

**СИНТЕЗ КОМПОЗИЦИИ НИТРИДОВ КРЕМНИЯ, АЛЮМИНИЯ И ЦИРКОНИЯ
АЗОТИРОВАНИЕМ В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ СЛОЖНОГО ФЕРРОСПЛАВА - ФЕРРОАЛЮМО-
СИЛИКОЦИРКОНИЯ****К.А. Болгару, В.И. Верещагин, А.А. Рeger**

Константин Александрович Болгару

Томский научный центр СО РАН, Академический просп., 10/4, Томск, Российская Федерация, 634055

E-mail: kbolgaru2008@yandex.ru

Владимир Иванович Верещагин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, просп. Ленина, 30, Томск, Российская Федерация, 634034

E-mail: vver@tpu.ru

Антон Андреевич Рeger*

Томский научный центр СО РАН, Академический просп., 10/4, Томск, Российская Федерация, 634055

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, просп. Ленина, 30, Томск, Российская Федерация, 634034

E-mail: regerwork1@gmail.com*

В работе приведены результаты исследований получения композиционного материала, содержащего нитрид кремния, нитрид циркония и нитрид алюминия, методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) азотированием ферросплава ферроалюмосиликоциркония. Представлены результаты исследования влияния давления азота, дисперсности, плотности исходного порошка ферроалюмосиликоциркония и диаметра образцов на количество поглощенного азота, скоростные и температурные характеристики горения в атмосфере азота. Показано, что при увеличении давления количество поглощенного азота, скорость горения и температура горения возрастают. При повышении плотности исходного порошка уменьшается количество поглощенного азота, скорость и температура горения. Увеличение диаметра исходных образцов, состоящих из порошка ферросплава, не приводит к значительному изменению количества поглощенного азота, при этом скорость горения падает и возрастает температура синтеза. Изменение дисперсности исходного ферроалюмосиликоциркония не влияет в значительной степени на изменение количества поглощенного азота, скорости и температуры горения. Выявлено, что распространение фронта волны горения по образцу в атмосфере азота проходит в нестационарном режиме, и полученные композиты имеют макро неоднородную структуру. Установлены оптимальные условия азотирования ферроалюмосиликоциркония: давление азота, диаметр исходного образца, дисперсность и плотность исходного порошка. Выявлены критические параметры азотирования ферроалюмосиликоциркония методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, при которых удастся реализовать формирование и продвижение фронта волны горения в исходном ферросплаве. Приведены вероятные реакции азотирования исходного материала в волне горения. Определен фазовый состав продуктов азотирования ферроалюмосиликоциркония методом рентгеннофазового анализа. Получен композиционный материал, содержащий нитрид кремния, нитрид алюминия и нитрид циркония.

Ключевые слова: ферросплав, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), нитрид циркония, нитрид кремния, нитрид алюминия, керамические композиты

SYNTHESIS OF COMPOSITE OF SILICON NITRIDE, ALUMINIUM NITRIDE, ZIRCONIUM NITRIDE FROM COMPLEX FERROALLOY – FERRO-ALUMINIUM-SILICON-ZIRCONIUM BY NITRIDING IN COMBUSTION MODE

K.A. Bolgaru, V.I. Vereshchagin, A.A. Reger

Konstantin A. Bolgaru

Tomsk Scientific Center, SB of RAS, Akademichesky ave., 10/4, Tomsk, 634055, Russia

E-mail: kbolgaru2008@yandex.ru

Vladimir I. Vereshchagin

National Research Tomsk Polytechnic University, Lenina ave., 30, Tomsk, 634034, Russia

E-mail: vver@tpu.ru

Anton A. Reger *

Tomsk Scientific Center, SB of RAS, Akademichesky ave., 10/4, Tomsk, 634055, Russia

National Research Tomsk Polytechnic University, Lenina ave., 30, Tomsk, 634034, Russia

