

УДК 546 : 54.057 : 539.25 : 539.26

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-23-30

Структуро- и фазообразование продуктов горения при синтезе γ -AlON в режиме СВС-газостатирования

© 2016 г. И.П. Боровинская, Т.Г. Акопджанян, Т.И. Игнатьева, Е.А. Чемагина

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (ИСМАН),
г. Черноголовка, Московская обл.

Статья поступила в редакцию 11.02.16 г., подписана в печать 17.02.16 г.

Проведены исследования синтеза оксинитрида алюминия (γ -AlON) в условиях СВС-газостатирования при высоких давлениях (10–100 МПа) газообразного азота, в том числе в режиме так называемых сопряженных реакций горения (химических печей). Показано, что химический и фазовый составы продуктов горения, а также их структура и морфология частиц порошков зависят от соотношения реагентов в исходной смеси Al–Al₂O₃, а также от давления азота, температуры горения высокоэкзотермических компонентов химических печей и марки исходных реагентов. Изучена структура частиц порошков γ -AlON и установлена ее связь с условиями проведения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Найдены оптимальные параметры СВС для получения Al₅O₆N (γ -AlON).

Ключевые слова: СВС-газостатирование, сопряженные реакции горения, продукты горения, алон, микроструктура, структурообразование, фазы, морфология.

Боровинская И.П. – докт. хим. наук, проф., гл. науч. сотрудник лаборатории СВС ИСМАН (142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 8). E-mail: inna@ism.ac.ru.

Акопджанян Т.Г. – аспирант той же лаборатории. E-mail: tigj@yandex.ru.

Игнатьева Т.И. – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник лаборатории химического анализа ИСМАН. E-mail: itian@ism.ac.ru.

Чемагина Е.А. – вед. инженер лаборатории СВС ИСМАН. E-mail: ea.chemagina@ism.ac.ru.

Для цитирования: Боровинская И.П., Акопджанян Т.Г., Игнатьева Т.И., Чемагина Е.А. Структуро- и фазообразование продуктов горения при синтезе γ -AlON в режиме СВС-газостатирования // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2016. No. 3. С. 23–30. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-23-30.

Borovinskaya I.P., Akopdzhanian T.G., Ignatieva T.I., Chemagina E.A.

Structure and phase formation of combustion products during γ -AlON synthesis in SHS gas-statting mode

The paper studies synthesis of aluminum oxynitride (γ -AlON) under the conditions of SHS gas-statting at high pressures (10–100 MPa) of gaseous nitrogen including the mode of so-called conjoint combustion reactions (chemical furnaces). It was shown that chemical and phase compositions of combustion products, their structure and morphology of powder particles depend on the reagent ratio in the initial Al–Al₂O₃ mixture, as well as nitrogen pressure, combustion temperature of high-exothermic components of chemical furnaces, and type of initial reagents. The structure of γ -AlON powder particles was studied and its relation to self-propagating high-temperature synthesis conditions was found. It determines the optimum SHS parameters for Al₅O₆N (γ -AlON) synthesis.

Keywords: SHS gas-statting, conjoint combustion reactions, combustion products, alon, microstructure, structure formation, phases, morphology.

Borovinskaya I.P. – Dr. Sci., Prof., SHS Laboratory, ISMAN (142432, Russia, Moscow region, Chernogolovka, Academica Osipyana str., 8). E-mail: inna@ism.ac.ru.

Akopdzhanian T.G. – Postgraduate Student, SHS Laboratory, ISMAN. E-mail: tigj@yandex.ru.

Ignatieva T.I. – PhD, Leading Scientist, Chemical analysis laboratory, ISMAN. E-mail: itian@ism.ac.ru.

Chemagina E.A. – Leading Engineer, SHS Laboratory, ISMAN. E-mail: ea.chemagina@ism.ac.ru.

Citation: Borovinskaya I.P., Akopdzhanian T.G., Ignatieva T.I., Chemagina E.A. Strukturo- i fазообразование produktov gorenija pri sinteze γ -AlON v rezhime SVS-gazostatirovaniya. Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya. 2016. No. 3. С. 23–30. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-23-30.

Введение

Оксинитрид алюминия с кубической кристаллической решеткой (γ -AlON) состава Al₅O₆N является твердым раствором в псевдобинарной систе-

ме xAlN–yAl₂O₃. Он оптически прозрачен (≥ 80 %) в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном спектрах, в 4 раза прочнее закаленного стекла, на

85 % такой же прочный, как сапфир, и примерно на 15 % прочнее шпинели алюмината магния. Это самый твердый поликристаллический прозрачный керамический материал, который производится в промышленном масштабе [1] и подходит для использования в качестве упрочняющего компонента конструкционных материалов для авиакосмических двигателей, установок в энергетике и других областях техники. При правильном подходе оксинитрид алюминия (γ -AlON) может стать более дешевым и доступным материалом, чем сапфир, там, где требуются высокая твердость, трещиностойкость, прозрачность в видимом, ультрафиолетовом и инфракрасном спектрах.

