

УДК 661.655

*Л.С. Ширяева, А.К. Гарбузова, Г.В. Галевский*

## **ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ КАРБИДА ТИТАНА (ОЦЕНКА, ТЕНДЕНЦИИ, ПРОГНОЗЫ)**

*L.S. Shiryayeva, A.K. Garbuzova, G.V. Galevsky*

## **PRODUCTION AND USE OF TITANIUM CARBIDE (ASSESSMENT, TRENDS, FORECASTS)**

Карбид титана TiC — износо- и коррозионностойкий, твердый, химически инертный материал, востребован в различных областях для изготовления твердых сплавов, металлокерамического инструмента, жаропрочных изделий, защитных покрытий металлов. Новые перспективы применения карбида титана открываются при использовании его в наносостоянии (модифицирование сплавов различного состава и назначения). Оценка экономической эффективности плазменного производства карбида титана показала, что при производительности 26 т карбида титана в год (в расчете на один реактор) и себестоимости 5,64 млн руб./т полученная отпускная цена 400 \$/кг является оптимальной для плазменного производства карбида титана и отражает его конкурентоспособность на мировом рынке наноматериалов.

КАРБИД ТИТАНА; НАНОПОРОШКИ; ПЛАЗМЕННЫЙ СИНТЕЗ.

Titanium carbide TiC — wear — and corrosion-resistant, hard, chemically inert material, has been used in various fields for the manufacture of hard metal, cermet tools, refractory products, protective coatings of metals. New perspectives for the use of titanium carbide are opened when used in nanostate: modification of alloys of different composition and appointment. Economic evaluation of plasma production of titanium carbide showed that the productivity of 26 tonnes per year of titanium carbide (per one reactor) and cost 5.64 million rubles / T obtained selling price 400 \$ / kg is optimal for plasma production of titanium carbide and reflects its competitiveness on the world market of nanomaterials.

TITANIUM CARBIDE; NANOPOWDERS; PLASMA SYNTHESIS.

Карбид титана относится к группе синтетических, сверхтвердых, тугоплавких, жаропрочных материалов и достаточно востребован для производства металлообрабатывающего инструмента, защитных покрытий и карбидосталей. Производство карбида титана в наносостоянии открывает новые перспективы его применения, одним из которых является модифицирование сплавов различного состава и назначения. В работе [1] исследовали введение в алюминиевые деформируемые и литейные сплавы нанопорошка карбида титана. Было установлено измельчение структуры литых изделий, улучшение характеристик механических свойств, пластичности и износостойкости. При полунепрерывном литье слитков прутки вводили в непрерывном режиме при помощи специально разработанного

устройства, которое позволяло регулировать непрерывную подачу прутка из бухты в лунку кристаллизатора со скоростью, обеспечивающей требуемое содержание нанопорошка в слитках. Количество нанопорошка при последующем их введении в различные сплавы не превышало 0,05 %, а расход прутка составлял 20–25 кг на 1 т металла. Сопоставление шлифов поперечного сечения проб показывает, что эффект модифицирования усиливается от прутка из лигатуры Al–Ti до прутка из крупки с нанопорошками (рис. 1). Модифицирующий пруток отпрессован из гранул сплава Д16, алюминиевой крупки АКП, лигатуры Al — 2,0 %Ti. Модифицирующий пруток отпрессован из нанопорошка: TaN; BN; VC; SiC; B<sub>4</sub>C; Cr<sub>3</sub>(C<sub>0.8</sub>N<sub>0.2</sub>)<sub>2</sub>; LaB<sub>6</sub> и TiC. Можно видеть (рис. 2), что из всех исследован-

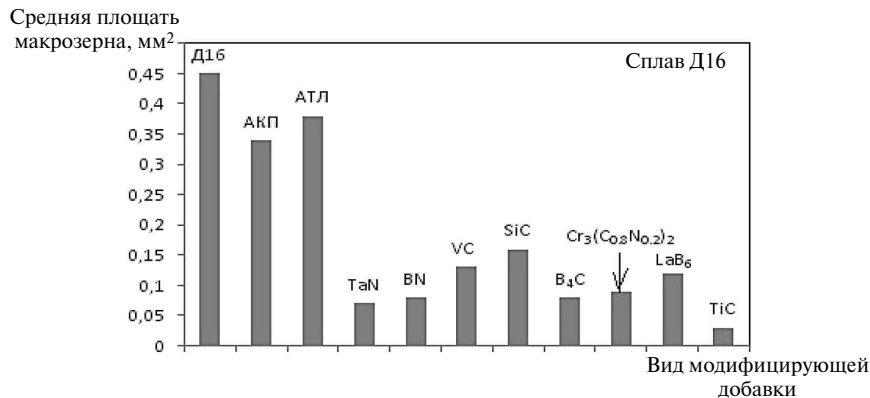


Рис. 1. Влияние вида нанопорошка на величину макрозерна на поперечном сечении проб диаметром 35 мм, отлитых в кокиль из сплава

