

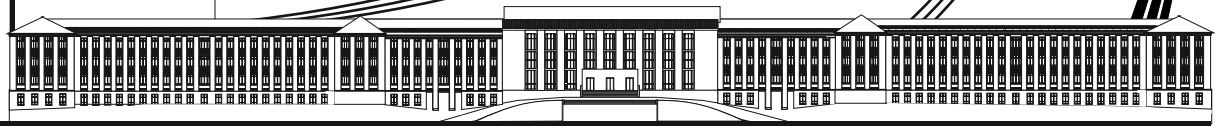
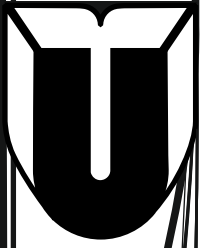
ISSN 1814-3520 (print)
ISSN 2500-1590 (online)

Том 22, № 7

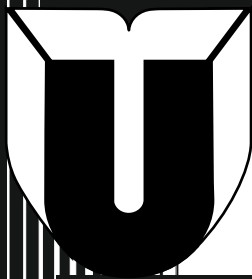
2018

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2018



Том 22, № 7

2018

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и машиноведение

- ❁ Астафьева Н.А., Бузин А.С. Исследование влияния видов предварительной обработки на качество сварных облегченных конструкций из алюминиевых сплавов..... 10
- ❁ Лагунова Е.О. Расчетная модель радиального подшипника, смазываемого расплавом, в турбулентном режиме трения с учетом зависимости вязкости от давления и температуры..... 19
- ❁ Серга Г.В., Марченко А.Ю., Хвостик Э.А. Увеличение технологических возможностей и повышение эффективности вибрационной обработки деталей в машиностроительном производстве..... 33
- ❁ Штайгер М.Г., Балановский А.Е. Анализ технологий для сварки высокопрочных рельсов с позиции структурообразования при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей (обзор). Часть 2..... 41

Информатика, вычислительная техника и управление

- ❁ Зуенко А.А. Методы ускорения комбинаторного поиска на основе матричного представления качественных зависимостей в задачах удовлетворения ограничений..... 69
- ❁ Столяров А.И., Донецкая Ю.В., Гатчин Ю.А. Особенности САПР при проектировании комплекса..... 88
- ❁ Черных Ю.А., Витвицкий Д.С., Кузьмина О.И. Алгоритм расчета интегрального индекса эффективности публикационной активности профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников вуза..... 96

Энергетика

- ❁ Губий Е.В. Математическая модель анализа надежности топливоснабжения отдаленных населенных пунктов биомассой с энергетических плантаций..... 102
- ❁ Курнакова Н.Ю., Нуждин А.В., Волхонский А.А. О Возможности повышения энергоэффективности тепловой схемы ТЭС с применением теплового насоса..... 114
- ❁ Петухов Р.А., Сизганова Е.Ю., Сизганов Н.В., Филатов АН. К вопросу автоматизации управления потоками реактивной мощности в системах электроснабжения..... 123

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

СОДЕРЖАНИЕ



Энергетика



- 
Полозов П.Ю., Поршнева Е.Г. Модернизация системы зажигания автономного электроагрегата АЭ–1 с помощью молекулярного накопителя энергии..... 147
- 
Соколов А.Д., Такайшвили Л.Н. Оценка ресурсов угля восточных регионов России для строительства угольных электростанций..... 155



Металлургия и материаловедение



- 
Алексеева Т.И., Галевский Г.В., Руднева В.В., Галевский С.Г. Разработка научных и технологических основ плазмохимического производства карбида циркония..... 164
- 
Дошлов О.И., Чижик К.И., Дошлов И.О., Подгорбунская Т.А., Афанасьева Р.С. Современная ресурсосберегающая технология получения анодной массы в металлургическом производстве..... 181



Транспорт



- 
Бояршинов А.Л., Ишков А.М., Решетников А.П. Влияние магнитных бурь на безопасность дорожного движения в условиях Севера..... 193
- 
Бутузова А.Б., Елфимова Н.А. Школьные перевозки в России и за рубежом..... 200
- 
Вшивков Ю.Ф., Галушко Е.А., Кривель С.М. Методика вычислительного эксперимента на основе ANSYS по определению аэродинамических характеристик тела при отрывном обтекании..... 208
- 
Михеев В.А. Влияние инновационных вагонов на производительность подвижного состава в грузовом движении..... 223
- 
Федотов А.И., Тихов-Тинников Д.А., Лысенко А.В., Кузнецов Н.Ю. Контроль технического состояния амортизаторов автотранспортного средства при переезде единичной неровности..... 234





Оригинальная статья / Original article

УДК 621. 762

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-164-180>

РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА КАРБИДА ЦИРКОНИЯ

© Т.И. Алексеева¹, Г.В. Галевский², В.В. Руднева³, С.Г. Галевский⁴

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

РЕЗЮМЕ. Данное исследование связано с разработкой научных и технологических основ плазмохимического производства карбида циркония. **ЦЕЛЬ.** Разработка научных и технологических основ получения нанокристаллического карбида циркония с использованием результатов теоретических и экспериментальных исследований плазмохимических процессов карбидообразования. **МЕТОДЫ.** При исследовании использовалось математическое моделирование процесса с применением константного метода. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработан непрерывный технологический процесс получения карбида циркония в плазмохимическом реакторе. Спрогнозирована возможность применения карбида циркония в функциональных защитных покрытиях.

Ключевые слова: карбид циркония, физико-химические характеристики, термодинамическое моделирование, плазмосинтез, степень превращения, равновесные и квазиравновесные составы, плазмохимический реактор, выход карбида.

Информация о статье. Дата поступления 06 апреля 2018 г.; дата принятия к печати 06 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 июля 2018 г.

Формат цитирования. Алексеева Т.И., Галевский Г.В., Руднева В.В. Галевский С.Г. Разработка научных и технологических основ плазмохимического производства карбида циркония // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 164–180. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-164-180

DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL BASES OF PLASMA-CHEMICAL PRODUCTION OF ZIRCONIUM CARBIDE

T.I. Alekseeva, G.V. Galevsky, V.V. Rudneva, S.G. Galevsky

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

ABSTRACT. This research deals with the development of scientific and technological fundamentals of plasma-chemical production of zirconium carbide. The **PURPOSE** of the paper is development of scientific and technological foundations for the production of nanocrystalline zirconium carbide using the results of theoretical and experimental studies of plasma-chemical processes of carbide formation. **METHODS.** The study uses mathematical modeling of the process with the const method. **RESULTS.** A continuous technological process of zirconium carbide production in a plasma-chemical re-

¹Алексеева Татьяна Игоревна, аспирант, e-mail: kafcmetsibsiiu.ru

Tatiana I. Alekseeva, Postgraduate student, e-mail: kafcmetsibsiiu.ru

²Галевский Г.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов и химической технологии.

Galevsky G.V., Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy and Chemical Technology.

³Руднева В.В., доктор технических наук, профессор кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии.

Rudneva V.V., Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy and Chemical Technology.

⁴Галевский С.Г., кандидат экономических наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии.

Galevsky S.G., Candidate of Economics, Associate Professor of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy and Chemical Technology.



actor has been developed. A prediction is made on the possibility to use zirconium carbide in functional protective coatings.

Keywords: zirconium carbide, physical and chemical characteristics, thermodynamic modeling, plasma synthesis, transformation degree, equilibrium and quasi-equilibrium compositions, plasma-chemical reactor, carbide yield

Information about the article. Received April 06, 2018; accepted for publication June 06, 2018; available online July 31, 2018.

For citation. Alekseeva T.I., Galevsky G.V., Rudneva V.V., Galevsky S.G. Development of scientific and technological bases of plasma-chemical production of zirconium carbide. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 164–180. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-164-180 (In Russian).

Введение

Актуальность выбранной темы.

Одной из важнейших задач химической технологии неорганических веществ является получение материалов для работы в экстремальных условиях – при высоких температурах и напряжениях, под воздействием агрессивных сред и т.п. В решении этих задач существенная роль принадлежит использованию соединений тугоплавких металлов с бором, углеродом, азотом, кремнием – боридов, карбидов, нитридов и силицидов, которые наряду с высокой твердостью и тугоплавкостью обладают жаростойкостью и жаропрочностью, специфическими физическими и химическими свойствами. Среди карбидов переходных металлов карбид циркония по сочетанию специальных свойств входит в лидирующую группу, уникально совмещая такие практически значимые свойства, как твердость, тугоплавкость, коррозионная стойкость в жидких, газовых и металлических средах, износостойкость.