E-mail: regerwork1@gmail.com *

In this paper a composite material consisting of silicon nitride, zirconium nitride and aluminum nitride is obtained from a complex ferro-aluminum-silicon-zirconium (FASZ) alloy by self-propagating high-temperature synthesis. The effect of the sample diameter, nitrogen pressure, the dispersity and density of the initial ferro-aluminum-silicon-zirconium powder on the amount of absorbed nitrogen, rate and temperature characteristics of combustion under the nitrogen atmosphere is investigated. It is shown that with increasing pressure the amount of absorbed nitrogen and the rate and temperature of combustion increase. Increasing the density of the initial powder leads to decreasing the amount of absorbed nitrogen and the rate and temperature of combustion. Increasing the diameter of the initial samples, consisting of ferroalloy powder, does not lead to a significant change in the amount of absorbed nitrogen, but decreases the rate of combustion and increases the temperature of synthesis. Changes in the dispersity of the initial ferro-aluminum-silicon-zirconium do not significantly affect the amount of absorbed nitrogen and the rate and temperature of combustion. It has been revealed that the combustion wave front propagates along the sample under the nitrogen atmosphere in a nonstationary mode, and the obtained composites have a macro-heterogeneous structure. The optimal conditions of nitriding ferro-aluminum-silicon-zirconium are found: nitrogen pressure, diameter of the initial sample, dispersity and density of the initial powder. The critical parameters of nitriding ferro-aluminum-silicon-zirconium by self-propagating high-temperature synthesis, at which the combustion wave front forms and propagates in the initial ferroalloy, are revealed. The probable reactions of nitriding the initial material in the combustion wave are given. The phase composition of the products obtained by nitriding ferro-aluminum-silicon-zirconium is determined by X-ray diffraction analysis. A composite material containing silicon nitride, aluminum nitride and zirconium nitride is obtained.

Key words: ferroalloy, self propagating high-temperature synthesis (SHS), zirconium nitride, silicon nitride, aluminium nitride, ceramic composite

Для цитирования:

Болгару К.А., Верещагин В.И., Регер А.А. Синтез композиции нитридов кремния, алюминия и циркония азотированием в режиме горения сложного ферросплава - ферроалюмосиликоциркония. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 7. С. 68–74

For citation:

Bolgaru K.A., Vereshchagin V.I., Reger A.A. Synthesis of composite of silicon nitride, aluminium nitride, zirconium nitride from complex ferroalloy – ferro-aluminium-silicon-zirconium by nitriding in combustion mode. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 7. P. 68–74

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых материалов и способов их получения является одной из первостепенных задач в настоящее время. Особый интерес вызывают нитриды ввиду их уникальных физико-химических свойств, в частности, большое внимание уделяется керамическим композиционным материалам на их основе [1-5].

Существует множество методов получения металлокерамических композитов на основе нитридов (термический синтез, плазмохимический синтез, горячее прессование и др.). Одним из наиболее приемлемых методов получения нитридодежащих композитных материалов является метод фильтрационного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Метод фильтрационного СВС основан на проведении высоко экзотермичных химических реакций в форме горения исходных порошков в атмосфере газообразного реагента. СВС является энергоэффективным и экологичным методом, который позволяет в короткий период времени получить материалы с уникальными свойствами. Обычно при проведении фильтрационного СВС большое влияние на протекание реакций и физико-химические свойства готовых продукт оказывают такие факторы, как дисперсность и плотность исходной шихты, давление газообразного реагента и диаметр образца [6, 7].

Традиционно в методе СВС в качестве исходной шихты используют чистые дорогостоящие порошки металлов и неметаллов [8-11]. Высокая цена и ограниченная доступность исходных реагентов затрудняют применение СВС в промышленности. Использование ферросплавов позволяет снизить себестоимость полученных материалов. Ферросплавы являются дешевыми и доступными материалами, которые производятся в многотоннажном объеме. При производстве ферросплавов образуется большое количество дисперсных отходов, которые наиболее предпочтительны для СВС процессов [12]. В работах [13-16] показано применение простых и сложных ферросплавов для получения нитридов. Следует отметить, что железо, входящее в состав сложных ферросплавов, в большинстве случаев является катализатором реакций азотирования остальных элементов, находящихся в сплаве [17].

Целью данной работы является исследование влияния основных параметров СВС на закономерности азотирования сложного ферросплава – ферроалюмосиликоциркония (ФАСЦ).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве исходного материала для азотирования в режиме горения был взят сложный ферросплав – ферроалюмосиликоцирконий промышленной марки ФСЦр30. По результатам химического анализа ФАСЦ содержит в своем составе Fe – 27,1%, Zr – 21,6%, Al – 24,8%, Si – 25,9% и примеси – 0,6 %. По результатам рентгенофазового анализа данный ферросплав является многофазным материалом и содержит следующие фазы: ZrSi₂, ZrAl₃, ZrFe₂, FeAl, Zr₄Fe₄Si₇ и Al.

Фазовый состав определяли на дифрактометре Shimadzu XRD 6000 (Япония). Химический анализ на содержание азота и кислорода был проведен на приборе LEKO-ONH 836 (США) в Томском центре коллективного пользования (Том ЦКП).