ных модифицирующих добавок карбид титана занимает лидирующую позицию. Проведенные исследования позволили сформулировать требования к карбиду титана как компонента модифицирующих комплексов [2] (представлены на рис. 2). Основными из них являются уровень дисперсности и тугоплавкость.

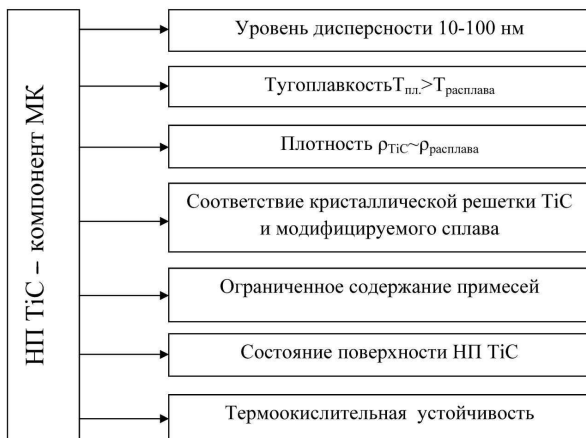


Рис. 2. Требования к карбиду титана TiC как компоненту модифицирующих комплексов

Именно для карбида титана характерно сочетание данных требований.

В настоящее время в России карбид титана такого назначения не производят. Для исследовательских целей его поставляет латышская фирма Neomat Compani [3]. Прогнозируемая Западно-Сибирским металлургическим комбинатом потребность в нанопорошке карбида титана составляет 400 т в год. Все это свидетельствует, что разработка и освоение технологии

производства карбида титана — актуальная научно-технологическая задача.

Цель настоящей работы — научное, технологическое и экономическое обоснование плазменного синтеза карбида титана как компонента модифицирующих комплексов.

#### Методика проведения исследований и расчетов

Для проведения экспериментальных исследований использовался промышленный плазмотехнологический комплекс, созданный СибГИУ и предприятием «Полимет». В основе комплекса — трехструйный прямоточный вертикальный плазменный реактор мощностью 150 кВт [4].

Реактор включает: камеру смешения с тремя плазмотронами ЭДП-104А, установленные под углом 30°, реактор и осадительную камеру. Наряду с реактором в комплекс входят системы шихтоподачи, электро-, газо-, водоснабжения, улавливания продуктов синтеза и вентиляции. Порошкообразное и газообразное сырье подается с помощью водоохлаждаемой фурмы в зону соударения плазменных струй. При этом формируется реакционная смесь заданного состава, осуществляется синтез и формирование нанодисперсных продуктов.

По уровню характеристик реактор может быть отнесен к современному электротермическому оборудованию [5]. Основные из них — следующие:

Характеристики	Значения
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> .....	0,001
Футеровка канала реактора.....	Диоксид циркония
Температура плазменного потока, К.....	5400 ( <i>L</i> = 0) — 2200 ( <i>L</i> = 12)
Температура футеровки, К.....	1549 ( <i>L</i> = 0) — 770 ( <i>L</i> = 12)
Удельная электрическая мощность, МВт/м <sup>3</sup> .....	2142
Ресурс работы:	
анода.....	3125
катода.....	112
Загрязнение карбида титана продуктами эрозии, % масс	
анода.....	Cu-0,0000954 %
катода.....	W-0,0000002 %

Экспериментальное исследование проводилось в реакторе, теплоизолированном футеровкой из диоксида циркония с толщиной стенок 0,005 м и наружным диаметром 0,066 м, уменьшающим его диаметр до 0,056 м.

При выборе сырьевых материалов предпочтение было отдано порошкам титана и его диоксида, а в качестве карбидизатора-восстановителя использовался природный газ, содержащий до 96 % метана. Характеристики сырьевых материалов и плазмообразующего газа для синтеза карбида титана приведены в табл. 1 [6, 7]. С учетом характеристик сырья, плазмообразующего газа и параметров работы реактора были сформированы необходимые данные для термодинамического и кинетического моделирования процессов. Необходимые для анализа равновесные составы газообразных и конденсированных продуктов рассчитывались «константным» методом [8].

