

DOI: 10.18721/JEST.230310

УДК 669.046:536.45

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

Сибирский государственный индустриальный университет, Российская Федерация

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ БОРИДООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПЛАЗМООБРАБОТКЕ ТИТАН-БОРСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ**

Для формирования представлений о механизме процессов боридообразования, протекающих при плазмообработке титан-борсодержащего сырья, изучены температурная зависимость состава образующихся газообразных и твердых продуктов, состав термодесорбированных с поверхности диборида титана газообразных соединений, морфология наночастиц. Анализ результатов позволяет предложить вероятный механизм образования диборида титана по схеме «пар — расплав — кристалл», включающий конденсацию паров титана в форме аэрозоля, борирование нанокпель расплава бороводородами и кристаллизацию расплава титан — бор. Составлена обобщенная гипотетическая схема боридообразования, содержащая 2 зоны: высокотемпературную (5400–3500 К) формирования реакционной смеси, в которой происходят процессы испарения порошкообразной титан-борсодержащей шихты, «газификации» бора в бороводороды, и более низкотемпературную (3500–2000 К), в которой происходит конденсация паров титана, значительное снижение концентрации бороводородов и образование диборида титана.

ТИТАН-БОРСОДЕРЖАЩЕЕ СЫРЬЕ; ПЛАЗМООБРАБОТКА; ДИБОРИД ТИТАНА; БОРИДООБРАЗОВАНИЕ; МЕХАНИЗМ.

*Ссылка при цитировании:*

Г.В. Галевский, В.В. Руднева, К.А. Ефимова. Особенности процессов боридообразования при плазмообработке титан-борсодержащего сырья // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2017. Т. 23. № 3. С. 109–117. DOI: 10.18721/JEST.230310

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

Сибирский государственный индустриальный университет, Российская Федерация

## **FEATURES OF THE PROCESSES OF BORIDE FORMATION DURING PLASMA TREATMENT OF TITANIUM-BORON-CONTAINING RAW MATERIALS**

The temperature dependence of the composition of the gaseous and solid products formed, the composition of gaseous compounds thermodesorbed from the surface of titanium diboride, and the morphology of nanoparticles were studied in order to form ideas on the mechanism of boride formation processes occurring during plasma treatment of titanium-boron-containing raw materials. Analysis of the results suggests a possible mechanism for the formation of titanium diboride in the «vapor-melt-crystal» scheme, which includes the condensation of titanium vapor in the form of an aerosol, the boron nano-drop of the melt with borohydrides, and the crystallization of the titanium-boron melt; A generalized hypothetical scheme of boride formation has been compiled, containing 2 zones: a high-temperature (5400–3500 K) for the formation of a reaction mixture in which evaporation of a powdered

titanium-boron-containing charge occurs, «gasification» of boron into borohydrides, and a lower-temperature (3500–2000 K), in which condensation of titanium vapor occurs, a significant decrease in the concentration of borohydrides and the formation of titanium diboride.

TITANIUM-BORON-CONTAINING RAW MATERIALS; PLASMA PROCESSING; TITANIUM DIBORIDE; BORIDE FORMATION; MECHANISM.

*Citation:*

G.V. Galevsky, V.V. Rudneva, K.A. Efimova, Features of the processes of boride formation during plasma treatment of titanium-boron-containing raw materials, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 23 (03) (2017) –117, DOI: 10.18721/JEST.230310

### Введение

Современная металлургия обеспечивает мировую экономическую систему разнообразной металлопродукцией как массового, так и специального назначения. По данным World Steel Association в структуре потребления металлопродукции 94 % приходится на сплавы железа, цветных металлов — 5 %, а 1 % составляет разнообразная по номенклатуре группа металлосо-держающих материалов с особым комплексом свойств. В этой группе важное место занимают бориды металлов подгрупп титана, ванадия и хрома, материалы и сплавы на их основе, которые благодаря уникальному сочетанию практически значимых свойств применяются в машино-, авиа- и ракетостроении для решения прикладных инженерно-технических и производственных задач, требующих высокотемпературных, сверхтвердых, жаропрочных, жаростойких, износостойчивых, конструкционных, огнеупорных, наплавочных материалов и защитных покрытий, способных работать в экстремальных условиях.

