



DOI 10.5862/JEST/15

УДК 661.665

Г.В. Галевский, В.В. Руднева, К.А. Ефимова

РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ПЛАЗМЕННОГО СИНТЕЗА НАНОБОРИДА ТИТАНА

G.V. Galevsky, V.V. Rudneva, K.A. Efimova

DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL FOUNDATIONS FOR PLASMA SYNTHESIS OF TITANIUM NANOBORIDE

Разработаны научные и технологические основы плазменного синтеза диборида титана, включая термодинамические и кинетические условия боридообразования при взаимодействии титана и его диоксида с продуктами газификации бора в потоке азотно-водородной плазмы и его закономерности для двух вариантов, реализуемых с использованием порошковых шихт «титан — бор» и «диоксид титана — бор». Для этих технологических вариантов получены математические модели, описывающие зависимости содержания в продуктах синтеза диборида титана и свободного бора от основных параметров. Исследован и предложен вероятный механизм образования диборида титана по схеме «пар — расплав — кристалл», предполагающий конденсацию паров титана в виде аэрозоля, борирование нанок капель расплава бороводородами и кристаллизацию расплава «титан — бор». Проведена комплексная физико-химическая аттестация диборида титана, включающая изучение кристаллической структуры, фазового и химического составов, дисперсности, морфологии и окисленности частиц. Проанализированы технологические перспективы применения нанопорошка диборида титана в качестве основного компонента смачиваемого покрытия углеродсодержащих катодов с улучшенными физико-механическими и защитными свойствами. ДИБОРИД ТИТАНА; ПЛАЗМЕННЫЙ СИНТЕЗ; МОДЕЛИРОВАНИЕ; БОРИДООБРАЗОВАНИЕ; БОР; ПОРОШКООБРАЗНОЕ СЫРЬЕ; ДИСПЕРСНОСТЬ.

The scientific and technological foundations of plasma synthesis of titanium diboride, including thermodynamic and kinetic conditions of boride formation during the interaction of titanium and titanium dioxide with the products of boron gasification in the stream of nitrogen - hydrogen plasma and its laws for the two options using titanium powder mix - boron and titanium dioxide - boron. Within the study of technological options the authors obtained mathematical models describing the dependence of the amount of titanium diboride and boron in synthesis products on the basic parameters. The authors examined and proposed a plausible mechanism of titanium diboride formation with the scheme “vapor - melt - crystal”, involving the condensation of titanium vapors in the form of aerosol, boriding of melt nanodroplets with borohydride and titanium - boron melt crystallization. There was conducted the complex physical and chemical certification of titanium diboride, which includes the study of the crystal structure, phase and chemical composition, dispersion, morphology and particle oxidation. The authors analyzed technological prospects to apply titanium diboride nanopowder as the main component of a wettable coating for carbon cathodes with improved physical - mechanical and barrier properties.

TITANIUM DIBORIDE; PLASMA SYNTHESIS; SIMULATION; FORMATION OF BORIDE; BORON; POWDERY RAW MATERIALS; DISPERSION.

Введение

Диборид титана TiB_2 — синтетический сверхтвёрдый тугоплавкий жаропрочный износостойкий материал, востребованный для производства

керметов, огнеупоров, защитных покрытий различного назначения [1, 2]. Сравнительно новое и значительное по объёму направление его применения — в электролитическом производстве алюминия в качестве компонента смачиваемого

покрытия катодов электролизеров, защищающего их от разрушающего воздействия криолиноземного расплава [3, 4]. Для получения такого покрытия готовится водная суспензия, содержащая 68–70 % твердого вещества (90 % — TiV_2 , 10 % — Al_2O_3). Физическая и химическая связь между коллоидными частицами Al_2O_3 и частицами TiV_2 в суспензии приводит к образованию вязкоэластичного желеподобного состояния материала. Такой материал не выделяет воду и ведет себя после сушки как твердый. Суспензию наносят распылением или окрашиванием с промежуточной сушкой воздухом после нанесения каждого слоя. Общая продолжительность сушки составляет 24 часа. Покрытие толщиной 1,0–2,0 мм обеспечивает смачивание катода алюминием, имеет высокое сопротивление внедрению натрия, одновременно сочетает достаточную твердость, прочность на изгиб, износостойкость, сцепление с основой, способствует снижению катодного падения напряжения и повышению катодного выхода алюминия по току.

В зарубежной практике алюминиевого производства материалы для защитных катодных покрытий алюминиевых электролизеров поставляются фирмой «МОЛТЕК» и имеют торговые марки ТИНОР А, ТИНОР М и утолщенный ТИНОР. При толщине покрытия 1 мм расход TiV_2 составляет 2,3 кг/м² поверхности катода [5, 6], что свидетельствует о необходимости дальнейшего развития технологической базы его производства. Основными способами получения TiV_2 для смачиваемых катодных покрытий являются самораспространяющийся высокотемпературный и печной синтезы [7]. Однако эти способы при относительной простоте технологического решения малопродуктивны и позволяют получать TiV_2 в виде достаточно крупного порошка с частицами размерного диапазона 5–10 мкм. Есть основания предполагать, что введение TiV_2 в состав суспензии в виде более тонкого порошка с размером частиц, меньшим или сопоставимым с размером частиц Al_2O_3 (0,1–1 мкм), будет способствовать повышению физико-механических и защитных свойств покрытия.