Карбид циркония ZrC , исследованный и введенный в обращение научной школой известного российского ученого-материаловеда Г.В. Самсонова более 50 лет назад, до сих пор востребован в технологии различных материалов: металлокерамических инструментальных и конструкционных, огнеупорных и абразивных, для модифицирования покрытий. Анализ современной научно-технической информации отражает тенденцию перехода от применения карбида циркония крупнозерни-

стого к микро- и нанокристаллическому, что обусловлено стремлением ученых и технологов-практиков к достижению качественно нового уровня эксплуатационных свойств материалов и покрытий на его основе.

Современное производство карбида циркония базируется на карботермическом способе, который реализуется в нескольких технологических вариантах и применяется для получения карбида циркония при использовании его в составе материалов для абразивной обработки, напыления и наплавки, защитных покрытий. Однако стратегически важный нанокристаллический сегмент рынка карбида циркония полностью обеспечивается зарубежными поставщиками, среди которых такие компании, как «Nanostructured & Amorphous Materials, Inc.» (США), «Hefei Kaier Nanotechnology & Development Ltd. Co» (Китай), «NEOMAT Co» (Латвия), «PlasmaChem GmbH» (Германия). Это обуславливает необходимость развития российской нанотехнологии карбида циркония.

Таким образом, исследование и технологическая реализация процессов карбидообразования при плазмохимической переработке цирконий-углеродсодержащего сырья является важной научно-практической задачей, имеющей большое значение для развития отечественной технологии многофункциональных соединений циркония, а также эффективного решения инновационных задач прикладного материаловедения.



Технологические решения в производстве и применении карбида циркония:
анализ, оценка и определение доминирующих тенденций
(обзор научно-технической литературы)

Физико-химические свойства карбида циркония: анализ, систематизация, оценка прикладной значимости.
В системе установлено существование одного соединения – монокарбида циркония с кубической гранецентрированной решеткой типа NaCl и параметром $a = 0,4692$ нм (пространственная группа O_h^5 –Fm3m) [1].

По своей структуре ZrC может быть отнесен к фазам внедрения.

Анализ физико-химических свойств карбида циркония приведен в работе [2]. Физические, химические, механические и адгезионные свойства карбида циркония представлены в табл. 1 [2–4].

Таблица 1

Физические, химические, механические и адгезионные свойства карбида циркония

Table 1

Physical, chemical, mechanical and adhesion properties of zirconium carbide

Характеристика	Значение
<i>Теплофизические свойства</i>	
Температура плавления, $T_{пл}$, К	3803
Температура кипения, $T_{кип}$, К	5373
Теплоемкость, C_{p298} , Дж/(моль·К)	37,91
Теплопроводность, λ_{298} , Вт/(м·К), $T=300$ К	11,60
Коэффициент термического расширения, $K^{-1} \cdot 10^{-6}$, $T=300$ К	7,01
<i>Стойкость против окисления</i>	
Температура, К / Время окисления, ч	1373 / 1,5; 1373 / 3,0; 1373 / 5,0
Изменение массы, кг/м ²	$\sim 22,5 \cdot 10^{-2}$; $\sim 40 \cdot 10^{-2}$; $\sim 55 \cdot 10^{-2}$
<i>Стойкость в жидких средах</i>	
Растворитель	Нерастворимый остаток, %
HNO ₃ (1:1)	76/6
H ₂ SO ₄ ($\rho = 1,84$)	97/99
H ₃ PO ₄ ($\rho = 1,21$)	96/88
H ₃ PO ₄ (1:3)	98/2
HClO ₄ ($\rho = 1,35$)	97/2
<i>Механические свойства</i>	
Плотность, $\rho \cdot 10^3$, кг/м ³	6,66
Модуль упругости, E , ГПа	4,12
Микротвердость, H_v , Па·10 ⁻⁹	29,00
Предел прочности, $\delta \cdot 10^{-8}$, Па ($T=300$ К):	
– при растяжении	10,5
– при сжатии	18,0
– при изгибе	4,4–6,0
<i>Адгезионные свойства</i>	
Расплавленный металл	Угол смачивания, град. / температура, К
Al	вакуум 150 / 1273
Si	вакуум 22 / 1773
Fe;	вакуум 40 / 1823
Co	вакуум 30 / 1723



Проведенный анализ доступной научно-технической и технологической литературы подтверждает, что карбид циркония входит в группу материалов, имеющих такие характеристики, как тугоплавкость, сверхтвердость, жаростойкость и жаропрочность [2]. Системные исследования карбида циркония в нанокристаллическом состоянии с использованием современной приборно-аналитической базы практически не проводились.

Технологические решения в производстве и применении карбида циркония. Анализ современного состояния производства карбида циркония приведен в работе [5]. Известные способы производства карбида циркония представлены в виде схемы на рис. 1 [1, 5].

Проведенный анализ позволяет выявить, что два способа – механосинтез и плазмосинтез, направлены на получение карбида в нанокристаллическом состоянии. Механосинтез карбида циркония, реализуемый обычно в высокоэнергетических мельницах с использованием шихты цирконий–углерод, ориентированный преимущественно на получение препаративных количеств нанопорошка карбида размерного диапазона 5–200 нм для исследования особенностей его физико-химических свойств в наносостоянии и обоснованного поиска новых областей применения, в течение последних 20 лет не претерпел существенных технологических и аппаратурных изменений и модернизаций и по своим показателям по-прежнему может быть отнесен к лабораторным [6–8].

Плазмосинтез карбида циркония – первая в его технологической истории попытка создания непрерывного процесса. Технологические основы плазмосинтеза, заложенные на рубеже 70–80 годов прошлого столетия, предполагают совместную переработку $ZrCl_4$ и пропан-бутановой технической смеси в плазменном потоке аргона и водорода, закалку продуктов плазмообработкой и их улавливание, внереакторную термическую обработку в инертной среде. Плазменный реактор мощностью 16,5 кВт обеспечивает производство карбида циркония в виде нанопорошка с частицами размерного диапазона 10–100 нм до 1 т в год. При этом нанопорошок характеризуется следующим содержанием, %: ZrC – 93,0–97,0; $C_{своб.}$ – 0,5–1,5; O – 2,0–5,0. Сам способ, оборудование и аппаратурно-технологическая схема для его реализации были освоены сначала для производства заказных партий в условиях Специального конструкторско-технологического бюро неорганических материалов АН Латвии, а позднее и до настоящего времени – для малотоннажного производства в условиях фирмы «NEOMAT Co» (Латвия) [5]. Достигнутые показатели позволяют рассматривать плазмосинтез как наиболее перспективный из известных способов получения карбида циркония в наносостоянии [9].

Карбид циркония стандартной granulometрии положительно опробован в составе твердых сплавов, антиэмиссионных, абразивных и коррозионностойких покрытий, что позволяет спрогнозировать его эффективное применение в наносостоянии в производстве поликристаллических



Рис. 1. Известные способы производства карбида циркония
Fig. 1. Known methods of zirconium carbide production



сверхтвердых материалов и изделий из них, в гальванотехнике при электроосаждении композиционных металломатричных покрытий, в металлургии алюминия при формировании защитных смачиваемых покрытий катодов электролизеров [10–12].

Анализ отечественного и мирового рынков карбида циркония и его сегментов свидетельствует о достаточно разнообразных предложениях производителей, ориентирующихся главным образом на поставку карбида циркония для производства абразивов, огнеупоров, пленочных покрытий,

металлокерамических мишеней и др. Данный анализ актуален и для решения задач исследовательского характера. Предлагаемый к реализации карбид циркония значительно отличается по химическому составу, дисперсности, уровню цен, объемам поставок. При этом рынок нанокристаллического карбида циркония обеспечивается в основном зарубежными производителями, что обуславливает необходимость отечественного освоения его производства как единственного направления эффективного импортозамещения [12].

Теоретическое исследование

Теоретическое исследование включает термодинамическое моделирование плазмосинтеза карбида циркония.

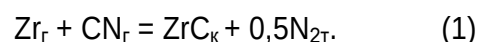
Термодинамическое моделирование плазмосинтеза карбида циркония: цели, задачи, объекты. Термодинамическое моделирование процессов синтеза проведено с целью прогнозирования оптимальных условий получения карбида циркония (соотношения компонентов и температуры), определения равновесных показателей процесса (степени превращения сырья в карбид, составов газообразных и конденсированных продуктов), оценки вклада в процессы карбидообразования газофазных реакций, обеспечивающих в условиях плазменных технологий эффективную переработку дисперсного сырья [13, 14].