В эту группу входит диборид титана  $TiB_2$ , исследованный и введенный в обращение научной школой известного российского ученого-материаловеда Г.В. Самсонова более 50 лет назад и востребованный до сих пор в технологии различных материалов: металлокерамических инструментальных и конструкционных, огнеупорных и абразивных, напыляемых и наплавляемых, для модифицирования смачиваемых покрытий [1, 2]. При этом прикладной интерес к дибориду титана постоянно растет: в течение последних 10-ти лет в изданиях, индексируемых в базах данных «Scopus» и «Web of Science», размещено 115 публикаций, содержащих технологическую информацию о его производстве и использовании, отражающих тенденцию перехода от применения диборида титана крупнозернистого

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

Основу современного производства диборида титана составляют карботермический, магнетермический и газофазный способы. Карбо- и магнетермический способы включают восстановление оксидов титана и бора углеродом или магнием с рафинированием продукта; реализуются в различных технологических вариантах. Газофазный способ основан на боридообразовании в условиях плазменного потока, реализуется в непрерывном режиме и обеспечивает производство нанокристаллического диборида титана. Выявлены 10 отечественных и 10 зарубежных фирм, реально позиционирующих себя в качестве производителей и поставщиков диборида титана. Российские производители предлагают к реализации диборид титана магнетермического способа получения. Стратегически важный нанокристаллический сегмент рынка полностью закрывается зарубежными поставщиками, среди которых такие компании, как «American Elements», «Nanostructured & Amorphous Materials, Inc.», «PlasmaChem GmbH», «NEOMAT Co». Это обуславливает необходимость развития российской нанотехнологии диборида титана.

В связи с этим исследование и технологическая реализация процессов боридообразования при плазмометаллургической переработке титан-борсодержащего сырья является важной научно-практической задачей, имеющей большое значение для развития отечественной металлургии титана, его многофункциональных соединений и сплавов, а также эффективного решения инновационных задач прикладного материаловедения.

### Современные представления о механизме боридообразования

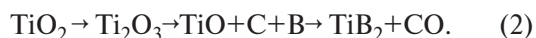
Анализ технологических результатов, приведенных в работах [1–5]\*, свидетельствует о том, что механизм боридообразования в различных способах получения — разный, определяется в первую очередь составом и состоянием шихты, кинетическими факторами реализуемых процессов — крупностью порошков реагентов, их чистотой, температурой, общим давлением в реакционном объеме, изотермичностью реактора, выбором газовой среды и др. Исследование и описание особенностей этих процессов осложняется возможностью образования в системе Ti–B следующих четырех боридов, а так же высокобористого твердого раствора:



В основе образования  $\text{TiB}_2$ , реализуемого при спекании и горячем прессовании при температурах ниже температуры плавления исходных веществ, лежит твердофазное взаимодействие. Лимитирующей стадией, определяющей параметры процесса, является диффузия бора в металл через слой образующегося продукта, в составе которого могут быть бориды  $\text{TiB}$ ,  $\text{Ti}_3\text{B}_4$ . При этом реальные скорости диффузионных процессов определяются крупностью частиц исходных порошков титана и бора, степенью однородности смеси, плотностью прессования, наличием и толщиной оксидных пленок, присутствием адсорбированных газов, средой, в которой осуществляется процесс. Для ускорения диффузионных процессов спекание трансформируется в сплавление, а горячее прессование проводят при температуре, превышающей температуру плавления титана в смеси титан-бор. Для полной гомогенизации диборида титана и получения из него очень плотных изделий зачастую дополнительно проводят измельчение спеченных заготовок и повторное прессование.

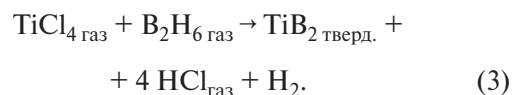
При углеродоборотермическом способе образования  $\text{TiB}_2$  реакция восстановления  $\text{TiO}_2$

углеродом в присутствии бора протекает в несколько стадий, соответствующих образованию промежуточных оксидов



Процесс может быть проведен в среде восстановительного газа при температуре 2173–2273 К. Лучшие результаты достигаются при проведении процесса в вакууме. За счет непрерывного удаления монооксида углерода и смещения равновесия реакции в сторону образования  $\text{TiB}_2$  температура восстановления снижается до 1723–1973 К, уменьшается содержание углерода в  $\text{TiB}_2$ , исключается его окисление и азотирование. Механизм процессов в этом случае определяется термодинамической устойчивостью оксидов и упругостью паров оксидов и субоксидов.

