



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2017



Том 21, № 10

2017

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 21, No. 10

2017

Publishers of Irkutsk National Research Technical University

Editorial board

SUSLOV K.V., Candidate of technical sciences, Professor of Irkutsk National Research Technical University, Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)

NEMCHINOVA N.V., Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy of Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor in Chief (Irkutsk, Russia)

AZAROV V.N., Doctor of technical sciences, Professor of Moscow Institute of Electronics and Mathematics of Higher School of Economics National Research University (Moscow, Russia)

BAZHIN V.Y., Doctor of technical sciences, Dean of the Faculty of Mineral Raw Materials Processing of the St. Petersburg Mining University (Saint Petersburg Mining University) (Saint Petersburg, Russia)

BOROVIKOV Y.S., Doctor of technical sciences, Pro-Rector of National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia)

VOROPAI N.I., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of technical sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Scientific Advisor of Melentiev Energy Systems Institute SB RAS (Irkutsk, Russia)

ZAIDES S.A., Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Machine-Building Technologies and Materials of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

MAMYACHENKOV S.V., Doctor of technical sciences, Professor of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

PANTELEEV V.I., Doctor of technical sciences, Professor of Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

PETROV A.V., Doctor of technical sciences, Professor of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

SITNIK L.E., Doctor-Engineer, Professor, Head of the Department of Transport Technology of Wrocław University of Science and Technology (Poland)

STYCHINSKI S.A., Professor of the Otto von Guericke University (Magdeburg, Germany)

TIKHOMIROV A.A., Doctor of Economics, Professor of the INHA University (Incheon, Republic of Korea)

FEDOTOV A.I., Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Automobile Transport of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

BERTHOLT SCHOLTES, Director of the Institute of Metallurgy of the University of Kassel (Kassel, Germany)

The Journal was founded in 1997
Frequency of publication – monthly
The journal is registered with the Federal Agency for Supervision of Communications, Information Technologies and Mass Media (Roskomnadzor).

Certificate of registration № ПИ № ФС77-62813
of 18 August, 2015.

Founder: Irkutsk National Research Technical University

Subscription index in the Catalog
of the Russian Press "Pochta Rossii" – 38237

Address of the Publishers:
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074
Office D-215
e-mail: pgp@istu.edu

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и машиноведение

- Орленко А.И., Кинаш Н.Ж., Выонг Куанг Чык. Возможности введения инерционных связей для коррекции вибрационного поля технологической машины..... 10
- Солер Я.И., Нгуен Киен Чи, Нгуен Кань Ван. Кластерный анализ влияния абразивных кругов на качество поверхности деталей из алюминиевого сплава 1933T2 при плоском маятниковом шлифовании..... 19

Информатика, вычислительная техника и управление

- Лубенец Ю.В. О модифицированном коэффициенте конкордации, учитывающем в большей степени согласованность лучших альтернатив..... 32
- Рыбин И.А., Рубанов В.Г. Синтез робастного регулятора для мобильного робота с интервальными параметрами и временным запаздыванием..... 40
- Якимук А.Ю., Конев А.А., Осипов А.О. Программный комплекс для автоматизации моделирования сегментации речевых сигналов и вокальных исполнений..... 53

Энергетика

- Батмунх Сэрээтэр, Стенников В.А., Бат-Эрдэнэ Баяр, Эрдэнэбаатар Алтайн. Потенциал Монголии в международной кооперации азиатского энергетического пространства..... 65
- Булатов Ю.Н. Интеллектуальные системы управления установками распределенной генерации..... 78
- Еделева О.А. Использование теории хабов в задачах оптимизации энергоисточников городских территорий..... 95
- Муссонов Г.П., Селезнев А.С., Федчишин В.В. Исследование взаимосвязи гармонических составляющих при передаче электрической энергии в сетях высокого напряжения..... 106

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

СОДЕРЖАНИЕ



Энергетика



- **Потапенко А.С., Скуратов А.П., Горохов Ю.В., Попиякова Н.П.** Численное исследование теплообмена в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов с водяной системой охлаждения..... 122
- **Смирнов К.С.** Комплексная оценка реализации проектов экспорта российской электроэнергии из Восточной Сибири в Китай..... 131
- **Такайшвили Л.Н.** Учет системных свойств угольной промышленности, как составляющей топливно-энергетического комплекса при моделировании ее развития..... 138
- **Федяев А.В., Лачков Г.Г.** Эффективность газификации котельных удаленного региона сжиженного углеводородного газа местного месторождения..... 150



Металлургия и материаловедение



- **Васильев А.А., Урлапкина Н.Н., Минеев Г.Г.** Экстракционная очистка медного электролита от мышьяка..... 160
- **Никаноров А.В.** Отражательная плавка серебросодержащих концентратов..... 169
- **Ширяева Л.С., Ноздрин И.В., Руднева В.В., Галевский Г.В.** Экспериментальное исследование плазмометаллургического синтеза карбида хрома с привлечением метода планируемого эксперимента для различных видов хромсодержащего сырья..... 177



Транспорт



- **Горбунов Р.Н., Пиров Ж.Т., Михайлов А.Ю.** Оценка уровня обслуживания на основе критериев надежности..... 188
- **Трофимова Л.С., Бородулина С.А.** Моделирование спроса на автомобильные перевозки грузов..... 195
- **Фокин А.В., Гузий А.Г.** Методическое обеспечение процедур управления риском для безопасности полетов коммерческой авиации..... 206