Известны несколько технологий получения порошков γ -AlON для производства прозрачной керамики. К основным методам синтеза относятся прямая твердофазная реакция между AlN и Al_2O_3 [2] и карботермическое восстановление Al_2O_3 в атмосфере азота [3, 4]. Разрабатываются также и новые способы синтеза порошка γ -AlON, такие как самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) [5], азотирование порошков алюминия в пламени горелки на воздухе, жидкофазные реакции азотирования алюминия с участием органических соединений [6], горение порошков алюминия в атмосфере воздуха [7]. Для компактирования порошков и получения поликристаллической керамики используются методы горячего прессования [8], изостатического прессования [9], микроволновой энергии [10], электроимпульсного плазменного спекания [11].

В настоящей работе для получения γ -AlON применялось азотирование смесей металлического алюминия и порошка корунда Al_2O_3 в режиме процесса СВС, основанного на процессах фильтрационного горения, в том числе при использованием так называемых термически сопряженных реакций [12]. При этом осуществлялось совместное горение слабо- и сильноэкзотермических смесей реагентов, последняя из которых служит химической печью для переноса дополнительного тепла [13]. В термически сопряженных системах реакционные смеси химических печей и целевых реагентов разделяются в пространстве.

В проведенных исследованиях в качестве химической печи использовались реакции порошков В или смесей В + BN с газообразным азотом высокого давления. Следует отметить, что конечным продуктом горения химической печи в этом случае являются порошки нитрида бора, которые также

представляют большой практический интерес и могут быть успешно использованы.

Цель данной работы — комплексное исследование возможности использования метода СВС для производства важных в практическом отношении, в том числе низкокалорийных, тугоплавких соединений типа Al_5O_6N , а также разработка нового варианта СВС — совместного получения двух и более целевых продуктов. Основное внимание уделено изучению влияния параметров процесса горения на фазовый и химический составы конечных продуктов, а также структуру материала и морфологию частиц. Также рассмотрены механизм и взаимодействие реагентов в условиях термически сопряженных реакций.

Материалы и методика эксперимента

В качестве основного сырья использовались порошки алюминия марок АСД-4, ПАП-1 (алюминиевая пудра) и оксид алюминия (корунд чистотой 95 % с размером частиц ~5 мкм). Для химической печи применялись порошки бора пиролитического и полиборид магния. Разбавителем порошка бора служил гексагональный нитрид бора, синтезированный методом СВС, чистотой 99,5 %. В качестве газообразного реагента выбран азот квалификации «ОЧ» (>99,4 %). В процессе исследования варьировались марки порошка алюминия, давление азота, соотношения исходных реагентов в смесях $Al + Al_2O_3$ и компонентов химической печи. Синтез проводился в СВС-газостате высокого давления, начальное давление изменялось от 10 до 100 МПа.

Продукты горения в зависимости от условий синтеза находились в виде сыпучих или плотно спеченных порошков. Полученные продукты исследовались с помощью рентгенофазового (РФА с использованием дифрактометра DRON-3М) и химического анализов, а также сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Микроструктура материала и морфология частиц порошков изучались с применением сканирующего электронного микроскопа LEO-1450 со встроенным рентгеновским анализатором IN-CA ENERGY 350 (EDS).

Результаты экспериментов и их обсуждение

Согласно литературным данным соединения AlON (так называемые алоны) разного состава находятся в пределах двойной системы $xAlN-yAl_2O_3$.

Область существования однофазных твердых растворов лежит между 24 и 41 мол.% AlN в области, ограниченной температурами 1700–2170 °С. При $t = 2170$ °С γ -AlON плавится [1]. Синтез алонов при горении системы $x\text{AlN}-y\text{Al}_2\text{O}_3$ в атмосфере газообразного азота происходит в результате экзотермического химического взаимодействия порошков алюминия с азотом в присутствии Al_2O_3 по реакции



Проведенные исследования показали, что реакционные смеси, содержащие не менее 22 мас.% Al, могут самостоятельно взаимодействовать с азотом в режиме фильтрационного горения. Если же в них менее 22 % Al, такие смеси взаимодействовать с N_2 в режиме горения не способны, для этого требуется их дополнительный подогрев. Как уже упоминалось выше, в таких случаях используются химические печи, в которых протекают термически сопряженные реакции горения в азоте смесей Al + AlN и B или B + BN.