При образовании  $\text{TiB}_2$  осаждением из газовой фазы, основанном на взаимодействии газобразных или легколетучих соединений титана и бора в присутствии водорода, последовательно и параллельно реализуется целая совокупность физических и химических процессов. Механизм боридообразования включает: переход твердых и жидких исходных веществ в парообразное состояние; пиролиз или восстановление химических соединений, содержащих титан, бор или оба этих компонента одновременно, до ионного или атомарного их состояния; газофазную и гетерофазную диффузию компонентов в реакционной зоне; непосредственное химическое взаимодействие между ними; гетерогенное зародышеобразование  $\text{TiB}_2$  и рост его кристаллов; отвод из газовой фазы побочных продуктов. Один из вариантов газофазного получения  $\text{TiB}_2$  может быть описан следующим уравнением:



### Цель, гипотезы, методология

Целями настоящей работы являются: исследование процессов боридообразования при обработке титан-борсодержащего сырья в условиях плазменного потока; описание вероятного механизма их протекания; определение возможности технологического управления содержанием сопутствующих дибориду титана примесей, в том числе свободного бора.

\* Патент 2498880 РФ, МПК С04В35/58. 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; ФГБОУ ВПО «СФУ», т. - 2012134603/02, заявл. 13.08.2012, опублик. 20.11.2013. 8 с.

Для экспериментального исследования процессов боридообразования использовался трехструйный плазмометаллургический реактор, включающий также 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. 1, а методы их экспериментального определения и расчета описаны в работах [6–8].

Для генерации плазменного потока используются три электродуговых подогревателя газа (плазмотрона) ЭДП-104АМ постоянного тока мощностью до 50 кВт каждый, установленные в камере смешения под углом 30° к оси реактора. Конструкция плазмотронов, устройство и работа систем дозирования сырья, его подачи в камеру смешения и улавливания продуктов плазмообработки описаны в патентах\*. Для подачи в реактор высокодисперсного сырья и газообразного углеводорода используется водоохлаждаемая фурма. Для снижения радиального градиента температуры в пристеночной зоне канал реактора футеруется изнутри высокотемпературным теплоизоляционным материалом — цилиндрическими вставками из диоксида циркония с внутренним диаметром 0,054 м.

В качестве титан-борсодержащих компонентов шихты использовались порошки титана марки ПТН-8 (вариант 1), диоксида титана марки Р-1 (вариант 2), бора марки Б-99. Порошки име-

\* Патент 107440 РФ, МПК Н 05 Н 7/18. Электродуговой подогреватель газовой азот-кислородной смеси для трехструйного прямоточного химико-металлургического реактора/ Г.В. Галевский, В.В. Руднева, И.В. Ноздрин, Л.С. Ширяева; ГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет». № 2011112115/07, заявл. 30.03.2011, опубл. 10.08.2011. 8 с.

А.с. № 1204578 СССР, МКИ В 65 G 53/40. Устройство для дозирования порошково-газовой смеси / В.Н. Речкин, А.А. Гусев. ИХТТ и МС СО АН СССР. № 3775795/28–13; заявл. 24.07.84; опубл. 15.01.86. Бюл. № 2. 3 с.

Патент 108319 РФ, МПК В 01 D 46/02. Рукавный фильтр для улавливания нанодисперсных порошков/ Г.В. Галевский, В.В. Руднева, И.В. Ноздрин, Л.С. Ширяева; ГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет». № 2011112113/05, заявл. 30.03.2011, опубл. 20.09.2011. 9 с.

ют размерный диапазон и характеризуются следующим распределением по фракциям: титан 0,5–4 мкм + 0,5–2 мкм — 48,2 %, 2–4 мкм — 51,8 %; диоксид 0,2–1,0 мкм + 0,2–0,5 мкм — 48,7 %, 0,5–1,0 мкм — 51,3 %; бор 0,05–0,25 мкм + 0,05–0,125 мкм — 53,2 %, 0,125–0,25 мкм — 46,8 %. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа использовался технический азот (ГОСТ 9293–84, изм.), восстановителя — природный газ с содержанием метана до 93,6 % об., технологической добавки — водород (ГОСТ 3022–80, изм.).