- of Irkutsk State Technical University]. 2011, no. 9 (56), pp. 142–148. (In Russian)
4. Beliaevsky M. M. Meierovich, A. C., meretukov M. A. *Perspektivnye sposoby pere-rabotki zoloto- i serebrosoderzhashchego syr'ya. Obzornaya informatsiya* [Promising processing methods of gold- and silver-containing raw materials. Overview]. Moscow: Publishing House of Central Research Institute of Nonferrous Metal Economy and Information, 1981, issue 3, 52 p. (In Russian)
5. Martynikhin V.V. *Serebropererabatyvayushchii kompleks Rossii: problemy upravleniya i stoimost' rabochei sily* [Silver-processing structure of Russia: problems of management and labor cost]. Irkutsk: Publishing House of Baikal State University of Economy and Law, 2003, 199 p. (In Russian)
6. Polonsky S.B., Nikanorov A.V., Belov I.B., Sedykh V.I. *Kombinirovannaya skhema pererabotki rud, sodержashchikh blagorodnye metally* [Combined scheme for processing of ores containing precious metals]. *Tezisy dokladov I Sibirskogo simpoziuma "Zoloto Sibiri: geologiya, geokhimiya, tekhnologiya, ekonomika"*. Abstracts of Papers of the 1st Siberian Symposium "Gold of Siberia: Geology, Geochemistry, Technology, Economy", Krasnoyarsk, 1–3 December 1999, Krasnoyarsk, 1999, pp. 55–56. (In Russian)
7. Polonsky S.B., Sedykh V.I., Nikanorov A.V. *Osobennosti pirometallurgicheskoi pererabotki serebrosoderzhashchikh kontsentratsionnykh koncentratov* [Features of pyrometallurgical processing of silver-bearing concentrates]. *Tezisy dokladov I Sibirskogo simpoziuma "Zoloto Sibiri: geologiya, geokhimiya, tekhnologiya, ekonomika"*. [Abstracts of Papers of the 1st Siberian Symposium "Gold of Siberia: Geology, Geochemistry, Technology, Economy", Krasnoyarsk, 1–3 December 1999, Krasnoyarsk, 1999, pp. 71–72. (In Russian)

Критерии авторства

Никаноров А.В. подготовил статью и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 18.09.2017 г.

8. Strizhko L.S. *Metallurgiya zolota i serebra* [Metallurgy of gold and silver]. Moscow: MISIS Publ., 2001, 336 p. (In Russian)
9. Sedykh V.I., Polonsky S.B. *Veshchestvennyi sostav i ratsional'nyi analiz sereb-rosoderzhashchikh kontsentratsionnykh koncentratov Dukatskogo GOKa* [Material composition and rational analysis of silver-bearing concentrates of Dukat ore mining and processing enterprise]. In: *Obogashchenie rud* [Ore Beneficiation]. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk State Technical University, 1998, pp. 45–50. (In Russian)
10. Polonsky S.B., Sedykh V.I., Mineev G.G. *Pere-rabotka serebryanykh rud i kontsentratsionnykh koncentratov* [Processing of silver ores and concentrates]. Irkutsk: Publishing house of Irkutsk State Technical University, 2000, 108 p. (In Russian)
11. Mikhailov N.I. *Poteri zolota i serebra so shlakami shakhtnoi svintsovoi plavki* [Losses of gold and silver in shaft lead smelting slags] In: *Kompleksnaya pererabotka shlakov tsvetnoi metallurgii* [Complex processing of nonferrous metallurgy slags]. Moscow: Tsvetmetinform Publ., 1967, pp. 69–80. (In Russian)
12. Nikanorov A.V., Golubtsov S.I. *Pererabotka serebrosoderzhashchikh kontsentratsionnykh koncentratov Dukatskogo GOKa* [Processing of silver-bearing concentrates of Dukat ore mining and processing enterprise]. *Materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Perspektivy razvitiya tekhnologii pererabotki uglerodistykh, rastitel'nykh i mineral'nykh resursov"* [Materials of III All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation "Development Prospects of Carbon, Plant and Mineral Resources Processing Technology"]. Irkutsk, 25–25 April 2013, Irkutsk, 2013, pp. 103–105. (In Russian)

Authorship criteria

Nikanorov A.V. has prepared the article and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 18 September 2017



Оригинальная статья / Original article
УДК 661.665
DOI: 10.21285/1814-3520-2017-10-177-187

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО СИНТЕЗА КАРБИДА ХРОМА С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ МЕТОДА ПЛАНИРУЕМОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ХРОМСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

© Л.С. Ширяева¹, И.В. Ноздрин², В.В. Руднева³, Г.В. Галевский⁴

Сибирский государственный индустриальный университет,
Российская Федерация, 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Карбид хрома Cr_3C_2 – твердый, износостойкий, химически инертный материал – достаточно востребован для изготовления защитных покрытий металлов и керметов в качестве компонентов и легирующих добавок безвольфрамовых твердых сплавов. Перспективы расширения применения карбида хрома связаны с производством его в наносостоянии. Введение в обращение карбида хрома в наносостоянии открывает новые направления его применения, в том числе для гальваники, поверхностного и объемного модифицирования металлических сплавов и полимеров. Целью работы является экспериментальное исследование плазменных процессов с привлечением метода планируемого эксперимента для определения связи управляющих параметров с основными физико-химическими характеристиками карбида хрома. **МЕТОДЫ.** Работа выполнена с привлечением современных методов исследования: математического моделирования и термодинамических расчетов, гидродинамического и теплового подбора, зондовой калориметрии и диагностики, химического и физико-химического анализов (рентгенография, спектроскопия в инфракрасной области, хроматография, высокотемпературная импульсная экстракция, термогравиметрия, термодесорбционная масс-спектрометрия, низкотемпературная адсорбция, просвечивающая и растровая электронная микроскопия). **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Исследованы зависимости содержания в продуктах синтеза карбонитрида хрома и примесей от основных параметров: количества восстановителя, состава газа-теплоносителя, начальной температуры плазменного потока, температуры закалки. Разработана комплексная многофакторная математическая модель карбонитридообразования. **ВЫВОДЫ.** По результатам экспериментальных исследований определены оптимальные значения технологических факторов и основные характеристики карбонитрида хрома. Содержание карбонитрида в продуктах синтеза составляет 91,80–93,40, % масс.; сопутствующих примесей, % масс.: хрома свободного – 1,80–2,1; углерода свободного – 1,10–1,3; кислорода – 3,00–4,00; размер частиц – 30–35 нм; форма частиц – шарообразная; выход карбонитрида хрома – 91,4 %.

