УДК 544.452.2

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ОКСИДА КАЛЬЦИЯ 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, 30, E-mail: genchem@mail.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, 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, 30, E-mail: genchem@mail.ru

Разработка новых методов синтеза нитридов щелочных и щелочноземельных элементов в настоящее время актуальна, поскольку данные нитриды, а также нитриды других металлов широко используются в промышленности.

Целью настоящей работы являлось установление фазового состава продуктов сгорания в воздухе смесей нанопорошка алюминия с оксидом кальция.

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).

В результате исследования параметров химической активности смесей был сделан вывод о том, что смеси нанопорошка алюминия с оксидом кальция не пирофорны. Кроме того, было установлено, что в продуктах сгорания смесей нанопорошка алюминия с оксидом кальция, содержавших 50 и 75 мас. % СаО, предположительно образуется кристаллическая фаза нитрида кальция Саз№2. Стабилизация этой фазы обусловлена более низкой температурой сгорания данных образцов в сравнении с образцами с меньшим содержанием оксида кальция.

Ключевые слова:

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

Введение

Экспериментально установлено, что при сгорании в воздухе порошкообразного магния, в конечных продуктах стабилизируется нитрид магния (Mg_3N_2), при окислении металлического лития в воздухе ~ 80 % конечных продуктов составляет нитрид лития (Li_3N) [1]. Остальные щелочные и щелочноземельные металлы при окислении и горении в воздухе нитридов не образуют [2]. Нитриды щелочных и щелочноземельных металлов используются в качестве добавок в шихту при получении кубического нитрида бора [3]: они способствуют увеличению выхода целевого нитрида бора. Поэтому проблема получения нитридов щелочных и щелочноземельных элементов в настоящее время актуальна.

В то же время способы получения нитридов в настоящее время не разработаны и требуют проведения экспериментов для установления наиболее оптимальных условий получения и повышения их выходов [4]. Известен способ получения нитридов титана, циркония и гафния при горении смесей нанопорошка алюминия с соответствующими диоксидами [5, 6], в котором нанопорошок алюминия смешивают с соответствующими диоксидами и сжигают в воздухе. Предполагается, что при горении нанопорошка алюминия диоксиды восстанавливаются до металлов или до субоксидов, которые при окислении образуют соответствующие нитриды [7–9]. Согласно литературным данным фазовый состав продуктов сгорания смесей нанопорошка алюминия с оксидом кальция, не исследован [10–12].

Целью настоящей работы являлось установление фазового состава продуктов сгорания в воздухе смесей нанопорошка алюминия с оксидом кальция.

Методики эксперимента и характеристики объекта исследований

В работе использовался нанопорошок (НП) алюминия, полученный с помощью электрического взрыва проводников в аргоне [14-16]. Схема установки для получения НП показана на рис. 1. Установка работает следующим образом: от высоковольтного источника питания – 1 заряжается емкостный накопитель энергии – 2. Механизм подачи проволоки – 3 обеспечивает автоматическую подачу взрываемого отрезка проволоки – 4 в межэлектродный промежуток. При достижении проволокой высоковольтного электрода – 5 срабатывает коммутатор -6, происходит разряд накопителя на этот отрезок проволоки, и он взрывается. Образовавшийся порошок собирается в накопителе – 7. Очищенный от порошка газ с помощью вентилятора – 8 подается обратно в камеру – 9. Объем камеры перед работой вакуумируется, а затем заполняется требуемой газовой атмосферой. Эти функции выполняет система газового снабжения – 10.



Рис. 1. Принципиальная схема установки для производства нанопорошков металлов в условиях электрического взрыва проводников [14]

Fig. 1. Flow chart of installation for metal nanopowder production at electric explosion [14]

Нанопорошок алюминия, полученный в среде аргона, является пирофорным, т. е. воспламеняется при контакте с воздухом. Его пассивировали медленным окислением малыми добавками воздуха [14]. Нанопорошок алюминия характеризовался следующими параметрами активности: температура начала окисления 450 °C; степень окисленности 63,8 %; максимальная скорость окисления 0,13 мас. %/°C; удельный тепловой эффект 4995 Дж/г. В экспериментах использовали реактив оксида кальция (ч.д.а.).