Подробные исследования фазового состава и структуры продуктов горения, а также их связи с параметрами процесса (температурой, маркой алюминия) при различных соотношениях компонентов в системе Al : Al_2O_3 , мас.%, от 15Al–85 Al_2O_3 до 50Al–50 Al_2O_3 , показали, что при горении смесей Al + Al_2O_3 без дополнительного подогрева полученные продукты многофазны (рис. 1), и наличие или отсутствие тех или иных фаз зависит не только от соотношения Al : Al_2O_3 , но и от давления

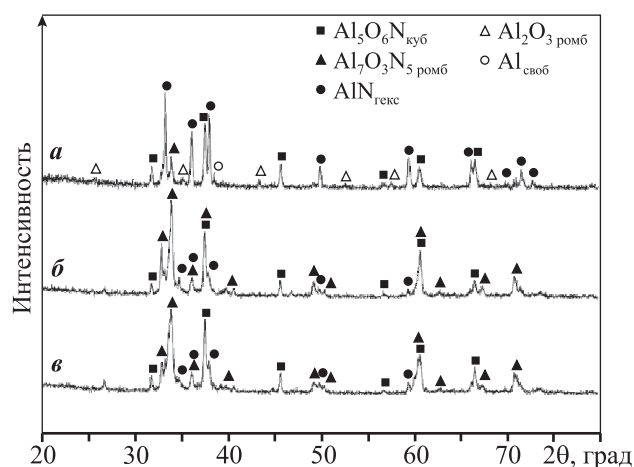


Рис. 1. Дифрактограммы порошков, полученных в отсутствие химической печи при соотношении Al : $\text{Al}_2\text{O}_3 = 55 : 45$ и разных давлениях азота
а – $P_{\text{N}_2} = 10$ МПа, б – 20 МПа и в – 40 МПа

азота. При $P_{\text{N}_2} = 10$ МПа и соотношении Al : $\text{Al}_2\text{O}_3 = 55 : 45$ наряду с основной фазой γ -AlON наблюдается большая интенсивность пиков $\text{AlN}_{\text{гекс}}$ и, кроме того, присутствуют Al_2O_3 и свободный Al.

При повышении давления азота до 20 и 40 МПа на дифрактограммах исчезли пики Al и Al_2O_3 , уменьшилось количество AlN, который частично перешел в твердый раствор с Al_2O_3 с образованием алона $\text{Al}_7\text{O}_3\text{N}_5$ ромбоэдрической формы.

При проведении исследований большое внимание уделялось изучению микроструктуры продуктов горения и морфологии частиц порошков в зависимости от параметров процесса СВС. На рис. 2 приведены микроструктуры, характерные для частиц порошков, полученных без применения дополнительного нагрева. Видно, что они неоднородны и состоят из отдельных слоистых частиц γ -AlON (рис. 2, а) и кристаллов в виде гибких стержней (рис. 2, б). В некоторых из порошков обнаруживаются также отдельные сферические частицы Al_2O_3 . Игольчатые кристаллы, содержание которых уменьшается с увеличением давления,

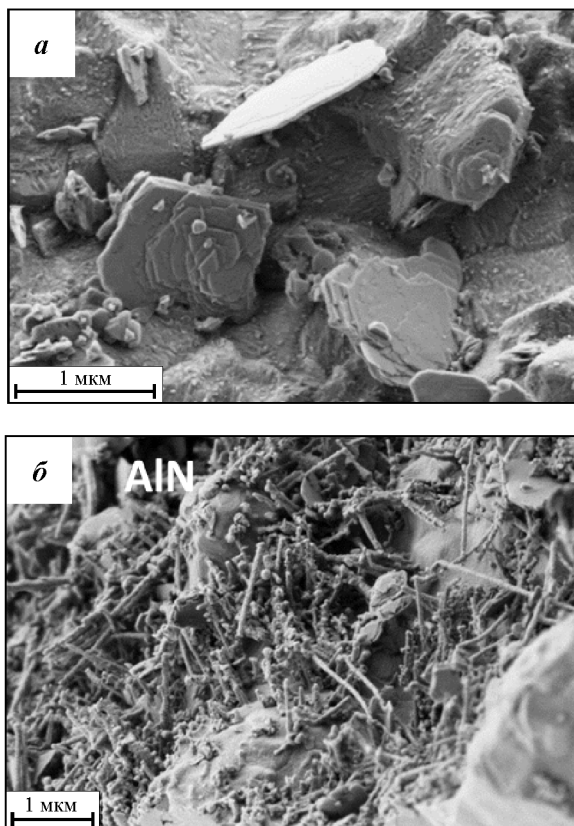


Рис. 2. СЭМ-изображения микроструктуры продуктов горения
Давление азота – 20 МПа
Дополнительный подогрев не применялся

можно отнести к наноструктурным пластинчатым частицам AlN, собранным в стержни.

Как показали эксперименты, высокое содержание алюминия в исходных смесях Al + Al₂O₃ способствует образованию большого количества AlN и снижению содержания однофазных твердых растворов γ -AlON, а уменьшение количества алюминия приводит к резкому понижению температуры синтеза (<1700 °C), неполноте сгорания образцов и даже затуханию горения. Ранее уже было отмечено, что для повышения температуры синтеза использовали сопряженные реакции горения — так называемые химические печи, подробно описанные в работе [13]. Был установлен наиболее благоприятный режим горения для получения порошков однофазного твердого раствора AlN—Al₂O₃ (γ -AlON), при котором соотношение исходных Al : Al₂O₃ соответствует 21 мас.% Al и 79 мас.% Al₂O₃.