При термодинамическом моделировании выбран аналогичный подход, описанный в работе [9]. Расчеты выполнялись с использованием программы компьютерного моделирования высокотемпературных сложных химических равновесий «PLASMA» (ИХТТМ СО РАН), 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.

Моделирование сырьевого и плазменного потока осуществлялось с помощью программы компьютерного моделирования взаимодействия сырьевого и плазменного потоков в условиях трехструйного реактора «PLASMA– BIS 80/MSW» (ИТМО АН Республики Беларусь — СибГИУ Минобрнауки России).

Экспериментальные исследования проводились с привлечением метода планируемого эксперимента, обработка результатов — по схеме с равномерным дублированием опытов [10].

Продукты плазменного синтеза исследовались методами рентгеновского, химического, электронно-микроскопического анализом, а также методом БЭТ определялась их удельная поверхность.

#### Термодинамическое моделирование высокотемпературных взаимодействий в карбидообразующих системах

Термодинамическое моделирование процессов синтеза проведено с целью прогнозирования оптимальных параметров получения карбида титана (соотношение компонентов и температуры), определения равновесных показателей процесса (степень превращения сырья в карбид, составы газообразных и конденсированных продуктов), оценки вклада в процессы карбидо-

Таблица 1

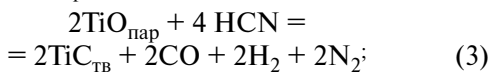
Сырьевые материалы и плазмообразующий газ

Сырьевой материал	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
Метан (природный газ)	93,6 (этан-3,0; пропан-2,18; бутан-1,18)	–
Технический азот (ГОСТ 9293–74, изм.)	99,5 (содержание кислорода не более 0,5)	–

образования газофазных реакций, обеспечивающих в условиях плазмохимической технологии эффективную переработку дисперсного сырья.

В связи с использованием метана и плазмообразующего газа — азота — в процессах синтеза в качестве титаносодержащего сырья — титана, оксида  $TiO_2$ , углеводородного сырья — объектами исследования были системы C–H–N, Ti–O–C–H–N, Ti–C–H–N.

В исследуемых системах получение карбида титана при всех учитываемых в расчетах компонентов возможно при температуре ниже 3500 К [7]. При этом термодинамически возможны следующие газофазные реакции образования карбида:



Из них термодинамически более вероятной является реакция (1).

Образование карбида титана термодинамически возможно по газофазной реакции с участием паров титана и циановодорода (т. е. по схеме «пар — кристалл»), что позволяет прогнозировать возможность достижения его высокого выхода в реальных условиях синтеза.

### Моделирование взаимодействия плазменного и сырьевого потоков

Для прогнозирования характеристик сырья и оценки гидродинамических и энергетических режимов его эффективной переработки про-

ведено модельно-математическое исследование влияния на степень испарения начальной температуры плазменного потока, крупности сырья и массовой расходной концентрации ( $\mu_p = G_p / (G_g + G_t)$ ). Результаты исследования приведены на рис. 3, 4. Можно видеть, что степень испарения зависит от крупности, массовой расходной концентрации и начальной температуры плазменного потока [11, 12].

В зависимости от крупности время испарения частиц составляет 0,1–1 мс. При этом рабочие параметры реактора обеспечивают полное испарение порошков диоксида титана крупностью не более 5 мкм, а Ti — не более 10 мкм. По результатам моделирования осуществлен выбор титаносодержащего сырья.

Из оксидного сырья этим требованиям отвечает  $TiO_2$  марки Р-1, поставляемый в виде порошка крупностью 1 мкм [7]. Однако производимые в России порошки Ti марок ПТС, ПТМ, ПТОМ — грубозернистые и этим требованиям не удовлетворяют. Поэтому выбор сделан в пользу поставляемого зарубежными производителями микропорошка Ti марки ПТМк крупностью менее 5 мкм, в целом доступного, но дорогостоящего [6].