Вольфрам-рениевыми термопарами ВР5/20 измеряли температуры горения ФАСЦ в атмосфере азота. При помощи АЦП LA20USB регистрировали сигнал и обрабатывали его на персональном компьютере.

Предварительно порошок измельчали до размера частиц менее 100 мкм и помещали в сушильный вакуумный шкаф на 3 ч при температуре 150 °С для удаления воды и летучих примесных соединений.

Азотирование ФАСЦ проводили в установке постоянного давления объемом 3 л с рабочим давлением 10 МПа. Инициирование реакции горения осуществляли с помощью электрического импульса, передаваемого от трансформатора.

Для проведения азотирования порошок ферроалюмосиликоциркония засыпали в цилиндрическую газопроницаемую сетку, установленную на подставке. Подставку с сеткой помещали в установку и герметично закрывали. Для инициирования реакции горения сверху исходной шихты насыпали поджигающую смесь. К поджигающей смеси подвели спираль, через которую проводили электрический импульс. После подачи электрического импульса происходила яркая вспышка, и затем наблюдалось формирование и движение фронта волны горения. После полного прохождения волны горения, полученный материал выдерживали в атмосфере азота до полного остывания и вынимали для дальнейших физико-химических исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Отличительной особенностью сложного ферросплава – ФАСЦ является то, что содержание всех элементов в сплаве одного порядка от 21,6 мас. %

(Zr) до 27,1 мас. % (Fe) и алюминий находится в несвязанном виде.

Горение ферроалюмосиликоциркония происходит в нестационарном режиме. При нестационарном режиме горения в объеме исходной заготовки распространение фронта волны горения осуществляется с непостоянной скоростью. Продукт азотирования ФАЦЦ неоднородный и имеет большое количество трещин. Полученный материал состоит из фаз: AlN, ZrN, α -Fe, Si₃N₄, FeSi (рис. 1). Присутствие фазы FeSi, содержащейся в исходном материале, свидетельствует о незавершенности процесса нитридообразования.

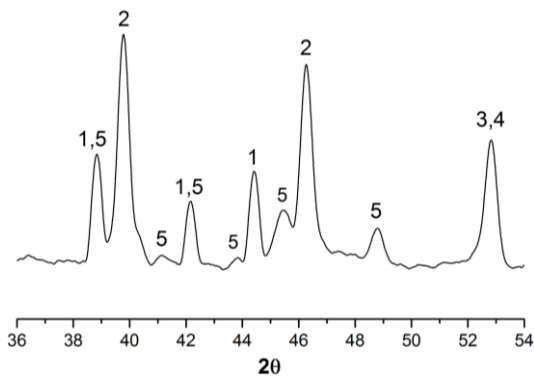
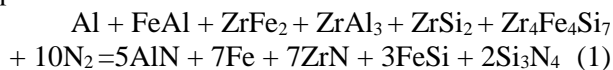


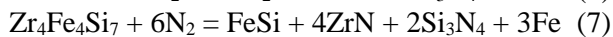
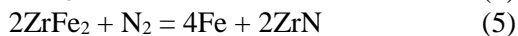
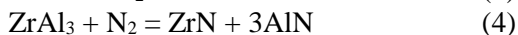
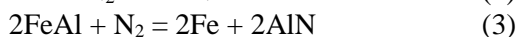
Рис. 1. Фрагмент рентгенограммы азотированного ФАЦЦ при P=6 МПа и d=40 мм (1- AlN, 2 - ZrN, 3 - α -Fe, 4 - FeSi, 5 - Si₃N₄)
 Pic. 1. X-ray diffraction pattern of sample of FSAZ at P=6 MPa и d=40 mm (1- AlN, 2 - ZrN, 3 - α -Fe, 4 - FeSi, 5 - Si₃N₄)

Процесс азотирования ФАЦЦ сопровождается рядом сопряженных реакций (несколько реакций, из которых одна дает заметный выход продуктов лишь в условиях, когда идет другая реакция).

Суммарная реакция синтеза нитридов азотирования исследуемого ферросплава в режиме горения:



Вероятные сопряженные реакции, в том числе разложения с образованием нитридов.



Металлическое железо образуется по реакциям (3), (5) и (7). По реакции (7) происходит образование ферросилиция, которого в исходном сплаве нет.