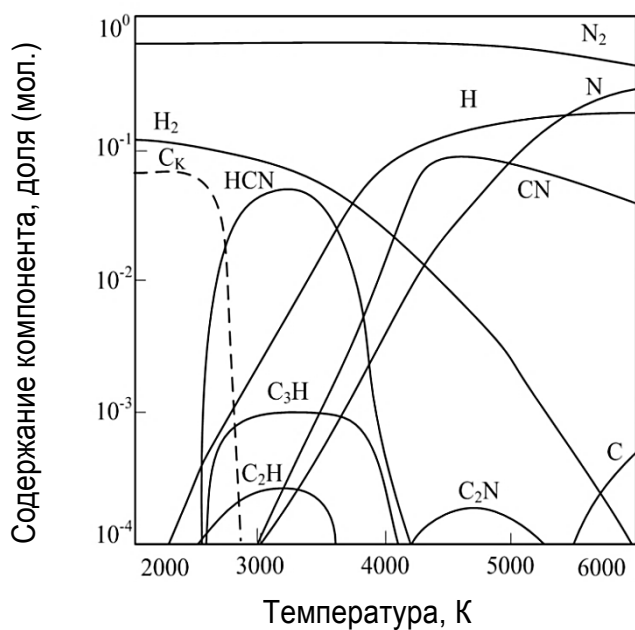
Объектами термодинамического моделирования являлись системы C-H-N, Zr-C-H-N и Zr-O-C-H-N, что обусловлено возможностью использования в качестве: цирконийсодержащего сырья – циркония и его диоксида, углеводородного сырья – метана, плазмообразующего газа – азота. При расчетах рассматривалась область температур от 1000 до 6000 К при общем давлении в системе 0,1 МПа. Необходимые для анализа составы газообразных и конденсированных продуктов рассчитывались константным методом. Расчеты выполнялись с использованием программы компьютерного

моделирования высокотемпературных сложных химических равновесий «PLASMA», имеющей встроенную базу данных продуктов взаимодействия для оксидо-, боридо-, карбидо- и нитридообразующих систем. Соотношения исходных компонентов задавались в соответствии со стехиометрией реакций образования целевых продуктов и параметрами технологического оборудования (расход плазмообразующего газа).

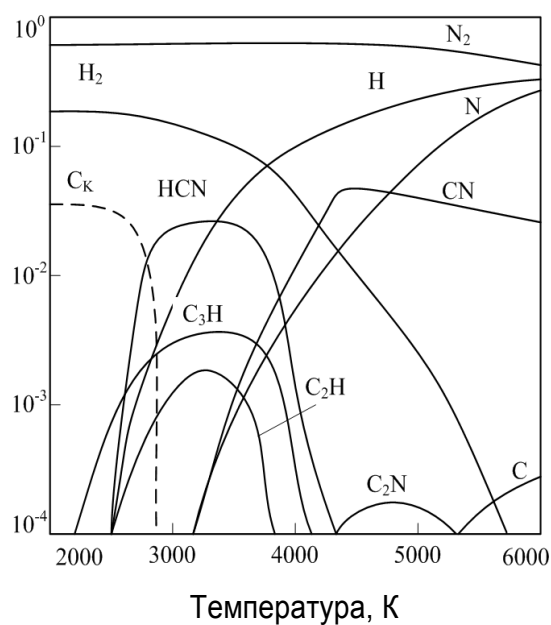
Анализ и результаты термодинамического моделирования плазмосинтеза карбида циркония. Анализ системы C-H-N (рис. 2) позволил выявить в равновесных условиях при 2800–3800 К присутствие HCN, CN, C₃H, C₂H. При этом до 98% углерода находится в газовой фазе в виде HCN. Квазиравновесные условия, отличающиеся значительным расширением температурной области стабильности циановодорода (2000–3800 К), позволяют получить состав конечных продуктов и основные показатели процесса, соответствующие экспериментальным данным.

Результаты термодинамических расчетов системы Zr-C-H-N приведены на рис. 3. В этой системе образование ZrC возможно по реакции

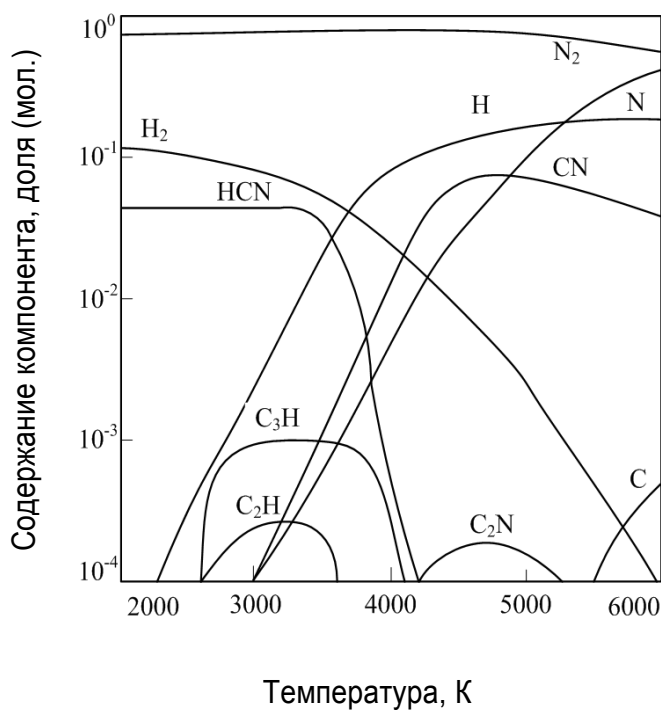




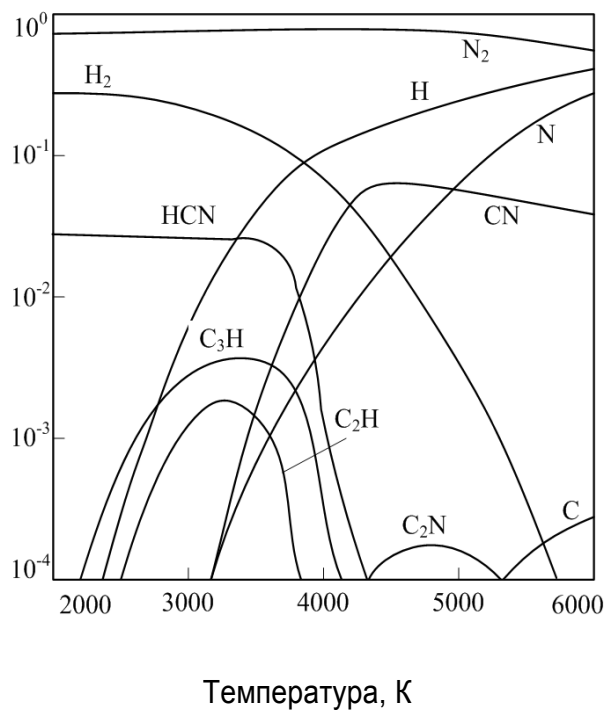
a – C:H:N=0,75:3:20



b – C:H:N=0,75:6:20



c – C:H:N=0,75:3:20



d – C:H:N=0,75:6:20

Рис. 2. *Равновесный (а, б) и квазиравновесный (с, д) состав системы C-H-N в зависимости от соотношения компонентов и температуры*
Fig. 2. *Equilibrium (a, b) and quasi-equilibrium (c, d) composition of the system C-H-N depending on the ratio of components and temperature*

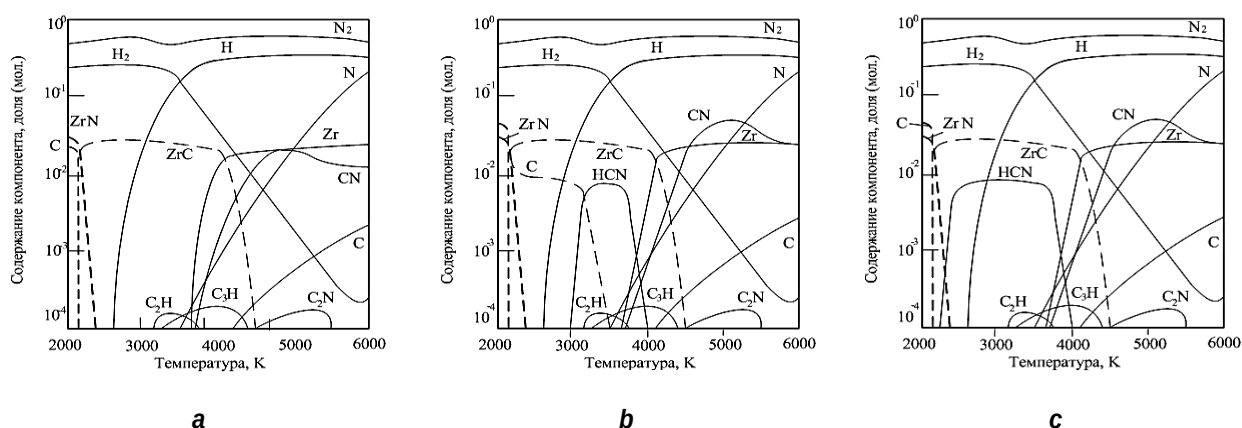


Рис. 3. Результаты термодинамических расчетов системы Zr-C-H-N:

a – равновесный состав газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении Zr:C:H:N=0,25:0,25:1:20;

b – равновесный состав газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении Zr:C:H:N=0,25:0,375:1,5:20;

c – квазиравновесный состав газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении Zr:C:H:N=0,25:0,375:1:20