Цель настоящего исследования — разработка научных и технологических основ плазменного синтеза диборида титана, его физико-химическая аттестация, определение основных техно-

логических показателей предлагаемого способа получения.

Реактор для синтеза диборида титана и его характеристики

Для синтеза диборида титана использовался промышленный плазмометаллургический комплекс, основа которого — трехструйный прямой вертикальный плазменный реактор мощностью 150 кВт [8]. Данный комплекс, наряду с реактором, включает усовершенствованные авторами конструкции плазмотроны, камеры смешения, дозатора для малосыпучего высокодисперсного сырья, рукавного фильтра непрерывного действия, системы электро-, газо- и водоснабжения и вентиляции. Для генерации плазменного потока используются три электродуговых плазмотрона ЭДП—104А мощностью 50 кВт каждый, установленные в камере смешения под углом 30° к оси реактора. Порошкообразное и газообразное сырье подается с помощью водоохлаждаемой фурмы в зону соударения плазменных струй. При этом формируется реакционная смесь заданного состава, осуществляются синтез и формирование нанодисперсных продуктов. По уровню характеристик реактор может быть отнесен к современному электротермическому оборудованию. Основные характеристики реактора следующие:

Мощность.....	150, кВт
Тип реактора.....	Трехструйный, прямоточный, вертикальный,
Тип плазмотрона и его мощность.....	ЭДП-104А, 50, кВт
Плазмообразующий газ	Азот
Масса нагреваемого газа.....	32,5, кг/ч
Внутренний диаметр.....	0,054, м
Объем реактора	0,001, м ³
Футеровка канала реактора	Диоксид циркония
Температура плазменного потока	5400 ($L^* = 0$) — 2200 ($L = 12$), К
Температура футеровки.....	1549 ($L = 0$) — 770 ($L = 12$), К
Удельная электрическая мощность.....	2142, МВт/м ³
Ресурс работы	
анода	3125 час.
катода.....	112 час.
Загрязнение диборида титана продуктами эрозии:	
анода	Cu — 0.0000954 %
катода.....	W — 0.0000002 %

* L — отношение длины реактора к его внутреннему диаметру

Выбор сырья для синтеза диборида титана

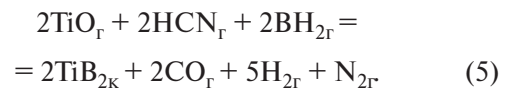
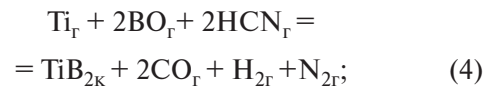
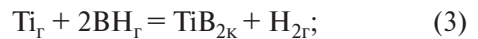
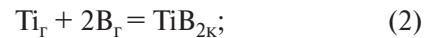
Для выбора титансодержащего сырья проведено моделирование взаимодействия плазменного и сырьевого потоков.

В связи с доступностью порошков титана, его диоксида, бора, углеводородного сырья (метан) и плазмообразующего газа (азот) объектами термодинамического моделирования были системы В–Н–N, Ti–O–C–В–Н–N, Ti–В–Н–N. Необходимые для анализа составы газообразных и конденсированных продуктов рассчитывались «константным» методом, основанным на совместном решении уравнений, описывающих следующее: закон действующих масс; материальный баланс; суммарное число молей газовой смеси; существование конденсированной фазы; закон Дальтона. Расчеты выполнялись с использованием программы для компьютерного моделирования высокотемпературных сложных химических равновесий «PLASMA», имеющей встроенную базу данных продуктов взаимодействия для оксидо-, боридо-, карбидо- и нитридообразующих систем. При расчетах рассматривалась область температур 1000–6000 К при общем давлении в системе 0,1 МПа.

Результаты расчета равновесных составов системы В–Н–N представлены на рис. 1, а, б. Можно видеть, что в исследуемой системе имеет место «газификация» бора, усиливающаяся с разбавлением системы водородом. Газификация бора обусловлена высокой термодинамической стабильностью в области температур 2650–3250 К бороводорода состава ВН_2 . При соотношении В:Н = 1:6 степень превращения бора в ВН_2 достигает 1. Конденсация бора из газовой фазы термодинамически возможна при температуре ниже 2650 К. Таким образом, следует признать целесообразным разбавление системы водородом и прогнозировать влияние концентрации его в газовой фазе на полноту протекания процессов боридообразования в условиях плазменного потока. Квазиравновесные составы системы В–Н–N (рис. 1, в, г) характеризуются значительным расширением температурной области устойчивости бороводорода ВН_2 , соответствующей 2150–3250 К.