Ключевые слова: карбид хрома, карбонитрид хрома, плазменный синтез, нанопорошки, моделирование плазменного синтеза.

Формат цитирования: Ширяева Л.С., Ноздрин И.В., Руднева В.В., Галевский Г.В. Экспериментальное исследование плазмометаллургического синтеза карбида хрома с привлечением метода планируемого эксперимента для различных видов хромсодержащего сырья // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 10. С. 177–187. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-10-177-187

¹Ширяева Людмила Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии, e-mail: kafcmet@sibsiu.ru

Lyudmila S. Shiryayeva, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals and Chemical Technology, e-mail: kafcmet@sibsiu.ru

²Ноздрин Игорь Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии, e-mail: kafcmet@sibsiu.ru

Igor V. Nozdrin, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals and Chemical Technology, e-mail: kafcmet@sibsiu.ru

³Руднева Виктория Владимировна, доктор технических наук, профессор кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии, e-mail: kafcmet@sibsiu.ru

Viktoria V. Rudneva, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals and Chemical Technology, e-mail: kafcmet@sibsiu.ru

⁴Галевский Геннадий Владиславович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов и химической технологии, e-mail: kafcmet@sibsiu.ru

Gennady V. Galevsky, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals and Chemical Technology, e-mail: kafc-met@sibsiu.ru



EXPERIMENTAL STUDY OF PLASMA METALLURGICAL SYNTHESIS OF CHROMIUM CARBIDE BY MEANS OF PLANNED EXPERIMENT FOR VARIOUS TYPES OF CHROME-CONTAINING RAW MATERIALS

L.S. Shiryayeva, I.V. Nozdrin, V.V. Rudneva, G.V. Galevsky

Siberian State Industrial University,
42 Kirov St., Novokuznetsk 654007, Russian Federation.

ABSTRACT. Chromium carbide Cr_3C_2 is a hard, durable, chemically inert material. It is in demand for the production of protective coatings for metals and cermets as a component and alloying additive of tungsten-free solid alloys. The prospects of expanded use of chromium carbide are related to its production in the nanostate. Introduction of nanostate chromium carbide into use opens new directions for its application including those for galvanizing, surface and volumetric modification of metal alloys and polymers. The **PURPOSE** of the work is an experimental study of plasma processes using the method of planned experiment to determine the relationship between the control parameters and the basic physicochemical characteristics of chromium carbide. **METHODS.** The study involves the use of the following modern research methods: mathematical modeling and thermodynamic calculations, hydrodynamic and thermal similarity, probe calorimetry and diagnostics, chemical and physico-chemical analyzes (X-ray diffraction, infrared spectroscopy, chromatography, high-temperature pulse extraction, thermogravimetry, thermal desorption mass spectrometry, low-temperature adsorption, transmission and raster electronic microscopy). **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The study has been given to the dependences of the chromium carbonitride and impurities content in the synthesis products on the basic parameters: amount of reducing agent, composition of coolant, initial temperature of the plasma flow and quenching temperature. A complex multi-factor mathematical model of carbonitride formation has been developed. **CONCLUSIONS.** The optimal values of technological factors and the main characteristics of chromium carbonitride are determined by the results of experimental studies. The content of carbonitride in the synthesis products is 91.80–93.40% wt; accompanying impurities, % wt is as follows: free chromium – 1.80–2.1; free carbon – 1.10–1.3; oxygen – 3.00–4.00; particle size – 30–35 nm; shape of the particles – ball-shaped; yield of chromium carbonitride – 91.4%.

Keywords: chromium carbide, chromium carbonitride, plasma synthesis, nanopowders, plasma synthesis modeling

For citation: Shiryayeva L.S., Nozdrin I.V., Rudneva V.V., Galevsky G.V. Experimental study of plasma metallurgical synthesis of chromium carbide by means of planned experiment for various types of chrome-containing raw materials. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2017, vol. 21, no. 10, pp. 177–187. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2017-10-177-187

Введение

В современной технике и технологиях для изготовления защитных покрытий металлов и керметов, легирования безвольфрамовых твердых сплавов широко востребован высший по содержанию углерода карбид Cr_3C_2 . Это обусловлено такими его свойствами, как износ- и коррозионностойкость, твердость, химическая инертность. Сопоставление различных технологий получения порошков тугоплавких соединений свидетельствует о том, что для достижения наноуровня в первую очередь востребованы технологии, основанные на применении высококонцентрированных энергетических потоков для газификации сырья и формирования целевого продукта при объемной конденсации из газовой фазы. Среди подобных технологий плазменный способ отличается сравнительной простотой реализации и является наиболее изученным и конкурентоспособным. Процессы плазменного синтеза условно можно подразделить на три стадии: 1) эволюция

исходного сырья, включающая его движение в потоке газа-теплоносителя, нагрев и фазовые переходы; 2) химические реакции, т.е. сам синтез; 3) формирование дисперсного продукта (конденсация, коалесценция, кристаллизация, коагуляция). На завершенность первой стадии, являющейся в случае использования дисперсного сырья лимитирующей и определяющей (в связи с этим происходит количественный выход целевого продукта), существенные ограничения накладывают высокие скорости движения реагирующих сред, основных составляющих в каналах трехструйных прямоточных реакторов, в зависимости от рабочих параметров плазмотронов 30–60 м/с. Тем самым они способствуют сокращению времени пребывания сырья при температурах перехода его в паровую фазу (10^{-4} – 10^{-5} с).

В связи с этим из всех факторов, влияющих на степень превращения исходного сырья, а именно: теплофизических и



термодинамических свойств плазмы и сырья, соотношения массовых расходов плазмообразующего газа и сырья, начальной температуры плазмы, конструктивных особенностей реактора, удельных энергозатрат, организации процесса смешения дисперсного сырья с плазмой и др. – основным лимитирующим фактором является теплообмен высокотемпературного потока газа с движущимися в нем частицами обрабатываемого материала. Следовательно, высокие степени превращения сырья на первой стадии синтеза могут быть достигнуты при таких гидродинамических и энергетических параметрах реакторов, которые обеспечивают за весьма ограниченное время подвод от теплоносителя к дисперс-

ному сырью количества энергии, достаточного для требуемых теплофизических и физико-химических превращений. Однако экспериментальное исследование этой стадии синтеза затруднено ввиду ее кратковременности и отсутствия надежно работающих в подобных условиях средств диагностики и контроля и сводится в связи с этим, как правило, к модельно-математическому, позволяющему при определенной «идеализации» процесса выявить влияние на степень перехода сырья в газовую фазу температуры и скорости газового потока в зоне ввода сырья, расхода реагентов, условий ввода и размеров частиц сырья [1].