Для выполнения качественного и количественного фазового анализа использовали дифрактометр ДРОН-3,0 [17]. Диапазон сканирования углов составлял 20–90 град. В работе применяли излучение медной трубки Си_{ка}. Для идентификации кристаллических фаз использовали картотеку PDF-4. Предварительно продукты сгорания дезагрегировали и просеивали через сито с размером ячеек 63 мкм.

Дифференциальный термический анализ [18] (ДТА) проводили с использованием термоанализатора SDT Q600 Научно-аналитического центра ТПУ. Точность измерения температуры составляла 0,001 °C. Исходные смеси нанопорошка алюминия с оксидом кальция проверяли на пирофорность путем расчета по ДТА четырех параметров активности [19]: температура начала окисления $(t_{\text{н.o.}})$, максимальная скорость окисления (V_{max}) , степень окисленности (α), приведенный тепловой эффект (ΔH). Все приготовленные смеси имеют температуру начала окисления выше 300 °С, поэтому не пирофорны.

Электронный микроскопический анализ продуктов сгорания смеси нанопорошка алюминия с оксидом кальция проводили с использованием электронных микроскопов Jeol-840 и Hitachi SU8000. Перед съемкой образцы помещали на поверхность алюминиевого столика диаметром 25 мм, фиксировали при помощи проводящего клея. Морфологию образцов исследовали в естественных условиях, чтобы исключить поверхностные эффекты от напыления проводящего слоя [20, 21]. Съемку изображений вели в режиме регистрации вторичных электронов при ускоряющем напряжении 2 кВ и рабочем расстоянии 4–5 мм.

Навески нанопорошка алюминия и оксида кальция смешивали в боксе на кальке с использованием пробки, обернутой в кальку, так как неизвестны характеристики смесей, связанных с трением. Смешивание проводили до тех пор, пока не исчезала неравномерность в окраске смеси. Всего было приготовлено 4 образца соотношение CaO:Al=0,5:3,5; 1:3; 2:2; 3:1. Нанопорошок без добавок использовали в качестве образца сравнения.

Инициирование 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.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Для проверки нанопорошка алюминия и его смесей с оксидом кальция на пирофорность была исследована их термическая устойчивость. Образцы нагревали в воздухе со скоростью 10 °С/мин до 900 °С (SDT Q600). Типичная термограмма приведена на рис. 2. До 220 °С с поверхности образца (1:3) медленно десорбировались примеси, но с 350 °С интенсивность разложения гидроксидов и карбонатов кальция возросла, что заметно по эндоэффекту на зависимости ДТА. Рост ТГ начинался с 400 °С, опережая начало теплового эффекта (470 °С).

Первый экзоэффект, сопровождающий процесс окисления, равен 3194 Дж/г, но после небольшого уменьшения теплового потока процесс окисления продолжился: значение его теплового эффекта равно 2122 Дж/г. Для остальных образцов смесей и нанопорошка алюминия были также записаны термограммы и рассчитаны параметры активности смесей [21] (таблица 1). Добавление оксида кальция к нанопорошку алюминия привело к повышению температуры начала окисления на 10–35 °С. При этом максимальная скорость окисления снижалась от 0,023 (нанопорошок алюминия) до



Рис. 2. Термограмма смеси нанопорошка алюминия с оксидом кальция (атмосфера – воздух, скорость нагрева 10 °С/мин, масса навески 5,4490 мг)

Fig. 2. Thermogram of aluminum nanopowder and calcium oxide mixture (air, heating rate is 10 °C/min, sample weight is 5,4490 mg)

0,002 мг/мин. Снижалась также степень окисленности смесей максимально в 2,27 раза. Добавление оксида кальция также приводило к монотонному уменьшению удельного теплового эффекта (в 5 раз).