При получении  $TiB_2$  в условиях плазменного потока возможности изучения процесса боридообразования еще более ограничены, тому есть следующие причины:

чрезвычайно высокие температуры: средне-массовая температура составляет 2800–5400 К;

высокие скорости движения турбулентной реакционной химически активной смеси — (40–60 м/с);

кратковременность процесса, оцениваемая на уровне 15 мс;

крайне ограниченный объем реакционной зоны, составляющий 0,0001 м<sup>3</sup>;

практическая недоступность реакционной зоны для зондовой диагностики ввиду значительного возмущающего воздействия водоохлаждаемого зонда, технически исполнимого с наружным диаметром не менее  $0,6 \cdot 10^{-2}$  м;

сложный состав газовой фазы, подлежащий определению только после закалки и, возможно, при этом изменяющийся;

непреодолимые пока трудности определения содержания в газовой фазе нестабильных борородов.

В то же время изучение механизма боридообразования наряду с научной стороной имеет важное прикладное значение, поскольку позволяет выявить возможность управления содержанием примесей, в том числе содержанием свободного бора.

Результаты термодинамического моделирования процессов боридообразования, описанные в работах [9–11], позволяют выдвинуть две научные гипотезы образования  $TiB_2$  в условиях плазмообработки шихты:

1) при взаимодействии в газовой фазе по схеме «пар-кристалл»



Основные характеристики реактора

Таблица 1

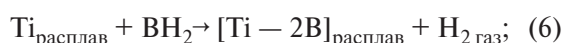
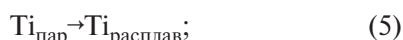
Table 1

Basic characteristics of the reactor

Мощность, кВт.....	150
Тип реактора.....	трехструйный прямоточный вертикальный
Тип плазмотрона, мощность, кВт .....	ЭДП-104А, 50
Плазмообразующий газ .....	азот
Масса нагреваемого газа, кг/ч.....	32,5
Внутренний диаметр, м .....	0,054
Объем реактора, м <sup>3</sup> .....	0,002
Футеровка канала реактора .....	диоксид циркония
Температура плазменного потока, .....	К5400 ( $L^* = 0$ ); 2600 ( $L = 20$ )
Температура футеровки, .....	К 1650 ( $L = 0$ ); 500 ( $L = 20$ )
Удельная электрическая мощность, МВт/м <sup>3</sup> .....	2140
Ресурс работы, ч	
анода.....	3000–3200
катода .....	100–110
Загрязнение диборида титана продуктами эрозии, %	
анода.....	Cu — 0,0001
катода .....	W — 0,000002

$L^*$  — относительная длина реактора

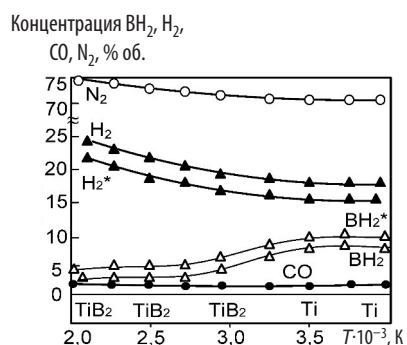
2. при взаимодействии титансодержащего металлического аэрозоля с газообразными борводородами по схеме «пар-расплав-кристалл»



Для подтверждения гипотетических представлений, накопления и анализа необходимой научной информации были проведены следующие исследования.

Изучена температурная зависимость состава газообразных и твердых продуктов плазмообработки шихты. Для этого процесс проводили в реакторе различной длины — от 6 до 24 калибров, что позволило осуществлять закалку продуктов при разной температуре — от 4000 до 2000 К и истечении газового потока из реактора в осадительную камеру со скоростью  $10^4$ – $10^5$  градусов/с. Нанопродукты, осажденные на водоохлаждаемой поверхности осадительной камеры, анализировались для определения фа-