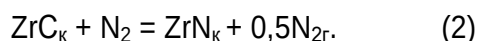
Fig. 3. Results of the thermodynamic calculations of Zr-C-H-N system:

a – equilibrium composition of gas and condensed phases as a function of temperature at the ratio of Zr:C:H:N = 0.25: 0.25:1:20;

b – equilibrium composition of gas and condensed phases as a function of temperature at the ratio of Zr:C:H:N = 0.25 0.375:1.5:20;

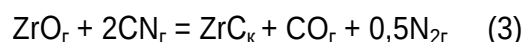
c – quasi-equilibrium composition of gas and condensed phases as a function of temperature at the ratio of Zr:C:H:N = 0.25:0.375:1:20

100%-ный выход ZrC достигается при стехиометрическом соотношении компонентов Zr:C в интервале температур 2300–4000 К. При избытке карбидизатора (соотношение Zr:C = 0,25:0,375) в условиях равновесия продуктом синтеза является карбид-углеродная композиция, содержащая 2,8% свободного углерода. В условиях квазиравновесия при избытке карбидизатора циановодород устойчив в области температур 2300–3800 К, что делает возможным получение карбида, не загрязненного пиролизическим углеродом. При температуре ниже 2300 К термодинамически возможным становится взаимодействие карбида с азотом по реакции



Результаты термодинамических расчетов системы Zr-C-O-H-N приведены на рис. 4. При изменении соотношения Zr:O:C от 0,25:0,50:0,19 до 0,25:0,50:0,75 степень превращения циркония в карбид

изменяется от 0,25 до 1. Карбид циркония устойчив в интервале температур 2300–4000 К. Образование ZrC возможно по реакциям (1) – до 98,5%, и (3) – до 1,5%:



При температуре ниже 2300 К термодинамически возможной становится реакция (2), приводящая к образованию нитрида ZrN.

Таким образом, установлено:

– в системе C-H-N в равновесных условиях 100%-ая газификация углерода достигается в интервале температур 2800–3800 К за счет образования циановодорода и углеводородных радикалов. До 98% углерода присутствует в газовой фазе в виде HCN. Квазиравновесные условия, исключая образование конденсированного углерода, позволяют расширить температурный интервал термодинамической устойчивости циановодорода до 2300 К;

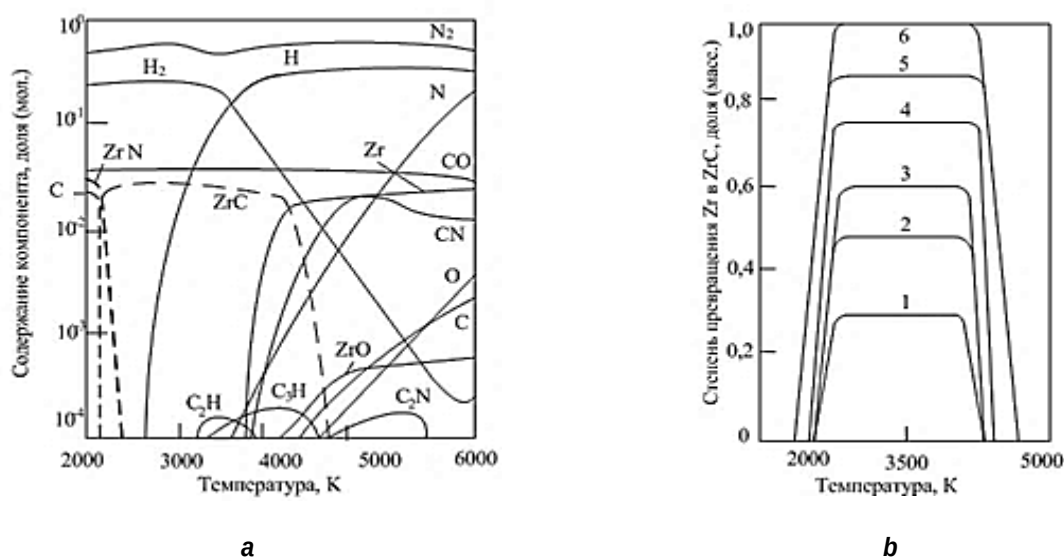


Рис. 4. Результаты термодинамических расчетов системы Zr-C-O-H-N:
a – равновесные составы газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении $Zr:C:O:H:N=0,25:0,75:0,50:3:20$;
b – зависимость степени превращения Zr в ZrC от соотношения $Zr:C=0,25:0,20$ (1); $0,25:0,375$ (2); $0,25:0,47$ (3); $0,25:0,56$ (4); $0,25:0,66$ (5); $0,25:0,75$ (6)
Fig. 4. Results of thermodynamic calculations of Zr-C-O-H-N system:
a – equilibrium compositions of gas and condensed phases as a function of temperature at the ratio of $Zr:C:O:H:N = 0.25:0.75:0.50:3:20$;
b – dependence of transformation degree of Zr into ZrC on the ratio $Zr:C = 0.25:0.20$ (1); $0.25:0.375$ (2); $0.25:0.47$ (3); $0.25:0.56$ (4); $0.25:0.66$ (5); $0.25:0.75$ (6)

– в системах Zr-C-H-N и Zr-C-O-H-N образование карбида циркония термодинамически возможно по газофазным реакциям с участием паров циркония и циана, т.е. по схеме «пар–кристалл», что позволяет прогнозировать достижение его высокого выхода в реальных условиях плазмосинтеза;

– по результатам термодинамического моделирования подтверждена целесообразность экспериментального исследования предлагаемого варианта плазмосинтеза карбида циркония.

Экспериментальное исследование плазмосинтеза карбида циркония

Плазмохимический реактор и его технические характеристики. Для экспериментального исследования плазмосинтеза карбида циркония использовался трехструйный плазмохимический реактор, созданный совместными усилиями СибГИУ и НПФ «Полимет», включающий системы электро-, газо-, водоснабжения и вентиляции, контрольно-измерительных приборов и автоматики, дозирования шихтовых материалов и улавливания продуктов плазмообработки. Теплотехнические, ресурсные и технологические характеристики реактора приведены в табл. 2, а методы их

экспериментального определения и расчета описаны в работе [15].

Сырье и технологические газы. Выбор порошкообразного сырья и газов – восстановителя и теплоносителя, осуществлен по результатам моделирования взаимодействия сырьевого и плазменного потоков. Их характеристики приведены в табл. 3. Микрофотография диоксида циркония приведена на рис. 5, где можно видеть, что диоксид циркония марки ЦрО-1 представляет собой порошок размерного диапазона 0,5–5 мкм с частицами округлой формы, склонными к агрегированию.



Таблица 2

Основные характеристики реактора

Table 2

Basic characteristics of reactor

Характеристика	Значение
Мощность, кВт;	150
Удельная электрическая мощность, МВт/м ³	2140
Тип реактора	трехструйный прямоточный вертикальный
Тип плазмотрона	ЭДП-104А
Мощность, кВт	50
Плазмообразующий газ	азот
Футовка канала реактора	диоксид циркония
Масса нагреваемого газа, кг/ч;	32,5
Внутренний диаметр, м	0,054
Объем реактора, м ³	0,002
Температура плазменного потока, К	5400 (L*=0) – 2600 (L=20)
Температура футеровки, К	1650 (L=0) – 500 (L=20)
Ресурс работы, ч:	
– анода	3000–3200;
– катода	100–110
Загрязнение карбида циркония продуктами эрозии, %:	
– анода	Cu – 0,0001
– катода	W – 0,000002

*L – относительная длина реактора.