В боридообразующих системах диборид титана может быть получен при всех рассматриваемых соотношениях компонентов в интервале температур 3500–2300 К. Термодинамически

возможно протекание следующих газофазных химических реакций боридообразования:



Степень превращения титана в диборид по реакции (1) может составлять 0,85. Стопроцентное превращение титана в диборид достигается при стехиометрическом соотношении компонентов в интервале температур 3200–2450 К (рис. 1, д, е). Если в системах имеет место избыток бора и углерода, в условиях равновесия в конденсированной фазе наряду с диборидом при температуре ниже 2800 К могут присутствовать нитрид бора и свободный углерод, концентрация которых зависит от соотношений В/Ti и C/O. При температуре 2300 К и ниже становятся термодинамически возможными процессы нитридообразования:



Образование нитрида титана возможно наряду с диборидом, но при более высоких температурах и недостатке бора в системе.

Прогнозирование условий эффективной переработки бор- и титансодержащего сырья проведено с использованием усовершенствованной математической модели взаимодействия плазменного и сырьевого потоков, которая учитывает влияние сырья и искусственной теплоизоляции канала на интенсивность теплообмена газа-теплоносителя со стенками, [7]. В основе модели — совместное решение уравнений движения частиц сырья, межкомпонентного теплообмена и теплообмена плазменного потока со стенками реактора.

Отличительные особенности реализуемого варианта модели: теплообмен плазменного потока со стенками канала реактора определяют по расчетной зависимости, полученной авторами для реальных условий образования боридов титана в плазменном реакторе, не учитываемых известными уравнениями (7); промышленный

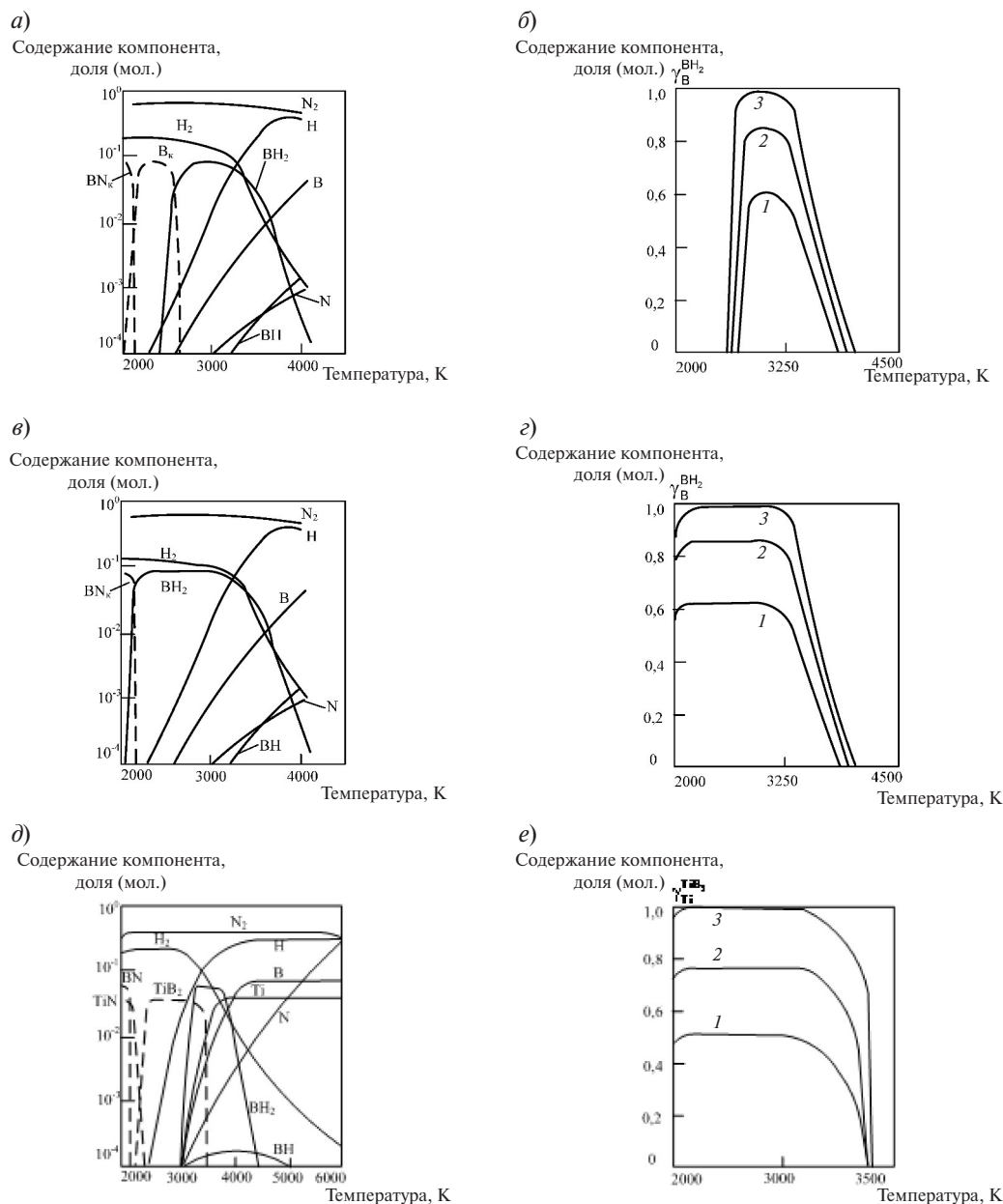


Рис. 1. Результаты термодинамических расчетов систем В–Н–N, Ti–В–Н–N:

- a) равновесные составы газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении В:Н:N = 1:6:20;
- б) равновесная зависимость степени превращения В в ВН₂ от соотношения В:Н (1:2 (1); 1:4 (2); 1:6 (3) и температуры;
- в) квазиравновесные составы газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении В:Н:N = 1:6:20;
- г) квазиравновесная зависимость степени превращения В в ВН₂ от соотношения В:Н (1:2 (1); 1:4 (2); 1:6 (3) и температуры;
- д) равновесные составы газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении Ti:В:Н:N = 1:2:12:20;
- е) зависимость степени превращения Ti в TiB₂ от соотношения Ti:В (1:1,5 (1); 1:1,75 (2); 1:2 (3) и температуры

уровень мощности реактора — 150 кВт; трехструйный вариант камеры смешения с углом наклона плазменных струй 30° , обеспечивающий вынужденную турбулизацию плазменного потока; футеровка канала реактора толщиной 0,005 м из диоксида циркония, снижающая теплоотдачу от плазменного потока на 20 %; введение в плазменный поток разнообразного по фазовому составу, дисперсности и теплофизическим свойствам высокодисперсного сырья (титан, оксид титана, бор); расходная массовая концентрация высокодисперсного сырья 0,12 кг/кг, близкая к максимальной и снижающая теплоотдачу от плазменного потока на 15 %. Уравнение имеет вид

$$St = (0,672 \pm 0,155) R_{f,x}^{-0,425 \pm 0,081} Pr_{f,x}^{-0,05}, \quad (7)$$

где St , Re , Pr — числа Стентона, Рейнольдса, Прандтля; x и f — индексы, соответствующие среднemasсовой температуре потока и осевой координате.

Степень плазменного испарения бор- и титансодержащего дисперсного сырья определяется такими факторами, как энергетические и гидродинамические характеристики плазменного потока, крупность частиц и их теплофизические свойства, массовая расходная концентрация. Исследования проводились для следующего режима работы трехструйного реактора: массовый расход плазмообразующего газа (азота) — $9 \cdot 10^{-3}$ кг/с, подведенная к камере смешения мощность — 75 кВт. Результаты исследования приведены на рис. 2.

При использовании в качестве сырья порошка металлического титана достаточно оптимальное сочетание теплофизических характеристик, в первую очередь — коэффициента теплопроводности, теплоты плавления и испарения, обуславливает возможность переработки с приемлемой ($0,10$ – $0,14$ кг/кг) для технологического процесса расходной концентрацией частиц крупностью 5–10 мкм. При этом тепловой КПД потока для частиц крупностью 5 мкм достигает 0,20. Установленные закономерности не зависят от начальной скорости частиц при изменении ее в пределах 1–3 м/с. Рабочие параметры реактора обеспечивают полное испарение частиц диоксида титана крупностью от 3 до 5 мкм, причем взаимодействие частиц с потоком происходит в условиях сопоставимых

скоростей, составляющих для частиц размером 3 мкм 32–60 м/с, а для 5 мкм — 28–55 м/с за время соответственно $15 \cdot 10^{-5}$ – $18 \cdot 10^{-5}$ и $54 \cdot 10^{-5}$ – $85 \cdot 10^{-5}$ с. Следует отметить, что увеличение до определенного уровня массовой расходной концентрации диоксида не влияет на степень его испарения. Максимальная расходная концентрация, при которой возможна полная переработка TiO_2 , составляет 0,12 кг/кг для частиц крупностью 5 мкм и 0,14 кг/кг для 3 мкм. При этом оптимальная загрузка реактора позволяет увеличить долю энергии, переданную частицам, т. е. тепловой КПД потока (например, для частиц 5 мкм с 0,075 до 0,20). Изменение скорости подачи порошка TiO_2 с 1 до 3 м/с практически не приводит к изменению гидродинамической обстановки в потоке, а следовательно, не оказывает влияние на межкомпонентный теплообмен. Полное испарение частиц бора крупностью 2–3 мкм при массовой расходной концентрации 0,077 кг/кг достигается при экстремальных энергетических характеристиках плазменного потока, соответствующих начальной температуре 5400 К.