### Экспериментальное исследование плазменного синтеза карбида титана методом планируемого эксперимента

При экспериментальном исследовании в обоих случаях реализована полуреплика полного факторного эксперимента  $2^{5-1}$ . Оптимизировалось содержание продуктов синтеза карбида титана и свободного углерода. Для исследуемых

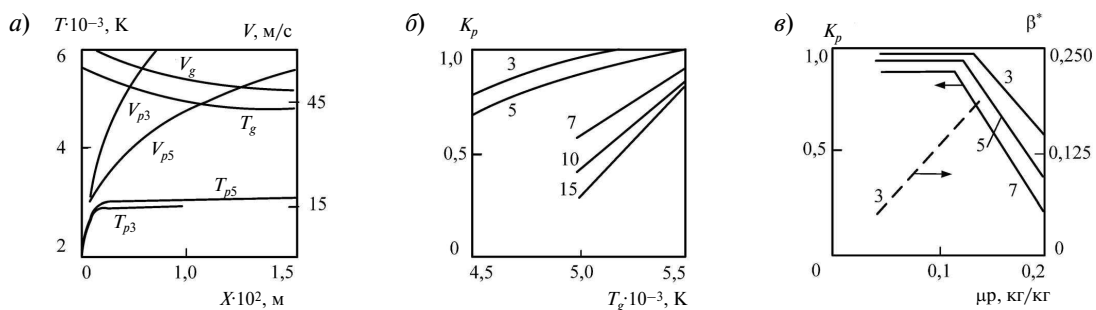


Рис. 3. Гидродинамические и энергетические режимы переработки оксида титана (IV) в трехструйном прямоточном реакторе:

a — изменение среднемассовой температуры и скорости плазменного потока и частиц по длине реактора ( $N = 75$  кВт,  $G_g = 9 \cdot 10^{-3}$  кг/с); б — влияние начальной температуры плазменного потока на степень испарения частиц; в — влияние массовой расходной концентрации на степень испарения частиц и долю энергии, переданной частицам ( $N = 75$  кВт,  $G_g = 9 \cdot 10^{-3}$  кг/с); 3, 5, 10, 15 — размер частиц, мкм

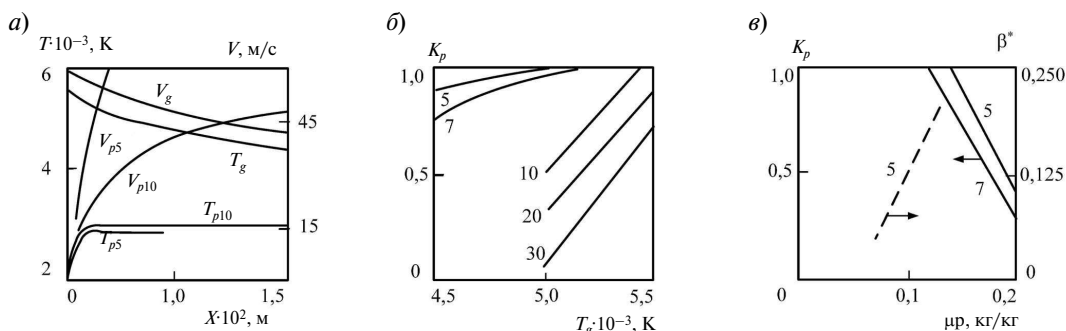


Рис. 4. Гидродинамические и энергетические режимы переработки титана в трехструйном прямоточном реакторе:

*a* — изменение среднемассовой температуры и скорости плазменного потока и частиц по длине реактора ( $N = 75$  кВт,  $G_g = 9 \cdot 10^{-3}$  кг/с); *b* — влияние начальной температуры плазменного потока на степень испарения частиц; *c* — влияние массовой расходной концентрации на степень испарения частиц и долю энергии, переданной частицам ( $N = 75$  кВт,  $G_g = 9 \cdot 10^{-3}$  кг/с)

технологических вариантов получены следующие уравнения, описывающие зависимости содержания карбида титана и свободного углерода от основных факторов, которые позволяют количественно оценить влияние отдельных факторов на параметры синтеза, оптимизировать и управлять процессами [13]:

$$\begin{aligned}
 [\text{TiC}(1)] = & 17,3211 + 0,0105 T_0 - 0,0156 T_3 + \\
 & + 0,1859[\text{CH}_4] - 3,432\{\text{H}_2\} - 0,4078 \cdot [\text{N}] + \\
 & + 0,000004562 T_0 T_3 + 0,000782 T_0 \{\text{H}_2\} - \\
 & - 0,0000567 T_3 [\text{CH}_4] - 0,000435 T_3 \{\text{H}_2\} + \\
 & + 0,0001353 T_3 [\text{N}]; \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [\text{TiC}(1) - C_{\text{своб}}(1)] = & -53,95 + 0,01152 T_0 + \\
 & + 0,0476[\text{CH}_4] + 0,1325\{\text{H}_2\} + 0,09257[\text{N}] - \\
 & - 0,00000576 T_0 T_3 - 0,002938 T_3 - \\
 & - 0,00000876 T_0 [\text{CH}_4] - 0,00000588 T_0 \{\text{H}_2\} + \\
 & + 0,00000728 T_3 [\text{CH}_4] - 0,000053 T_3 [\text{N}] + \\
 & + 0,000417\{\text{H}_2\}[\text{N}]; \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [\text{TiC}(2)] = & -182,277 + 0,05187 T_0 + 0,000927 T_3 + \\
 & + 0,9428[\text{CH}_4] - 0,4464\{\text{H}_2\} - 0,1208[\text{N}] - \\
 & - 0,0001878 T_0 [\text{CH}_4]; \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [\text{TiC}(2) - C_{\text{своб}}(2)] = & -13,162 + 0,01157 T_3 + \\
 & + 0,01588[\text{CH}_4] - 0,1244\{\text{H}_2\} + 0,00013[\text{N}] - \\
 & - 0,000001162 T_0 T_3 + 0,00279 T_0 + \\
 & + 0,000057 T_3 \{\text{H}_2\} + 0,005707\{\text{H}_2\}[\text{N}], \quad (8)
 \end{aligned}$$

где  $T_0$  — начальная температура плазменного потока, К;  $T_3$  — температура закалки продуктов синтеза, К;  $[\text{CH}_4]$  — количество углеводорода от стехиометрически необходимого для получения карбида титана, %;  $\{\text{H}_2\}$  — концентрации водо-

рода в плазмообразующем газе, % об;  $[\text{N}]$  — количество атомарного азота в плазмообразующем газе от стехиометрически необходимого для образования циановодорода, %.

Содержание карбида титана в обоих вариантах зависит главным образом от концентрации карбидизатора-восстановителя, начальной температуры плазменного потока и температуры закалки.

#### Физико-химическая аттестация карбида титана

В продуктах синтеза присутствует монокарбид титана с кубической гранцентрированной кристаллической решеткой с параметром  $a = 0,4323$  нм, что на  $0,0004$  нм меньше, чем у массивных кристаллов. Это может быть обусловлено неравновесным состоянием в частицах размером менее  $100$  нм из приповерхностных слоев, которое приводит к деформации (сжатию) кристаллических решеток, смещению атомов из идеальных положений, возникновению микронапряжений. В первом варианте карбиду титана сопутствует диоксид с кристаллической структурой рутила и анатаза. Сопутствующий карбид свободный пиролитический углерод образуется, по-видимому, при разложении метана в аморфном состоянии и на дифрактограммах не проявляется. Продукты синтеза в I и II вариантах содержат, % масс.: TiC — 91,88 и 93,15;  $C_{\text{своб}}$  — 1,44 и 1,33; N — 0,90 и 1,00; они имеют удельную поверхность  $30000$  и  $34000$  м<sup>2</sup>/кг.

Нанопорошок карбида титана представлен агрегатами шаровидной формы размером от  $150$  до  $600$  нм, образованными сообществом

частиц кубической формы достаточно широкого размерного диапазона — от 10 до 60 нм. Ограниченная форма частиц карбида титана свидетельствует об образовании их по механизму «пар — кристалл» предположительно при взаимодействии паров титана и циановодорода. Присутствие в продуктах синтеза агрегатов различного объема указывает на высокую вероятность дальнейшего укрупнения наночастиц путем их коагуляции при понижении температуры.

Отличительная особенность нанопорошка пиролитического углерода — это его способность образовывать микроагрегаты размером до 100–150 нм, включающие до 6–10 частиц размером до 30–40 нм. Естественно, что полученный кар-

бид титана по наноуровню и морфологии существенно отличается от его микропорошка, полученного механическим диспергированием карбида карботермического печного синтеза.

### Обсуждение результатов

Результаты модельно-математического и экспериментального исследований позволили прогнозировать технологические показатели плазменного производства карбида титана для титансодержащего сырья различного вида и выбрать оптимальный технологический вариант.