Таблица 3

Основные характеристики порошкообразного сырья и технологических газов

Table 3

Basic characteristics of powdered raw materials and process gases

Порошкообразное сырье и технологические газы	Содержание основного вещества, %, не менее
Диоксид циркония ЦрО (ГОСТ 21907-76, изм.)	99,0
Метан (природный газ)	93,6 (этан – 3,0; пропан – 2,18; бутан – 1,18)
Технический водород (ГОСТ 3022-80, изм.)	99,8
Технический азот (ГОСТ 9293-84, изм.)	99,5 (содержание кислорода не более 0,5)

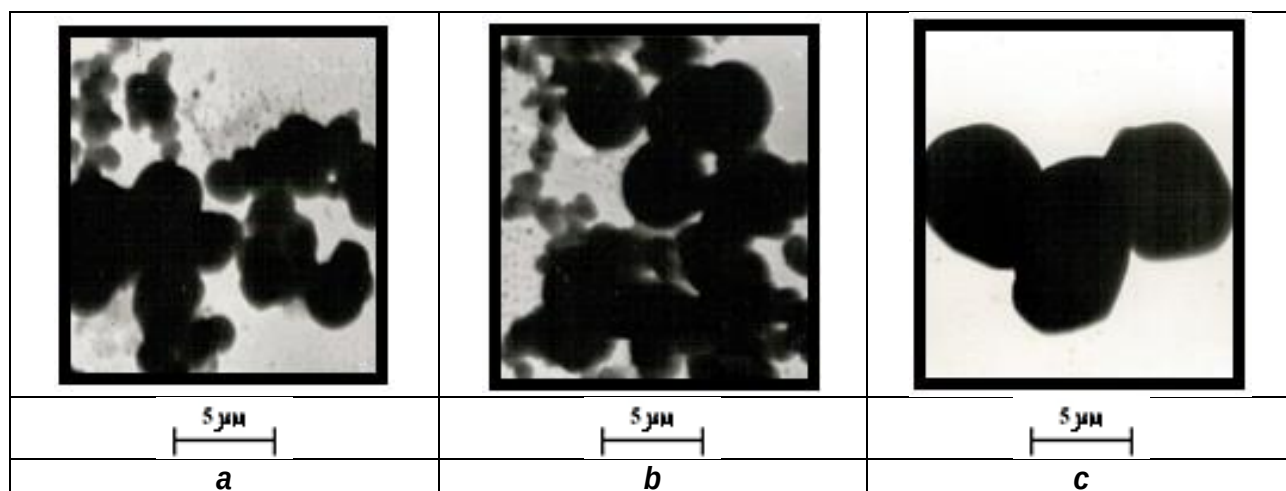


Рис. 5. Микрофотография диоксида циркония:

a – агрегат; b – частицы и агрегаты; c – частицы

Fig. 5. Micrograph of zirconium dioxide: a – aggregate; b – particles and aggregates; c – particles



Методы исследования продуктов плазмосинтеза. Продукты плазмосинтеза, уловленные в рукавном фильтре, исследовались с использованием рентгеновского, химического и электронно-микроскопического анализов, метода БЭТ для определения удельной поверхности (рис. 6) [16].

Применение метода планируемого эксперимента. Исследования проводились с привлечением метода планируемого эксперимента, позволяющего найти зависимость выхода (содержания) целевого продукта от определяющих факторов в виде интерполяционных уравнений⁵. В качестве модели выбран неполный квадратичный полином вида

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i \cdot x_j, \quad (4)$$

где $\tilde{y}$ – параметр оптимизации; b_0 , b_i , b_{ij} – коэффициенты; x_i – переменные факторы; $x_i \cdot x_j$ – двойные взаимодействия фак-

торов.

Данный полином учитывает главные эффекты факторов и все двойные взаимодействия. При этом предполагалось выполнение следующих условий регрессионной модели:

- 1) результат эксперимента – параметр y_1 – случайная величина, распределение которой нормальное;
- 2) дисперсии параметра равны и не зависят от места измерения;
- 3) переменные факторы фиксированы в каком-то интервале и не являются случайными величинами;
- 4) определитель матрицы плана не равен 0, т.е. матрица ортогональных уравнений имеет обратную матрицу.

Все условия, кроме второго, выполняются. Второе условие остается непроверенным ввиду недостаточного числа проведенных экспериментов.

Факторы, влияние которых учитывалось, и интервалы их варьирования приведены в табл. 4.

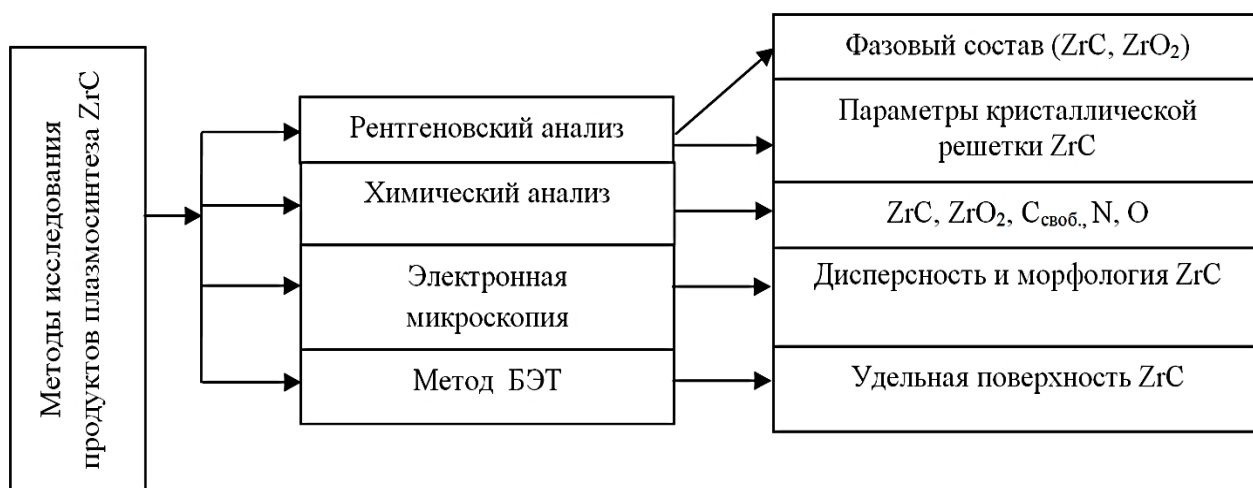


Рис. 6. Методы исследования продуктов плазмосинтеза карбида циркония
Fig. 6. Research methods of zirconium carbide plasma synthesis products

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., Pevtsov N.V. Planning and mathematical processing of chemical experiment results. Omsk: Omsk State University Publ., 2005. 184 p.



Таблица 4

Переменные факторы, выбранные для исследования процесса синтеза карбида циркония

Table 4

Variable factors chosen to study zirconium carbide synthesis

Фактор	Уровень фактора		
	Обозн.	Верхний (+)	Нижний (-)
Начальная температура плазменного потока, T_0 , К	x_1	5400	5000
Температура закалки продуктов синтеза, T_3 , К	x_2	2800	2300
Количество углеводорода (метана) от стехиометрически необходимого для получения ZrC , $\{CH_4\}$, %	x_3	130	100
Концентрация водорода в плазмообразующем газе $\{H_2\}$, % об.	x_4	5	2

При проведении экспериментов реализован полный факторный эксперимент 2^4 . В качестве параметра оптимизации процесса принято содержание в продуктах ZrC , ZrO_2 , $C_{своб.}$, N. Обработка результатов проводилась по схеме с равномерным дублированием опытов [14]. По критерию Кохрена (G_K) во всех экспериментах проверялась однородность дисперсий, далее рассчитывались оценки дисперсии выход-

ного параметра ($S_{\{y\}}^2$) и коэффициентов регрессии ($S_{\{b\}}^2$), определялись коэффициенты регрессии (b_0 , b_i , b_{ij}) и с помощью критерия Стьюдента оценивалась их значимость. Проверка адекватности полученных моделей проводилась с использованием критерия Фишера. Результаты расчетов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Основные параметры синтеза и характеристики карбида циркония

Table 5

Basic synthesis parameters and zirconium carbide characteristics

Параметр	Значение
Состав газа-теплоносителя, % об.:	
– азот	74,0;
– водород	2–5;
– природный газ (метан)	1,0
Крупность диоксида циркония, мкм	0,5–5,0
Количество карбидизатора (метана), % от стехиометрического	100–130
Начальная температура плазменного потока, К	5400
Температура закалки, К	2300–2800
Химический состав, %:	
– карбид циркония (ZrC)	94,12–93,61;
– диоксид циркония (ZrO_2)	4,56–5,27
– углерод свободный ($C_{своб.}$)	1,32–1,12;
– азот (N)	1,87–2,12
Форма частиц	Ограниченная