Наиболее подробные исследования условий синтеза γ -AlON проводились с использованием химической печи, состоящей из элементарного бора или его смесей с BN в соотношениях (мас.%) 30 : 70 и 50 : 50. При повышенных давлениях азота (>10 МПа) такие химические печи могут достигать температур 2500—3000 °C [14].

Изучение азотированных продуктов горения смесей алюминия с его оксидом показало, что как температура горения и давление азота, так и марка алюминия и форма загрузки шихты (засыпка порошков или спрессованный образец), а также другие параметры синтеза сказываются на фазовом составе и однородности конечных продуктов.

С помощью электронных микроскопов были исследованы макроструктура порошков спеков, агломератов и морфология частиц γ -AlON. Установлено, что практически во всех экспериментах γ -AlON представляет собой плотно спеченные слоистые агломераты со слоями из тонких пластинок толщиной ~20 нм, собранных в пористые стержни. На рис. 3 видны четко ограненные пластинчатые образования, состоящие из самособранных пористых кристаллитов.

Примесный нитрид алюминия кристаллизуется в виде тонких гибких пластинчатых стержней диаметром 100—200 нм, их элементный состав соответствует стехиометрическому AlN (рис. 4).

Оксид алюминия представлен сферическими частицами, состоящими из тонких нитевидных кристаллитов диаметром менее 20 нм (рис. 5, а), которые формируются в сферы из ячеистых обра-

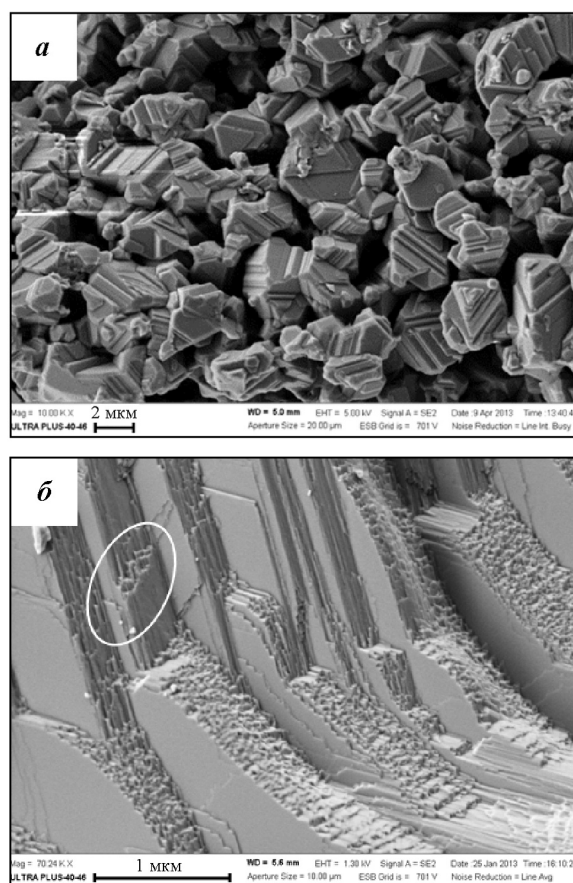


Рис. 3. Микроструктура частиц порошка γ -AlON (а) и наноструктура слоев частицы γ -AlON (б)

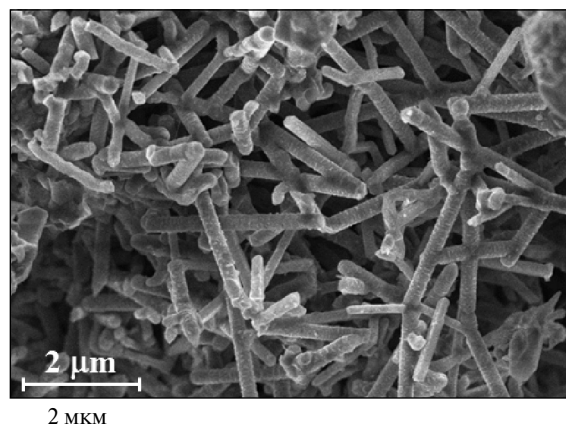


Рис. 4. СЭМ-изображение частиц нитрида алюминия

зований, заполненных нитевидными кристаллитами (рис. 5, б). Элементный состав частиц (52,99 % Al и 47,01 % O) соответствует оксиду алюминия Al₂O₃.

На рис. 6 приведены дифрактограммы продуктов, полученных при горении смеси Al + Al₂O₃ в массовом соотношении 21 : 79 при разных давлениях азота в химической печи состава 50%B—50%BN.