Основные параметры синтеза и характеристики карбида титана представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры синтеза и характеристики карбида титана для двух технологических вариантов

Параметры синтеза и характеристики карбида титана, ед. измер.	Значения параметров	
	Вариант I (TiO <sub>2</sub> + природный газ)	Вариант II (Ti + природный газ)
Состав газа-теплоносителя (азот), % об.	99,5	99,5
Состав карбидизатора, % об.:		
метан	93,6	93,6
этан	3,0	3,0
пропан	2,2	2,2
бутан	1,2	1,2
Крупность титансодержащего сырья, мкм	1–3	5
Количество карбидизатора, % от стехиометрического	120–140	120–140
Начальная температура плазменного потока, К	5400	5400
Температура закалки, К	2600–2800	2600± –2800
Химический состав, % масс		
TiC	91,62–92,13	92,88–93,42
диоксид титана	6,56–6,82	–
титан свободный (Ti+O)	–	5,37–5,68
углерод свободный	1,31–1,56	1,21–1,44
летучие	0,82–0,97	0,97–1,11
Выход карбида титана, % масс.	92	92
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	29000–32000	33000–35000
Размер*частиц, нм	38–42	34–36
Форма частиц	ограниченная, кубическая	ограниченная, кубическая
Окисленность нанопорошка карбида титана**, 10 <sup>7</sup> кг O <sub>2</sub> /м <sup>2</sup>	12,5	8,6
Производительность, кг/ч	2,8	3,7

Примечание: \*рассчитывался по величине удельной поверхности;

\*\*определялась после выдержки на воздухе в течении 24 ч.

Сопоставление двух вариантов позволяет выбрать в качестве оптимального вариант карбидизации титанового порошка метаном. По комплексу свойств синтезированный карбид титана в целом удовлетворяет требованиям, предъявляемым к нанодисперсным модификаторам.

Для оценки экономической эффективности выбранного технологического варианта, который заключается в карбидизации титана метаном, были определены основные экономические показатели. Предполагалось, что работа организована на одном реакторе, продолжительность рабочего времени в рабочие дни — 8 ч, в 3 смены, график 5/2. Показатели экономической эффективности производства карбида титана (в расчете на один реактор): инвестиции — 28,8 млн руб.; объем производства — 26 т/год; производственная себестоимость — 5,64 млн руб.; рентабельность продукции — 80 %; срок окупаемости капитальных вложений — 1,0; отпускная цена — 12,0 тыс. руб./кг.

Расчет экономических показателей выявил, что при объеме производства 26 т карбида титана в год отпускная цена составляет 400 \$/кг, что свидетельствует о конкурентоспособности его на мировом рынке наноматериалов.

На основе анализа современного состояния производства и применения карбида титана установлено, что карбид титана — это износостойкий и коррозионностойкий, твердый, химически инертный материал, который находит широкое применение в технике (изготовление защитных покрытий металлов, в качестве компонентов и легирующих добавок твердых сплавов). При использовании в наносостоянии открываются новые перспективы применения карбида титана — модифицирование сплавов различного состава и назначения.

Исследованы теплотехнические, ресурсные и технологические характеристики трехструйного прямоточного плазменного реактора промышленного уровня мощности (150 кВт). Установлено, что на длине реактора с футеровкой из диоксида циркония 12 калибров среднемаховая температура плазменного потока и температура стенки изменяется в пределах 5400–2200 К (1549–770 К). Удельная электрическая мощность в камере смешения достигает 2142 МВт/м<sup>3</sup>. Расчетные ресурсы работы электродов

для медного анода и вольфрамового катода составляют соответственно 3125 и 112 часов. Прогнозируемое загрязнение карбида титана продуктами эрозии электродов — 0,0000954 % меди и 0,000002 % вольфрама. Подтверждено, что по совокупности характеристик трехструйный плазменный реактор мощностью 150 кВт может быть отнесен к высокоэффективному, надежно работающему современному электротермическому оборудованию.

Разработаны научные основы плазменного производства карбида титана, включающие термодинамические условия карбидообразования и кинетические закономерности испарения титаносодержащего сырья в этих условиях. Степень плазменного испарения порошкообразного титаносодержащего сырья определяется его крупностью и массовой расходной концентрацией. Установлено, что при подводимой к реактору мощности 75 кВт достигается 100 %-я степень испарения частиц титана крупностью не более 10 мкм, а оксида титана (IV) — не более 5 мкм. На основании полученных результатов выбраны сырьевые материалы для синтеза карбида титана.