Таблица 1. Параметры активности смесей оксида кальция и нанопорошка алюминия

s	Параметры активности смесей Mixture activity parameters					
Состав образца СаО: НП АІ, мас. частей Coposition of CaO: AI NP sample, wt. part	Teмпература начала оки- сления, °C Initial oxidation temperature, °C	Максимальная скорость окиспения, мг/мин Peak oxidation rate, mg/min	Степень окисленности, % Oxidation level, %	Удельный тепловой эффект, Дж/г Specific heat effect, J/g		
0:4	405 0,023		25	5445		
0,5:3,5	0,5:3,5 440		19	3288		
1:3	1:3 410		17	3194		
2:2	2:2 415		11	2218		
3:1	3:1 420		-	1128		

 Table 1.
 Parameters of calcium oxide and aluminum nanopowder mixture activity

На рис. 3 представлены микрофотографии продуктов сгорания исходного нанопорошка алюминия, в которых значительное количество представлено в виде игольчатых кристаллов и небольшого количества спёков. Согласно результатам микроскопии (рис. 3, *a*) продукты сгорания частично построены из игольчатых кристаллов, частично из кристаллов с не до конца сформировавшейся структурой.

С добавлением оксида кальция в продуктах сгорания уменьшилось количество игольчатых кри-

сталлов и увеличилось количество спёков, кристаллиты приняли округлую форму (рис. 3. б). Дальнейшее увеличение содержания оксида кальция в смеси привело к формированию однородной структуры конечных продуктов горения субмикронного размера частиц (0,2–2,0 мкм) (рис. 3, *в*).

Продукты сгорания смесей оксида кальция и нанопорошка алюминия представляют собой спёки с характерным размером от 1 до 5 мкм, игольчатые кристаллы отсутствуют.

Продукты сгорания в воздухе смеси оксида кальция с нанопорошком алюминия (2:2) содержат агломераты микронного размера неправильной формы (1–5 мкм), но присутствуют агломераты большего размера, состоящие из спеченных частиц (рис. 4а). Продукты сгорания с максимальным содержанием оксида кальция состоят из каркасных пористых структур. Размеры пор в основном составляет 1,0–1,5 мкм. Наличие такой структуры продуктов сгорания связано с образованием жидкой фазы в процессе горения.

С увеличением содержания оксида кальция в продуктах сгорания исчезают игольчатые кристаллы, но обнаружены структуры, которые формируются с образованием жидкой фазы (рис. 4, δ).

РФА продуктов сгорания исходного нанопорошка алюминия и смеси оксида кальция с нанопорошком алюминия показал, что основной кристаллической фазой образца (0:4) и (0,5:3,5) является нитрид алюминия. В продуктах сгорания образцов смесей (0,5:3,5) и (1:3) нитрид кальция не обнаружен, в то же время нитрид кальция по трем рефлексам обнаружен в образце (2:2) и по двум рефлексам в образце (3:1). Отсутствие рефлекса в последнем случае сожжет быть связано с образованием кристаллов вытянутой структуры или плоских кристаллов.



Рис. 3. Микрофотографии продуктов сгорания: а) нанопорошка алюминия (образец 0:4); б) смеси оксида кальция и нанопорошка алюминия (0,5:3,5); в) смеси оксида кальция и нанопорошка алюминия (1:3)

Fig. 3. Micro photos of combustion products of: a) aluminum nanopowder (sample 0:4); b) calcium oxide and aluminum nanopowder mixture (0,5:3,5); c) calcium oxide and aluminum nanopowder mixture (1:3)



Рис. 4. Микрофотографии продуктов сгорания смеси оксида кальция с нанопорошком алюминия: а) 2:2; б) 3:1

Fig. 4. Micro photos of combustion products of calcium oxide and aluminum nanopowder mixture: a) 2:2; b) 3:1

На рис. 5 представлены результаты рентгенофазового анализа продуктов сгорания смеси оксида кальция с нанопорошком алюминия в соотношении 2:2.

В табл. 2 приведены результаты РФА продуктов сгорания оксида кальция с нанопорошком алюминия.

