

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 666.775-798.2

doi: 10.30987/2782-5957-2023-3-4-13

СИНТЕЗ СИАЛОНА ИЗ СВС-СИСТЕМЫ В РЕЖИМЕ ТВЕРДОПЛАМЕННОГО ГОРЕНИЯ

Мария Евгеньевна Валяева^{1✉}, Людмила Александровна Кондратьева²

^{1,2} Самарский государственный технический университет, Самара, Российская Федерация

¹ valiaeva.maria@yandex.ru

² schiglou@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3940-9511>

Аннотация

Цель исследования: в режиме твердопламенного горения СВС-систем «диоксид кремния (песок) – азид натрия – галогениды кремния и алюминия» синтезировать порошок сиалона.

Задача, решению которой посвящена статья: установить исходный состав шихты (выбрав из нескольких образцов песка наилучший по показателям – количество примесей и модуль крупности), при синтезе которого в режиме твердопламенного горения образуется сиалон состава $Si_3Al_3O_3N_5$.

Методы исследования, применяемые для получения и анализа синтезируемого продукта в режиме СВС-Аз: самораспространяющийся высокотемпературный синтез с применением азид натрия и галогенидов в лабораторном реакторе СВС-Аз, рентгенодифракционный анализ на дифрактометре ARL X'tra-138 и изучение микроструктуры на растровом электронном микроскопе JSM-6390A.

Новизна работы состоит в том, что впервые методом СВС-Аз были проведены исследования по

синтезу сиалона из систем, в составе которых в качестве диоксида кремния использовался речной песок.

Результаты исследования по синтезу сиалона в режиме твердопламенного горения показали, что конечный продукт кроме $\beta-Si_3Al_3O_3N_5$ состоит еще из нескольких фаз: Si_3N_4 ; AlN, Si, NaF и Na_3AlF_6 . Установлено, что в процессе горения образовавшиеся равноосные частицы продукта объединяются в агломераты. Средний размер частиц, из которых состоит продукт равен 180-230 нм.

Выводы: было установлено, что в режиме твердопламенного горения из систем, состоящих из диоксида кремния, азид натрия и галоидных солей кремния и алюминия был получен сиалон состава $Si_3Al_3O_3N_5$.

Ключевые слова: песок, сиалон, диоксид кремния, прекурсор, галоидная соль, азид натрия, СВС.

Ссылка для цитирования:

Валяева М.Е. Синтез сиалона из СВС-системы в режиме твердопламенного горения / М.Е. Валяева, Л.А. Кондратьева // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 03. – С. 4 – 13. doi: 10.30987/2782-5957-2023-3-4-13.

Original article

Open Access Article

SYNTHESIS OF SIALONE FROM SHS SYSTEM IN THE MODE OF SOLID-FLAME COMBUSTION

Maria Evgenievna Valyaeva^{1✉}, Lyudmila Aleksandrovna Kondratieva²

^{1,2} Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

¹ valiaeva.maria@yandex.ru

² schiglou@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3940-9511>

Abstract

The study objective is to synthesize sialon powder in the mode of solid-flame combustion of silicon

dioxide (sand) - sodium azide – silicon and aluminum halogenide systems.

The task to which the paper is devoted is to find out the initial charge composition (choosing from several sand samples the best in terms of the amount of impurities and the gradation factor), which synthesis gives $\text{Si}_3\text{Al}_3\text{O}_3\text{N}_5$ sialon in the mode of solid-flame combustion.

Research methods used to obtain and analyze the synthesized product in SHS-Az mode: self-propagating high-temperature synthesis using sodium azide and halogenides in SHS-Az laboratory reactor, X-ray fractional analysis on ARL X'trA-138 diffractometer and the study of microstructure by a scanning electron microscope JSM-6390A.

The novelty of the work is in the fact that for the first time SHS-Az method is applied to conduct re-

search on the synthesis of sialon from systems which use bank sand as silicon dioxide.

The study results on the synthesis of sialon in the mode of solid-flame combustion show that the final product, in addition to $\beta\text{-Si}_3\text{Al}_3\text{O}_3\text{N}_5$ consists of some more phases such as Si_3N_4 : AlN , Si , NaF и Na_3AlF_6 . It is found out that during combustion the formed uniform particles of the product are combined into agglomerate. The average size of the particles that make up the product is 180-230 nm.

Conclusions: it is found out that $\text{Si}_3\text{Al}_3\text{O}_3\text{N}_5$ sialon is obtained in the mode of solid-flame combustion of silicon dioxide (sand) - sodium azide – silicon and aluminum halogenide systems.

Keywords: sand, sialon, silicon dioxide, precursor, salt halide, sodium azide, SHS.

