

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

PHYSICO-CHEMICAL BASICS  
OF METALLURGICAL PROCESSES



УДК 621.785.532:536.46

DOI 10.17073/0368-0797-2024-3-360-365



Оригинальная статья

Original article

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ АЗОТИРОВАНИЯ ФЕРРОСИЛИКОХРОМА В РЕЖИМЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ

К. А. Болгару<sup>1</sup>, А. А. Ререр<sup>1</sup>, В. И. Верещагин<sup>2</sup>, А. А. Акуликин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Томский научный центр Сибирского отделения РАН (Россия, 634055, Томск, Академический пр., 10/4)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30)

✉ regerwork1@gmail.com

**Аннотация.** В работе изучены процессы азотирования ферросиликохрома в режиме горения в условиях естественной фильтрации азота и представлены результаты исследования влияния основных параметров синтеза (давление газообразного азота, диаметр образцов и размер исходных частиц) на максимальную температуру и процесс горения исходной порошковой шихты. Горение ферросиликохрома протекает устойчиво в стационарном режиме с образованием макрооднородной азотированной композиции, которая по результатам рентгенофазового анализа содержит в своём составе две нитридные фазы – нитрид хрома и нитрид кремния. Взаимодействие исходного порошка с газообразным азотом в режиме фильтрационного горения протекает по следующей вероятной химической реакции:  $3\text{CrSi}_2 + 3\text{Si} + 3\text{FeSi}_2 + 11,5\text{N}_2 = 3\text{CrN} + 5\text{Si}_3\text{N}_4 + 3\text{Fe}$ . Увеличение диаметра исходных образцов незначительно влияет на количество поглощенного азота и приводит к замедлению продвижения фронта волны горения. При повышении давления газообразного реагента наблюдается увеличение количества поглощенного азота и скорости горения. Более тонкое измельчение исходного порошка позволяет увеличить количество поглощенного азота и скорость горения. Определено, что при уплотнении исходного образца реализовать реакцию горения невозможно. Максимальная температура горения в зависимости от условий азотирования изменяется в пределах от 2400 до 2650 °С и повышается при увеличении давления газообразного азота, диаметра исходных образцов и дисперсности порошка ферросиликохрома. Реализовать азотирование ферросиликохрома в режиме горения возможно при давлении газообразного азота не менее 3 МПа, диаметре исходных образцов не менее 3,5 см и размере исходных частиц не более 100 мкм. Оптимальными параметрами азотирования ферросиликохрома является давление газообразного азота 5 МПа, диаметр образцов 5 см, размер исходных частиц менее 100 мкм и насыпная плотность порошка 2,23 г/см<sup>3</sup>.

**Ключевые слова:** самораспространяющийся высокотемпературный синтез, фильтрационное горение, азотирование, нитриды, ферросплав, порошковая металлургия

**Для цитирования:** Болгару К.А., Ререр А.А., Верещагин В.И., Акуликин А.А. Физико-химические процессы азотирования ферросиликохрома в режиме фильтрационного горения. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(3):360–365.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-3-360-365>

## PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES DURING NITRIDING OF CHROMIUM FERROSILICON BY FILTRATION COMBUSTION

K. A. Bolgaru<sup>1</sup>, A. A. Reger<sup>1</sup>, V. I. Vereshchagin<sup>2</sup>, A. A. Akulinkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (10/4 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University (30 Lenina Ave., Tomsk 634050, Russian Federation)

