

DOI 10.5862/JEST.238.9

УДК УДК 669.046 : 536.45 : 533.9

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ БОРИДО- И КАРБИДООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ТИТАНСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ В ПЛАЗМЕННОМ РЕАКТОРЕ

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

MODELING BORIDE AND CARBIDE FORMATION IN THE PROCESSING OF TITANIUM-CONTAINING RAW MATERIALS IN A PLASMA REACTOR

Разработаны комплексные многофакторные математические модели процессов боридо- и карбидообразования при плазменной переработке титан-бор-углеродсодержащего сырья и компьютерные программы для их реализации. Модели имеют блочную структуру и позволяют рассчитывать процессы плазмогенерации, движения и теплообмена сырьевого и плазменного потоков, нагрева, плавления и испарения сырья, его борирования, карбидизации и формирования дисперсных продуктов. Подмодель «Испарение сырья» описывает взаимодействие плазменного и сырьевого потоков, включает блоки задания начальных условий и изменения гидродинамических и тепловых условий. Подмодель «Борирование, карбидизация сырья и формирование частиц» включает блоки изменения технологических условий и формирования нанодисперсного продукта. Компьютерные программы позволяют осуществлять многовариантные исследовательские и инженерные расчеты параметров эффективной переработки в борид и карбид титансодержащих сырьевых материалов и анализ параметрической чувствительности процессов боридо- и карбидообразования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ; БОРИДЫ; КАРБИДЫ; ТИТАН; НАНОПОРОШКИ; БОРИДООБРАЗОВАНИЕ; КАРБИДООБРАЗОВАНИЕ.

Complex multi-factor mathematical models of boride and carbide formation for plasma processing of titan-boron-carbonaceous raw materials and computer programs for implementing them are developed. Models have a block structure and allow to simulate processes of plasma generation, the movement and heat exchange of raw and plasma streams, heating, melting and evaporation of raw materials, its boration and carbonization and formation of disperse products. The "evaporation of raw materials" submodel describes the interaction of plasma flows and commodity units and includes the initial conditions and the outcome variables of hydrodynamic and thermal conditions. The "boration, carbonization of raw materials and particle formation" submodel includes units for changing process conditions and forming nanosized products. Computer programs allow to perform multiple research and engineering calculations of parameters of effective processing of titaniferous raw materials in boride and carbide and the analysis of parametrical sensitivity of the processes of boride and carbide formation.

MODELING; BORIDES; CARBIDES; TITANIUM; NANO-POWDERS; FORMATION OF BORIDE; FORMATION OF CARBIDE.

Введение

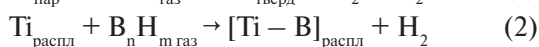
Соединения титана – борид TiB_2 и карбид TiC – относятся к группе синтетических сверх-твердых, тугоплавких, жаропрочных материалов,

востребованных для производства металлообра-батывающего инструмента, защитных покрытий и карбидосталей. Производство в наносостоянии открывает новые перспективы их применения для модифицирования сплавов различного со-

става и назначения, формирования гальванических композиционных покрытий, создания материалов специального назначения (пасты для смачиваемых электродов, легирующие компоненты поликристаллических алмазов и др.) [1–7].

Сопоставление различных технологий получения порошков соединений титана свидетельствует о том, что для достижения наноуровня в первую очередь востребованы технологии, основанные на применении высококонцентрированных энергетических потоков для газификации сырья и формирования целевого продукта при объемной конденсации из газовой фазы. Среди подобных технологий плазменный способ отличается сравнительной простотой реализации и является наиболее изученным и конкурентоспособным.