Reference for citing:

Valyaeva ME, Kondratieva LA. Synthesis of sialone from SHS system in the mode of solid-flame combustion. *Transport Engineering*. 2023; 3:4-13. doi: 10.30987/2782-5957-2023-3-4-13.

Введение

Сиалон представляет собой твердый раствор на основе нитрида кремния переменного состава, в котором атомы кремния и азота заменены атомами алюминия и кислорода. Материалы на основе сиалона обладают уникальными физическими и химическими свойствами, такими как высокая термостойкость, высокая коррозионная стойкость, высокая износостойкость и т. д. [1]. Такие материалы на основе сиалона применяются для изготовления люминофоров, режущих инструментов, мембран, фотокатализаторов, носителей катализатора и т. д. [2]. В настоящее время известно много методов получения сиалона [3-13], из которых самыми основными являются реакционное спекание смеси порошков нитридов, искровое плазменное спекание, металлотермический процесс и самораспространяющийся высокотемпературный синтез [14]. В данной работе синтез сиалона проводился в режиме твердопламенного горения, из шихт состоящих из оксида кремния, азиды натрия и галогенидов алюминия и кремния. Высокотемпературная технология самораспространяющегося синтеза порошкового продукта с применением в качестве исходных компо-

нентов шихты неорганических азидов и галоидных солей называется азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и обозначается как СВС-Аз [15, 16]. Давно известно, что для уменьшения размеров синтезируемых порошков по технологии СВС-Аз вместо элементных порошков используют галоидные соли азотируемых элементов, то есть прекурсоры. Применение в процессах высокотемпературного синтеза прекурсоров:

- ведет к снижению расходов на компоненты исходной шихты, а, следовательно, и целевого продукта;
- позволяет использовать выделенный из галогенида активный азотируемый элемент, не имеющий оксидной пленки;
- позволяет осуществлять получение порошковых продуктов по механизму «газ-твердое».

Одним из компонентов СВС-шихты для синтеза сиалона по азидной технологии СВС предлагается использовать песок, являющийся источником диоксида кремния SiO_2 . Песок – это мелкообломочная рыхлая осадочная горная порода, представляющая собой смесь частиц минералов разрушенных горных пород [17].

Материалы и методы

Для изучения качества песка были отобраны пять образцов, по одному образцу от каждого вида песка (рис. 1). Химиче-

ский элементный состав образцов песка представлен в табл. 1.



Рис. 1. Внешний вид песка, используемого в качестве образцов для исследования
 Fig. 1. Appearance of the sand used as samples for research

Таблица 1

Элементный состав образцов песка

Table 1

Elemental composition of sand samples

Химические элементы, %	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4	Образец № 5
Кремний (Si)	11,95	26,00	28,88	39,68	43,95
Алюминий (Al)	3,01	7,20	9,46	5,04	7,09
Кислород (O)	49,06	40,63	34,28	42,02	37,47
Углерод (C)	19,20	7,82	2,62	6,40	4,19
Кальций (Ca)	0,63	4,12	3,65	0,87	1,59
Железо (Fe)	1,00	9,86	14,66	4,28	3,46
Магний (Mg)	1,06	4,01	3,57	0,74	1,02
Калий (K)	0,44	0,27	2,39	0,80	1,15
Натрий (Na)	0,75	0,09	0,50	0,18	0,07

Для исследования возможности синтеза сиалона в режиме твердопламенного горения по азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза были использованы порошки азид натрия (белые гексагональные кристаллы с содержанием основного вещества NaN_3 – 98,7 масс. %) и в качестве прекурсоров азотируемого элемента галоидные соли:

– гексафторсиликат аммония (соль в виде кристаллов белого цвета с содержанием основного вещества $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ – 99,1 масс. %);

– фторид алюминия (соль в виде кристаллов белого цвета с содержанием основного вещества AlF_3 – 99,3 масс. %) или гексафторалюминат натрия Na_3AlF_6 (соль в виде кристаллов белого цвета с содержанием основного вещества Na_3AlF_6 – 99,1 масс. %).

Первоначально были проведены исследования по установлению качества образцов песка по двум характеристикам: состав, характеризующийся количеством примесей и модуль крупности.

Определение состава песка, а именно

наличия глинистых отложений в его составе, было проведено методом промывания песка в воде. Воду в количестве 100 мл наливали в прозрачные пластиковые стаканы. Такое количество воды было обусловлено тем, что объем жидкости в стакане должен быть в 2-3 раза больше количества объема песка, добавляемого в стакан. Затем песок засыпался в стаканы с водой. Полученные суспензии перемешивались и убирались на 24 часа для отстаивания (рис. 2). По истечении установленного времени жидкость из каждого стакана отдельно сливалась в другой прозрачный пустой стакан. Производился визуальный анализ слитой жидкости в стакане (рис. 3). Также были поставлены эксперименты на образцах песка, для установления присутствия в их составе глинистых отложений, без операции промывки в воде с помощью сжатия в кулаке горсти сухого песка.

