy G.V. Ob aktivnosti poroshkov alyuminiya. [About activity of aluminum powders]. *Combustion, explosion and shock waves*, 2001, vol. 37, no. 4, pp. 58-62.
- Ilin A.P., Gromov A.A., An V.V., Faubert F. Characterization of Aluminum Powders. Parameters of Reactivity of Aluminum Powders. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2002, vol. 27, no. 6, pp. 361-364.
- Kachala V.V., Khemchyan L.L., Kashin A.S. Kompleksnoe issledovanie struktury i mekhanizmov polucheniya i prevrashcheniya gazoobraznykh, zhidkikh i tverdykh khimicheskikh sistem metodami mass-spektrometrii, spektroskopii YAMR i elektronnoy mikroskopii [A comprehensive study of the patterns and mechanisms of reception and transformation of gaseous, liquid and solid chemical systems by mass spectrometry, NMR spectroscopy and electron microscopy]. *Uspekhi khimii*, 2013, no. 82, pp. 648-685.
- Kashin A.S., Anannikov V.P. Formirovaniya nanorazmernykh pokrytiy i nanochastits metallov putem magnetronnogo raspyle-niya i ikh issledovanie metodom skaniruyushchey elektronnoy mikroskopii [The formation of nanoscale coatings and nanoparticles of metals by magnetron sputtering and their study by scanning electron microscopy]. *Izvestiya akademii nauk. Ser. Khim.*, 2011, no. 12, pp. 2551-2556.
- Khabas T.A., Melnikov A.G., Ilin A.P. Sintez keramicheskikh materialov na osnove oksida magniya i alyuminiya v rezhime goreniya [Synthesis of ceramic materials on basis of oxides of magnesium and aluminum]. *Ogneupory i Tekhnicheskaya Keramika*, 2003, no. 11, pp. 14-19.
- Ilin A.P., Tolbanova L.O. Produkty goreniya smesey nanoporoshkov alyuminiya i vol'frama v vozdukh [Products of Combustion of Mixtures of Aluminium and Tungsten Nanopowders in Air]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2007, vol. 43, no. 4, pp. 423-428.

Received: 21 February 2015.