Заключение

Согласно проведенным исследованиям фазовый состав продуктов сгорания нанопорошка алюминия сильно зависит от содержания добавки оксида кальция в исходный нанопорошок: добавление 0,5 мас. частей оксида кальция существенно изменяет морфологию кристаллов: содержание



Рис. 5. Рентгенограмма продуктов сгорания смеси оксида кальция с нанопорошком алюминия (2:2)

Fig. 5. X-ray diagram of combustion products of calcium oxide aluminum nanopowder mixture (2:2)

Состав образца CaO: НП Al, мас. частей Composition of CaO: Al NP sample, wt. parts	Интенсивность 100 %-го рефлекса, % (угол 2 <i>θ</i> , град) Intensity of 100 % reflex, % (angle 2 degrees)					
	AIN	Al ₂ O ₃	Al	CaO	Ca ₃ N ₂	
0:4	92 (33,29°)	29 (35,17°)	100 (38,58°)	-	-	
0,5:3,5	98 (34,14°)	50 (25,35°)	100 (38,43°)	-	42 (34,47°)	
1:3	79 (34,14°)	48 (25,28°)	100 (38,43°)	34 (29,94°)	-	
2:2	94 (33,42°)	34 (57,49°)	100 (38,5°)	36 (55,2°) 46 (41,28°)	31 (34,47°) 47 (36,76°) 47 (37,39°) 33 (46,64°)	
3:1	100 (33,28°)	16 (57,63°)	30 (38,5°)	18 (41,28°)	94,91 (37,39°)	

 Таблица 2. Результат рентгенофазового анализа продуктов сгорания оксида кальция с нанопорошком алюминия

 Table 2.
 Results of X-ray phase analysis of combustion products of calcium oxide and aluminum nanopowder mixture

игольчатых кристаллов резко уменьшается, а спёков по форме близких к сферическим увеличивается. В продуктах сгорания смеси оксида кальция с нанопорошком алюминия в соотношении (1:3) размеры агломератов уменьшаются, но игольчатые кристаллы отсутствуют. Увеличение размеров агломератов в продуктах сгорания образца (2:2), вероятно, связано с формированием жидкофазных продуктов. Дальнейшее увеличение содержание оксида кальция приводит к формированию спеченных пористых структур, причем размер пор составляет 1,0–1,5 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Самсонов Г.В. Нитриды. Киев: Наукова думка, 1969. 390 с.
- Самсонов Г.В., Кулик О.П., Полищук В.С. Получение и методы анализа нитридов. – Киев: Наукова думка, 1978. – 320 с.
- Боримский А.И., Белявина Н.Н., Маркив В.Я. Синтез и свойства крупнозернистого кубического нитрида бора, полученного с использованием дополнительных центров кристаллизации // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – Вып. 9. – Киев, 2006. – С. 286–292.
- Чухломина Л.Н., Максимов Ю.М, Верещагин В.И. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез композиционных нитридсодержащих керамических материалов. – Новосибирск: Наука, 2012. – 260 с.
- Synthesis of titanium and zirconium nitrides by burning mixtures of their oxides with aluminum nanopowder in air / Yu.A. Amelkovich, A.P. Astankova, L.O. Tolbanova, A.P. Ilin // Refractories and Industrial Ceramics. 2007. V. 48. № . 6. P. 425-428.
- The influence of inorganic substances on oxidation characteristics of nanopowders / Y.S. Kwon, Yu.A. Amelkovich, A.Yu. Godimchuk, A.P. Ilyin, L.O. Tolbanova // KORUS'2005: Proc. of the 9th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology. – Novosibirsk, 2005. – P. 206–210.
- Ильин А.П., Громов А.А., Толбанова Л.О. Явление химического связывания азота воздуха с образованием кристаллических фаз нитридов при горении порошкообразных металлов, бора и кремния // Фундаментальные исследования. – 2008. – № 4. – С. 13–18.
- Ильин А.П., Громов А.А. Горение алюминия и бора в сверхтонком состоянии. – Томск: изд-во Том. ун-та, 2002. – 154 с.
- Горение нанопорошков металлов / А.А. Громов, Т.А. Хабас, А.П. Ильин, Е.М. Попенко, А.Г. Коротких, В.А. Архипов, А.А. Дитц, Л.О. Толбанова, Ю.И. Строкова. – Томск: Дельтаплан, 2008. – 382 с.