Основными факторами, которые влияют на закономерности протекания реакций горения в

фильтрационном СВС, являются давление газообразного реагента (P, 0,5-7,0 МПа), дисперсность (D, -40 - 100 мкм) и плотность засыпки исходного порошка (ρ , 2,20-3,15 кг/м³), диаметр образца (d, 20-60 мм).

Давление азота

При азотировании ферросплавов методом СВС одним из главных параметров синтеза является давление азота. Величина давления значительно влияет на характеристики горения и возможность реализации химических реакций в форме волны горения в целом. Как правило, ускорение фильтрации азота к зоне реакции приводит к увеличению количества поглощенного азота, скорости и температуры горения. Однако при определенном значении давления азота фильтрация перестает быть лимитирующей стадией в химической реакции порошка с азотом, и значение количества поглощенного азота выходит на свой максимум. К примеру, данная зависимость характерна для ферросплава – феррованадия [18].

Азотирование ФАЦЦ проводили в интервале давления азота от 0,5 до 6 МПа. Минимальное давление азота, при котором возможно реализовать полное прохождение фронта волны горения по образцу, составляет 0,5 МПа. В пределах давления от 2 до 7 МПа количество поглощенного азота изменяется незначительно (12,3-14%) и достигает своего максимального значения (14%) при давлении 6 МПа (рис. 2). При повышении давления азота наблюдается увеличение скорости распространения фронта волны горения. В интервале давления от 0,5 до 6 МПа максимальная температура горения составляет 2100 °С.

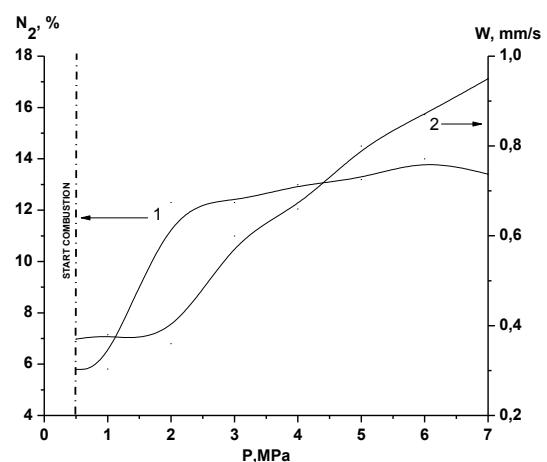


Рис. 2. Зависимость количества поглощенного азота (N) (1) и скорости горения (W) (2) от давления азота (d=40 мм, ρ =2,3 кг/м³ D_M=100 мкм)

Fig. 2. Content of nitrogen (N) and combustion rate (W) as a function of nitrogen pressure. (d=40 mm, ρ =2.3 kg/m³ D=100 μ m)

Плотность засыпки исходного порошка

При возрастании плотности исходного порошка ферросплавов в реакциях фильтрационного горения возникают фильтрационные трудности.

Исследования влияния плотности на характеристики горения порошка ФАСЦ в атмосфере азота проводили в интервале плотности от 2,20 до 3,15 кг/см³. Увеличение плотности исходных образцов приводит к снижению количества поглощенного азота и скорости горения (рис. 3). Это объясняется тем, что при большей плотности исходного порошка расстояние между частицами становится слишком малым для проникновения азота к зоне реакции. Поэтому в дальнейших экспериментах использовали образцы насыпной плотности. Следует отметить, что образцы с высокой плотностью азотируются без образования трещин. С увеличением плотности исходных образцов происходит уменьшение температуры горения от 2100 до 1290 °С. Это также связано с тем, что с возрастанием плотности исходных образцов ухудшается фильтрация, и соответственно уменьшается количество азота, поступающего к зоне реакции.

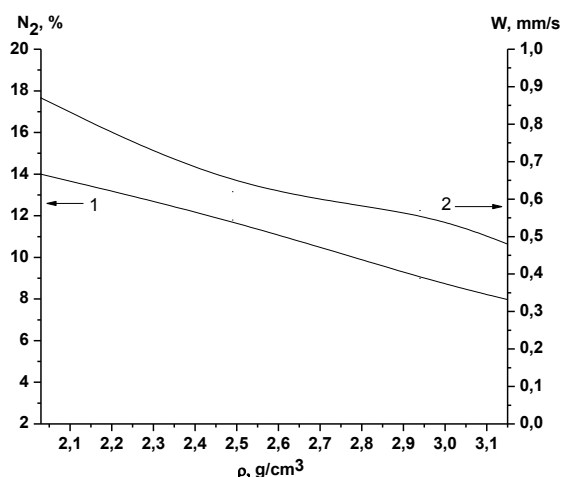


Рис. 3. Зависимость количества поглощенного азота (N) (1) и скорости горения (W) (2) от плотности порошка (P=6 МПа, D=40мм, D_m=100 мкм)