Значимость выходных параметров от условий синтеза описывается следующими уравнениями:

$$y[\text{ZrC}] = 83,97 + 7,42x_1 + 0,86x_2 - 1,03x_3; \quad (5)$$

$$y[\text{ZrO}_2] = 12,68 - 5,99x_1 - 0,59x_2; \quad (6)$$

$$y[\text{C}_{\text{своб.}}] = 3,28 - 1,37x_1 - 0,33x_2 + 0,85x_3 - 0,58x_{13} - 0,31x_{23}; \quad (7)$$

$$y[\text{N}] = 1,3 + 0,26x_1 + 0,16x_2. \quad (8)$$

Полученные уравнения позволяют количественно оценить влияние отдельных факторов на параметры оптимизации и управлять процессами синтеза. После перевода моделей от безразмерных координат к натуральным переменным получены следующие уравнения:

$$[\text{ZrC}] = -109,72 + 0,0371 T_0 + 0,0034 T_3 - 0,0687\{\text{CH}_4\}, \quad (9)$$

$$[\text{ZrO}_2] = 174,44 - 0,02995 T_0 - 0,00236 T_3, \quad (10)$$

$$[\text{C}_{\text{своб.}}] = -101,33 + 0,015 T_0 + 0,0079 T_3 + 1,2487\{\text{CH}_4\} - 0,00019 T_0\{\text{CH}_4\} - 0,00008 T_3\{\text{CH}_4\}, \quad (11)$$

$$[\text{N}] = -7,092 + 0,0013 T_0 + 0,00064 T_3. \quad (12)$$

В уравнениях (9)–(12): T_0 – начальная температура плазменного потока (5000–5400 K); $\{\text{H}_2\}$ – концентрация водорода в плазмообразующем газе (2–5% об. от объема плазмообразующего газа); $\{\text{CH}_4\}$ – количество восстановителя (100–130% от стехиометрически необходимого для получения ZrC)).

Анализ и обсуждение результатов. Содержание в продуктах синтеза карбида циркония является функцией трех факторов: начальной температуры плазменного потока x_1 , температуры закалки продуктов синтеза x_2 , содержание метана в шихте x_3 . Ранжирование факторов дает следующий ряд:

$$x_1 > x_2 > x_3 (T_0 > T_3 > \{\text{CH}_4\}).$$

На рис. 7 приведена зависимость содержания ZrC от начальной температуры плазменного потока и количества карбидизатора (метана).

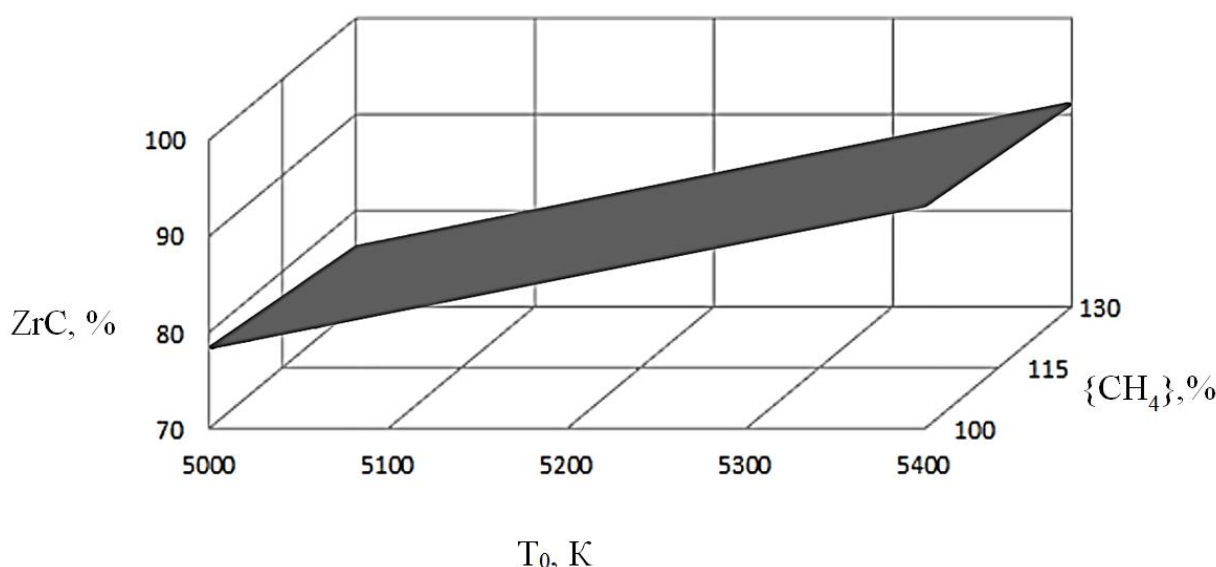


Рис. 7. Зависимость содержания ZrC в продуктах синтеза от начальной температуры плазменного потока и количества карбидизатора (метана) ($T_3=2800$)
Fig. 7. Dependence of ZrC content in synthesis products on initial temperature of plasma flow and amount of carbidizer (methane) ($T_3 = 2800$)



Содержание диоксида циркония в продуктах синтеза является функцией двух факторов: начальной температуры плазменного потока x_1 и температуры закалки продуктов синтеза x_2 . Ранжирование факторов дает следующий ряд:

$$x_2 > x_1 > (T_3 > T_0).$$

На рис. 8 приведена зависимость содержания диоксида циркония в продуктах синтеза от температуры закалки продуктов синтеза и начальной температуры плазменного потока.

Содержание свободного углерода в продуктах синтеза является функцией трех факторов – начальная температура плазменного потока x_1 , температура закалки продуктов синтеза x_2 и количество углеводорода (метана) от стехиометрически не-

обходимого x_3 , и двух двойных взаимодействий – x_{13} , x_{23} . Ранжирование факторов дает следующий ряд:

$$x_3 > x_2 > x_1 (\{CH_4\} > T_3 > T_0).$$

На рис. 9 приведена зависимость содержания свободного углерода в продуктах синтеза от температуры закалки продуктов синтеза и начальной температуры плазменного потока.

Содержание азота в продуктах синтеза является функцией двух факторов: начальной температуры плазменного потока x_1 и температуры закалки продуктов синтеза x_2 . Ранжирование факторов дает следующий ряд:

$$x_1 > x_2 (T_0 > T_3).$$

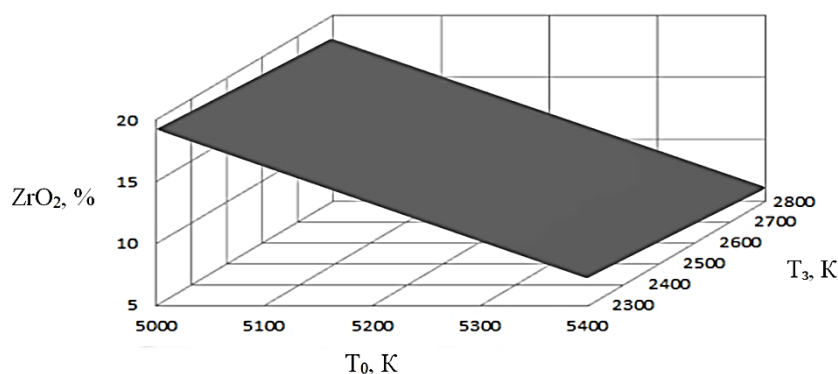


Рис. 8. Зависимость содержания ZrO_2 в продуктах синтеза от температуры закалки продуктов синтеза и начальной температуры плазменного потока ($\{CH_4\}=115\%$)
Fig. 8. Dependence of ZrO_2 content in synthesis products on quenching temperature of synthesis products and initial temperature of plasma flow ($\{CH_4\} = 115\%$)

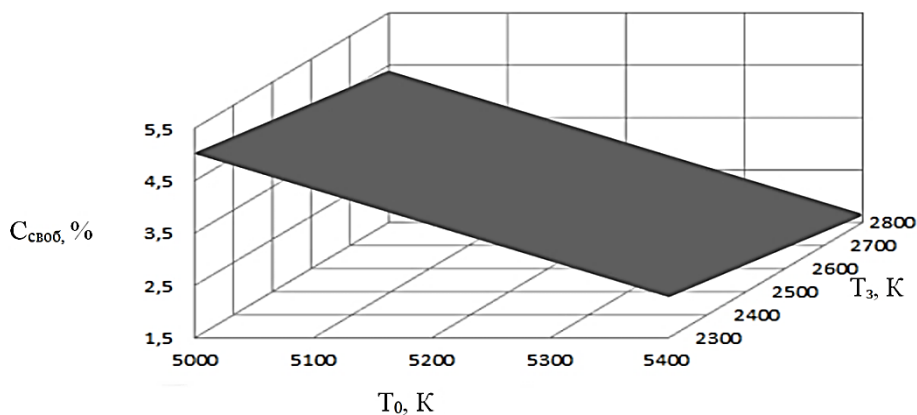


Рис. 9. Зависимость содержания свободного углерода в продуктах синтеза от температуры закалки продуктов синтеза и начальной температуры плазменного потока ($\{CH_4\}=115\%$)
Fig. 9. Dependence of free carbon content in synthesis products on quenching temperature of synthesis products and initial temperature of plasma flow ($\{CH_4\} = 115\%$)



На рис. 10 приведена зависимость содержания азота в продуктах синтеза от начальной температуры плазменного потока и температуры закалки продуктов синтеза.