Для синтеза сиалона в режиме твердопламенного горения по азидной технологии СВС были выбраны две системы, состоящие из песка (диоксида кремния, азид натрия и галогенидов алюминия и

кремния):

– система 1 « $2\text{SiO}_2 + 15\text{NaN}_3 + 3\text{AlF}_3 + (\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ »,

– система 2 « $2\text{SiO}_2 + 24\text{NaN}_3 + 3\text{Na}_3\text{AlF}_6 + (\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ ».

Исследование возможности синтеза силана в режиме СВС из выбранных систем осуществлялось при условиях относительной плотности шихты ($\delta = 0,34$) образца диаметром 3 см в лабораторном реакторе СВС-Аз при давлении азота в процессе синтеза 4 МПа.

Компоненты шихты взвешивались на электронных весах и смешивались в фарфоровой ступке. Далее собирался образец для проведения исследований: смесь сыпалась в стаканчик из кальки и помещалась на предметную полочку лабораторного реактора СВС-Аз. Для измерения температуры горения в образец вводили термомпары. Реактор заполнялся азотом. Инициирование химической реакции проводилось с помощью вольфрамовой спирали, на которую подавалось напряжение. После инициирования шихта воспламенялась. После завершения процесса горения обра-

зец выдерживали в реакторе без сброса давления в течение 15...20 минут. По истечении времени сбрасывалось давление и образец извлекался из реактора. Образец зачищался, то есть с его поверхности счищались обугленные частицы калькового стаканчика и затем полученный продукт подвергался измельчению. Порошковый продукт промывался водой и фильтровался с помощью воронки Бюхнера и колбы Бунзена. Сушка промытого продукта проводилась на открытом воздухе [18, 19, 20].

Все пять образцов песка (рис. 1) были подвергнуты микроскопическому исследованию и энергодисперсионному элементному анализу на растровом электронном микроскопе JSM-6390A (табл. 1).

Все СВС-продукты, синтезированные в режиме СВС-Аз были исследованы:

– на дифрактометре ARL X'tra-138 и получены рентгенограммы конечного продукта (рентгенофазовый анализ (РФА)),

– на растровом электронном микроскопе JSM-6390A и получены фотографий структуры конечного продукта (результаты по морфологии и размеру частиц) [21].

Результаты

Исследования пяти исходных образцов песка на растровом электронном микроскопе установили морфологию и размер

частиц песка. Анализ внешнего вида и структуры песчаных частиц 5-ти исходных образцов песка представлен в табл. 2.

Таблица 2

Анализ внешнего вида и структуры исходных образцов песка

Table 2

Analysis of the appearance and structure of the initial sand samples

Номер образца	Форма песчаных частиц	Средний размер частиц
№ 1	Продолговатая с гладкими закругленными и острыми отколотыми гранями	индивидуальные частицы (в диаметре): 150-250 мкм
№ 2	Продолговатая и округлая с гладкими закругленными и острыми отколотыми гранями	индивидуальные частицы: 300-400 мкм
№ 3	Округлая с гладкими закругленными гранями	агломерат: от 300 мкм выше; индивидуальные частицы: 20-30 мкм
№ 4	Продолговатая и округлая с гладкими закругленными гранями	индивидуальные частицы: 200-300 мкм
№ 5	Продолговатая и округлая с гладкими закругленными и острыми отколотыми гранями	индивидуальные частицы (в диаметре): 200-300 мкм

Результаты исследований образцов песка методом промывания в воде и установлению его состава, а именно присут-

ствия в нем глинистых отложений, представлены на рис. 2 и 3. На рис. 2 показаны прозрачные пластиковые стаканы с пятью

суспензиями (песок в воде). А на рис. 3 показаны образцы слитой воды, после отстаивания суспензий в течении 24 часов.

Размер частиц песка является важным параметром, оказывающих сильное

влияние на дальнейшее применение песка. Поэтому были проведены экспериментальные исследования с целью определения размера частиц песка.



Рис. 2. Образцы суспензий (песок в воде)
Fig. 2. Slurry samples (sand in water)



Рис. 3. Образцы слитой воды
Fig. 3. Samples of drained water

Для определения размера частиц песка использовались сита с разным размером ячеек (1 мм; 0,8 мм; 0,6 мм). Каждый образец песка просеивался поочередно через все сита. И затем вычислялось процентное соотношение частиц, оставшихся и не прошедших через ячейки сита, к общей массе исследуемого образца песка:

$$M_k = \frac{A_1 + A_{0,8} + A_{0,6}}{100},$$

где A_1 , $A_{0,8}$, $A_{0,6}$ – количество оставшихся частиц песка на ситах с размером ячейки 1, 0,8 и 0,6 мм соответственно.