Fig. 3. Content of nitrogen (N) and combustion rate (W) as a function of density of the powder. (P=6 MPa, d=40mm, D_m=100 μm)

Диаметр образца засыпки порошка

Диаметр образцов засыпок порошка влияет на характеристики горения главным образом изменением теплопотерь. Теплопотери в фильтрационном СВС складываются из излучения тепла химических реакций в объем реактора и на прогрев исходной шихты. Увеличение диаметра исходных образцов позволяет уменьшить теплопотери излучением тепла в объем реактора. Данный эффект

приводит к повышению температуры горения, однако с увеличением диаметра возрастает объем исходной засыпки и соответственно затрачивается больше тепла на прогрев шихты. С увеличением диаметра возникают фильтрационные трудности, концентрация азота в зоне реакции значительно уменьшается, что приводит к меньшему количеству поглощенного азота (рис. 4).

Исследование проводили в диапазоне диаметров образцов от 20 до 60 мм. При диаметре менее 20 мм не удалось реализовать реакции горения порошка ФАСЦ. На рис. 4 показано, что с увеличением диаметра количество поглощенного азота в продуктах синтеза изменяется незначительно, а скорость горения уменьшается. При изменении диаметра образцов от 20 до 60 мм происходит повышение температуры горения с 1980 до 2180 °С соответственно. Оптимальным диаметром исходных образцов, при котором наблюдается максимальное количество поглощенного азота, является 40 мм.

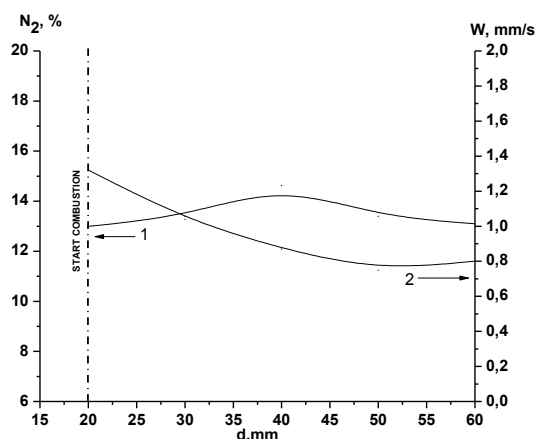


Рис. 4. Зависимость количества поглощенного азота (N) (1) и скорости горения (W) (2) от диаметра образца (P=6 МПа, ρ=2,3 кг/м³, D_m=100 мкм)

Fig. 4. Content of nitrogen (N) and combustion rate as a function of the diameter. (P=6 MPa, ρ=2.3 kg/m³, D_m=100 μm)

Дисперсность исходного порошка

Уменьшение дисперсности исходного порошка приводит к увеличению площади реагирующей поверхности, что, как правило, приводит к большему количеству связанного азота в полученных образцах и скорости горения. К примеру, данная зависимость наблюдается при горении порошков ферросиликоалюминия [19] и ферросилиция [20].

Использование в качестве исходного порошка ФАСЦ различной дисперсности (менее 40 мкм, менее 63 мкм и менее 100 мкм) не приводит к значительному изменению количества поглощенного азота и скорости горения (рис. 5). При уменьшении

дисперсности увеличивается площадь соприкосновения порошка с азотом, что теоретически должно привести к возрастанию количества поглощенного азота, однако также увеличивается скорость продвижения фронта волны горения. При различной дисперсности исходного порошка температура горения ФАСЦ в атмосфере азота изменяется в пределах погрешности с 2120 до 2100 °С. Технологически выгодно использовать порошок ФАСЦ менее 100 мкм так как после измельчения в шаровой мельнице порошок состоит на 98% из фракции менее 100 мкм.