Цель исследования

Целью работы является экспериментальное исследование плазменных процессов с привлечением метода планируемого эксперимента для определения

связи управляющих параметров с основными физико-химическими характеристиками карбида хрома.

Материал и методы исследования

В данной работе проведено экспериментальное исследование плазменного синтеза карбида хрома с привлечением метода планируемого эксперимента для трех технологических вариантов: карбидизации хрома, восстановления оксида хрома Cr_2O_3 , восстановления хлорида хрома CrCl_3 . В качестве объекта исследования и освоения выбрана технология производства карбида хрома карбидизацией хромсодержащего сырья углеводородами в плазменном потоке, генерируемом в трехструйном прямом реакторе [2]. Технологические варианты, параметры и показатели синтеза карбида хрома спрогнозированы по данным термодинамического моделирования высокотемпературных взаимодействий в карбидообразующих хромсодержащих системах и модельно-математического исследования взаимодействия потоков хромсодержащего

сырья и газа – теплоносителя. Их результаты описаны в работе [3].

Технологические варианты, параметры и показатели синтеза карбида хрома представлены в табл. 1. При расчете учитывались возможные потери сырья в реакторе в количестве 4 % и потери продуктов синтеза в системе улавливания в количестве 5 %.

Анализ приведенных в табл. 1 данных показывает, что наиболее перспективным является технологический вариант получения карбида карбидизацией порошка хрома, технико-экономические показатели которого значительно превышают ожидаемые в других вариантах.

Экспериментальные исследования проводились с привлечением метода планируемого эксперимента. Реализована полуреплика полного факторного эксперимента 2^5 . В результате этих исследований

⁵Вершинин В.И., Перцев Н.В. Планирование и математическая обработка результатов химического эксперимента: учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГУ, 2005. 184 с. / Vershinin V.I., Pertsev N.V. Planning and mathematical processing of chemical experiment results: Learning aids. Omsk: Omsk State University Publ., 2005. 184 p.



Таблица 1

Технологические варианты, параметры и показатели синтеза
карбида хрома (прогноз)

Table 1

Technological variants, parameters and synthesis indicators of
chromium carbide (forecast)

Технологические параметры и показатели / Technological parameters and indicators	Технологические варианты / Technological options		
	Карбиди- зация хрома / Chromium carbida- tion	Восстановление оксида хрома Cr_2O_3 / Reduction of chromium oxide Cr_2O_3	Восстановление хлорида хрома CrCl_3 / Reduction of chromium chloride CrCl_3
Мощность реактора, кВт / Reactor capacity, kW	150	150	150
Расход плазмообразующего газа (азота), кг/с / Consumption of plasma-forming gas (nitrogen), kg/s	$9 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$
Начальная температура плазменного по- тока, К / Initial temperature of plasma flow, K	5400	5400	5400
Температуры закалки, К / Quenching tem- peratures, K	2000	2000	2000
Массовая расходная концентрация, кг сы- рья/кг азота / Mass flow rate, kg of feed / kg of nitrogen	0,10	0,12	0,15
Степень превращения сырья в карбид / Conversion degree of raw materials into carbide	0,96	0,96	0,96
Выход карбида, % масс / Carbide yield, % wt.	91,4	90,0	91,8
Производительность по карбиду хрома, кг/ч / Chromium carbide productivity, kg/h	3,42	2,79	1,69
Интенсивность производства, кг/ч·м ³ / Pro- duction intensity, kg/h m ³	2011	1641	994
Расход хромсодержащего сырья, кг/кг / Consumption of chromium-containing raw materials, kg/kg	0,90	1,30	2,76
Расход метана, кг/кг / Methane consump- tion, kg/kg	0,84	2,74	0,89
Расход газа – теплоносителя, кг/кг / Coolant flow rate, kg/kg	9,47	11,6	19,70
Удельный расход эл. энергии, кВт·ч /кг / Specific consumption of electrical energy, kW·h/kg	43,85	53,76	88,70
Расход охлаждающей воды, м ³ /кг / Consumption of cooling water, m ³ /kg	1,08	1,32	2,19



установлено, что продуктом карбидизации в области температур 5400–2000 К является близкий по кристаллической структуре и фазовому составу к карбиду хрома карбонитрид состава $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2$. Для исследуемых технологических вариантов получены уравнения регрессии в натуральных переменных (1)–(16):

$$[\text{Cr}_3(\text{C}_1\text{N})_2] = -66,12 + 0,03T_0 - 0,42\{\text{H}_2\} - 0,14\{\text{N}\} - 0,00002T_0\{\text{N}\}; \quad (1)$$

$$[\text{Cr}_3(\text{C}_1\text{N})_2 - \text{Cr}_{\text{своб}}] = 147,95 - 0,027T_0 - 0,34\{\text{H}_2\} - 1,37\{\text{N}\} + 0,0003T_0\{\text{N}\}; \quad (2)$$

$$[\text{Cr}_3(\text{C}_1\text{N})_2 - \text{C}_{\text{своб}}] = 11,2 - 0,002T_0 + 0,0096\{\text{CH}\} + 0,44\{\text{N}\} - 0,00008T_0\{\text{N}\}; \quad (3)$$

$$[\text{Cr}_3(\text{C}_1\text{N})_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3] = 41,08 - 0,0069T_0 + 0,00004T_0\{\text{CH}\} - 0,208\{\text{CH}\}; \quad (4)$$