зового и химического составов (рис. 1). При каждой температуре закалки с помощью зонда отбирались пробы газо-порошковой смеси. Для этих целей использовался стальной интенсивно охлаждаемый зонд (расход воды 0,050 кг/с), выполненный в виде трубки с внутренним диаметром 0,003 м и длиной 0,5 м, последовательно соединенной с фильтром, стеклянной емкостью с поглотителем (этиловый спирт), пипеткой, расходомером и вакуумным насосом КВН-8, создающим разрежение до 20 кПа. Зонд устанавливался на удаление 1 калибра от входа газового потока в осадительную камеру ортогонально потоку таким образом, чтобы его газозаборное отверстие совпадало с осью реактора. При зондировании скорость закалки газопорошковой смеси составляла порядка  $5 \cdot 10^4$  градусов/с. Фильтр выполнялся из двух соприкасающихся основаниями конусов, разделенных фильтрующей перегородкой из стальной сетки саржевого плетения марки С-120, и обеспечивал выделение из пробы порошков, предохраняя их от контакта с воздушной атмосферой. Емкость



Состав	Концентрация ( $\bar{a} \pm \Delta a$ ) при разной температуре			
	2000 К	3000 К	3500 К	4000 К
H <sub>2</sub>	23,12±0,94	19,31±0,82	18,72±0,71	18,11±0,73
BH <sub>2</sub>	0,82±0,06	3,62±0,10	7,00±0,39	7,31±0,42
H <sub>2</sub> *	21,05±	17,62±0,53	16,05±0,50	18,25±0,44
BH <sub>2</sub> *	3,37±0,10	6,54±0,28	9,12±0,49	10,21±0,63
N <sub>2</sub>	74,35±1,23	74,00±1,36	73,65±1,21	73,51±1,44
CO	0,98±0,04	1,00±0,05	1,14±0,04	1,11±0,05

Рис. 1. Температурная зависимость состава газообразных и фазового состава твердых продуктов взаимодействия титана с бором в потоке азотной плазмы ( $\bar{a} \pm \Delta a$ —средние арифметические значения и доверительные интервалы концентраций)

Fig. 1. Temperature dependence of the composition of gaseous and phase composition of solid products of titanium-boron interaction in a nitrogen plasma flow ( $\bar{a} \pm \Delta a$ —average arithmetic values and confidence intervals of concentrations).

с поглотителем позволяла улавливать борсодержащие соединения. Проба обеспыленного газового потока отбиралась в пипетку. Состав газовой фазы определялся хроматографически (см. рис. 1). Кривые H<sub>2</sub>\* и BH<sub>2</sub>\* соответствуют 1,5-кратному избытку бора.

Изучен с помощью масс-спектрометрического анализа состав продуктов термодесорбции образцов, отобранных при зондировании (табл. 2), а с помощью растровой электронной микроскопии — морфология наночастиц TiB<sub>2</sub> (рис. 2)

Таблица 2

Состав и количества продуктов вакуумной термодесорбции образцов TiB<sub>2</sub>, не контактировавших с атмосферой

Table 2

Composition and quantities of products of vacuum thermal desorption of TiB<sub>2</sub> samples not contacted with the atmosphere

Название характеристики	Значение характеристики	
	для TiB <sub>2</sub> (1)	для TiB <sub>2</sub> (2)
Химический состав, %:		
TiB <sub>2</sub>	96,26	93,27
B <sub>свободный</sub>	1,05	0,45
Ti <sub>свободный</sub>	1,13	—
C	—	1,22
O	0,44	—
N	1,12	1,24
TiO <sub>2</sub>	—	3,82
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	45000	37000
Размер* частиц, нм	37	45
Молекулярные массы продуктов десорбции	2,12–13, 26–28, 32–36	2,12–12, 14–16, 26–28, 32–36
Предполагаемый состав продуктов десорбции	H <sub>2</sub> , BH, BH <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , CO, O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , BH, BH <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> , CH <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , CO, O <sub>2</sub>
Количество десорбированных газообразных продуктов	1,24	1,36