Процессы плазменного синтеза боридов и карбидов титана условно можно подразделить на три стадии: 1) эволюцию исходного сырья, включающую его движение в потоке газа-теплоносителя, нагрев и фазовые переходы; 2) химические реакции, т. е. сам синтез; 3) формирование дисперсного продукта (конденсация, коалесценция, кристаллизация, коагуляция). На протекание первой стадии существенные ограничения накладывают высокие скорости движения реагирующих сред, достигающие в каналах трехструйных прямооточных реакторов в зависимости от рабочих параметров плазмотронов 30–60 м/с и тем самым способствующие сокращению времени пребывания сырья при температурах перехода его в паровую фазу (10^{-4} – 10^{-5} с). Вторая стадия синтеза гипотетически может быть описана уравнениями вида



Для оценки эффективности реакций карбидо- и боридообразования необходимо проведение их кинетического анализа. Однако в этом случае применение методов классической химической кинетики ограничено, поскольку они не учитывают особенностей синтеза в условиях химически активного плазменного потока: необходимости совместного решения уравнений химической кинетики и газодинамики, турбулентности струй, влияния конденсированной фазы. В настоящее время из-за отсутствия надежных кинетических данных, трудоемкости

экспериментального исследования и практической невозможности получения точных кинетических констант задача описания кинетики химических реакций с участием конденсированных фаз, протекающих в турбулентных плазменных потоках, не может быть решена корректно. Аналитическое описание третьей стадии, обеспечивающее количественные прогнозы дисперсности получаемых нанопроductов, может быть основано на модели формирования целевого нанодисперсного продукта путем превращения пересыщенного однокомпонентного пара в дисперсный конденсат с последующей эволюцией его дисперсного состава сначала путем жидкокапельной коалесценции, а затем – агрегативной коагуляции. При этом объемная конденсация может быть описана с помощью уравнения Сцилларда–Фаркаша, но значительно упрощенного ввиду теоретической и экспериментальной неопределимости целого ряда входящих в него коэффициентов и адаптированного к системе без химических взаимодействий с пространственно однородными условиями, т. е. далекими от реальных. Это обстоятельство вообще ставит под сомнение достоверность результатов прогнозирования дисперсности твердых частиц конденсационного происхождения и ограничивает технологическую целесообразность реализации такого подхода.

Цель и методология

Целями настоящей работы являются: построение комплексных многофакторных математических моделей процессов карбидо- и боридообразования, протекающих при плазменной переработке титансодержащего сырья; разработка компьютерной программы, реализующей модели процессов плазменного синтеза и позволяющей осуществлять многовариантные инженерные и исследовательские расчеты параметров эффективного борирования и эффективной карбидизации первичного и вторичного титансодержащего сырья.

С учетом идеи прерывности, имеющей большое значение при построении моделей сложных металлургических систем и на основе которой сложные системы поддаются описанию как закономерно составленные из более простых частей, предложена следующая структура моделей процессов боридо- и карбидообразования при