В табл. 3 приведены результаты расчетов модуля крупности для каждого образца песка и показано к какой группе его можно отнести [22].

Таблица 3

Результаты исследования размера песчаных частиц

Table 3

Results of studying the size of sand particles

Номер образца	Модуль крупности (M_k) (среднее значение)	Группа
№ 1	0,25	очень тонкий
№ 2	0,80	тонкий
№ 3	1,60	мелкий
№ 4	1,03	очень мелкий
№ 5	1,15	очень мелкий

Все продукты, полученные в режиме твердопламенного горения методом СВС-Аз в системах 1 и 2 были исследованы на фазовый состав и установлена структура

продукта (морфология и размер частиц). Дифрактограммы целевых продуктов горения, полученных по технологии СВС-Аз представлены на рис. 4 и 5.

Результаты исследования продуктов, синтезированных в режиме горения методом СВС-Аз в системах 1 и 2, на растро-

вом электронном микроскопе представлены на рис. 6.

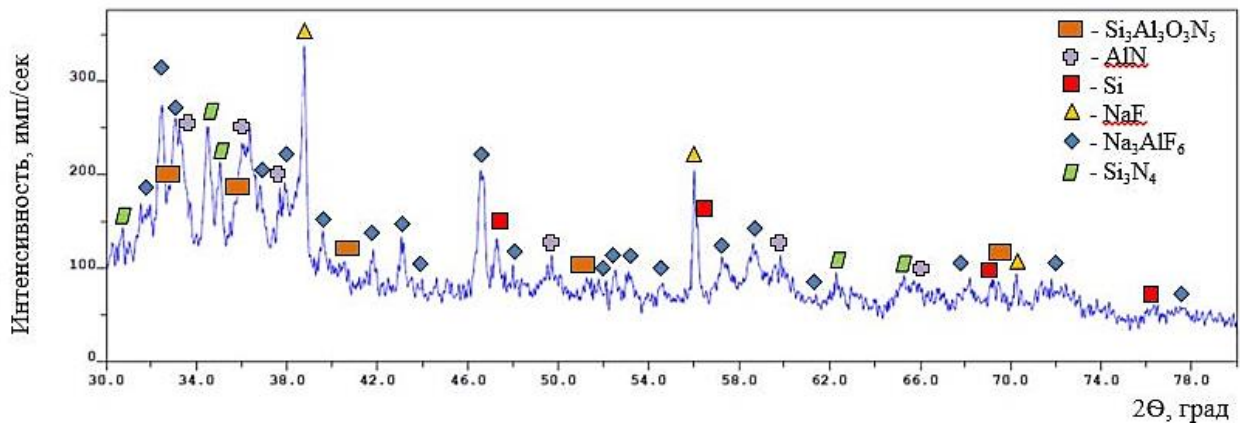


Рис. 4. Дифрактограмма целевого продукта, полученного из системы 1 « $2SiO_2+15NaN_3+3AlF_3+(NH_4)_2SiF_6$ »

Fig. 4. Diffraction pattern of the target product obtained from the system 1 « $2SiO_2+15NaN_3+3AlF_3+(NH_4)_2SiF_6$ »