✉ regerwork1@gmail.com

**Abstract.** In this paper, the nitriding of chromium ferrosilicon is carried out in the combustion mode under the condition of natural nitrogen filtration. The authors studied the effect of the key parameters (pressure of gaseous nitrogen, diameter and dispersity of starting samples) on the maximum temperature and combustion of the starting powder mixture based on chromium ferrosilicon. The combustion synthesis of chromium ferrosilicon proceeds steadily in the stationary mode with formation of a macrohomogeneous nitrided composition which, according to the results of X-ray phase analysis, contains two nitride phases - chromium nitride and silicon nitride. Interaction of the initial powder with gaseous nitrogen in the filtration combustion mode proceeds by the following probable chemical reaction:  $3\text{CrSi}_2 + 3\text{Si} + 3\text{FeSi}_2 + 11,5\text{N}_2 = 3\text{CrN} + 5\text{Si}_3\text{N}_4 + 3\text{Fe}$ . Increasing the diameter of the starting samples slightly affects the amount of absorbed nitrogen and slows the propagation of the combustion wave front. An increase in the pressure of gaseous nitrogen increases the amount of absorbed nitrogen and the combustion rate. Increasing the dispersity of the starting powder increases the amount of absorbed nitrogen and the combustion rate. It was found that the combustion reaction is not possible with

a dense initial sample. The maximum combustion temperature, depending on the nitriding conditions, varies between 2400 and 2650 °C and increases with increasing gaseous nitrogen pressure, diameter of the initial samples and dispersion of chromium ferrosilicon powder. It is possible to realise nitriding of chrome ferrosilicon in the combustion mode at the pressure of gaseous nitrogen not less than 3 MPa, diameter of initial samples not less than 3.5 cm and size of initial particles not more than 100 µm. Optimal parameters of nitriding are gaseous nitrogen pressure of 5 MPa, diameter of samples 5 cm, size of initial particles less than 100 µm and bulk density of samples (2.23 g/cm<sup>3</sup>).

**Keywords:** self-propagating high-temperature synthesis, combustion synthesis, nitriding, nitrides, ferroalloy, powder metallurgy

**For citation:** Bolgaru K.A., Reger A.A., Vereshchagin V.I., Akulinkin A.A. Physical and chemical processes during nitriding of chromium ferrosilicon by filtration combustion. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(3):360–365. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-3-360-365>

## ВВЕДЕНИЕ

Метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) основан на высокоэкзотермических реакциях, которые протекают в форме волны горения в самораспространяющемся режиме. Метод СВС имеет несомненные достоинства: энергоэффективность, малое время синтеза, экологичность и простота оборудования [1 – 3].

В настоящее время методом фильтрационного СВС в среде азота получено большое количество материалов, в частности нитридных [4 – 6]. Ряд нитридных материалов обладает уникальными физико-химическими свойствами [7 – 9]. Они могут быть использованы в производстве компонентов газотурбин [10], теплоотводных радиаторов [11], режущих инструментов [12; 13], фотокатализаторов [14], полупроводников [15] и т. д.

Наиболее перспективно в методе фильтрационного СВС применение доступных и относительно дешевых ферросплавов. При использовании в процессах СВС ферросплавов возможно получить нитридный материал с относительно низкой себестоимостью без потери качества продукта [16; 17]. Железо, входящее в состав ферросплавов, оказывает каталитическое действие на процесс азотирования остальных элементов, которые входят в состав исходной смеси [18]. Таким образом железо позволяет увеличить интенсивность и глубину азотирования исходного материала. Имеется достаточно большой объем работ, посвященных фильтрационному горению простых ферросплавов. Подробно изучены закономерности азотирования ферросилиция [19 – 21], а также фильтрационного горения феррохрома и феррованадия [22]. В работе [23] проведено исследование горения в азоте промышленного ферротитана. В монографии [24] описано азотирование ферробора и феррониобия в режиме горения.

Однако интересным и малоизученным является использование в процессах фильтрационного горения сложных ферросплавов. Сложными ферросплавами являются сплавы железа с двумя и более элементами. На данный момент изучено СВС горение ферросиликоалюминия [25] и ферроалюмосиликоциркония [2].

Целью данной работы является исследование процессов горения ферросиликохрома в режиме самораспространения в условиях естественной фильтрации азота для получения нитридсодержащего композиционного материала на основе нитрида хрома и нитрида кремния.

## ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве исходного материала был использован ферросиликохром (ФСХ). Рентгенофазовый анализ показал, что данный ферросплав является многофазным и содержит в своем составе CrSi<sub>2</sub>, Si и FeSi<sub>2</sub> (рис. 1). По результатам химического анализа состав ФСХ, мас. %: 49,4 Si; 29,7 Cr; 20,7 Fe; остальное – оксиды. Для проведения азотирования в режиме самораспространения исходный ФСХ измельчали в шаровой мельнице и высушивали в сушильном вакуумном шкафу при температуре 150 °C в течение 3 ч.

Азотирование исходного ФСХ проводили в установке постоянного давления объемом 3 л. Для синтеза исходную порошковую смесь помещали в газопроницаемый контейнер, установленный на непроводящей подставке. Поверх исходной шихты насыпали поджигающий состав. К поджигающему составу подвели спираль для проведения электрического импульса от трансформатора. После подачи электрического импульса инициировалась реакция горения поджигающего состава. Затем тепло, выделившееся в результате горения поджигающего состава, инициировало реакцию горения исходного порошка ФСХ. После прохождения фронта волны горения и полного остывания непрореагировавший азот сбрасывали и вынимали азотированные образцы для дальнейших физико-химических исследований.

Фазовый состав изучали на дифрактометре Shimadzu XRD-6000. Содержание кислорода и азота определяли на приборе LEKO-ONH 836. Максимальную температуру горения находили при помощи термопарного

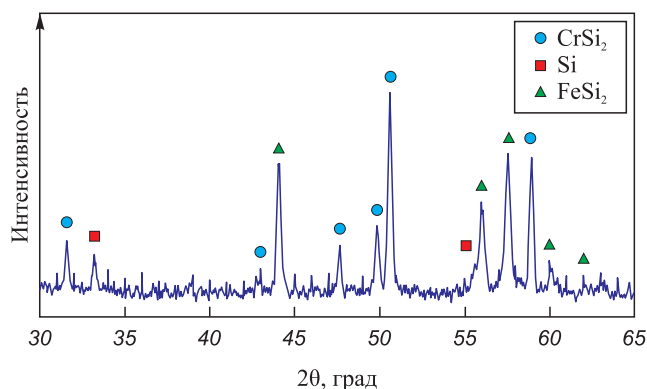


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма ферросиликохрома

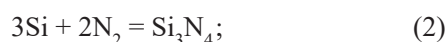
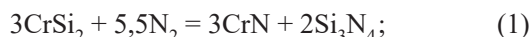
Fig. 1. X-ray diffraction pattern of chromium ferrosilicon

метода с использованием вольфрам-рениевых термопар (ВР 5/20) на приборе АЦП ЛА20USB.

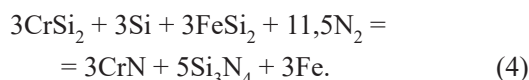
## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Горение ферросиликохрома протекает в стационарном режиме. Азотированные образцы, полученные на основе ФСХ, являются макрооднородными. Изображение азотированного ФСХ показано на рис. 2.

Ниже приведены вероятные химические реакции взаимодействия исходной шихты на основе ФСХ с азотом:



Суммарное уравнение химической реакции выглядит следующим образом:



Реакция (4) соответствует полному азотированию исходного ФСХ (при степени превращения, равной 1). Ввиду скоротечности процессов СВС исходная шихта находится в зоне реакции относительно малое время и не успевает в полной мере прореагировать с азотом. Теоретически рассчитано, что максимальное количество поглощенного азота ферросиликохромом составляет 28,99 %.