$$[\text{Cr}_3(\text{C}_1\text{N})_2 - \text{N}_{\text{связ}}] = 1,74 + 0,0002T_0 - 0,012\{\text{H}_2\} - 0,04\{\text{N}\} - 0,000007T_0\{\text{N}\}; \quad (5)$$

$$[\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2] = -60,59 + 0,031T_0 - 2,25\{\text{H}_2\} - 0,24\{\text{N}\}; \quad (6)$$

$$[\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2 - \text{CrCl}_2] = 206,9 - 0,034T_0 - 0,0116T_1 - 2,8\{\text{H}_2\} - 1,75\{\text{N}\} + 0,0003T_0\{\text{N}\} + 0,0015T_1\{\text{H}_2\}; \quad (7)$$

$$[\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2 - \text{C}_{\text{своб}}] = 13,64 - 0,0022T_0; \quad (8)$$

$$[\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2 - \text{HCl}] = -9,85 + 0,0025T_0 + 0,00086T_1 - 0,0192\{\text{CH}\} - 0,32\{\text{H}_2\} + 1,18\{\text{N}\} - 0,0002T_0\{\text{N}\} - 0,0000688T_1\{\text{N}\} + 0,00256\{\text{CH}\}\{\text{H}_2\}; \quad (9)$$

$$[\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2 - \text{O}] = 13,99 - 0,002T_0 - 0,8\{\text{N}\} + 0,00016T_0\{\text{N}\}; \quad (10)$$

$$[\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2 - \text{N}] = 0,35 + 0,08\{\text{H}_2\} + 0,05\{\text{N}\} - 0,00620\{\text{H}_2\}\{\text{N}\}; \quad (11)$$

$$[\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2] = [\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2] = -97,7 + 0,0324T_0 + 0,0039T_1 + 2,8\{\text{H}_2\} + 0,7556\{\text{N}\} - 0,000192T_0\{\text{N}\} - 0,00157T_1\{\text{H}_2\}; \quad (12)$$

$$[\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3] = 185,5 - 0,03T_0 + 0,4\{\text{H}_2\} - 1,5\{\text{N}\} + 0,0003T_0\{\text{N}\}; \quad (13)$$

$$[\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2 - \text{C}_{\text{своб}}] = 11 - 0,00198T_0 + 0,01\{\text{CH}\} + 0,6\{\text{N}\} - 0,000112T_0\{\text{N}\}; \quad (14)$$

$$y_4[\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2 - \text{O}] = -0,86 + 0,001292T_1 + 0,2\{\text{N}\} - 0,0001T_1\{\text{N}\}; \quad (15)$$

$$y_5[\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2 - \text{N}] = 0,95 - 0,0048\{\text{N}\}; \quad (16)$$

где T_0 – начальная температура плазменного потока, К; T_1 – температура закалки, К; $\{\text{H}_2\}$ – концентрация водорода в плазмообразующем газе, % об.; $\{\text{N}\}$ – количество атомарного азота в плазмообразующем газе $\text{N}(\text{NH}_3)/\text{C}(\text{CH}_4)$, % от стехиометрического; $\{\text{CH}\}$ – количество углеводорода от стехиометрически необходимого для карбидизации хрома.

Во всех случаях с 95%-й степенью вероятности установлена адекватность полученных интерполяционных полиномов ($F_{\text{табл}} > F_{\text{эксп.}}$) описываемым процессам синтеза (вариант 1, 2, 3). Это свидетельствует об учете всех основных влияющих на процесс факторов.

На рис. 1–4 показаны зависимости содержания карбонитрида хрома $\text{Cr}_3(\text{C}, \text{N})_2$ в продуктах синтеза от концентрации водорода в плазмообразующем газе ($\{\text{H}_2\}$, %) и от количества атомарного азота в плазмообразующем газе ($\{\text{N}\}$, %) при температуре 5400 К, а также содержания хрома свободного $\text{Cr}_{\text{своб}}$ в продуктах синтеза от концентрации водорода в плазмообразующем газе ($\{\text{H}_2\}$, %) и от количества атомарного азота в плазмообразующем газе ($\{\text{N}\}$, %) при температуре 5000 К; содержания углерода свободного $\text{C}_{\text{своб}}$ в продуктах синтеза от количества углеводорода от стехиометрически необходимого для карбидизации хрома ($\{\text{CH}\}$, %) и от количества атомарного азота в плазмообразующем газе ($\{\text{N}\}$, %) при температуре 5400 К; содержания оксида хрома Cr_2O_3 в продуктах синтеза от начальной температуры плазменного потока (T_0 , К) и от количества углеводорода от стехиометрически необходимого для карбидизации хрома ($\{\text{CH}\}$, %); содержания азота $\text{N}_{\text{связ}}$ в продуктах синтеза от концентрации водорода в плазмообразующем

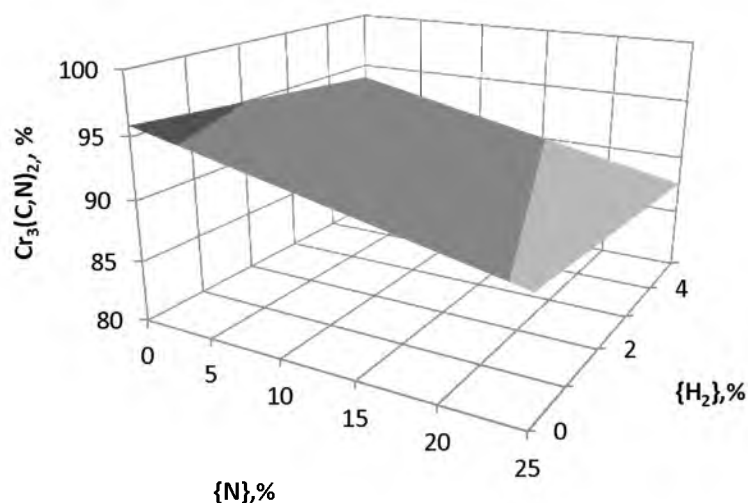


Рис. 1. Содержание карбонитрида хрома $Cr_3(C,N)_2$ в продуктах синтеза при температуре 5400 K
Fig. 1. Content of chromium carbonitride $Cr_3(C,N)_2$ in synthesis products at the temperature of 5400 K