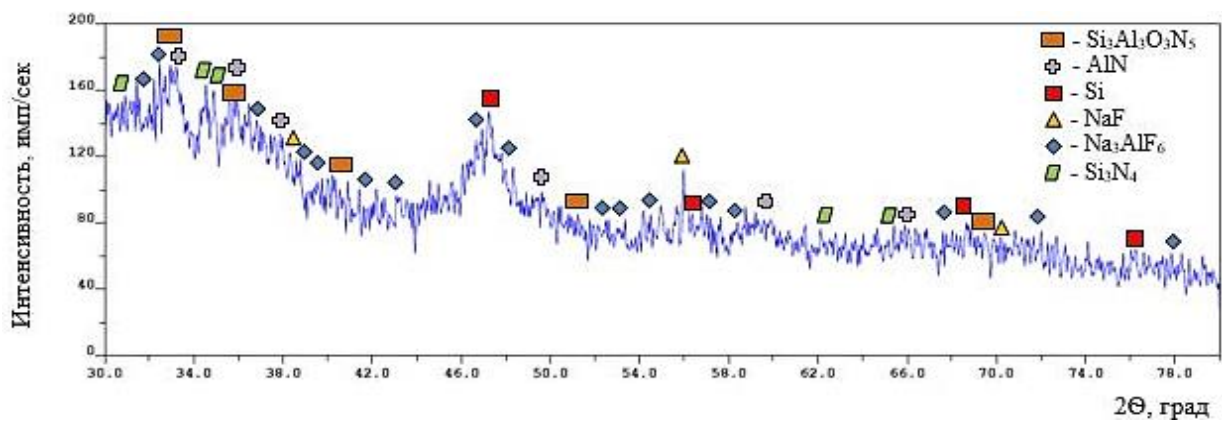
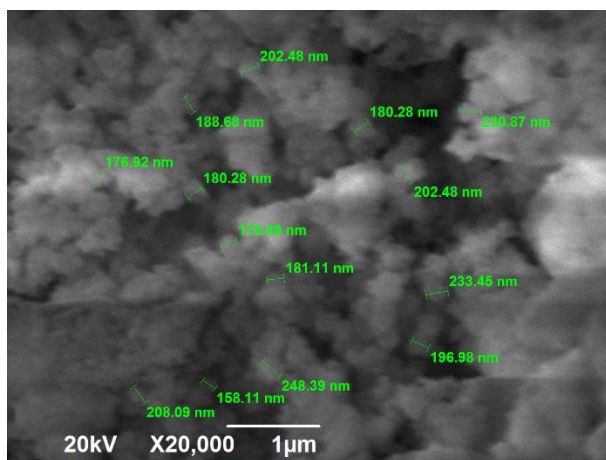
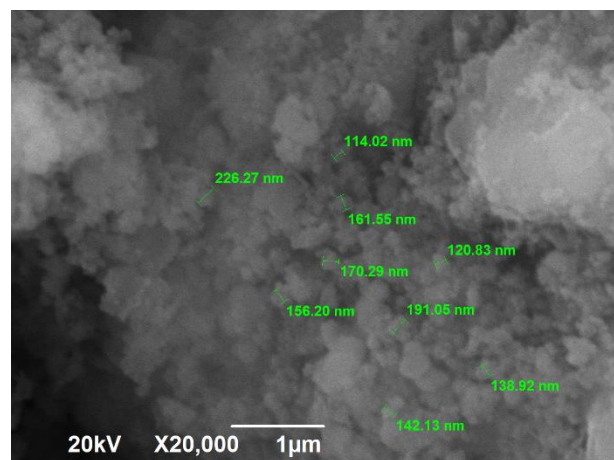


Рис. 5. Дифрактограмма целевого продукта, полученного из системы 2 « $2SiO_2+24NaN_3+3Na_3AlF_6+(NH_4)_2SiF_6$ »

Fig. 5. Diffraction pattern of the target product obtained from the system 2 « $2SiO_2+24NaN_3+3Na_3AlF_6+(NH_4)_2SiF_6$ »



а)



б)

Рис. 6. Структуры продуктов, полученных в режиме горения:

а) система 1 « $2SiO_2+15NaN_3+3AlF_3+(NH_4)_2SiF_6$ », б) система 2 « $2SiO_2+24NaN_3+3Na_3AlF_6+(NH_4)_2SiF_6$ »

Fig. 6. Structures of the products obtained in gorenje mode:

а) system 1 « $2SiO_2+15NaN_3+3AlF_3+(NH_4)_2SiF_6$ », б) system 2 « $2SiO_2+24NaN_3+3Na_3AlF_6+(NH_4)_2SiF_6$ »

Обсуждение

Энергодисперсионный элементный анализ показал, что в составе изучаемых образцов песка находятся химические элементы Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, O и C (табл. 1), входящие в состав соединений, из которых состоит песок. Оксид кремния, согласно данным табл. 1 по элементу кремния, в наибольшем количестве наблюдается в образцах № 4 и № 5. В связи с этим, данные образцы песка можно отнести к мономинеральным пескам. В образцы песка № 1, № 2 и № 3 по своему химическому составу являются полиминеральными песками.

Частицы песка во всех исследуемых образцах имеют продолговатую и/или округлую форму с гладкими закругленными и/или острыми отколотыми гранями. Диапазон среднего размера песчаных частиц в исследуемых образцах песка находился в пределах 150...350 нм (табл. 2).

Проведенные эксперименты по установлению в составе образцов песка глинистых отложений показали, что в пластиковых стаканах, где находились образцы песка № 3 и № 4, вода осталась мутной даже после отстаивания в течении 24 часов. Данный факт указывает на наличие в составе этих образцов глины (рис. 2). Результаты экспериментов образцов № 1, № 2 и № 5 показали, что вода в пластиковых стаканах после отстаивания практически прозрачна, как чистая вода (рис. 3), это говорит об отсутствии в составе данных образцов каких либо глинистых отложений [22].

Результаты испытаний на наличие глинисты отложений в составе исследуемых образцов, проведенные с помощью сжатия в кулаке горсти сухого песка показали, что образцы № 3 и № 4 после сжатия немного склеились в ком, а образцы № 1, № 2, № 5 после сжатия не слиплись, а рассыпались. Следовательно, можно утверждать, что в составе образцов № 3 и № 4 присутствует глина [22].