Продукт азотирования ФСХ является многофазным материалом и содержит в своем составе  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ ,  $\alpha\text{-Fe}$ ,

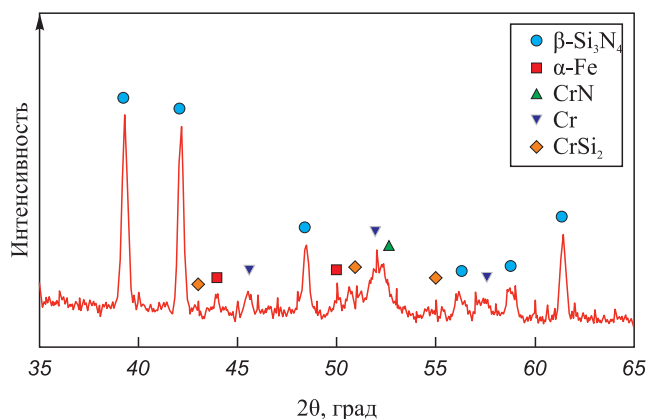


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма азотированного ферросиликохрома

Fig. 3. X-ray diffraction pattern of nitrated chromium ferrosilicon

CrN, Cr и  $\text{CrSi}_2$ . Наличие Cr и  $\text{CrSi}_2$  свидетельствует о неполноте протекания реакции азотирования исходного порошка (рис. 3).

На максимальную температуру, процесс и возможность реализации фильтрационного горения в самораспространяющемся режиме в значительной степени влияют такие параметры, как давление газообразного реагента, диаметр образцов, размер частиц и плотность исходного материала.

На рис. 4 приведена зависимость количества поглощенного азота и скорости горения от диаметра образцов. Исследование влияния диаметра проводили в диапазоне от 35 до 65 мм. Горение ФСХ возможно инициировать при диаметре исходных образцов не менее 35 мм. Увеличение диаметра незна-



Рис. 2. Образец азотированного ферросиликохрома

Fig. 2. Sample of nitrated chromium ferrosilicon

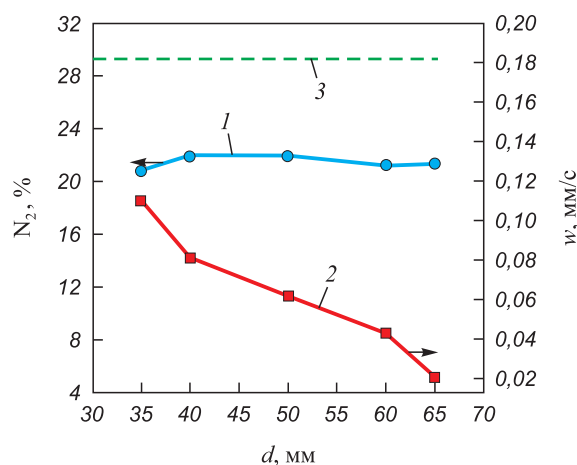
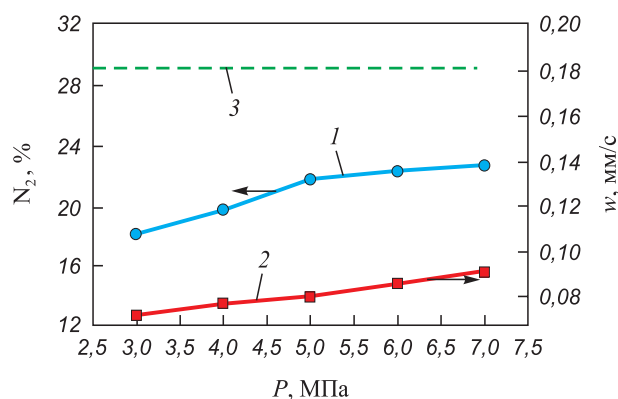


Рис. 4. Зависимость количества поглощенного азота (1) и скорости горения (2) от диаметра образцов (3 – теоретически рассчитанное максимальное количество поглощенного азота) при  $P = 5 \text{ МПа}$ ,  $D > 100 \text{ мкм}$  и  $\rho = 2,23 \text{ г/см}^3$

Fig. 4. Dependence of the content of absorbed nitrogen (1) and combustion rate (2) on diameter of the starting samples (3 – theoretically calculated maximum amount of absorbed nitrogen) at  $P = 5 \text{ МПа}$ ,  $D > 100 \text{ мкм}$  and  $\rho = 2.23 \text{ г/см}^3$