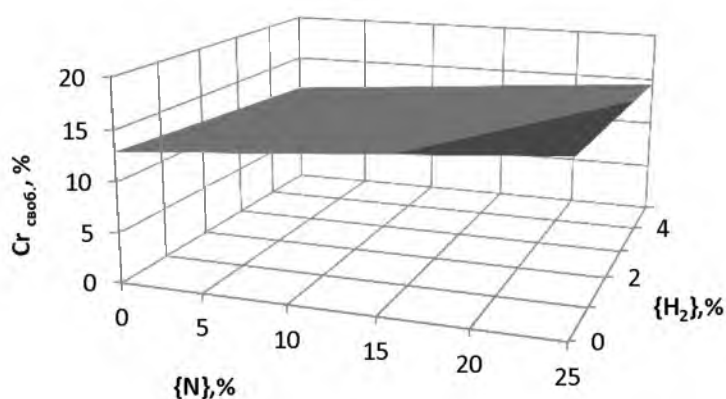


Рис. 2. Содержание хрома свободного $Cr_{своб.}$ в продуктах синтеза при температуре 5000 K
Fig. 2. Content of free chromium $Cr_{своб.}$ in the synthesis products at the temperature of 5000 K

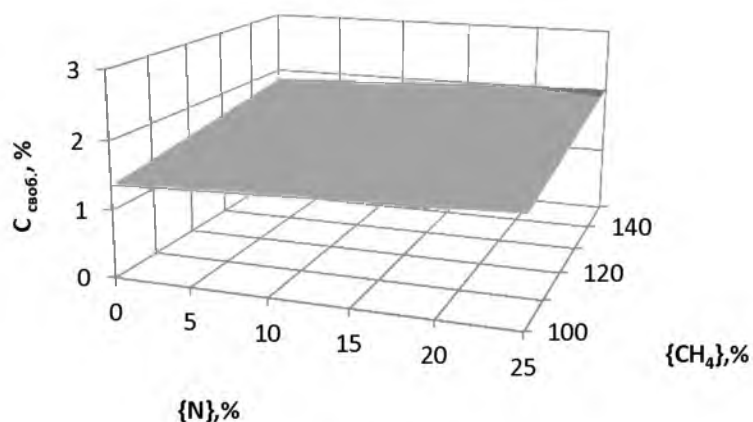


Рис. 3. Содержание углерода свободного $C_{своб.}$ в продуктах синтеза при температуре 5400 K
Fig. 3. Content of free carbon $C_{своб.}$ in the synthesis products at the temperature of 5400 K

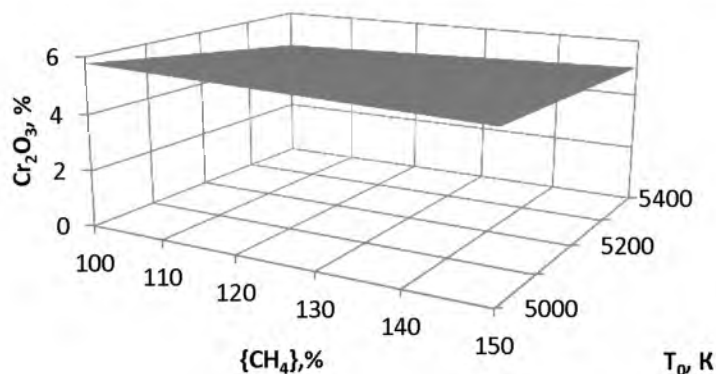


Рис. 4. Содержание оксида хрома Cr_2O_3 в продуктах синтеза
Fig. 4. Content of chromium oxide Cr_2O_3 in the synthesis products

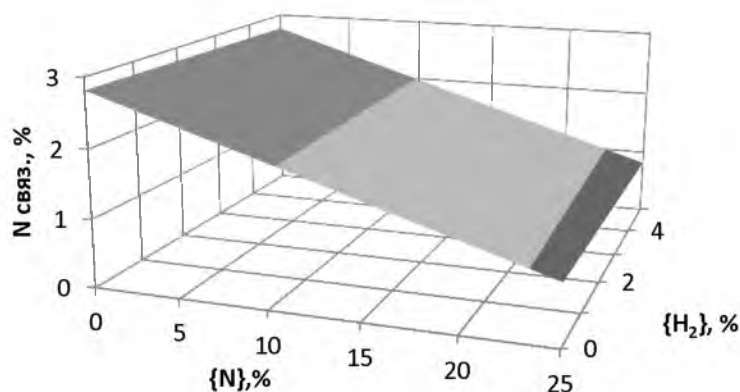


Рис. 5. Содержание азота $N_{связ}$ в продуктах синтеза при температуре 5400 K
Fig. 5. Content of nitrogen N_{bound} in the synthesis products at the temperature of 5400 K

Результаты исследования и их обсуждение

газе ($\{H_2\}$, %) и от количества атомарного азота в плазмообразующем газе ($\{N\}$, %) при температуре 5400 K (вариант 1).

Из анализа полученных результатов для технологического варианта 1 следует, что содержание в продуктах синтеза карбонитрида хрома является функцией трех факторов: x_1 – начальной температуры плазменного потока; x_4 – концентрации водорода в плазмообразующем газе; x_5 – количества атомарного азота в плазмообразующем газе и одного двойного взаимодействия x_{15} . Ранжирование факторов по значимости коэффициентов показывает, что

$$x_1 > x_5 > x_4 > x_{15}.$$

Следовательно, для повышения содержания карбонитрида хрома синтез тех-

нологически целесообразно осуществлять в плазменном потоке, имеющем максимально достижимую начальную температуру, без дополнительного введения в поток водорода и аммиака. Содержание свободного углерода может быть снижено при повышении начальной температуры плазменного потока (фактор x_1), снижении концентрации атомарного азота (фактор x_5) и водорода (фактор x_4) в плазмообразующем газе. Сопоставление уравнений 1 и 4 для свободного хрома и диоксида хрома позволяет предположить, что окисление носит вторичный характер, происходит в послеплазменный период в момент разгерметизации системы улавливания, а в содержание оксида хрома вносят вклад как карбонитрид, так и свободный хром.