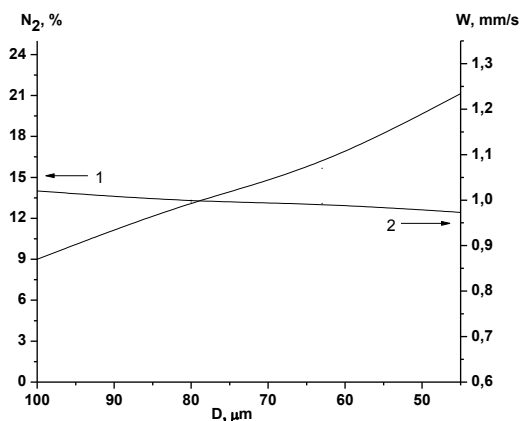


Рис. 5. Зависимость количества поглощенного азота (N) (1) и скорости горения (W) (2) от дисперсности порошка ($P=6$ МПа, $D_M=40$ мм, $\rho=2,3$ кг/м³)

Fig. 5. Content of nitrogen (N) and combustion rate (W) as a function of the dispersity of the powder. ($P=6$ МПа, $D=40$ мм, $\rho=2,3$ кг/м³ исходного образца)

Как правило, порошки ферросплавов не азотируются в режиме горения в отсутствие мелкой фракции. Однако в случае с порошком ФАСЦ

удалось реализовать горение в атмосфере азота в отсутствие мелкой фракции (менее 40 мкм, менее 63 мкм). Исследования показали, что ФАСЦ поглощает большее количество азота относительно полидисперсного порошка в отсутствие фракции менее 40 мкм и менее 63 мкм. Это связано с тем, что образование капель расплава, затрудняющих фильтрацию азота, происходит значительно быстрее из мелких частиц.

ВЫВОДЫ

По результатам исследований влияния давления азота, диаметра исходных образцов, дисперсности и плотности порошка на количество поглощенного азота, скорость и температуру горения в атмосфере азота сложного ферросплав – ферроалюмосиликоциркония:

1) При давлении азота менее 0,5 МПа и диаметре образцов менее 20 мм реализовать реакции горения исследованного ферросплав невозможно.

2) Порошок ФАСЦ горит в атмосфере азота без мелкой фракции (менее 40 мкм и менее 63 мкм), вероятной причиной этого является наличие свободного (несвязанного) алюминия в исходном порошке.

3) Оптимальными условия азотирования порошка ФАСЦ соответствуют значениям давления азота $P = 6$ МПа, диаметра исходных образцов $d = 40$ мм, дисперсности $D < 100$ мкм и плотности $\rho = 2,3$ кг/м³ исходного образца.

4) Продукты азотирования ФАСЦ являются многофазными и в качестве основных фаз содержат фазы нитрида кремния, нитрида циркония, нитрида алюминия и α -Fe.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимова Н.С. Основные виды композиционных материалов и керамики. Калуга: КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2019. 32 с.
2. Khader I., Koplin C., Schröder C., Stockmann J., Beckert W., Kunz W., Kailer A. Characterization of a silicon nitride ceramic material for ceramic springs. *J. Eur. Ceramic Soc.* 2020. V. 40. N 10. P. 3541-3554. DOI: 10.1016/j.jeurceram-soc.2020.03.046.
3. Yugeswaran S., Ananthapadmanabhan P. V., Kumaresan L., Kuberan A., Sivakumar S., Shanmugavelayutham G., Ramachandran K. Synthesis of zirconium nitride from zircon sand by transferred arc plasma assisted carbothermal reduction and nitridation process. *Ceramics Internat.* 2018. V. 44. N 12. P. 14789-14796. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.05.109.
4. Kudyakova V.S., Shishkin R.A., Elagin A.A., Baranov M.V., Beketov A.R. Aluminium nitride cubic modifications synthesis methods and its features. Review. *J. Eur. Ceramic Soc.* 2017. V. 37. N 4. P. 1143-1156. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.11.051.
5. Лупарев Н.В., Сорокин Б.П., Аксененков В.В. Получение и исследование тонких пленок нитрида алюминия-скандия в составе пьезоэлектрических слоистых структур.

REFERENCES

1. Gerasimova N.S. Main types of composite materials and ceramics. Kaluga: KF MGTU n. N.E. Bauman. 2019. 32 p. (in Russian).
2. Khader I., Koplin C., Schröder C., Stockmann J., Beckert W., Kunz W., Kailer A. Characterization of a silicon nitride ceramic material for ceramic springs. *J. Eur. Ceramic Soc.* 2020. V. 40. N 10. P. 3541-3554. DOI: 10.1016/j.jeurceram-soc.2020.03.046.
3. Yugeswaran S., Ananthapadmanabhan P. V., Kumaresan L., Kuberan A., Sivakumar S., Shanmugavelayutham G., Ramachandran K. Synthesis of zirconium nitride from zircon sand by transferred arc plasma assisted carbothermal reduction and nitridation process. *Ceramics Internat.* 2018. V. 44. N 12. P. 14789-14796. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.05.109.
4. Kudyakova V.S., Shishkin R.A., Elagin A.A., Baranov M.V., Beketov A.R. Aluminium nitride cubic modifications synthesis methods and its features. Review. *J. Eur. Ceramic Soc.* 2017. V. 37. N 4. P. 1143-1156. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.11.051.
5. Luparev N.V., Sorokin B.P., Akseenkov V.V. Synthesis and research of aluminum-scandium nitride films as a part of piezoelectric layered structure based on synthetic diamond single crystalline substrates. *ChemChemTech [Izv. Vyssh.*