На основе результатов моделирования спрогнозированы технологические показатели плазменного производства карбида титана для двух технологических вариантов: восстановления оксида титана TiO<sub>2</sub> метаном и карбидизации титана метаном. Установлено, что оптимальным технологическим вариантом плазменного производства карбида титана является карбидизация титана. Для реализации данной технологии может применяться титан металлический марки ПТМк, в качестве плазмообразующего газа — технический азот (ГОСТ 9293–74, изм.), карбидизатора — метан (природный газ).

На основании выбранного технологического варианта реализовано получение карбида титана карбидизацией в условиях НПФ «Полимет» на базе промышленного плазмотехнологического комплекса мощностью 150 кВт. Продуктом плазменного синтеза является соединение TiC. Определены оптимальные значения технологических факторов и допустимые пределы их изменения, а также основные характеристики карбида титана: крупность титаносодержащего сырья — 5 мкм; количество карбидизатора от стехиометрически необходимого — 120–140 %; начальная температура

тура плазменного потока — 5400 К; температура закалки — 2600–2800 К; выход карбида титана — 92,0 % масс.; производительность — 3,7 кг/ч; удельная поверхность — 33000–35000 м<sup>2</sup>/кг; размер частиц — 34–36 мкм; форма частиц — ограниченная кубическая.

Проведена оценка экономической эффективности плазменного производства карбида титана. Установлено, что при производительности 26 т карбида титана в год (в расчете на один

реактор) и себестоимости 5,64 млн руб./т полученная отпускная цена 400 \$/кг оптимальной для плазменного производства карбида титана и отражает его конкурентоспособность на мировом рынке наноматериалов. Срок окупаемости капиталовложений в плазмометаллургическое производство составляет 1 год, что позволяет судить о его прибыльности и о технологической целесообразности освоения плазменного производства карбида титана.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Решетникова С.Н.** Применение нанопорошков химических соединений для повышения качества металлоизделий: автореф. дис. на соиск. учен. степ. кандидата технических наук / Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2008. 17 с.

2. **Галевский Г.В., Руднева В.В.** Некоторые вопросы применения наночастиц порошков тугоплавких соединений в качестве модифицирующих комплексов различного назначения // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии: сб. науч. трудов // СибГИУ. Новокузнецк, 1999. Вып. 8. С. 46–53.

3. NEOMAT NANO POWDERS [Электронный ресурс] / Products. — Электронные данные. — Сала-спилс: Neomat Co., 2008. Режим доступа: <http://www.neomat.lv>, свободный. — Загл. с экрана. — яз. англ.

4. **Сабуров В.П.** [и др.]. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов / Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. 344 с.

5. **Ноздрин И.В., Ширяева Л.С., Галевский Г.В., Руднева В.В.** Исследование характеристик реактора для плазмометаллургического производства тугоплавких боридов и карбидов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2011. № 8. С. 27–32.

6. Электронный каталог ГПНТБ России [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения

о всех видах лит., поступающей в фонд ГПНТБ России. Режим доступа: [<http://tokem.narod.ru>, 12.02.2013] — Загл. с экрана.

7. **Боровинская И.П.** Применение титана в процессах СВЧ / И.П. Боровинская, В.К. Прокудина, В.И. Ратников // Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2010. №4. С. 26–33.

8. **Сурис А.Л.** Термодинамика высокотемпературных процессов: справочник. М.: Металлургия, 1985. 568 с.

9. **Ноздрин И.В., Ширяева Л.С.** Термодинамический анализ процессов плазменного синтеза карбида хрома // Изв. вузов. Черная металлургия. 2011. № 10. С. 3–7.

10. **Галевский Г.В., Киселева Т.В., Руднева В.В.** Исследование плазмохимического синтеза тугоплавких соединений методом планируемого эксперимента: методические указания. СибГИУ. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2010. 31 с.

11. **Моссэ А.Л., Бузов И.С.** Обработка дисперсных материалов в плазменных реакторах. Минск: Наука и техника, 1980. 208 с.

12. **Руднева В.В., Галевский Г.В., Юркова Е.К.** Модельно-математическое исследование режимов эффективной переработки дисперсного сырья в плазменном реакторе. Изв. вузов. Черная металлургия. 2007. № 5. С. 52–55.

13. **Костин В.Н., Тишина Н.А.** Статистические методы и модели: учеб. пособие. Оренбург: Изд-во ГОУ ОГУ, 2004. 138 с.

### REFERENCES

1. **Reshetnikova S.N.** Primeneniye nanoporoshkov khimicheskikh soyedineniy dlya povysheniya kachestva metalloizdeliy: avtoref. dis. na soisk. uchen. step. kandidata tekhnicheskikh nauk / Sibirskiy gosudarstvennyy aerokosmicheskiy universitet imeni akademika M.F. Reshetneva. Krasnoyarsk, 2008. 17 s. (rus.)