Плазменный синтез и характеристики диборида титана

По результатам моделирования взаимодействия сырьевого и плазменного потоков осуществлен выбор порошкообразного сырья и газов — восстановителя и теплоносителя. Их характеристики приведены в табл. 1.

Дисперсный состав порошкообразного сырья представлен на рис. 3. Порошок титана при обследовании массива из 985 частиц характеризуется размерным диапазоном 0,5–4 мкм, средним размером частиц 2,0 мкм (рис. 3 а) и следующим распределением их по фракциям: 0,5–2 мкм — 48,2 %, 4 мкм — 51,8 %. Порошок диоксида титана имеет средний размер частиц 0,5 мкм (рис. 3 б), а 770 исследованных частиц укладываются в размерный диапазон 0,2–1,0 мкм, причем доля частиц фракции 0,5 мкм составляет 48,7 %, а фракции 0,5–1,0 мкм — 51,3 %. Порошок бора является самым высокодисперсным из используемого сырья (рис. 3 в): для 760 частиц установлен размерный диапазон 50–250 нм, средний размер — 112 нм и распределение по фракциям 50–125 нм — 53,2 %; 125–250 нм — 46,8 %

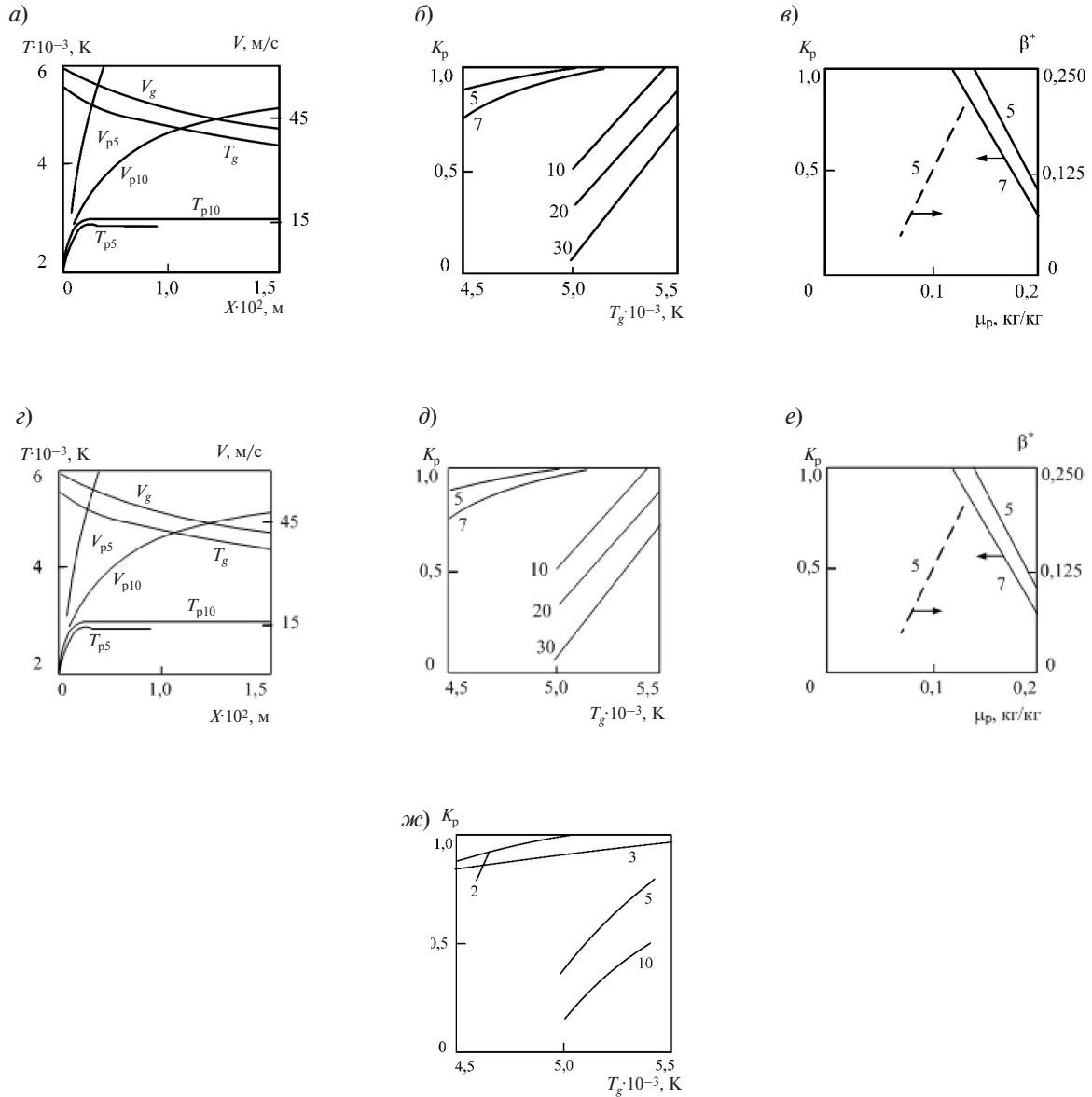


Рис. 2. Гидродинамические и энергетические режимы переработки порошкового сырья титана, диоксида титана и бора (размеры частиц — 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30 мкм — указаны на рисунке):

a, г — изменение среднemasовых температур и скоростей плазменного потока (T_g, V_g) и частиц порошка (T_p, V_p) (*a* — титан; *г* — диоксид титана) по длине реактора;