- тур с подложками из синтетического монокристалла алмаза. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 12. С. 77-84. DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.6312.
6. **Чухломина Л.А., Максимов Ю.М., Верещагин В.И.** Самораспространяющийся высокотемпературный синтез композиционных нитридсодержащих материалов. Новосибирск: Наука. 2012. 260 с.
 7. **Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г.** Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов. М.: Машиностроение. 2007. 567 с.
 8. **Hu Y., Zuo K., Xia Y., Yin J., Liang H., Zeng Y.** Microstructure and permeability of porous Si₃N₄ supports prepared via SHS. *Ceramics Internat.* 2020. V. 47. N 2. P. 1571-1577. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.08.270.
 9. **Марков Ю.М.** Исследование способа получения порошка нитрида магния в режиме СВС. *Совр. материалы, техника и технология*. 2016. № 3(6). С. 91-95.
 10. **Амосов А.П., Бичуров Г.В.** Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза микро- и нанопорошков нитридов. М.: Машиностроение-1. 2007. 26 с.
 11. **Закоржевский В.В., Лорян В.Э., Боровинская И.П., Кириллов А.В., Санникова С.Н.** Самораспространяющийся высокотемпературный синтез нитрида циркония из элементов. *Новые огнеупоры*. 2016. № 9. С. 56-58. DOI: 10.17073/1683-4518-2016-9-56-58.
 12. **Манашев И.Р., Гаврилова Т.О., Шатохин И.М., Зиятдинов М.Х., Леонтьев Л.И.** Утилизация дисперсных отходов ферросплавного производства на базе металлургического СВС-процесса. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2018. Т. 63. № 8. С. 591-599. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-8-591-599.
 13. **Зиятдинов М.Х., Шатохин И.М., Леонтьев Л.И.** Технология СВС композиционных ферросплавов часть I. Металлургический СВС процесс. Синтез нитридов феррованадия и феррохрома. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 5. С. 339-347. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-5-339-347.
 14. **Зиятдинов М.Х., Шатохин И.М., Леонтьев Л.И.** Технология СВС композиционных ферросплавов часть II. Синтез нитрида ферросилиция и борида ферротитана. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 7. С. 527-535. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-7-527-535.
 15. **Bolgaru K.A., Reger A.A., Skvortsova L.N.** Combustion synthesis of metal-ceramic silicon nitride-based composites and their photocatalytic activity. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. V. 1115. N 4. P. 5. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/4/042040.
 16. **Болгару К.А., Браверманн Б.Ш., Максимов Ю.М., Рeger А.А., Верещагин В.И.** Получение композиционных материалов в режиме горения ферросиликоалюминия в форме полых цилиндров. *Международ. журн. приклад. и фундамент. иссл.* 2019. № 11. С. 86-91. DOI: 10.17513/mjpf.12937.
 17. **Yatsimirskiy V.K., Tyrenkova N.I.** The interaction of molecular nitrides with iron clusters. *Theor. Experim. Chem.* 1975. N 1. P. 378-381.
 18. **Манашев И.Р., Гаврилова Т.О., Шатохин И.М., Зиятдинов М.Х.** Технология производства азотированных ферросплавов методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. *Теория и технология металлург. пр-ва*. 2019. № 4(31). С. 4-12.
 19. **Болгару К.А., Чухломина Л.Н., Максимов Ю.М.** Исследование механизма и закономерностей азотирования комплексного ферросплава – ферросиликоалюминия в режиме СВС. *Изв. вузов. Порошковая металлургия и функц. покрытия*. 2016. 4. С. 34-40. DOI: 10.17073/1997-308X-2016-4-34-40.
 20. **Чухломина Л.Н., Максимов Ю.М., Китлер В.Д., Витускина О.Г.** О механизме и закономерностях азотирования ферросилиция в режиме горения. *Физика горения и взрыва*. 2006. Т. 42. № 3. С. 71-78.