Результаты электронно-микроскопического исследования продуктов карбида циркония представлены на рис. 11, где можно видеть, что просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) при увеличении в 25000–30000 раз обеспечивает только констатацию наноуровня (рис. 11, а). Метод растровой электронной микроскопии (РЭМ) при увеличении в 220000 раз обеспечивает визуализацию отдельных частиц, возможность определения их размеров и формы, а также выявление соответствующей

щей карбиду примеси пиролитического, несвязанного в карбид углерода (рис. 11, б). Карбид циркония получен в виде ограниченных частиц кубической формы размерного диапазона от 10 до 40 нм. Ограниченная форма частиц карбида циркония свидетельствует об образовании их по механизму «пар–кристалл», предположительно при взаимодействии паров циркония и циана. Синтезированный карбид циркония по наноуровню и морфологии существенно отличается от его микропорошка, полученного механическим диспергированием карбида карботермического печного синтеза. Основные параметры синтеза и характеристики карбида циркония представлены в табл. 5.

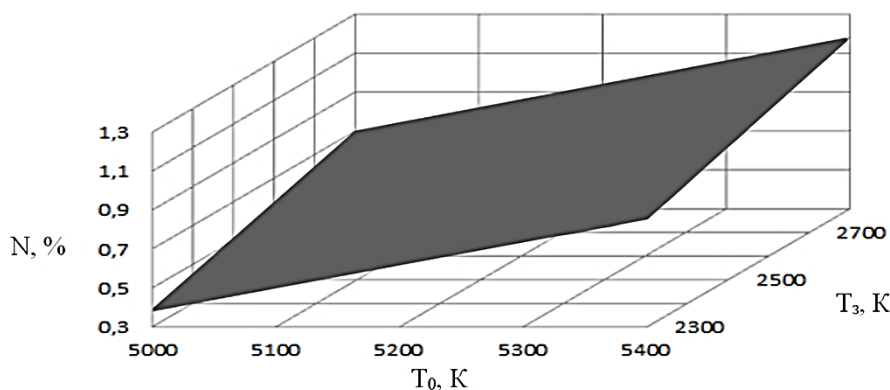


Рис. 10. Зависимость содержания азота в продуктах синтеза от начальной температуры плазменного потока и температуры закалки продуктов синтеза ($\{CH_4\}=115\%$)
Fig. 10. Dependence of nitrogen content in synthesis products on initial temperature of plasma flow and quenching temperature of synthesis products ($\{CH_4\}=115\%$)

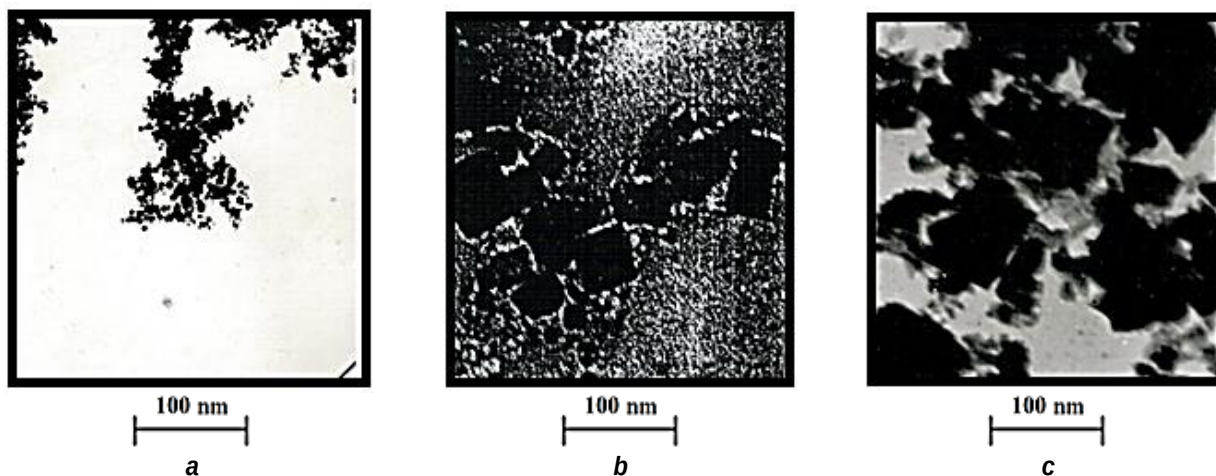


Рис. 11. Микрофотографии нано- (а, б) и кристаллического (с) карбида циркония
(а – ПЭМ; б – РЭМ; с – ПЭМ)
Fig. 11. Micrographs of nano (a, b) and crystalline (c) zirconium carbide
(a – TEM; b – REM; c – TEM)



Оптимальное сочетание технологических факторов для получения продуктов синтеза с максимальным содержанием карбида циркония соответствует начальной температуре плазмы 5400 К, стехиометрическому соотношению углеводорода и за-

калке карбида при 2800 К. В этих условиях получены порошки с содержанием, %: ZrC – 94,2–93,61; ZrO₂ – 4,56–5,27; C_{своб.} – 1,32–1,12; N – 1,87–2,12, что позволяет отказаться от дальнейшей оптимизации процесса.

Заключение

1. Проведен анализ современного состояния производства и применения карбида циркония. Подтверждено, что карбид циркония обладает уникальным сочетанием практически значимых свойств, многофункционален и способен работать в составе композиционных материалов и покрытий в экстремальных условиях. Установлено, что основу современного производства карбида циркония составляет карботермический способ. Стратегически важный нанокристаллический сегмент рынка полностью обеспечивается зарубежными поставщиками, что обуславливает необходимость развития российской нанотехнологии карбида циркония.

2. На основе моделирования высокотемпературных процессов пиролиза, газификации, карбидообразования, протекающих в системах C-H-N, Zr-C-H-N, Zr-C-O-H-N, для технологического варианта получения ZrC описаны закономерности изменения с температурой составов газообразных и конденсированных продуктов карбидообразования и прогнозированы условия образования ZrC в различных реакционных средах (соотношение компонентов, температура, состав газовой фазы, степень превращения цирконий-углеродсодержащего сырья в ZrC).

3. Научно обоснованы и экспериментально определены рациональные составы и дисперсность цирконий-углеродсодержащих шихт, составы и начальная температура газа-теплоносителя, температура закалки продуктов карбидообразования, обеспечивающие получение карбида

циркония с содержанием ZrC 93,61–94,12%. Для исследуемых технологических вариантов получены уравнения, описывающие зависимости содержания ZrC от основных технологических факторов: соотношения реагентов, состава газа-теплоносителя, температур.

4. Определены физико-химические характеристики карбида циркония в наноразмерном состоянии: кристаллическая структура, фазовые и химические составы, дисперсность, морфология, окисленность, термоокислительная устойчивость.

5. Разработан на основе интерпретации результатов теоретических и экспериментальных исследований непрерывный технологический процесс получения карбида циркония в плазмохимическом реакторе, включающий плазмогенерацию, плазмообработку цирконий-углеродсодержащего сырья, образование ZrC, принудительное охлаждение и выделение его из потока отходящих от реактора технологических газов.

6. Проведено в производственных условиях ООО «Полимет» в плазмохимическом трехструйном вертикальном прямоточном реакторе мощностью 150 кВт опробование и подтверждение достоверности технологических режимов получения карбида циркония.

7. Спрогнозирована на основе сформированных представлений об особенностях физико-химических свойств нанокристаллического карбида циркония возможность применения его в функциональных защитных покрытиях.