б, д, ж — влияние начальной температуры T_g плазменного потока на степень K_p испарения частиц порошка (*б* — титан; *д* — диоксид титана; *ж* — бор);

в, е — влияние массовой расходной концентрации μ_p на степень K_p испарения частиц порошка (*в* — титан; *е* — диоксид титана)

Таблица 1

Основные характеристики порошкообразного сырья и технологических газов

Порошкообразное сырье и технологические газы	Содержание основного вещества, %, не менее	Дисперсность, мкм
Тонкодисперсный порошок титана ПТМк	99,9	0,5–5
Диоксид титана пигментный Р-1 (ГОСТ 9808–84, изм.)	99,0	–1
Бор аморфный Б99	99,0	–1
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 9293–74, изм.)	99,5 (содержание кислорода – не более 0,5)	–

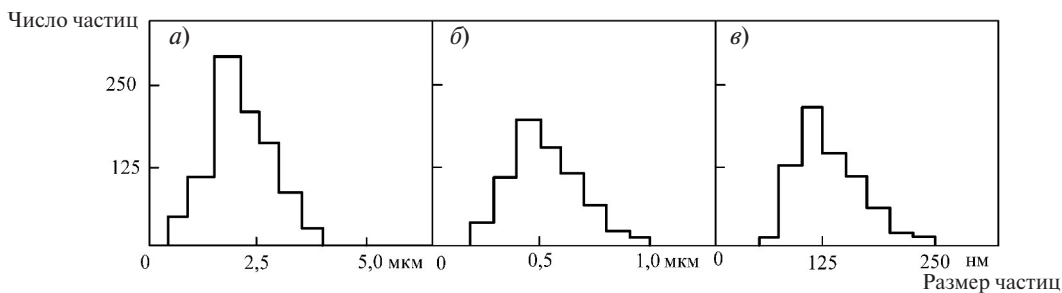


Рис. 3. Дисперсный состав порошкообразного сырья: порошки титана (а), его диоксида (б), бора (в)

Процесс синтеза диборида титана исследовался при мощности дугового разряда 80–150 кВт и расходе плазмообразующего газа $(4,6–9,0) \times 10^{-3}$ кг/с, что соответствует начальной температуре плазменного потока 5400–5500 К. Массовая расходная концентрация составляла 0,10 кг порошка на кг плазмообразующего газа. Закалка продуктов синтеза осуществлялась азотом, подаваемым через закалочное кольцо, установленное на выходе из реактора. Температура закалки регулировалась изменением длины реактора. Расход закалывающего газа составлял $(1,0–2,0) \cdot 10^{-3}$ кг/с.

Твердые продукты синтеза исследовались методами рентгеновского, химического, масс-спектрометрического, электронно-микроскопического, термогравиметрического анализов и методом БЭТ. Для решения различных задач исследования анализировались образцы, отобранные из плазменного потока металлическим водоохлаждаемым зондом для предотвращения контакта с воздухом, а также образцы нанопорошков из системы улавливания, отобранные

после разгерметизации фильтров. Газообразные продукты и продукты термодесорбции исследовались хроматографическим методом.

Исследовались два технологических варианта с использованием шихт различных составов: 1 – $(\text{Ti} + \text{B} + \text{H}_2)$, 2 – $(\text{TiO}_2 + \text{CH}_4 + \text{B})$. При этом оптимизировалось содержание в продуктах синтеза диборида титана. Получены следующие уравнения, описывающие зависимость содержания диборида титана от основных технологических факторов:

$$[\text{TiB}_2 (1)] = -412,41 + 0,09489 T_0 + 2,196[\text{B}] + 0,1597\{\text{H}_2\} - 0,00061 T_0[\text{B}]; \quad (8)$$

$$[\text{TiB}_2 (2)] = 4,59 + 0,0156 T_0 + 0,00213 T_3 - 0,0688\{\text{CH}_4\} - 0,214[\text{B}] \cdot \{\text{H}_2\} \quad (9)$$

где T_0 – начальная температура плазменного потока (5000–5400 К); T_3 – температура закалки (2600–2800 К); $[\text{B}]$ – содержание бора в шихте (100–120 % от стехиометрически необходимого);

{CH₄} — количество восстановителя (метан) (100–120 % от стехиометрически необходимого); {H₂} — концентрация водорода в плазмообразующем газе (0–0,25 % об.).