 20. **Chukhlomina L.N., Maksimov Yu.M., Vereschagin V.I.** Self propagating high-temperature synthesis of composites nitride-based materials. *Novosibirsk: Nayka*. 2012. 260 p. (in Russian).
 7. **Amosov A.P., Borovinskaya I.P., Merzhanov A.G.** Powder technology of self-propagating high-temperature synthesis of materials. М.: Mashinostroenie. 2007. 567 p. (in Russian).
 8. **Hu Y., Zuo K., Xia Y., Yin J., Liang H., Zeng Y.** Microstructure and permeability of porous Si₃N₄ supports prepared via SHS. *Ceramics Internat.* 2020. V. 47. N 2. P. 1571-1577. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.08.270.
 9. **Markov Yu.M.** Study of the method for producing of magnesium nitride powder in the SHS mode. *Sovr. Mater. Tekhnika Tekhnol.* 2016. N 3(6). P. 91-95 (in Russian).
 10. **Amosov A.P., Bichurov G.V.** Azide-based technology of self propagation high-temperature synthesis of micro- and nanopowder of nitrides. М.: Mashinostroenie. 2007. 26 p. (in Russian).
 11. **Zakorzhevskii V.V., Loryan V.E., Borovinskaya I.P., Kirillov A.V., Sannikova S.N.** Zirconium nitride self-propagating high temperature synthesis out of components. *Novye Ogneupory*. 2016. N 9. P. 56-58 (in Russian). DOI: 10.17073/1683-4518-2016-9-56-58.
 12. **Manashev I.R., Gavrilova T.O., Shatokhin I.M., Ziatdinov M.K., Leont'ev L.I.** Utilization of dispersed waste of ferroalloy production on the basis of metallurgical SHS-process. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Chernaya Metallurgiya*. 2020. V. 63. N 8. P. 591-599 (in Russian). DOI: 10.17073/0368-0797-2020-8-591-599.
 13. **Ziatdinov M.K., Shatokhin I.M., Leont'ev L.I.** SHS technology of composition ferroalloys part I. Metallurgical SHS process. Synthesis of ferrovandium and ferrochromium nitrides. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Chernaya Metallurgiya*. 2018. V. 61. N 5. P. 339-347 (in Russian). DOI: 10.17073/0368-0797-2018-5-339-347.
 14. **Ziatdinov M.K., Shatokhin I.M., Leont'ev L.I.** SHS technology of composition ferroalloys part II. Synthesis of ferrosilicon and ferrotitanium boride. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Chernaya Metallurgiya*. 2018. V 61. N 7. P. 339-347 (in Russian). DOI: 10.17073/0368-0797-2018-7-527-535.
 15. **Bolgaru K.A., Reger A.A., Skvortsova L.N.** Combustion synthesis of metal-ceramic silicon nitride-based composites and their photocatalytic activity. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. V. 1115. N 4. P. 5. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/4/042040.
 16. **Bolgaru K.A., Braverman B. Sh., Maksimov Yu.M., Reger A.A., Vereschagin V.I.** Obtaining of composite materials by the combustion of hollow cylinder-shaped aluminum ferrosilicon. *Mezhdun. Zhurn. Priklad. Fundamental. Issl.* 2019. N 11. P. 86-91 (in Russian). DOI: 10.17513/mjpf.12937.
 17. **Yatsimirskiy V.K., Tyrenkova N.I.** The interaction of molecular nitrides with iron clusters. *Theor. Experim. Chem.* 1975. N 1. P. 378-381.
 18. **Manashev I.R., Gavrilova T.O., Shatokhin I.M., Ziatdinov M.H.** Theory and technology of nitrided ferro-alloys production by self propagating high temperature synthesis. *Teor. Tekhnol. Metallurg. Pr-va*. 2019. N 4(31). P. 4-12 (in Russian).
 19. **Bolgaru K.A., Chukhlomina L.N., Maksimov Yu.M.** Study of regularities for the nitriding of complex ferrosilicoaluminum ferroalloy during SHS. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Poroshkovaya Metallurgiya Funkts. Pokrytiya*. 2016. N 4. P. 34-40 (in Russian). DOI: 10.17073/1997-308X-2016-4-34-40.
 20. **Chukhlomina L.N., Maksimov Yu.M., Kitler V.D., Vitushkina O.G.** Mechanism and features of nitriding of ferrosilicon in the combustion mode. *Combustion, Explosion, Shock Waves*. 2006. V. 42. N 3. P. 309-316.

Поступила в редакцию (Received) 12.01.2021

Принята к опубликованию (Accepted) 22.04.2021