Выводы

При сгорании нанопорошка алюминия в смесях с оксидом кальция (образцы 2:2 и 3:1), по-видимому, образуется кристаллическая фаза нитрида кальция Ca_3N_2 . Стабилизация этой фазы обусловлена более низкой температурой сгорания данных образцов в сравнении с образцами с меньшим содержанием оксида кальция (0,5:3,5; 1:3).

По результатам определения параметров активности установлено, что смеси нанопорошка алюминия с оксидом кальция не пирофорны и не взрывоопасны: температура начала окисления 300 °C.

- Ильин А.П., Мостовщиков А.В., Тимченко Н.А. Изучение последовательности фазообразования при горении прессованного нанопорошка алюминия в воздухе с применением синхротронного излучения // Физика горения и взрыва. – 2013. – Т. 49. – № 3. – С. 72–76.
- Горение порошкообразных металлов в активных средах / П.Ф. Похил, А.Ф. Беляев, Ю.В. Фролов, В.С. Логачев, А.И. Коротков. – М.: Наука, 1972. – 215 с.
- Шевченко В.Г., Кононенко В.И., Булатов М.А. О механизме окисления порошкообразных металлов в процессе их нагревания на воздухе // Физика горения и взрыва. – 1998. – № 1. – С. 45–49.
- Диагностика нанопорошков и наноматериалов / А.П. Ильин, А.В. Коршунов, Д.О. Перевезенцева, Л.О. Толбанова. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2010. – 250 с.
- Назаренко О.Б., Ильин А.П., Тихонов Д.В. Электрический взрыв проводников. Получение нанопорошков металлов и тугоплавких неметаллических соединений. – Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co/KG, 2012. – 274 с.
- Назаренко О.Б. Электровзрывные нанопорошки: получение, свойства, применение. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005. – 148 с.
- 16. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В. Синтез карбидов металлов электрическим взрывом проводников // Вестник науки Сибири. – 2012. – № 3 (4). – С. 80–88. URL: http://sjs. tpu.ru/journal/view/358/319 (дата обращения: 20.07.2014).
- Ковба Л.М., Трунов В.К. Рентгенофазовый анализ. М.: МГУ, 1976. – 232 с.
- Уэндландт У. Термические методы анализа. М.: Мир, 1978. 218 с.
- Яблуновский Г.В. Использование метода дериватографии в исследовании УДП // Получение, свойства и применение энергонасыщенных УДП металлов и их соединений: Тезисы докладов Российской конференции. – Томск: НИИ ВН при ТПУ, 1993. – С. 70.

- 20. Комплексное исследование структуры и механизмов получения и превращений газообразных, жидких и твердых химических систем методами масс-спектрометрии, спектроскопии ЯМР и электронной микроскопии / Качала В.В., Хемчян Л.Л., Кашин А.С. и др. // Успехи химии. 2013. № 82. С. 648–685.
- Кашин А.С., Анаников В.П. Формирование наноразмерных покрытий и наночастиц металлов путем магнетронного распы-

ления и их исследование методом сканирующей электронной микроскопии // Изв. академии наук Сер. Хим. - 2011. - № 12. - С. 2551-2556.

Il'in A.P., Gromov A.A., Yablunovskii G.V. Reactivity of Aluminium Powders // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 2001. – V. 37. – № 4. – P. 418–422.

Поступила 23.07.2014 г.