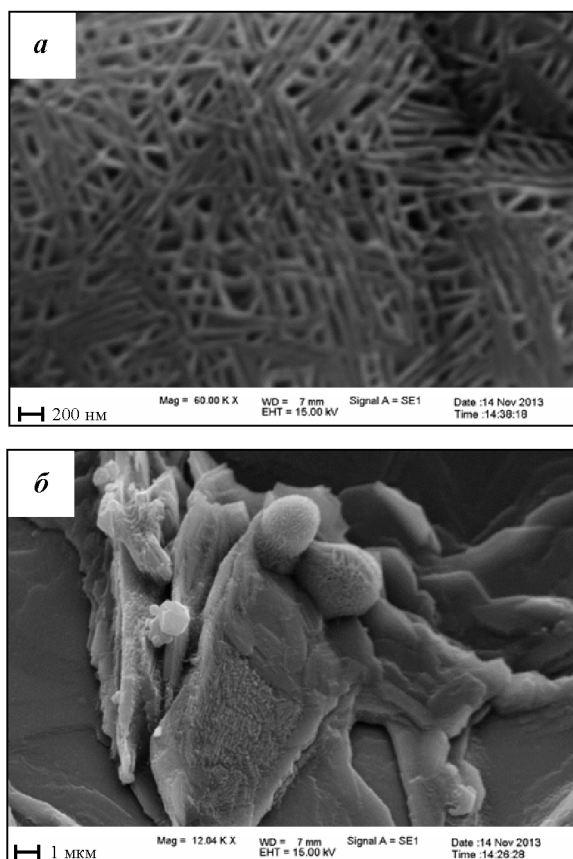


Рис. 5. СЭМ-изображение частиц оксида алюминия
 а — ячеистая структура частицы оксида алюминия
 б — динамика превращения ячеистых структур Al_2O_3 в сферы

В табл. 1 представлен химический анализ продуктов горения, полученных в химической печи состава 50%B–50%BN с использованием алюминия марки АСД-4 при разных давлениях азота. Видно, что с повышением давления газа содержание азота в $\gamma\text{-AlON}$ понижается. При $P_{\text{N}_2} = 40$ МПа оно достигает 5,8 мас.% в $\text{Al}_5\text{O}_6\text{N}$ ($\gamma\text{-AlON}$), что практически соответствует его теоретическому значению (5,7 %). При повышении давления до 100 МПа наблюдается снижение содержания азота, которое может быть связано с особенностями фильтрационного подвода газа (N_2) к зоне горения при высоких давлениях [15].

Применение химической печи, состоящей из 100 % бора пиролитического, сопровождается резким повышением температуры горения до значений >2500 °С. Продукты горения представляют собой плотные спеки, количество азота уменьшается, что, скорее всего, является результатом фильтрационных затруднений поступления газообразного реагента (N_2) к фронту горения за счет спекания реакционной массы.

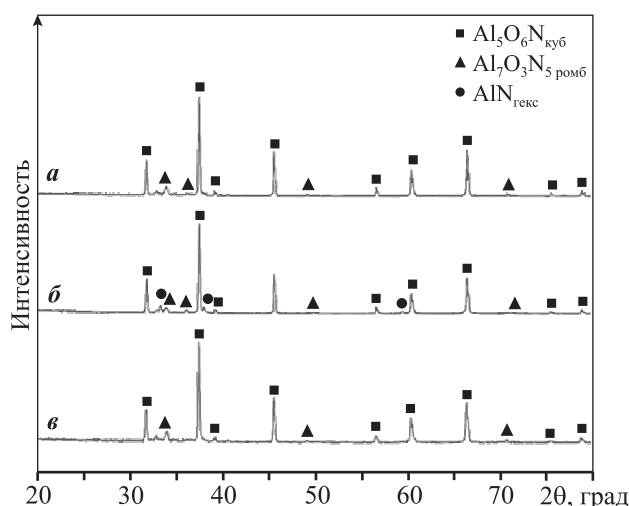


Рис. 6. Дифрактограммы порошков, полученных при синтезе $\text{Al}_x\text{O}_y\text{N}_z$ в химической печи состава 50%B–50%BN при разных давлениях азота
 а — $P_{\text{N}_2} = 20$ МПа, б — 40 МПа, в — 100 МПа

Таблица 1. Содержание азота в $\gamma\text{-AlON}$ при разных давлениях

P_{N_2} , МПа	N_2 , мас. %
20	6,8
40	5,8
100	5,1

Иная картина наблюдается при выборе в качестве основного реагента алюминия марки ПАП-1 (пудра). При использовании смесей алюминиевой пудры с Al_2O_3 практически при всех параметрах горения продукты образуют оплавленные, часто стекловидные, спеки, что свидетельствует о высокой температуре синтеза. Основным полученным при этом соединением является $\text{Al}_5\text{O}_6\text{N}$ ($\gamma\text{-AlON}$) с небольшими примесями $\text{Al}_7\text{O}_3\text{N}_5$ и AlN . Изменение давления азота не сказывается на фазовом составе продуктов горения.