Расчеты модуля крупности для каждого образца песка (табл. 3) показали, что образец песка № 3 можно отнести к группе мелкого песка. Мелкий песок больше всего используется в строительстве, для изго-

товления кирпича и цементного раствора. Образцы песка № 4 и № 5 входят по значениям модуля крупности ($M_k = 1,0...1,5$) в группу очень мелкой фракции. Такие пески применяются при изготовлении мелкодисперсных веществ. Образцы № 1 и № 2, согласно расчетам (табл. 3), относятся к группе тонкого и очень тонкого песка. Такой песок используется в декоративных работах [22].

На основании проведенных экспериментов в качестве исходного компонента в СВС-шихтах для получения сиалона был выбран песок образца № 5. Данный песок имеет оптимальный состав по наличию примесей и обладает подходящим размером частиц, позволяющим получать хорошо перемешанную шихту, способную к твердопламенному горению в реакторе СВС.

Согласно результатам рентгенофазового анализа, представленным на рис. 4, продукт синтеза системы 1 « $2SiO_2+15NaN_3+3AlF_3+(NH_4)_2SiF_6$ » состоял из нескольких фаз: β -сиалон $Si_3Al_3O_3N_5$ (14 масс. %), нитрид кремния Si_3N_4 (17 масс. %), нитрид алюминия AlN (17 масс. %), свободный кремний Si (10 масс. %), фторид натрия NaF (23 масс. %), гексафторалюминат натрия Na_3AlF_6 (19 масс. %) [23].

Согласно результатам рентгенофазового анализа, представленным на рис. 5, продукт синтеза системы 2 « $2SiO_2+24NaN_3+3Na_3AlF_6+(NH_4)_2SiF_6$ » состоял из нескольких фаз: β -сиалон $Si_3Al_3O_3N_5$ (19 масс. %), нитрид кремния Si_3N_4 (17 масс. %), нитрид алюминия AlN (18 масс. %), свободный кремний Si (15 масс. %), фторид натрия NaF (12 масс. %), гексафторалюминат натрия Na_3AlF_6 (19 масс. %) [23].

Оценка морфологии частиц порошкового продукта и определение среднего размера частиц, проводились по фотографиям микроструктуры продукта (рис. 6). Было установлено, что частицы продукта, синтезированного в системе 1 « $2SiO_2+15NaN_3+3AlF_3+(NH_4)_2SiF_6$ » имеют равноосную структуру с большой развитой поверхностью (рис. 6 а). Частицы объеди-

нены в агломераты и средний размер отдельных частиц составляет 180...230 мкм.

Частицы продукта, синтезированного в системе $2\langle 2\text{SiO}_2+24\text{NaN}_3+3\text{Na}_3\text{AlF}_6+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6 \rangle$ также имеют равноосную структуру с большой развитой поверхностью (рис. 6 б). Частицы объединены в агломераты со средним размером отдельных частиц 150-200 нм.

Таким образом, проведенные исследования свойств 5-ти образцов песка позволили определить образец с наилучшими параметрами, подходящими для его использования в СВС-шихтах $\langle 2\text{SiO}_2+15\text{NaN}_3+3\text{AlF}_3+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6 \rangle$ и $\langle 2\text{SiO}_2+24\text{NaN}_3+3\text{Na}_3\text{AlF}_6+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6 \rangle$ для