\* рассчитывался по величине удельной поверхности

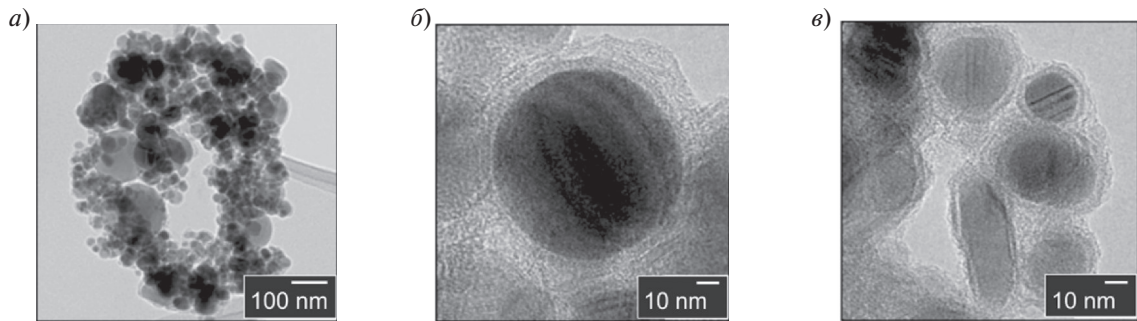


Рис. 2. Микрофотографии нанокристаллического диборида титана  $TiB_2$  (1):  
 а — частицы и агрегаты; б — морфологическая картина агрегата; в — отдельные частицы

Рис. 2. Микрофотографии нанокристаллического диборида титана  $TiB_2$  (1):  
 а — частицы и агрегаты; б — морфологическая картина агрегата; в — отдельные частицы

**Обсуждение результатов**

Анализ полученных результатов подтверждает присутствие в азотно-водородном потоке газообразных борсодержащих соединений. В масс-спектрах продуктов вакуумной термодесорбции присутствуют компоненты с молекулярными массами 12 и 13, предположительно соответствующие  $BH$  и  $BH_2$ . Сопоставление температурной зависимости концентраций  $BH$  и  $BH_2^*$ , рассчитанных по определенному экс-

периментально содержанию в газовой фазе бора, и изменения фазового состава уловленных порошкообразных продуктов подтверждают безусловное участие газообразных соединений бора в боридообразовании. В то же время изучение формы и размера частиц  $TiB_2$ , полученного в виде нанопорошка с шаровидными частицами, однозначно указывает на формирование их по механизму «пар — расплав — кристалл».

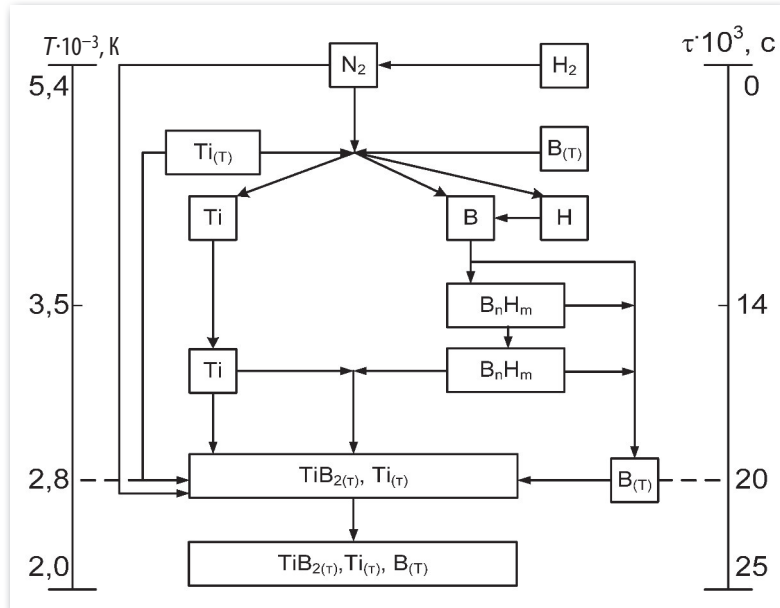


Рис. 3. Предполагаемая схема взаимодействия титана с бором в потоке азотно-водородной плазмы

Fig. 3. The proposed scheme for the interaction of titanium with boron in a stream of nitrogen-hydrogen plasma

Полученные результаты и их обсуждение позволяют описать процесс боридообразования в виде схемы, включающей две основные температурно-пространственные зоны и представленной на рис. 3.

Зона 1 соответствует температурному интервалу 5400–3500 К. В ней протекают процессы тепло- и массообмена и формирование реакционной смеси заданного состава: активное перемешивание азотно-водородного плазменного потока и порошкообразной титанборсодержащей шихты, нагрев, плавление и испарение титана и бора, «газификация» бора в бороводороды.