Если сравнить химический состав продуктов горения, полученных с использованием алюминия марки АСД-4 и алюминиевой пудры, синтезированных при одинаковых условиях ($P_{\text{N}_2} = 40$ МПа, соотношение $\text{Al} : \text{Al}_2\text{O}_3 = 21 : 79$, химическая печь состава 50%B–50%BN), то заметна значительная разница в количестве общего азота и пониженное содержание связанного азота в порошке $\gamma\text{-AlON}$ (табл. 2). Последнее свидетельствует о наличии в продуктах горения посторонних примесей, которые удалось устранить в последующих экспериментах.

При использовании химической печи из эле-

Таблица 2. Содержание азота в γ -AlON при использовании разных порошков алюминия

Тип порошка	P_{N_2} , МПа	N_2 , мас.%
АСД-4	40	5,8
ПАП-1 (пудра)	40	4,2

ментарного бора, температура горения которой приближается к 3000 °С, в продуктах горения алюминиевой пудры, наряду с Al_5O_6N и примесями $Al_7O_3N_5$, AlN и Al_2O_3 , в неоптимальных условиях синтеза (например, при активном теплоотводе), может появиться небольшое количество тетраэдрического алона $Al_{196}O_{228}N_4$. А в химической печи наблюдаются также примеси нитрида бора, который проникает в основную реакционную массу в результате газозависимых реакций летучих соединений бора и его оксида с азотом. Проведение синтеза в химической печи из пиролитического бора с максимальной толщиной стенки печи (≥ 2 см) приводит к эволюции структуры γ -AlON за счет сильного спекания и усадки реакционной массы, вплоть до плавления продуктов горения. В этом случае γ -AlON полностью теряет мозаичную макроструктуру, превращаясь в поликристаллическую стеклообразную массу с появлением участков, прозрачных в видимой области спектра (рис. 7).

При этом одновременно с плавлением основных продуктов горения происходит ликвация материала, возникающая при кристаллизации из расплава. Выделившиеся в виде кристаллов примесные фазы неравномерно распределяются по объему реакционной массы в связи с оттеснением их перемещающимся фронтом кристаллизации с последующим перераспределением за счет диффузии. На рис. 8 представлена картина фронта

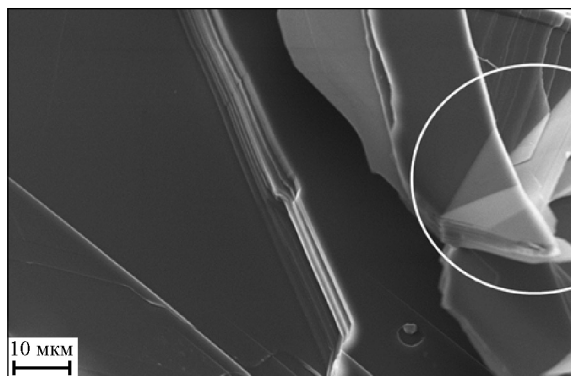


Рис. 7. Микроструктура расплава продуктов горения, полученного с применением алюминиевой пудры при соотношении (мас.%) $Al : Al_2O_3 = 21 : 79$

кристаллизации с выделившимися ромбоэдрическими кристаллами $Al_7O_3N_5$ и гексагональными кристаллами, которые можно отнести к AlN .

Следует отметить, что в экспериментах были зафиксированы следы $AlN_{куб}$. Появление кубической модификации нитрида алюминия свидетельствует, скорее всего, о реализации при синтезе алона механизма образования γ -AlON через фазовый переход $AlN_{гекс} \rightarrow AlN_{куб}$ после получения гексагонального нитрида при горении алюминия в газообразном азоте. Высокие давления газа и температуры реакции азотирования способствовали такому фазовому переходу, благодаря которому происходит взаимное растворение нитрида и оксида алюминия с образованием оксинитрида Al_5O_6N . Необходимость присутствия $AlN_{куб}$ для образования однофазного твердого раствора $AlN-Al_2O_3$ была показана в работе [16].

Конечным продуктом горения химических печей, в состав которых входит бор, является высококачественный нитрид бора, который также представляет большой практический интерес и может быть успешно использован. Химический состав и структура частиц порошков нитрида бора соответствуют стехиометрическому составу и гексагональной структуре $BN_{гекс}$.

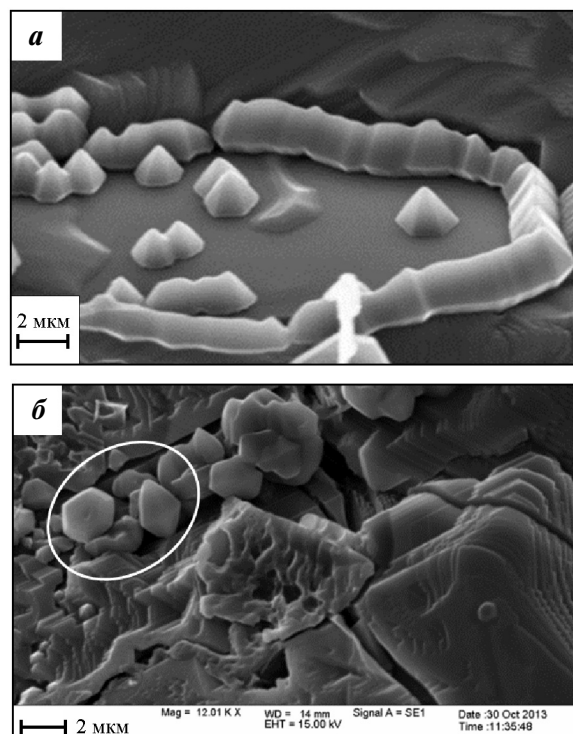


Рис. 8. СЭМ-изображение расплава γ -AlON с «вытесненными» кристаллами примесей (а): ромбоэдрическими $Al_7O_3N_5$ и гексагональными AlN (б)