UDC 544.452.2

THE INFLUENCE OF CALCIUM OXIDE ADDITION ON THE CONTENT OF COMBUSTION PRODUCTS OF ALUMINIUM NANOPOWDER IN AIR

Alexander P. Ilyin,

Prof., Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin ave., 30, e-mail: genchem@mail.ru

Lyudmila O. Root,

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

Viktoria V. Krivosheina,

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

Development of new methods for synthesis of nitrides of the alkaline and alkaline-earth elements is currently relevant because these nitrides, and nitrides of other metals are commonly used in industry.

The aim of this work was to determine the phase structure of products of combustion in air of aluminum nanopowder with calcium oxide mixtures.

To perform qualitative and quantitative phase analysis the X-ray diffraction (diffractometer DRON-3,0) was used; for calculations of the chemical activity parameters of mixtures and determination of their ignition ability the differential thermal analysis (termoanalyzer 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 chemical activity parameters of mixes investigation showed that the mixes of aluminum nanopowder with calcium oxide are not pyrophoric. Furthermore, it was established that in combustion products of aluminum nanopowder with calcium oxide mixes containing 50 and 75 wt. % of CaO, the crystal phase of calcium nitride Ca_3N_2 presumably is formed. Stabilization of this phase is caused by lower combustion temperature of these samples in comparison with the samples containing less calcium oxide.

Key words:

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

REFERENCES

- Samsonov G.V. Nitridy [Nitrides]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1969. 390 p.
- Samsonov G.V., Kulik O.P., Polishchuk V.S. Poluchenie i metody analiza nitridov [Obtaining of nitrides and their analysis methods]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1978. 320 p.
- Borimskiy A.I., Belyavina N.N., Markiv V.Ya. Sintez i svoystva krupnozernistogo kubicheskogo nitrida bora, poluchennogo s ispolzovaniem dopolnitelnykh tsentrov kristallizatsii [Synthesis and properties of coarse-grained cubic boron nitride obtained with the help of addition crystallization centers]. Porodorazrushayushhiy i metalloobrabatyvayushhiy instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniya i primeneniya: Sb. nauch. tr. (Proc. Rock-destroying and metal-processing tools – technique and technology of its production and application). Kiev, 2006, Iss. 9, pp. 286–292.
- Chukhlomina L.N., Maksimov Yu.M, Vereshchagin V.I. Samorasprostranyayuschiysya vysokotemperaturnyy sintez kompozitcionnykh nitridsoderzhaschikh keramicheskikh materialov [Self-propagating high-temperature synthesis of composite nitridecontaining ceramic materials]. Novosibirsk, Nauka, 2012. 260 p.
- Amelkovich Yu.A., Astankova A.P., Tolbanova L.O., Ilin A.P. Synthesis of titanium and zirconium nitrides by burning mixtures of their oxides with aluminum nanopowder in air. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2007, vol. 48, no. 6, pp. 425–428.
- Kwon Y.S., Amelkovich Yu.A., Godimchuk A.Yu., Ilin A.P., Tolbanova L.O. The influence of inorganic substances on oxidation characteristics of nanopowders. KORUS'2005: Proceedings of the 9th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology. Novosibirsk, 2005, pp. 206-210.
- 7. Ilin A.P., Gromov A.A., Tolbanova L.O. Yavlenie khimicheskogo svyazyvaniya azota vozdukha s obrazovaniem kristallicheskikh

faz nitridov pri gorenii poroshkoobraznykh metallov, bora i kremniya [The phenomenon of chemical bonding of air nitrogen with formation of nitrides crystalline phases at combustion of powdered metals, boron and silicon]. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental Research], 2008, no. 4, pp. 13–18.