синтеза сиалона в режиме твердопламенного горения по азидной технологии СВС. Установлено, что применение в качестве исходного компонента СВС-шихт песка, являющегося источником SiO_2 , позволяет синтезировать целевой продукт содержащий сиалон состава $\text{Si}_3\text{Al}_3\text{O}_3\text{N}_5$. Однако, кроме сиалона целевой продукт представляет собой многофазный продукт, в котором присутствуют фазы других соединений: Si_3N_4 , AlN , Na_3AlF_6 , NaF и Si . Частицы продукта в процессе горения объединялись в агломераты, средний размер частиц из которых они состояли варьировался от 100 до 250 нм. Форма частиц преимущественно равноосная с большой развитой поверхностью.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yin L, Zhao K, Ding Y, Wang Y, He Z, Huang S. Effect of hBN addition on the fabrication, mechanical and tribological properties of Sialon materials. *Ceramics International*. 2022. № 48 (2022). PP. 7715–7722.
2. Bolgaru K., Reger A., Vereshchagin V., Akulinkin A. Combustion synthesis of β -SiAlON from a mixture of aluminum ferrosilicon and kaolin with nitrogen-containing additives using acid enrichment. *Ceramics International*.
3. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: теория и практика / Сборник научных статей под ред. Е.А. Сычева. Черногловка: Территория, 2001. 432 с.
4. Мержанов А.Г., Мукасян А.С. Твердопламенное горение. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007. 336 с.
5. Merzhanov A.G. Borovinskaya I.P. Historical retrospective of SHS: An autoreview. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2008. № 17(4). PP. 242-265.
6. Мержанов А.Г. Процессы горения и синтез материалов. Черногловка: ИСМАН, 1998. 512 с.
7. Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов: учебное пособие. М.: Машиностроение-1, 2007. 568 с.
8. Xanthopoulou G., Vekinis G. An overview of some environmental applications of self-propagating high-temperature synthesis. *Advances in Environmental Research*. No.5(2001). PP. 117-128.
9. Kheirandish A.R., Nekouee Kh.A., Khosroshahi R.A., Ehsani N. Self-propagating high temperature synthesis of SiAlON / *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. No.55(2015). PP. 68-79.
10. Niu J., Yi X., Nakatsugawa. I, Akiyama T. Salt-assisted combustion synthesis of β -SiAlON fine powders. *Intermetallics*. No.35(2013). PP. 53-59.
11. Li Z., Wang Z., Zhu Mengguang, Li Jinfu Zhang, Zuotai. Oxidation behavior of β -SiAlON powders fabricated by combustion synthesis. *Ceramics International*. No.42(2016). PP. 7290-7299.
12. Shahien M., Radwan M., Kirihara S., Miyamoto Y., Sakurai T. / Combustion synthesis of single-phase sialons ($z = 2-4$) / *Journal of the European Ceramic Society*. No.30(2010). PP. 1925-1930.
13. Yiyao G., Zhaobo T., Ying C., Siyuan S., Jie Z., Zhipeng X. Effect of comburent ratios on combustion synthesis of Eu-doped β -SiAlON green phosphors / *Journal of Rare Earths*. Vol. 35. No. 5. 2017. PP. 430.
14. Валяева М.Е., Кондратьева Л.А. Обзор методов получения сиалона. *Современные материалы, техника и технологии*. 2021. № 4(37). С.10-16.
15. Амосов А.П., Бичуров Г.В. Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза микро- и нанопорошков нитридов: монография. М.: Машиностроение-1, 2007. 526 с. ISBN 978-5-94275-344-3.
16. Бичуров Г.В., Шиганова Л.А., Титова Ю.В. Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза микро- и нанопорошков нитридных композиций: монография.- М.: Машиностроение, 2012. 519 с. ISBN 978-5-94275-658-1.
17. Кондратьева Л.А. Изучение состава песка, как исходного компонента СВС-систем для получения порошков сиалона и нитрида кремния. *Современные материалы, техника и технологии*. 2021. №4 (37). С. 24-29.
18. Кондратьева Л. А. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез порошков нитридных композиций Si_3N_4 -TiN, Si_3N_4 -AlN, Si_3N_4 -BN, AlN-BN, AlN-TiN, BN-TiN с применением азиды натрия и галоидных солей: специальность 01.04.17 «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества»:

дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук / Кондратьева Людмила Александровна; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2018. 881 с. Библиогр.: С. 365-401.

19. Кондратьева Л.А. Схема азидной технологии саморапространяющегося высокотемпературного синтеза порошков нитридов. *Журнал технических исследований*. 2020. Т. 6. № 1. С. 3-9.
20. Кондратьева Л.А. Изучение теоретических расчетов и экспериментальных результатов исследований получения порошка сialона методом СВС-Аз. *Современные материалы, техника и технологии*. 2020. № 3 (30). С. 27-31.
21. Кондратьева Л.А. Изучение возможности получения из осадочной горной породы порошка

нитрида кремния. *Современные материалы, техника и технологии*. 2019. № 5(26). С. 62-67.

22. Валяева М.Е., Кондратьева Л.А. Исследование свойств компонента реакционной шихты и его влияние на синтез сialона в режиме горения. *Высокие технологии в машиностроении*: сб. науч. тр. XVIII Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием, Самара. 2021. С. 207-211.
23. Кондратьева Л.А. Исследование возможности получения порошка сialона в режиме горения (СВС-Аз) с использованием речного песка. *Современные материалы, техника и технологии*. 2020. № 4 (35). С. 48-53.