Из анализа полученных результатов для технологического варианта 2 следует, что содержание в продуктах синтеза карбонитрида хрома является функцией трех факторов: x_1 – начальной температуры плазменного потока, x_4 – концентрации водорода в плазмообразующем газе, x_5 – количества атомарного азота в плазмообразующем газе. Ранжирование факторов по значимости коэффициентов показывает, что $x_1 > x_5 > x_4$.

Следовательно, для повышения содержания карбонитрида хрома синтез технологически целесообразно осуществлять в плазменном потоке, имеющем максимально достижимую начальную температуру, без дополнительного введения в поток водорода и аммиака. Содержание CrCl_2 может быть снижено при повышении начальной температуры плазменного потока (фактор x_1), понижении концентрации водорода (фактор x_4) и атомарного азота (фактор x_5) в плазмообразующем газе, а также при снижении температуры закалки, о чем свидетельствуют факторы двойного взаимодействия (x_{15} , x_{24}). Содержание углерода свободного может быть снижено при повышении начальной температуры плазменного потока (фактор x_1). Содержание HCl является функцией трех двойных взаимодействий: x_{15} , x_{25} , x_{34} . Следовательно, для понижения содержания HCl синтез необходимо проводить в наиболее высокотемпературном азот-водородном плазменном потоке и сниженных концентрациях метана и водорода. Содержание кислорода в карбиде является функцией одного двойного взаимодействия – начальной температуры плазменного потока и концентрации азота в плазмообразующем газе (x_{15}). Содержание азота в карбиде также является функцией одного двойного взаимодействия и определяется условиями газификации углерода и концентрации атомарного азота (фактор x_{45}).

Из анализа полученных результатов для технологического варианта 3 следует, что содержание в продуктах синтеза карбо-

нитрида хрома является функцией четырех факторов (x_1 – начальной температуры плазменного потока, x_2 – температуры закалки, x_4 – концентрации водорода в плазмообразующем газе, x_5 – количества атомарного азота в плазмообразующем газе и двух двойных взаимодействий – x_{15} и x_{24}). Ранжирование факторов по значимости коэффициентов показывает, что

$$x_1 > x_5 > x_4 > x_{24} > x_{15}.$$

Следовательно, для повышения содержания карбонитрида хрома синтез технологически целесообразно осуществлять в плазменном потоке, имеющем максимально достижимую начальную температуру, без дополнительного введения в поток водорода и аммиака, а также с понижением температуры закалки. Содержание оксида хрома Cr_2O_3 уменьшается с повышением начальной температуры плазменного потока (фактор x_1), уменьшением концентрации водорода (фактор x_4) и атомарного азота (фактор x_5) в плазмообразующем газе. Содержание углерода свободного может быть снижено при повышении начальной температуры плазменного потока (фактор x_1), понижении количества метана (фактор x_3) и концентрации азота в плазмообразующем газе (фактор x_5). Содержание кислорода является функцией одного двойного взаимодействия и зависит от температуры закалки и концентрации азота в плазмообразующем газе (фактор x_{25}). Содержание азота зависит от концентрации азота в плазмообразующем газе (фактор x_5).

Оптимальные значения технологических факторов и допустимые пределы их изменения, а также основные характеристики синтезируемого при этих условиях карбонитрида хрома, полученные при пятикратном дублировании опытов, приведены в табл. 2. Аналогичная методика описания параметров синтеза и характеристик нанодисперсных материалов представлена в работах^{5,6} [4–8].

⁶Костин В.Н., Тишина Н.А. Статистические методы и модели: учеб. пособие. Оренбург: Изд-во ОГУ, 2004. 138 с. / Kostin V.N., Tishina N.A. Statistical methods and models: Learning aids. Orenburg: Orenburg State University Publ., 2004. 138 p.



Таблица 2

**Допустимые пределы изменения параметров синтеза карбонитрида
хрома в промышленном реакторе мощностью 150 кВт
и его основные характеристики**

Table 2

**Permissible limits of chromium carbonitride synthesis parameters alteration
in an industrial reactor of 150 kW and its main characteristics**

Параметры синтеза и характеристики карбонитрида хрома / Synthesis parameters and characteristics of chromium carbonitride	Значение / Value
Состав газа-теплоносителя, % об. / Composition of coolant gas, % vol. – азот / nitrogen	100
Состав карбидизатора, % об. / Composition of carbidizer, % vol. – метан / methane – этан / ethane – пропан / propane – бутан / butane	93,6 3,0 2,2 1,2
Состав хромсодержащего сырья, % масс. / Composition of chromium-containing raw materials, % wt. – хром металлический / metallic chromium	99,3
Крупность хромсодержащего сырья, мкм / Size of chromium-containing raw materials,	–10
Производительность по сырью, кг/ч / Total crude capacity, kg/h	3,11
Количество карбидизатора, % от стехиометрического / Amount of carbidizer, % of stoichiometric	120 – 140
Начальная температура плазменного потока, К / Initial temperature of the plasma flow, K	н.м. 5400
Температура закалки, К / Quenching temperature, K	2000÷2200
Фазовый состав / Phase composition	$\text{Cr}_3(\text{C}_{0,80}\text{N}_{0,20})_2$
Химический состав, % масс. / Chemical Composition, % wt – $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,80}\text{N}_{0,20})_2$ – хром свободный / free chromium – углерод свободный / free carbon – оксид хрома (III)* / chromium (III) oxide * – летучие / volatiles	91,8 – 93,45 2,10 – 1,80 1,30 – 1,10 4,00 – 3,00 0,80 – 0,60
Выход карбонитрида хрома, % масс. / Yield of chromium carbonitride, % wt	92,0
Производительность, кг/ч / Productivity, kg / h	3,42
Интенсивность, кг/ч·м ³ / Intensity, kg/h·m ³	2010
Удельная поверхность, м ² /кг / Specific surface, m ² /kg	31000 – 35000
Размер** частиц, нм / Size** of particles, nm	32 – 35
Форма частиц / Shape of particles	Шаровидная / Ball-shaped
Окисленность нанопорошка карбонитрида хрома*** × 10 ⁷ , кг О ₂ /м ² / Oxidation of chromium carbonitride nanopowder	2,56

Примечание / Note. * – определялось по содержанию кислорода / determined by the oxygen content; **– рассчитывался по величине удельной поверхности/ calculated by the specific surface area value; ***– определялась после выдержки на воздухе в течение 24 ч / determined after 24-hour exposure to air.