Зона 2 соответствует температурному интервалу 3500–2000 К. Характерная особенность зоны — существенное снижение концентрации в газовом потоке бороводорода  $\text{BH}_2$ , соответствующее появлению в продуктах  $\text{TiB}_2$ . Это позволяет предположить, что образование  $\text{TiB}_2$  возможно при кристаллизации расплава «титан — бор — продукт борирования бороводородами металлического аэрозоля, формирующегося в потоке при объемной конденсации паров титана». Характер изменения concentra-

ции  $\text{BH}_2$  с температурой при 1,5 кратном избытке бора в шихте подтверждает устойчивость его в пределах температурной зоны и свидетельствуют о реальной возможности ограничения содержания свободного бора в дибориде титана. Сформировавшиеся в рассматриваемой зоне боридные наночастицы активно адсорбируют технологические газы и газообразные продукты боридообразования.

### Заключение

Процесс боридообразования с получением  $\text{TiB}_2$  в условиях плазмообработки шихты характеризуется особенностями, существенно отличающимися его от традиционных технологических вариантов. Образование  $\text{TiB}_2$  возможно при кристаллизации расплава «титан — бор — продукт борирования бороводородами металлического аэрозоля, формирующегося в потоке при объемной конденсации паров титана». Наряду с обсуждаемым механизмом возможны и иные реакционные схемы, не выявленные пока доступными средствами диагностики, но характерные для высокотемпературных неидеальных химико-металлургических реакторов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Панов В.С.** Тугоплавкие металлы IV VI групп и их соединения. Структура, свойства, методы получения: учеб. пособие. М.: МИСиС, 2006. 63 с.
2. **Serlire M., Oye H.A.** Cathodes in aluminum electrolysis. Dusseldorf: Aluminum Verlag, 2010. 698 p.
3. **Golla B.R.** Titanium diboride/ B. R. Golla, T. Bhandari, A. Mukhopadhyay, B. Basu // Journal Ultra-High Temperature Ceramics: Materials for Extreme Environment Applications. 2015. P. 316–360.
4. **Murthy T.S.R.Ch.** Development and characterization of (Ti,Cr)B<sub>2</sub> based composites / T.S.R.Ch. Murthy, J.K. Sonber, K. Sairam, R.D. Bedse // BARC Newsletter. 2016. № 349. P. 1–10.
5. **Крутский Ю.Л. [и др.]**. Изучение процесса синтеза диборида титана с использованием нановолокнистого углерода / Ю. Л. Крутский, Е. В. Антонова, А. Г. Баннов, И. С. Фролова // Актуальные проблемы в машиностроении: мат. I Междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. С. 453–458.
6. **Ширяева Л.С.** О механизме образования карбонитрида хрома в условиях плазменного потока азота. Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2013. № 1. С. 13–16.
7. **Галевский Г.В. [и др.]**. Применение плазменного нагрева в производстве высокотемпературных боридов и карбидов / Г.В. Галевский, В.В. Руднева, И.В. Ноздрин, С.Г. Галевский, К.А. Ефимова // Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра: мат. XIV Всеукр. науч.-практ. конф. Киев, 2016. С. 248–259.
8. **Дигонский С.В.** Газофазные процессы синтеза и спекания тугоплавких веществ. М.: ГЕОС, 2013. 464 с.
9. **Крастиньш Я.А.** Термодинамика образования соединений в системах Ti–B–N и Zr–B–N / Я.А. Крастиньш, Г.Н. Медведева И.П. Лестева // Применение низкотемпературной плазмы в технологии неорганических веществ и порошковой металлургии. Т2: Сб. науч. тр. Рига: Зинатне, 1985. С. 50–54.
10. **Ma Ai-Qiong, JiAng Ming — Xue.** The Thermodynamic Analysis on the System of  $\text{TiO}_2\text{—B}_2\text{O}_3\text{—C}$  // School of Material Science and Engineering. 2008. V. 27. № 5. P. 957–952.
11. **Смирнягина Н.Н. [и др.]**. Термодинамическое моделирование процесса синтеза боридов переходных металлов в вакууме / Н.Н. Смирнягина, И.Г. Сизов, А.П. Семенов / Неорган. Материалы. 2002. Т. 138, № 1. С. 48–54.



## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ГАЛЕВСКИЙ Геннадий Владиславович** — доктор технических наук профессор Сибирского государственного индустриального университета. E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

**РУДНЕВА Виктория Владимировна** — доктор технических наук профессор Сибирского государственного индустриального университета. E-mail: kafcmet@mail.ru

**ЕФИМОВА Ксения Александровна** — аспирант Сибирского государственного индустриального университета. E-mail: efimovaksenia@mail.ru

## REFERENCES

1. **Panov V.S.** Tugoplavkiye metally IV VI grupp i ikh soyedineniya. Struktura, svoystva, metody polucheniya : ucheb. posobiye / V.S. Panov. M. : MISiS, 2006. 63 s. (rus.)
2. **Serlire M., Oye H.A.** Cathodes in aluminum electrolysis. Dusseldorf: Aluminum Verlag, 2010. 698 p.
3. **Golla B.R. [et al.].** Titanium diboride/ B.R. Golla, T. Bhandari, A. Mukhopadhyay, B. Basu. *Journal Ultra-High Temperature Ceramics: Materials for Extreme Environment Applications*. 2015. R. 316–360.
4. **Murthy T.S.R.Ch. [et al.].** Development and characterization of (Ti,Cr)B<sub>2</sub> based composites / T.S.R.Ch. Murthy, J.K. Sonber, K.Sairam, R.D. Bedse. *BARC Newsletter*. 2016. № 349. P. 1–10.
5. **Krutskiy Yu.L. [et al.].** Izucheniye protsessy sinteza diborida titana s ispolzovaniyem nanovoloknistogo ugleroda / Yu.L. Krutskiy, Ye.V. Antonova, A.G. Bannov, I.S. Frolova. *Aktualnyye problemy v mashinostroyenii: mat. I Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.*, Novosibirsk : Izdvo NGTU, 2014. S. 453–458. (rus.)
6. **Shiryayeva L.S.** O mekhanizme obrazovaniya karbonitrida khroma v usloviyakh plazmennogo potoka azota. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*. 2013. № 1. S. 13–16. (rus.)
7. **Galevskiy G.V. [et al.].** Primeneniye plazmennogo nagreva v proizvodstve vysokotemperaturnykh boridov i karbidov / G.V. Galevskiy, V.V. Rudneva, I.V. Nozdrin, S.G. Galevskiy, K.A. Yefimova. *Spetsialnaya metallurgiya: vchera, segodnya, zavtra: mat.XIV Vseukr. nauch.-prakt. konf.* Kiyev, 2016. S. 248–259. (rus.)
8. **Digonskiy S.V.** Gazofaznyye protsessy sinteza i spekaniya tugoplavkikh veshchestv. M.: GEOS, 2013. 464 s. (rus.)
9. **Krastinsh Ya.A. [et al.].** Termodinamika obrazovaniya soyedineniy v sistemakh Ti–B–N i Zr–B–N/ Ya.A. Krastinsh, G.N. Medvedeva I.P. Lesteva. *Primeneniye nizkotemperaturnoy plazmy v tekhnologii neorganicheskikh veshchestv i poroshkovoy metallurgii*. T2: Sb. nauch. tr. Riga: Zinatne, 1985. S. 50–54. (rus.)
10. Ma Ai–Qiong, JiAng Ming – Xue. The Thermodynamic Analysis on the System of TiO<sub>2</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–C // School of Material Science and Engineering. 2008. V. 27. № 5 pp.957–952. (rus.)
11. **Smirnyagina N.N. [et al.].** Termodinamicheskoye modelirovaniye protsessy sinteza boridov perekhodnykh metallov v vakuume/ N.N. Smirnyagina, I.G. Sizov, A.P. Semenov. *Neorgan. Materialy*. 2002. T. 138, № 1. S. 48–54. (rus.)

## AUTHORS

**GALEVSKY Gennadii V.** —Siberian State Industrial university. E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

**RUDNEVA Viktorija V.** — Siberian State Industrial University. E-mail: kafcmet@mail.ru

**EFIMOVA Ksenija A.** — Siberian State Industrial university. E-mail: efimovaksenia@mail.ru

**Дата поступления статьи в редакцию: 1 августа 2017 г.**