Основные параметры синтеза и характеристики диборида титана представлены в табл. 2. Сопоставление двух вариантов синтеза позволяет считать более перспективным борирование титанового порошка. Нанопорошок диборида

титана представлен агрегатами шаровидной формы размером 120–200 нм, образованными сообществом округлых частиц достаточного широкого размерного диапазона — от 10 до 60 нм (рис. 4). Округлая форма наночастиц диборида титана указывает на возможность их образования по механизму «пар — расплав — кристалл» предположительно при взаимодействии «титанового» аэрозоля с бороводородами.

Таблица 2

Основные параметры синтеза и характеристики диборида титана

Параметры синтеза и характеристики диборида титана	Технологические варианты синтеза	
	1 — Ti + B + H ₂	2 — TiO ₂ + B + CH ₄
Состав газа — теплоносителя, % об.:		
азот		74,0
водород		25,0
природный газ (метан)		1,0
Крупность титаносодержащего сырья, мкм	0,5–4,0	0,2–1,0
Крупность борсодержащего сырья, мкм		0,25–0,40
Количество бора в порошкообразной шихте, % от стехиометрического		100–120
Количество восстановителя (метан), % от стехиометрического	—	100–120
Начальная температура плазменного потока, К		5400
Температура закалки, К		2600–2800
Химический состав, %:		
TiB ₂	92,0–93,0	90,05–91,30
свободный бор	1,30–1,15	1,91–1,04
титан свободный	1,91–1,45	—
углерод свободный	—	1,42–0,92
кислород	2,29–1,83	3,72–3,52
азот	2,05–1,92	2,26–2,11
летучие	0,45–0,65	0,64–1,11
Удельная поверхность, м ² /кг	46000–48000	35000–37000
Форма частиц		округлая
Окисленность порошков x10 ⁷ , кг O ₂ /м ² удельной поверхности	3,82–4,98	9,51–10,63
Производительность по сырью, кг/ч		3,6
Производительность по TiB ₂ , кг/ч	3,42	2,35
Интенсивность, кг/ч·м ³	1556	1070

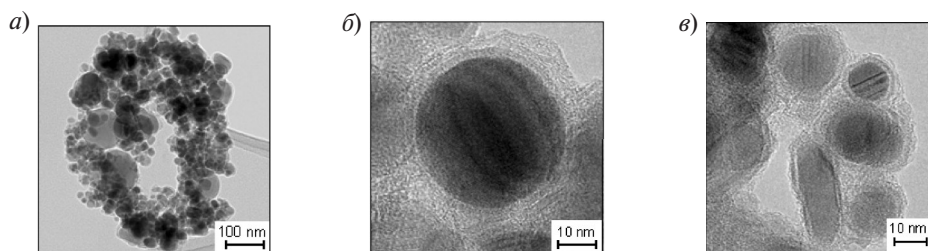


Рис. 4. Микрофотографии нанопорошка диборида титана (а — ансамбль частиц и агрегатов; б — морфологическая картина агрегата; в — отдельные частицы)

Предполагается, что по фазовому и химическому составу, уровню дисперсности, основным технологическим показателем предлагаемый способ получения диборида титана является конкурентоспособным и может занять лидирующее положение в производстве диборида для защитных смачиваемых алюминием катодных и гальванических композиционных покрытий [8, 9].

Выводы

Установлена возможность получения диборида титана в наносостоянии из порошковых шихт «титан — бор» и «диоксид титана — бор» в условиях плазменных азотно-водородного

и азотно-углеводородного потоков. Выявлен и обсужден механизм процессов боридообразования. Сопоставление двух вариантов синтеза позволяет выбрать в качестве более перспективного борирование титанового порошка. По фазовому и химическому составу, дисперсности диборида титана предлагаемый способ его получения является конкурентоспособным и может занять лидирующее положение в производстве этого материала для защитных смачиваемых алюминием катодных и гальванических композиционных покрытий.

Данная работа является проектной частью государственного задания Минобрнауки России № 11.1531/2014/К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Серебрякова Т.И., Неронов В.А., Пешев П.Д.** Высокотемпературные бориды. М.: Metallurgy, Челябинское отделение, 1991. 368 с.
2. **Косолапова Т.Я.** Свойства, получение и применение тугоплавких соединений: справочник. М.: Metallurgy, 1986. 928 с
3. **Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я., Сиразутдинов Г.А.** Metallurgy алюминия. Технология. Электроснабжение. Автоматизация: Учебное пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Флинта, Наука, 2008. 528 с.
4. **Serlire M., Oye H.A.** Cathodes in Aluminum Electrolysis. Dusseldorf: Aluminum Verlag, 2010. 698 p.
5. **Чанг Х., де Нора В., Секхар Дж.А.** Материалы, используемые в производстве алюминия методом Эру—Холла / Пер. с англ. П. Полякова. Красноярск: Изд-во КГУ, 1998.
6. **Патент 2498880 РФ, МПК C04B35/58.** Способ получения порошка диборида титана для материала

смачиваемого катода алюминиевого электролизера / В.В. Иванов, С.Ю. Васильев, В.К. Лауринавичюте, А.А. Черноусов, И.А. Блохина; ФГАОУ ВПО Сибирский федеральный университет. 2012134603/02, заявл. 13.08.2012, опубл. 20.11.2013. 8 с

7. **Ширяева Л.С., Ноздрин И.В., Галевский Г.В., Руднева В.В.** Исследование плазменного синтеза нанокарбида хрома // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии / СибГИУ. Москва — Новокузнецк. 2012. № 29. С. 94—101.