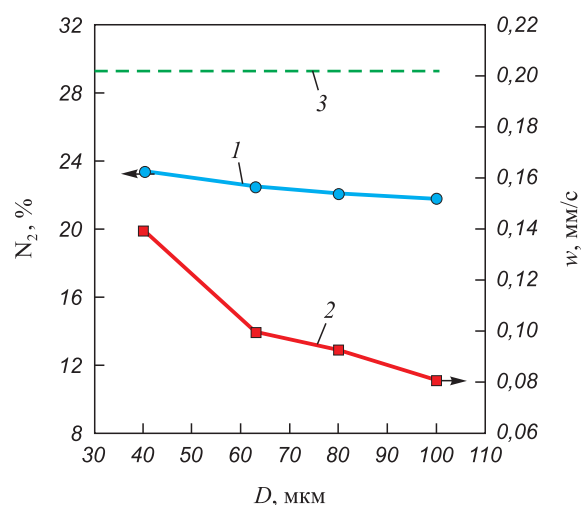
**Рис. 5.** Зависимость количества поглощенного азота (1) и скорости горения (2) ферросиликохрома от давления газообразного азота (3 – теоретически рассчитанное максимальное количество поглощенного азота) при  $d = 50$  мм,  $\rho = 2,23$  г/см<sup>3</sup> и  $D > 100$  мкм

**Fig. 5.** Dependence of the content of absorbed nitrogen (1) and combustion rate (2) on pressure of gaseous nitrogen (3 – theoretically calculated maximum amount of absorbed nitrogen) at  $d = 50$  mm,  $\rho = 2.23$  g/cm<sup>3</sup> and  $D > 100$  μm

чительно влияет на количество поглощенного азота и приводит к уменьшению скорости горения от 0,11 до 0,021 мм/с. Незначительное изменение количества поглощенного азота связано с тем, что при увеличении диаметра трудность фильтрации на пути доступа азота к зоне реакции значительно усиливается. В то же время в связи с замедлением продвижения фронта волны горения увеличивается время пребывания частиц исходного ФСХ в зоне реакции. Замедление продвижения фронта волны горения связано с увеличением объема порошковой смеси, на прогрев которой затрачивается большое количество тепла. При изменении диаметра максимальное количество поглощенного азота составило около 22 %, что меньше теоретически рассчитанного количества поглощения азота на 6,99 %. При увеличении диаметра исходной порошковой смеси максимальная температура горения ФСХ изменяется от 2400 до 2650 °С.

В лабораторной установке объемом 3 л наиболее предпочтительно реализовать горение образцов диаметром 50 мм.

Увеличение давления приводит к ускорению фильтрации газообразного азота и соответственно увеличению концентрации газа реагента в зоне химической реакции. Горение ФСХ при давлении азота менее 3 МПа реализовать не удалось. Увеличение давления газообразного азота приводит к увеличению количества поглощенного азота от 18,3 до 22,8 % и скорости горения от 0,073 до 0,092 мм/с. В диапазоне давления азота от 5 до 7 МПа изменение количества поглощенного азота становится менее выражено. Повышение давления азота более 7 МПа нецелесообразно. Это связано с тем, что при 5 МПа влияние давления на процесс горения становится незначительным (рис. 5). При



**Рис. 6.** Зависимость количества поглощенного азота (1) и скорости горения (2) от дисперсности порошка ферросиликохрома (3 – теоретически рассчитанное максимальное количество поглощенного азота) при  $d = 50$ ,  $P = 5$  МПа и  $\rho = 2,23$  г/см<sup>3</sup>

**Fig. 6.** Dependence of the content of absorbed nitrogen (1) and combustion rate (2) on dispersity of the starting powder (3 – theoretically calculated maximum amount of absorbed nitrogen) at  $d = 50$  mm,  $P = 5$  МПа and  $\rho = 2.23$  g/cm<sup>3</sup>

реализации горения ФСХ при давлении 7 МПа образец содержит азота на 6,29 % меньше теоретически рассчитанного значения. При увеличении давления газообразного азота от 3 до 7 МПа повышается максимальная температура горения от 2350 до 2600 °С.