Заключение

В результате проведенных исследований фазового состава и структуры продуктов горения смесей $\text{Al} + \text{Al}_2\text{O}_3$ при высоких давлениях газобразного азота (10–100 МПа) в условиях СВС-газостатирования были найдены оптимальные параметры синтеза порошков $\text{Al}_5\text{O}_6\text{N}$ (γ -AlON), которые служат исходным сырьем для получения поликристаллической прозрачной керамики — перспективного заменителя дорогостоящего, дефицитного сапфира.

Эксперименты с использованием высокоэкзотермических сопряженных реакций горения бора в газобразном азоте для дополнительного подогрева исходных смесей показали возможность получения в режиме СВС не только порошков с четко сформированными слоистыми частицами, собранными в мозаичные макроструктуры, но и стеклообразной поликристаллической массы с прозрачными в видимой области спектра участками. Это свидетельствует о перспективности применения процессов СВС для одностадийного изготовления прозрачной поликристаллической керамики на основе γ -AlON.

Найденные в работе оптимальные условия синтеза γ -AlON в режиме «сопряженного» горения и возможность получения высококачественных порошков нитрида бора составляют основу перспективных методов одностадийного совместного получения при СВС двух и более целевых продуктов.

Литература

1. McCauley J.W., Patel P., Chen M., Gilde G., Strassburger E., Paliwal B., Ramesh K.T., Dandekar D.P. AlON: A brief history of its emergence and evolution // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2009. Vol. 29. No. 2. P. 223–236. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2008.03.046.
2. Zheng J., Forslund B. Carbothermal synthesis of aluminium oxynitride (AlON) powder: influence of starting materials and synthesis parameters // *J. Eur. Ceram. Soc.* 1995. Vol. 15. No. 11. P. 1087–1100. DOI: 10.1016/0955-2219(95)00078-9.
3. Li Y.W., Li N., Yuan R.Z. Effect of raw materials on carbothermal reduction synthesis of γ -aluminum oxynitride spinel powder // *J. Mater. Sci.* 1999. Vol. 34. No. 11. P. 2547–2552. DOI: 10.1023/A:1004636312836.
4. Yuan X., Liu X., Zhang F., Wang S. Synthesis of c-AlON powders by a combinational method of carbothermal re-

duction and solid-state reaction // *J. Am. Ceram. Soc.* 2010. Vol. 93. No. 1. P. 22–24.

5. Lee J., Lee I., Chung H., Ahn J., Kim D., Kim B. Self-propagating high-temperature synthesis for aluminum oxynitride (AlON) // *Mater. Sci. Forum.* 2006. Vol. 510–511. P. 662–665.
6. Galakhov A.V., Zelenskii V.A., Vinogradov L.V., Antipov V.I., Alymov M. Synthesis of aluminum oxynitride from starter organic compounds // *Refract. Industr. Ceram.* 2012. Vol. 53. No. 4. P. 269–271.
7. Gromov A., Ilyin A., Ditts A., Vereshchagin V. Combustion of $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$ mixtures in air // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2005. Vol. 25. No. 9. P. 1575–1579.
8. Wei Chun-cheng, Tian Gui-shan. Synthesis technology of spinel AlON // *Trans. Nonferr. Met. Soc. China.* 2007. Vol. 17. No. 1. P. 1152–1155.
9. Zheng Y., Yun X., Zhang X. Fabrication and microstructure of AlON ceramic by self-propagating high-temperature synthesis and hot isostatic pressing // *Mater. Sci. Technol.* 2008. Vol. 16. No. 4. P. 481–484.
10. Cheng J.P., Agrawal D., Zhang Y.J., Roy R. Microwave reactive sintering to fully transparent aluminum oxynitride (AlON) ceramics // *J. Mater. Sci. Lett.* 2001. Vol. 20. No. 1. P. 77–79.
11. Sahin F.C., Kanbur H.E., Apak B. Preparation of AlON ceramics via reactive spark plasma sintering // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2012. Vol. 32. No. 4. P. 925–929.
12. Мержанов А.Г. Термически сопряженные процессы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // *ДАН.* 2010. Vol. 434. No. 4. С. 489–492.
13. Borovinskaya I.P., Ignat'eva T.I., Semenova V.N., Chermagina E.A. SHS of aluminum oxynitride in chemical furnace // *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* 2015. Vol. 24. No. 3. P. 142–147.
14. Loryan V.E., Borovinskaya I.P. SHS under high pressure of nitrogen gas: Feasibility of nitride melting // *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* 2014. Vol. 23. No. 4. P. 202–206.
15. Грачев В.В. Пределы распространения волн фильтрационного горения при высоких давлениях газобразного окислителя // *ДАН.* 2013. Vol. 449. No. 4. С. 429–433.
16. Cai K.F., Mclachlan D.S., Sigalas I. Preparation of Al_2O_3 –AlON and Al_2O_3 –AlN composites via reaction-bonding // *J. Mater. Sci. Lett.* 2001. Vol. 20. No. 3. P. 193–195.