8. **Ноздрин И.В., Галевский Г.В., Руднева В.В.** Особенности свойств композиционного материала никель — нанодисперсный диборид хрома // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 9. С. 46—48.

9. **Руднева В.В., Галевский Г.В.** Термоокислительная устойчивость нанопорошков тугоплавких карбидов и боридов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2007. №4. С. 20—24.

REFERENCES

1. **Serebryakova T.I., Neronov V.A., Peshev P.D.** Vysokotemperaturnyye boridy [Hightemperature borides]. M.: Metallurgiya, Chelyabinskoye otdeleniye, 1991. 368 s. (rus.)
2. **Kosolapova T.Ya.** Svoystva, polucheniye i primeneniye tugoplavkikh soyedineniy: spravochnik [Properties, production and application of refractory compounds: a handbook]. M.: Metallurgiya, 1986. 928 s. (rus.)
3. **Galevskiy G.V., Kulagin N.M., Mintsis M.Ya., Sirazutdinov G.A.** Metallurgiya alyuminiya. Tekhnologiya. Elektrosnabzheniye. Avtomatizatsiya: uchebnoye posobiye dlya vuzov [Metallurgy aluminum. The Technology. Power supply. Automation: a manual for universities]. 3-ye izd., pererab. i dop. M.: Flinta, Nauka, 2008. 528 s. (rus.)

4. **Serlire M., Oye H.A.** Cathodes in Aluminum Electrolysis. Dusseldorf: Aluminum Verlag, 2010. 698 p.

5. **Chang Kh., de Nora V., Sekkhar Dzh. A.** Materialy, ispolzuyemyye v proizvodstve alyuminiya metodom Eru Kholla. [The materials used in the production of aluminum by Eru - Hall] / Per. s angl. P. Polyakova. Krasnoyarsk, Izd-vo KGV, 1998.

6. **Patent 2498880 RF, МПК C04B35/58.** Sposob polucheniya poroshka diborida titana dlya materiala smachivayemogo katoda alyuminiyevogo elektrolizera [A metod for producing a powder of titanium dibonde for material the alluminium-wettable cathode electrolyzer] / V.V. Ivanov, S.Yu. Vasilyev, V.K. Laurinavichyute, A.A. Chernousov,

I.A. Blokhina; «Sibirskiy federalnyy universitet. 2012134603/02, zayavl. 13.08.2012, opubl. 20.11.2013. 8 s. (rus.)

7. **Shiryayeva L.S., Nozdrin I.V., Galevskiy G.V., Rudneva V.V.** Issledovaniye plazmennogo sinteza nanokarbida khroma [Investigation of plasma synthesis nanokarbide chromium]. *Vestnik gorno-metallurgicheskoy sektsii RAEN. Otdeleniye metallurgii / SibGIU. Moskva — Novokuznetsk.* 2012. № 29. S. 94–101. (rus.)

8. **Nozdrin I. V., Galevskiy G.V., Rudneva V.V.** Oso-bennosti svoystv kompozitsionnogo materiala nikel-nano-

dispersnyy diborid khroma [Features properties of the composite material of nickel-nanonanodisperse diboride chromium]. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii.* 2011. № 9. S. 46–48. (rus.)

9. **Rudneva V.V., Galevskiy G.V.** Termookislitel'naya ustoychivost nanoporoshkov tugoplavkikh karbidov i boridov [Thermal and oxidative stability of nanopowders of refractory carbides and borides]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya.* 2007. №4. S. 20–24. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГАЛЕВСКИЙ Геннадий Владиславович — доктор технических наук заведующий кафедрой Сибирского государственного индустриального университета. 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.. E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

РУДНЕВА Виктория Владимировна — доктор технических наук профессор Сибирского государственного индустриального университета. 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.. E-mail: kafcmet@mail.ru

ЕФИМОВА Ксения Александровна — аспирант Сибирского государственного индустриального университета. 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.. E-mail: efimovaksenia@mail.ru

AUTHORS

GALEVSKY Gennadii V. — Siberian State Industrial University. 42, Kirov St, Novokuznetsk, Russia, 654007. E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

RUDNEVA Viktoriia V. — Siberian State Industrial University. 42, Kirov St, Novokuznetsk, Russia, 654007. E-mail: kafcmet@mail.ru

EFIMOVA Kseniia A. — Siberian State Industrial University. 42, Kirov St, Novokuznetsk, Russia, 654007. E-mail: efimovaksenia@mail.ru