Горение ФСХ с размером частиц более 100 мкм и в отсутствии мелкой фракции (менее 63 мкм) реализовать не удалось. При уменьшении размера частиц исходного материала увеличивается количество поглощенного азота от 21,9 до 23,5 % и скорость горения от 0,081 до 0,140 мм/с. Рост дисперсности исходного материала приводит к увеличению удельной поверхности, способной реагировать (рис. 6). Уменьшение размера частиц ФСХ приводит к повышению максимальной температуры от 2400 до 2490 °С.

Повышение плотности исходной порошковой смеси проводили путем прессования исходного порошка в прессформах в таблетки диаметром и высотой 40 мм. Горение спрессованного порошка, который сохраняет форму таблетки ( $\rho = 2,52$  г/см<sup>3</sup>), реализовать не удалось. Таким образом, были использованы образцы только насыпной плотности (2,23 г/см<sup>3</sup>).

## Выводы

Горение ферросиликохрома протекает в стационарном режиме и приводит к получению однородных азотированных образцов без капель расплава и трещин.

Увеличение диаметра приводит к уменьшению скорости горения от 0,11 до 0,021 мм/с и незначительно влияет на количество поглощенного азота. При повы-



шении давления азота происходит рост количества поглощенного азота (18,3 – 22,8 %) и скорости горения (0,073 – 0,092 мм/с) ферросиликохрома. Уменьшение дисперсности исходного материала позволяет увеличить количество поглощенного азота от 21,9 до 23,5 % и скорость горения от 0,081 до 0,14 мм/с. Незначительное повышение плотности исходного порошка приводит к невозможности реализации реакции горения ферросиликохрома в среде азота.

Рост максимальной температуры горения происходит при увеличении давления газообразного азота от 3 до 7 МПа (от 2350 до 2600 °С), диаметра исходных образцов от 35 до 65 мм (от 2400 до 2650 °С) и уменьшении размера частиц исходной шихты от менее 100 до менее 40 мкм (от 2400 до 2490 °С).

Устойчивое горение в режиме самораспространения образцов порошка ФСХ возможно при давлении азота не менее 3 МПа, диаметре образцов не менее 3,5 см, размере частиц менее 100 мкм в присутствии мелкой фракции (менее 63 мкм) и плотности образца не более 2,23 г/см<sup>3</sup>. Оптимально проводить азотирование исходного ферросиликохрома в условиях естественной фильтрации азота при давлении 5 МПа, диаметре образца 5 см, размере частиц исходного материала менее 100 мкм и насыпной плотности образца (2,23 г/см<sup>3</sup>).