REFERENCES

1. Yin L Zhao K, Ding Y, Wang Y, He Z, Huang S. Effect of hBN addition on the fabrication, mechanical and tribological properties of Sialon materials. *Ceramics International*. 2022;48 (2022):7715-7722.
2. Bolgaru K, Reger A, Vereshchagin V, Akulinkin A. Combustion synthesis of β -SiAlON from a mixture of aluminum ferrosilicon and kaolin with nitrogen-containing additives using acid enrichment. *Ceramics International*. 2022.
3. Sychev EA, editor. Self-propagating high-temperature synthesis: theory and practice. Collection of Scientific Papers; Chernogolovka: Territory; 2001.
4. Merzhanov AG, Mukasyan AS. Solid flame combustion. Moscow: TORUS PRESS; 2007.
5. Merzhanov AG, Borovinskaya IP. Historical retrospective of SHS: an autoreview. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2008;17(4):242-265.
6. Merzhanov AG. Combustion processes and synthesis of materials. Chernogolovka: ISMAN; 1998.
7. Amosov AP, Borovinskaya IP, Merzhanov AG. Powder technology of self-propagating high-temperature synthesis of materials: textbook. Moscow: Mashinostroenie-1; 2007.
8. Xanthopoulou G, Vekinis G. An overview of some environmental applications of self-propagating high-temperature synthesis. *Advances in Environmental Research*. 2001;5:117-128.
9. Kheirandish AR, Nekouee KhA, Khosroshahi RA, Ehsani N. Self-propagating high temperature synthesis of SiAlON / *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2015;55:68-79.
10. Niu J, Yi X, Nakatsugawa I, Akiyama T. Salt-assisted combustion synthesis of β -SiAlON fine powders. *Intermetallics*. 2013;35:53-59.
11. Li Z, Wang Z, Zhu Mengguang, Li Jinfu Zhang, Zuotai. Oxidation behavior of β -SiAlON powders fabricated by combustion synthesis. *Ceramics International*. 2016;42:7290-7299.
12. Shahien M, Radwan M, Kirihara S, Miyamoto Y, Sakurai T. Combustion synthesis of single-phase sialons ($z = 2-4$). *Journal of the European Ceramic Society*. 2010;30:1925-1930.
13. Yiyao G, Zhaobo T, Ying C, Siyuan S, Jie Z, Zhipeng X. Effect of comburent ratios on combustion synthesis of Eu-doped β -SiAlON green phosphors. *Journal of Rare Earths*. 2017;35(5):430.
14. Valyaeva ME, Kondratieva LA. Review of methods for obtaining sialon. *Sovremennie Materiali, Technika I Technologii*. 2021;4(37):10-16.
15. Amosov AP, Bichurov GV. Azide technology of self-propagating high-temperature synthesis of micro- and nanopowders of nitrides: monograph. Moscow: Mashinostroenie-1; 2007.
16. Bichurov GV, Shiganova LA, Titova YuV. Azide technology of self-propagating high-temperature synthesis of micro- and nanopowders of nitride compositions: monograph. Moscow: Mashinostroenie; 2012.
17. Kondratieva LA. Study of sand composition as an initial component of SHS systems for the production of sialon and silicon nitride powders. *Sovremennie Materiali, Technika I Technologii*. 2021;4(37):24-29.
18. Kondratieva LA. Self-propagating high-temperature synthesis of powders of nitride compositions Si₃N₄-TiN, Si₃N₄-AlN, Si₃N₄-BN, AlN-BN, AlN-TiN, BN-TiN using sodium azide and halide salts [dissertation]. [Samara (RF)]; Samara State Technical University; 2018.
19. Kondratieva LA. Diagram of azide technology of self-propagating high-temperature synthesis of nitride powders. *Journal of Technical Research*. 2020;6(1):3-9.
20. Kondratieva LA. Study of theoretical calculations and experimental results of studies to obtain sialon powder by SHS-Az method. *Sovremennie Materiali, Technika I Technologii*. 2020;3(30):27-31.
21. Kondratieva LA. Study of the possibility to obtain silicon nitride powder from sedimentary rock. *Sovremennie Materiali, Technika I Technologii*. 2019;5(26):62-67.
22. Valyaeva ME, Kondratieva LA. IStudy of the properties of the reaction charge component and its effect on the synthesis of sialon in the combustion mode. *High Technologies in Mechanical Engineering: Collection of Scientific Papers of the XVIII*

Russian Scientific and Practical Conference with International Participation. Samara; 2021.
23. Kondratieva LA. Study of the possibility to obtain sialon powder in the combustion mode (SHS-Az)

using bank sand. *Sovremennye Materialy, Technika I Technologii*. 2020;4 (35):48-53.

Информация об авторах:

Валяева Мария Евгеньевна – аспирант, 8927-611-03-96.

Кондратьева Людмила Александровна – профессор, доктор технических наук, доцент, 8927-200-26-60.

Valyaeva Maria Evgenievna – Postgraduate student, 8927-611-03-96.

Kondratieva Lyudmila Aleksandrovna – Professor, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, 8927-200-26-60.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 19.12.2022; одобрена после рецензирования 18.01.2023; принята к публикации 27.02.2023. Рецензент – Широбоков К.П., кандидат технических наук, доцент, ООО Научно-технический центр «ТехПром».

The article was submitted to the editorial office on 19.12.2022; approved after review on 18.01.2023; accepted for publication on 27.02.2023. The reviewer is Shiroboikov K.P., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Research and Development Centre *TechProm*.