Библиографический список

1. Косолапова Т.Я. Карбиды. М.: Metallurgy, 1968. 300 с.
2. Алексеева Т.И., Галевский Г.В., Руднева В.В. Физико-химические свойства карбида циркония: анализ, систематизация, оценка прикладной значимости // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2016. Вып. 36. С. 136–143.
3. Serlire M., Oye H.A. Cathodes in Aluminium Electrolysis // Dusseldorf: Aluminium – Verlag, 2010. 698 p.
4. Yutai Katoh, Gokul Vasudevamurthy, Takashi Nozawa, Lance L. Snead Properties of zirconium carbide for nuclear fuel applications // Journal of Nuclear Materials. 2013. Vol. 4419 (1–3). P. 718–742.
5. Алексеева Т.И., Галевский Г.В., Руднева В.В., Галевский С.Г. Технологические решения в производстве карбида циркония: анализ, оценка состояния и перспектив // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1. С. 256–270. DOI: 10.18721/JEST.230126.
6. Xiang J.Y., Liu S.C., Hua W.T., Zhang Y., Chen C.K., Wang P., He J.L., Yu D.L., Xu B., Lu Y.F., Tian Y.J., Liu Z.Y. Mechanochemically activated synthesis of zirconium carbide nanoparticles at room temperature: A simple route to prepare nanoparticles of transition metal carbides // Journal of the European Ceramic Society. 2011. Vol. 31 (8). P. 1491–1496.
7. Kuvshinov G.G., Ermakova M. A. and Ermakov D.Yu. Morphology and Texture of Silica Prepared by Sol–Gel Synthesis on the Surface of Fibrous Carbon Materials. Novosibirsk: Boreskov Institute of Catalysis, 2002. 432 p.
8. Jingjing Xie, Zhengyi Fu, Yucheng Wang, Soo Wahn Lee, Koichi Niihara Synthesis of nanosized zirconium carbide powders by a combinational method of sol–gel and pulse current heating // Journal of the European Ceramic Society. 2014. Vol. 34 (1). P. 13.e1–13.e7.
9. Liliang Chen, Chihiro Iwamoto, Emil Omurzak, Shintaro Takebe, Hiroki Okudera, Akira Yoshiasa, Saadat Sulaimankulovaf, Tsutomu Mashimo Synthesis of zirconium carbide (ZrC) nanoparticles covered with graphitic “windows” by pulsed plasma in liquid // RSC Advances. 2011. Vol. 1. P. 1083–1088.
10. Dan Zhao, Changrui Zhan, Haifeng Hu, Yudi Zhang Preparation and characterization of three-dimensional carbon fiber reinforced zirconium carbide composite by precursor infiltration and pyrolysis process // Ceramics International. 2011. Vol. 37 (7). P. 2089–2093.
11. Medri V., Monteverde F., Balbo A., Bellosi A. Comparison of ZrB₂-ZrC-SiC Composites Fabricated by Spark Plasma Sintering and Hot-Pressing // Advanced Engineering Materials. 2005. Vol. 7 (3). P. 159–163.
12. Алексеева Т.И. Анализ российского и мирового рынка нанокристаллического карбида циркония // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Новокузнецк, 16–18 мая 2017 г.). Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2017. Вып. 21. Ч. 2: Естественные и технические науки. С. 265–267.
13. Хартманн У. Очарование нанотехнологии / пер. с нем. Т.Н. Захаровой; под ред. Л.Н. Патрикеева. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 173 с.
14. Рудской А.И. Нанотехнологии в металлургии. СПб.: Наука, 2007. 186 с.
15. Ефимова К.А., Галевский Г.В., Руднева В.В., Алексеева Т.И. Реактор для обработки и производства тугоплавких материалов: теплотехнические, ресурсные и технологические характеристики // XV Минский международный форум по тепло- и массообмену: тезисы докладов сообщений (Минск, 23–26 июня 2016 г.). Минск: Изд-во Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Белоруси, 2016. Т. 3. С. 72–76.
16. Центр коллективного пользования «Материаловедение и металлургия» [Электронный ресурс] / Официальный сайт НИТУ МИСиС. URL: <http://misis.ru/science/naucnyj-kompleks/naucnye-laboratorii-i-centry/centr-kollektivnogo-polzovaniy> (22.06.2016).

References

1. Kosolapova T.Ya. *Karbidy* [Carbides]. Moscow: Metallurgy Publ., 1968, 300 p. (In Russian).
2. Alekseeva T.I., Galevskii G.V., Rudneva V.V. Physico-chemical properties of zirconium carbide: analysis, systematization, evaluation of applied significance. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sekti RAEN. Otdelenie metallurgii* [Bulletin of Mining and Metallurgical Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Metallurgy Department]. 2016, issue 36, pp. 136–143. (In Russian).
3. Serlire M., Oye H.A. Cathodes in Aluminium Electrolysis. Dusseldorf: Aluminium – Verlag, 2010, 698 p.
4. Yutai Katoh, Gokul Vasudevamurthy, Takashi Nozawa, Lance L. Snead Properties of zirconium carbide for nuclear fuel applications. *Journal of Nuclear Materials*. 2013, vol. 4419 (1–3), pp. 718–742.
5. Alekseeva T.I., Galevskii G.V., Rudneva V.V., Galevskii S.G. Technological solutions in production of zirconium carbide: analysis, evaluation of state and prospects. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* [St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology]. 2017, vol. 23, no. 1, pp. 256–270. <https://doi.org/10.18721/JEST.230126>. (In Russian).
6. Xiang J.Y., Liu S.C., Hua W.T., Zhang Y., Chen C.K., Wang P., He J.L., Yu D.L., Xu B., Lu Y.F., Tian Y.J., Liu Z.Y. Mechanochemically activated synthesis of zirconium carbide nanoparticles at room temperature: A simple route to prepare nanoparticles of transition metal carbides. *Journal of the European Ceramic Society*.



2011, vol. 31 (8), pp. 1491–1496.

7. Kuvshinov G.G., Ermakova M. A. and Ermakov D.Yu. Morphology and Texture of Silica Prepared by Sol–Gel Synthesis on the Surface of Fibrous Carbon Materials. Novosibirsk: Boreskov Institute of Catalysis, 2002, 432 p.

8. Jingjing Xie, Zhengyi Fu, Yucheng Wang, Soo Wahn Lee, Koichi Niihara Synthesis of nanosized zirconium carbide powders by a combinational method of sol–gel and pulse current heating. Journal of the European Ceramic Society. 2014, vol. 34 (1), pp. 13.e1–13.e7.

9. Liliang Chen, Chihiro Iwamoto, Emil Omurzak, Shintaro Takebe, Hiroki Okudera, Akira Yoshiasa, Saadat Sulaimankulovaf, Tsutomu Mashimo Synthesis of zirconium carbide (ZrC) nanoparticles covered with graphitic “windows” by pulsed plasma in liquid. RSC Advances. 2011, vol. 1, pp. 1083–1088.

10. Dan Zhao, Changrui Zhan, Haifeng Hu, Yudi Zhang Preparation and characterization of three-dimensional carbon fiber reinforced zirconium carbide composite by precursor infiltration and pyrolysis process. Ceramics International. 2011, vol. 37 (7), pp. 2089–2093.

11. Medri V., Monteverde F., Balbo A., Bellosi A. Comparison of ZrB₂-ZrC-SiC Composites Fabricated by Spark Plasma Sintering and Hot-Pressing. Advanced Engineering Materials. 2005, vol. 7 (3), pp. 159–163.

12. Alekseeva T.I. *Analiz rossiiskogo i mirovogo rynka nanokristallicheskogo karbida tsirkoniya* [Analysis of Russian and world market of nanocrystalline zirconium carbide]. *Trudy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh “Nauka i molodez: problemy, poiski, resheniya”* [Proceedings of the

All-Russian Scientific Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists “Science and Youth: Problems, Searches, Solutions”]. Novokuznetsk: SibGIU Publ., 2017, issue 21, part 2. Natural and technical sciences. P. 265–267. (In Russian).

13. Khartmann U. *Ocharovanie nanotekhnologii* [Charm of nanotechnology]. Moscow: BINOM. Laboratory of Knowledge Publ., 2008, 173 p.

14. Rudskoi A.I. *Nanotekhnologii v metallurgii* [Nanotechnologies in metallurgy]. SPb.: Nauka Publ., 2007, 186 p. (In Russian).

15. Efimova K.A., Galevskii G.V., Rudneva V.V., Alekseeva T.I. *Reaktor dlya obrabotki i proizvodstva tugoplavkikh materialov: teplotekhnicheskie, resursnye i tekhnologicheskie kharakteristiki* [Reactor for processing and production of refractory materials: heat engineering, resource and technological characteristics]. *Tezisy dokladov i soobshchenii XV Minskogo mezhdunarodnogo foruma po teplo- i massoobmenu* [Abstracts of reports at XV Minsk International Heat and Mass Transfer Forum]. Minsk: A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 2016, vol. 3, pp. 72–76.

16. *Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya “Materialovedenie i metallurgiya”* [Multiple Access Center “Material Science and Metallurgy”]. *Ofitsial'nyi sait NITU MISiS* [Official site of MISiS National University of Science and Technology]. Available at:

<http://misis.ru/science/naucnyj-kompleks/naucnye-laboratorii-i-centry/centr-kollektivnogo-polzovaniya> (accessed 22 June 2016).

Критерии авторства

Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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