Продукт азотирования ферросиликохрома содержит в своем составе  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, CrN,  $\alpha$ -Fe, Cr и CrSi<sub>2</sub>. Наличие Cr и CrSi<sub>2</sub> свидетельствует о неполноте протекания реакции азотирования исходного ферросиликохрома. При этом насыщение азотом составляет 21,9 %, что меньше теоретически рассчитанного максимального количества поглощенного азота на 7,09 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Чухломина Л.Н., Витушкина О.Г. СВС-азотирование ферросилиция в присутствии ильменита. *Известия вузов. Серия: Химия и химическая технология*. 2011;54(5): 105–108.  
Chukhlomina L.N., Vitushkina O.G. SHS nitriding of ferro-silicon with ilmenite. *ChemChemTech*. 2011;54(5):105–108. (In Russ.).
2. Болгару К.А., Верещагин В.И., Регер А.А. Синтез композиции нитридов кремния, алюминия и циркония азотированием в режиме горения сложного ферросплава – ферроалюмосиликоциркония. *Известия вузов. Серия: Химия и химическая технология*. 2021;64(7):68–74.  
<https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216407.6362>  
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*. 2021;64(7):68–74. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216407.6362>
3. Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов. Москва: Машиностроение; 2007:567.
4. Won H.I., Won C.W., Nersisyan H.H., Yoon K.S. Salt-assisted combustion synthesis of silicon nitride with high  $\alpha$ -phase content. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010;496(1-2): 656–659. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.02.157>
5. Yeh C.L., Liu E.W. Combustion synthesis of chromium nitrides by SHS of Cr powder compacts under nitrogen pressures. *Journal of Alloys and Compounds*. 2006;426(1-2): 131–135. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.01.082>
6. Yeh C.L., Chuang H.C. Experimental studies on self-propagating combustion synthesis of niobium nitride. *Ceramics International*. 2004;30(5):733–743.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2003.10.001>
7. Zhang J., Ge Y., Tian Z., Sun S., Cui W., Liu G., Chen K. Combustion synthesis of  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> with green additives. *Ceramics International*. 2019;45(5):6594–6596.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.12.147>
8. Zhang Y., He X., Han J., Du S. Combustion synthesis of hexagonal boron-nitride-based ceramics. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;116(2-3):161–164.  
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01023-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01023-8)
9. Chen Y.X., Li J.T., Du J.S. Cost effective combustion synthesis of silicon nitride. *Materials Research Bulletin*. 2008;43(6):1598–1606.  
<https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2007.06.051>
10. Won H.I., Won C.W., Nersisyan H.H., Yoon K.S. Salt-assisted combustion synthesis of silicon nitride with high  $\alpha$ -phase content. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010;496(1-2): 656–659. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.02.157>
11. Juang R.C., Chen C.C. Combustion synthesis of hexagonal aluminum nitride crystal by aluminum carbides. *Materials Science and Engineering: A*. 2007;458(1-2):210–215.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.01.004>
12. Fang S. Morphological study of a cubic boron nitride (CBN) cutting tool and characterization of its wear scenarios in abrasive machining process. *Ceramics International*. 2020;46(11B):19491–19498.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.302>
13. Sugihara T., Nishimoto Y., Enomoto T. Development of a novel cubic boron nitride cutting tool with a textured flank face for high-speed machining of Inconel 718. *Precision Engineering*. 2017;48:75–82.  
<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.11.007>
14. Akulinkin A., Bolgaru K., Reger A. Facile synthesis of porous g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/β-SiAlON material with visible light photocatalytic activity. *Materials Letters*. 2021;305:130788.  
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130788>
15. Hua Q., Ma B., Hu W. Aluminum, gallium, and indium nitrides. *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*. 2021;3:74–83.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.12065-X>
16. Зиятдинов М.Х. Из истории азотированных ферросплавов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020; 63(10):773–781.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-10-773-781>  
Ziatdinov M.Kh. From the history of nitrided ferroalloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(10):773–781. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-10-773-781>
17. 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. *Известия вузов. Черная*