Выводы

Оценка влияния отдельных факторов на состав продуктов синтеза подтверждает лимитирующую роль в этом процессе испарения хромосодержащего сырья. Слабая чувствительность синтеза к разбавлению плазменного потока азота водородом и аммиаком обусловлена применением метана как альтернативного пропану углеводорода с более высоким соотношением водорода к углероду. Результаты экспериментального исследования процесса синтеза карбонитрида хрома в целом подтверждают основные выводы, вытекающие из его термодинамического и кинетического анализов. По результатам экспериментальных исследований определены опти-

мальные значения технологических факторов и основные характеристики карбонитрида хрома. Содержание карбонитрида в продуктах синтеза составляет 91,80–93,40 % масс; сопутствующих примесей, % масс: хрома свободного – 1,80–2,1; углерода свободного – 1,10–1,3; кислорода – 3,00–4,00; размер частиц – 30–35 нм; форма частиц – шарообразная; выход карбонитрида хрома – 91,4 %. Следует отметить, что в отдельных опытах отмечается оптимальное сочетание факторов, обеспечивающих достижение требуемых характеристик карбонитрида хрома уже на стадии синтеза: фазового и химического составов, а также дисперсности.

Библиографический список

1. Галевский Г.В., Руднева В.В., Юркова Е.К. Компьютерное моделирование режимов эффективной переработки дисперсного сырья в плазменном реакторе // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: тр. VI Всерос. науч.-практ. конф. СибГИУ (Новокузнецк, 17–19 мая 2007 г.). Новокузнецк, 2007. С. 343–346.
2. Галевский Г.В., Руднева В.В., Ноздрин И.В. Исследование характеристик реактора для плазмометаллургического производства тугоплавких боридов и карбидов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2011. № 8. С. 27–32.
3. Руднева В.В., Ноздрин И.В., Терентьева М.А. Ноздрин И.В. Модельно-математическое исследование условий эффективной переработки хромосодержащего сырья в плазменном реакторе // Изв. вузов. Черная металлургия. 2012. № 2. С. 13–18.
4. Моссэ А.Л. Обработка дисперсных материалов в плазменных реакторах. Минск: Наука и техника, 1980. 207 с.
5. Самсонов Г.В. Свойства элементов: справочник в 2-х частях. М.: Металлургия, 1976. Ч. 1. Физические свойства. 600 с.
6. Самсонов Г.В., Борисова А.Л. Физико-химические свойства окислов: справочник. М.: Металлургия, 1978. 472 с.
7. Фурман А.А. Неорганические хлориды. М.: Химия, 1980. 416 с.
8. Боровинская И.П., Прокудина В.К., Ратников В.И. Применение титана в процессах СВС // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2010, № 4. С. 26–33.

References

1. Galevskij G.V., Rudneva V.V., Jurkova E.K. *Komp'yuternoe modelirovanie rezhimov jeffektivnoj pererabotki dispersnogo syr'ja v plazmennom reaktore* [Computer simulation of efficient processing modes of disperse raw materials in a plasma reactor]. *Works VI Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii SibGIU "Sistemy avtomatizacii v obrazovanii, nauke i proizvodstve"* [Proceedings of VI All-Russia scientific and practical conference of Siberian State Industrial University "Automation systems in education, science and industry", Novokuznetsk, 17–19 May 2007]. Novokuzneck, 2007, pp. 343–346. (In Russian)
2. Galevskij G.V., Rudneva V.V., Nozdrin I.V. Reactor for plasmometallurgical production of refractory borides and carbides. *Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija* [Izvestiya. Ferrous metallurgy]. 2011, no. 8, pp. 27–32. (In Russian)
3. Rudneva V.V., Nozdrin I.V., Terent'eva M.A. Nozdrin I.V. Mathematical analysis and simulation study on the conditions of the effective chromium-containing raw materials processing in plasma reactor. *Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija* [Izvestiya. Ferrous metallurgy]. 2012, no. 2, pp. 13–18. (In Russian)
4. Mossje A.L. *Obrabotka dispersnyh materialov v plazmennyh reaktorah* [Dispersed materials processing in plasma reactors]. Minsk: Nauka i tehnika Publ., 1980, 207 p. (In Russian)
5. Samsonov G.V. *Svojstva jelementov. Fizicheskie svojstva*. [Properties of elements. Physical properties]. Moscow: Metallurgija Publ., 1976, 600 p. (In Russian)



6. Samsonov G.V., Borisova A.L. *Fiziko-himicheskie svoystva okislov* [Physico-chemical properties of oxides]. Moscow: Metallurgija Publ., 1978, 472 p. (In Russian)
7. Furman A.A. *Neorganicheskie hlорidy* [Inorganic chlorides]. Moscow: Himija Publ., 1980, 416 p. (In Russian)

Критерии авторства

Ширяева Л.С., Ноздрин И.В., Руднева В.В., Галевский Г.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 25.09.2017 г.

8. Borovinskaja I.P., Prokudina V.K., Ratnikov V.I. Obtaining of titanium powder from titanium sponge by self-propagating high-temperature synthesis hydration and dehydration. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Poroshkovaja metallurgija i funkcional'nye pokrytija* [Universities' Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings]. 2010, no. 4, pp. 26–33. (In Russian)

Authorship criteria

Shiryaeva L.S., Nozdrin I.V., Rudneva V.V., Galevsky G.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The article was received 25 September 2017