References

1. McCauley J.W., Patel P., Chen M., Gilde G., Strassburger E., Paliwal B., Ramesh K.T., Dandekar D.P. AlON: A brief history of its emergence and evolution. *J. Eur. Ceram. Soc.*

2009. Vol. 29. No. 2. P. 223—236. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2008.03.046.
2. Zheng J., Forslund B. Carbothermal synthesis of aluminum oxynitride (AlON) powder: influence of starting materials and synthesis parameters. *J. Eur. Ceram. Soc.* 1995. Vol. 15. No. 11. P. 1087—1100. DOI: 10.1016/0955-2219(95)00078-9.
3. Li Y.W., Li N., Yuan R.Z. Effect of raw materials on carbothermal reduction synthesis of γ -aluminum oxynitride spinel powder. *J. Mater. Sci.* 1999. Vol. 34. No. 11. P. 2547—2552. DOI: 10.1023/A:1004636312836.
4. Yuan X., Liu X., Zhang F., Wang S. Synthesis of c-AlON powders by a combinational method of carbothermal reduction and solid-state reaction. *J. Am. Ceram. Soc.* 2010. Vol. 93. No. 1. P. 22–24.
5. Lee J., Lee I., Chung H., Ahn J., Kim D., Kim B. Self-propagating high-temperature synthesis for aluminum oxynitride (AlON). *Mater. Sci. Forum.* 2006. Vol. 510–511. P. 662—665.
6. Galakhov A.V., Zelenskii V.A., Vinogradov L.V., Antipov V.I., Alymov M. Synthesis of aluminum oxynitride from starter organic compounds. *Refract. Industr. Ceram.* 2012. Vol. 53. No. 4. P. 269—271.
7. Gromov A., Ilyin A., Ditts, A., Vereshchagin V. Combustion of Al—Al₂O₃ mixtures in air. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2005. Vol. 25. No. 9. P. 1575—1579.
8. Wei Chun-cheng, Tian Gui-shan. Synthesis technology of spinel AlON. *Trans. Nonferr. Met. Soc. China.* 2007. Vol. 17. No. 1. P. 1152—1155.
9. Zheng Y., Yun X., Zhang X. Fabrication and microstructure of AlON ceramic by self-propagating high-temperature synthesis and hot isostatic pressing. *Mater. Sci. Technol.* 2008. Vol. 16. No. 4. P. 481—484.
10. Cheng J.P., Agrawal D., Zhang Y.J., Roy R. Microwave reactive sintering to fully transparent aluminum oxynitride (AlON) ceramics. *J. Mater. Sci. Lett.* 2001. Vol. 20. No. 1. P. 77—79.
11. Sahin F.C., Kanbur H.E., Apak B. Preparation of AlON ceramics via reactive spark plasma sintering. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2012. Vol. 32. No. 4. P. 925—929.
12. Merzhanov A.G. Termicheski sopriazhennyye protsessy samorasprostraniayushchegosia vysokotemperaturnogo sinteza [Thermal conjugated processes of self-propagating hightemperature synthesis]. *Doklady akademii nauk.* 2010. Vol. 434. No. 4. P. 489—492.
13. Borovinskaya I.P., Ignat'eva T.I., Semenova V.N., Chemagina E.A. SHS of aluminum oxynitride in chemical furnace. *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* 2015. Vol. 24. No. 3. P. 142—147.
14. Loryan V.E., Borovinskaya I.P. SHS under high pressure of nitrogen gas: Feasibility of nitride melting. *Int. Self-Propag. High-Temp. Synth.* 2014. Vol. 23. No. 4. P. 202—206.
15. Grachev V.V. Predely rasprostraneniia voln fil'tracionnogo goreniia pri vysokikh davleniiakh gazoobraznogo okislitelia [The limits of wave propagation of filtration combustion at high pressure gaseous oxidizer]. *Doklady akademii nauk.* 2013. Vol. 449. No. 4. P. 429—433.
16. Cai K.F., Mclachlan D.S., Sigalas I. Preparation of Al₂O₃—AlON and Al₂O₃—AlN composites via reaction-bonding. *J. Mater. Sci. Lett.* 2001. Vol. 20. No. 3. P. 193—195.