- металлургия. 2020;63(8):591–599.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-8-591-599>
- Manashev I.R., Gavrilova T.O., Shatokhin I.M., Ziatdinov M.Kh., Leont'ev L.I. Utilization of dispersed waste of ferroalloy production on the basis of metallurgical SHS-process. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(8):591–599. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-8-591-599>
18. Zhang M., Chen Z., Huang J., Wang S., Xiong Q., Feng Z., Liu Q., Sun Z., Li X. In situ nitriding reaction formation of  $\beta$ -Sialon with fibers using transition metal catalysts. *Ceramics International*. 2019;45(17A):21923–21930.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.204>
  19. Chukhlomina L.N., Maksimov Yu.M., Kitler V.D., Vitushkina O.G. Mechanism and features of nitriding of ferrosilicon in the combustion regime. *Combustion, Explosion, Shock Waves*. 2006;42(3):309–316.  
<https://doi.org/10.1007/s10573-006-0056-0>
  20. Ma C., Li Y., Chen J., Zhu S., Li B. Cost-effective manufacture and synthesis mechanism of ferrosilicon nitride porous ceramic with interlocking structure. *Ceramics International*. 2021;47(4):5265–5272.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.10.107>
  21. Ziatdinov M.Kh., Shatokhin I.M. Self-propagating high-temperature synthesis of ferrosilicon nitride. *Steel in Translation*. 2008;38(1):39–44.  
<https://doi.org/10.3103/S0967091208010130>
  22. Зиятдинов М.Х., Шатохин И.М., Леонтьев Л.И. Технология СВС композиционных ферросплавов часть 1. Металлургический СВС процесс. Синтез нитридов феррованадия и феррохрома. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018;61(5):339–347.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-5-339-347>
  - Ziatdinov M.Kh., Shatokhin I.M., Leont'ev L.I. SHS technology of composition ferroalloys. Part I. Metallurgical SHS process. Synthesis of ferrovanadium and ferrochromium nitrides. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;61(5):339–347. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-5-339-347>
  23. Glazunov A.A., Maksimov Yu.M., Chukhlomina L.N., Braverman B.Sh., Avramchik A. N. Combustion of ferrotitanium in nitrogen. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2020;56(2):137–141.  
<https://doi.org/10.1134/S0010508220020033>
  24. Чухломина Л.Н., Максимов Ю.М., Верещагин В.И. Самораспространяющейся высокотемпературный синтез композиционных нитридосодержащих керамических материалов. Новосибирск: Наука; 2012:260.
  25. Bolgaru K., Reger A., Vereshchagin V., Akulinkin A. Combustion synthesis of porous ceramic  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-based composites with the use of ferroalloys. *Ceramics International*. 2021;47(24):34765–4773.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.09.015>

## Сведения об авторах

## Information about the Authors

**Константин Александрович Болгару**, к.т.н., старший научный сотрудник, Томский научный центр Сибирского отделения РАН  
**ORCID:** 0000-0001-6772-8192  
**E-mail:** kbolgaru2008@yandex.ru

**Konstantin A. Bolgaru**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
**ORCID:** 0000-0001-6772-8192  
**E-mail:** kbolgaru2008@yandex.ru

**Антон Андреевич Регер**, младший научный сотрудник, Томский научный центр Сибирского отделения РАН  
**ORCID:** 0000-0001-5269-8576  
**E-mail:** regerwork1@gmail.com

**Anton A. Reger**, Junior Researcher, Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
**ORCID:** 0000-0001-5269-8576  
**E-mail:** regerwork1@gmail.com

**Владимир Иванович Верещагин**, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
**E-mail:** vver@tpu.ru

**Vladimir I. Vereshchagin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research Tomsk Polytechnic University  
**E-mail:** vver@tpu.ru

**Александр Александрович Акулинкин**, младший научный сотрудник, Томский научный центр Сибирского отделения РАН  
**ORCID:** 0000-0002-7020-969X  
**E-mail:** akulinkinalex@gmail.com

**Aleksandr A. Akulinkin**, Junior Researcher, Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
**ORCID:** 0000-0002-7020-969X  
**E-mail:** akulinkinalex@gmail.com

## Вклад авторов

## Contribution of the Authors

**К. А. Болгару** – научное руководство, формирование целей и задач, написание статьи, доработка текста, корректировка выводов.  
**А. А. Регер** – написание статьи, проведение синтеза, анализ полученных данных, визуализация.  
**В. И. Верещагин** – научное руководство, написание статьи, доработка текста, корректировка выводов.  
**А. А. Акулинкин** – проведение физико-химических анализов, обработка данных.

**K. A. Bolgaru** – scientific guidance, formation of goals and objectives, writing and revision of the text, correction of conclusions.  
**A. A. Reger** – writing the text, conducting synthesis, analysis of the obtained data, visualization.  
**V. I. Vereshchagin** – scientific guidance, writing and revision of the text, correction of conclusions.  
**A. A. Akulinkin** – conducting physicochemical analysis, data processing.

Поступила в редакцию 13.10.2023  
 После доработки 13.11.2023  
 Принята к публикации 28.03.2024

Received 13.10.2023  
 Revised 13.11.2023  
 Accepted 28.03.2024