- Ilin A.P., Gromov A.A. Gorenie alyuminija i bora v sverkhtonkom sostoyanii [Burning of aluminium and boron in ultrafine state]. Tomsk, Tomsk State Univ. Publ., 2002. 154 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., Strokova Yu.I. *Gorenie nanoporoshkov metallov* [Metal nanopowder burning]. Tomsk, Deltaplan Publ., 2008. 382 p.
- Ilyin A.P., Mostovshchikov A.V., Timchenko N.A. Izuchenie posledovatelnosti fazoobrazovaniya pri gorenii presovannogo nanoporoshka alyuminiya v vozdukhe s primeneniem sihkhrotropnogo izlucheniya [Study of succession in phase formation at aluminum compacted nanopowder combustion in the air when applying synchrotron radiation]. *Fizika goreniya i vzryva*, 2013, vol. 49, no. 3, pp. 72–76.
- Pokhil P.F., Belyayev A.F., Frolov Yu.V., Logachev V.S., Korotkov A.I. Gorenie poroshkoobraznykh metallov v aktivnykh sredakh [Combustion of Powdered Metals in the Active Media]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 298 p.
- 12. Shevchenko V.G., Kononenko V.I., Bulatov M.A. O mekhanizme okisleniya poroshkoobraznykh metallov v protsesse ikh nagrevaniya na vozdukhe [On the mechanism of powdered metals oxidation during their heating in air]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1998, no. 1, pp. 45–49.
- Ilin A.P., Korshunov A.V., Perevezentseva D.O., Tolbanova L.O. Diagnostika nanoporoshkov i nanomaterialov [Nanopowders and nanomaterials diagnostics]. Tomsk, Tomsk Politechnic University Publ., 2010. 250 p.
- 14. Nazarenko O.B., Ilin A.P., Tikhonov D.V. Elektricheskiy vzryv provodnikov. Poluchenie nanoporoshkov metallov i tugoplavkikh nemetallicheskikh soedineniy [Wire electrical explosion. Metal and refractory nonmetal compounds nanopowders production]. Saarbrucken, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co/KG, 2012. 274 p.
- 15. Nazarenko O.B. Elektrovzryvnye nanoporoshki: poluchenie, svoj stva, primenenie [Electroexplosive nanopowders: production,

properties, application]. Tomsk, Tomsk Politechnic University Publ., 2005. 148 p.

- Ilin A.P., Nazarenko O.B., Tikhonov D.V. Sintez karbidov metallov elektricheskim vzryvom provodnikov [Metal carbides synthesis by wire electrical explosion]. Vestnik nauki Sibiri – Bulletin of Siberian science, 2012, no. 3 (4), pp. 80–88.
- Kovba L.M., Trunov V.K. Rentgenofazovyy analiz [X-ray diffraction analysis]. Moscow, MGU Publ., 1976. 232 p.
- Uendlandt U. Termicheskie metody analiza [Thermal analysis methods]. Moscow, Mir Publ., 1978. 218 p.
- 19. Yablunovskiy G.V. Ispolzovanie metoda derivatografii v issledovanii UDP [The derivatogram method in UFP investigation]. Poluchenie, svoystva i primenenie energonasyshchennykh UDP metallov i ikh soedineniy [Production, properties and application of energy-saturated ultrafine metals and their compounds]. *Tezisy dokladov Rossiyskoy konferentsii* [Proceedings of Russian conference at HVRI TPU]. Tomsk, NII VN pri TPU, 1993, p. 70.
- 20. Kachala V.V., Khemchyan L.L., Kashin A.S. Kompleksnoe issledovanie struktury i mekhanizmov polucheniya i prevrashcheniy gazoobraznykh, zhidkikh i tverdykh khimicheskikh sistem metodami mass-spektrometrii, spektroskopii YaMR i elektronnoy mikroskopii [Complex research of the structure and mechanisms for obtaining 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.
- 21. Kashin A.S., Ananikov V.P. Formirovanie nanorazmernykh pokrytiy i nanochastits metallov putem magnetronnogo raspyleniya i ikh issledovanie metodom skaniruyushchey elektronnoy mikroskopii [The formation of nanoscale coatings and metal nanoparticles by magnetron sputtering, and their investigation by scanning electron microscopy]. Izv. akademii nauk Ser. Khim. – Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Chemistry series, 2011, no. 12, pp. 2551–2556.
- Il'in A.P., Gromov A.A., Yablunovskii G.V. Reactivity of Aluminium Powders. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2001, vol. 37, no. 4, pp. 418–422.

Received: 23 July 2014.