2. **Galevskiy G.V., Rudneva V.V.** Nekotoryye voprosy primeneniya nanofaznykh poroshkov tugoplavkikh soyedineniy v kachestve modifitsiruyushchikh kompleksov

razlichnogo naznacheniya. *Vestnik gorno-metallurgicheskoy sekcii RAEN. Otdeleniye metallurgii: sb. nauch. trudov.* SibGIU. Novokuznetsk, 1999. Vyp. 8. S.46–53. (rus.)

3. NEOMAT NANO POWDERS [Elektronnyy resurs] / Products. — Elektronnyye dannyye. — Salaspils: Neomat Co., [2008]. Rezhim dostupa: <http://www.neomat.lv>, svobodnyy. Zagl. s ekrana. (angl.)

4. **Saburov V.P.** [i dr.]. Plazmokhimicheskiy sintez ultradispersnykh poroshkov i ikh primeneniye dlya modi-



fitsirovaniya metallov i splavov. Novosibirsk: Nauka.Sibirskaya izdatelskaya firma RAN, 1995. 344 s. (rus.)

5. **Nozdrin I.V., Shirayeva L.S., Galevskiy G.V., Rudneva V.V.** Issledovaniye kharakteristik reaktora dlya plazmometallurgicheskogo proizvodstva tugoplavkikh boridov i karbidov. *Izv. Vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2011. № 8. S. 27–32. (rus.)

6. Elektronnyy katalog GPNTB Rossii [Elektronnyy resurs]: baza dannykh sodержit svedeniya o vseh vidakh lit., postupayushchey v fond GPNTB Rossii. Rezhim dostupa: [http://tokem.narod.ru, 12.02.2013] — Zagl. s ekrana.

7. **Borovinskaya I.P., Prokudina V.K., Ratnikov V.I.** Primeneniye titana v protsessakh SVS. *Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnyye pokrytiya*. 2010. №4. S. 26–33.

8. **Suris A.L.** Termodinamika vysokotemperaturnykh protsessov: spravochnik. M.: Metallurgiya, 1985. 568 s. (rus.)

9. **Nozdrin I.V., Shirayeva L.S.** Termodinamicheskiy analiz protsessov plazmennogo sinteza karbida khro-

ma. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2011. № 10. S. 3–7. (rus.)

10. **Galevskiy G.V., Kiseleva T.V., Rudneva V.V.** Issledovaniye plazmokhimicheskogo sinteza tugoplavkikh soyedineniy metodom planiruyemogo eksperimenta: metodicheskiye ukazaniya / SibGIU. Novokuznetsk: SibGIU, 2010. 31 s. (rus.)

11. **Mosse A.L., Burov I.S.** Obrabotka dispersnykh materialov v plazmennykh reaktorakh. Minsk: Nauka i tekhnika, 1980. 208 s. (rus.)

12. **Rudneva V.V., Galevskiy G.V., Yurkova Ye.K.** Modelno-matematicheskoye issledovaniye rezhimov effektivnoy pererabotki dispersnogo syr'ya v plazmennom reaktore. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2007. № 5. S. 52–55. (rus.)

13. **Kostin V.N., Tishina N.A.** Statisticheskiye metody i modeli: ucheb. posobiye. Orenburg: Izd-vo GOU OGU, 2004. 138 s. (rus.)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ШИРЯЕВА Людмила Сергеевна** — ведущий инженер кафедры металлургии цветных металлов и химических технологий Сибирского государственного индустриального университета. 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42. E-mail: ilusiag@mail.ru

**ГАРБУЗОВА Алина Константиновна** — аспирант кафедры металлургии цветных металлов и химических технологий Сибирского государственного индустриального университета. 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42. E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

**ГАЛЕВСКИЙ Геннадий Владиславович** — доктор технических наук директор института металлургии и материаловедения Сибирского государственного индустриального университета. 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42. E-mail: kafcmet@mail.ru

#### AUTHORS

**SHIRYAEVA Ludmila S.** — Siberian State Industrial University. 42, Kirov St, Novokuznetsk, Russia, 654007. E-mail: ilusiag@mail.ru

**GARBUSOVA Alina K.** — Siberian State Industrial University. 42, Kirov St, Novokuznetsk, Russia, 654007. E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

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