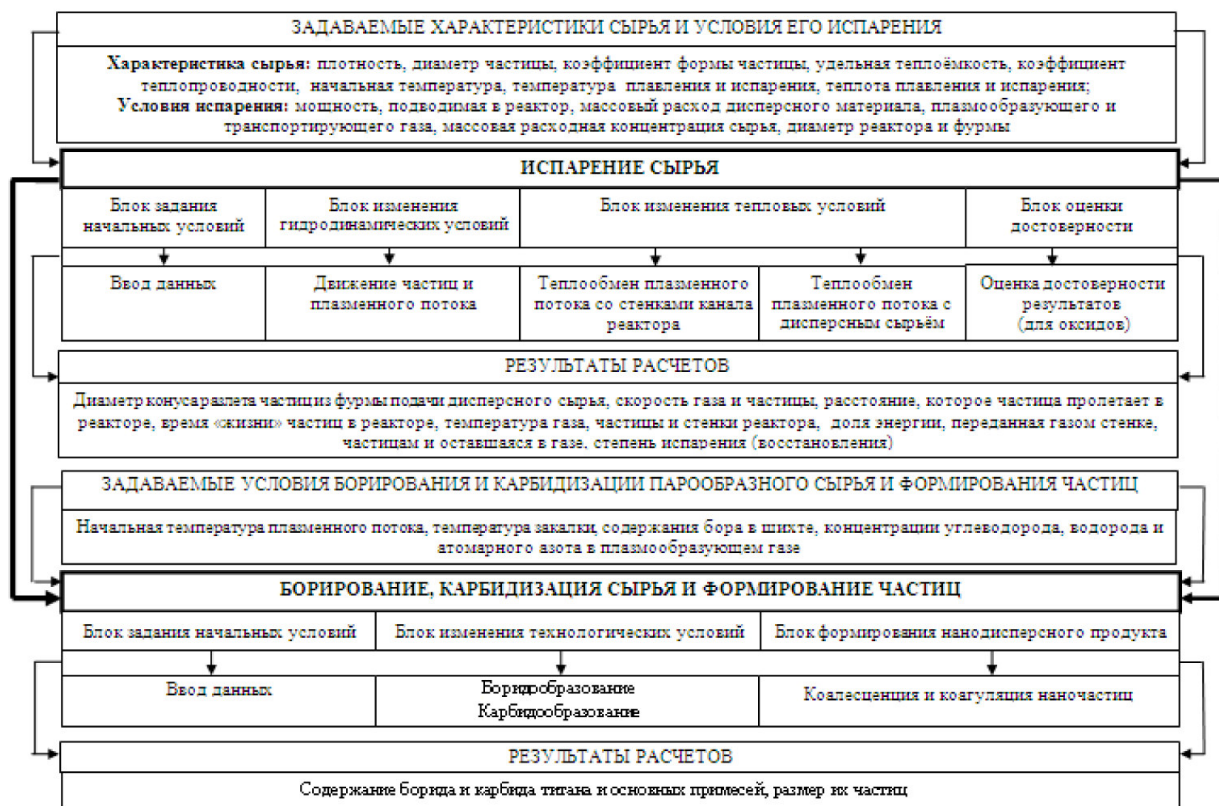


Рис. 1. Математические модели процессов боридо- и карбидообразования при плазменном синтезе

плазменном синтезе (рис. 1), интегрирующая две подмодели: 1 – «Испарение сырья»; 2 – «Борирование, карбидизация сырья и формирование частиц».

Плодотворность такого подхода подтверждена в процессе разработки моделей карбидо- и боридообразования при переработке в условиях плазменного потока кремний- и хромсодержащего сырья [8–11].

**Подмодель «Испарение сырья»:
структура, особенности,
результаты моделирования**

Подмодель «Испарение сырья» описывает взаимодействие плазменного и сырьевого потоков. Подмодель включает четыре блока:

блок задания начальных условий;

блок изменения гидродинамических условий, описывающий движение частиц и плазменного потока (уравнения: диаметра конуса разлета частиц из фурмы подачи дисперсного сырья; движения частиц; неразрывности потока расстояния, пролетаемого частицей в реакторе;

блок изменения тепловых условий, описывающий теплообмен плазменного потока со стенками канала реактора (уравнения: теплофизических свойств газа при среднемассовой температуре потока и температуре частицы; баланса тепла для реактора; баланса тепла для газа; теплового потока от плазмы к стенке реактора) и теплообмен плазменного потока с дисперсным сырьем (уравнения коэффициента межкомпонентного теплообмена, баланса тепла для дисперсного материала, степени испарения);

блок оценки достоверности результатов плазменной обработки оксидного сырья, основанный на обобщающем положении о лимитировании процессов плазменного восстановления степенью перехода сырья в газовую фазу и на экспериментальном определении степени восстановления по составу газовой фазы.

При моделировании приняты следующие допущения, начальные и граничные условия. Начальное сечение реактора $x = 0$ соответствует точке соударения плазменных струй и сырьевого потока; температура и скорость плазменного

потока в поперечном сечении реактора одинаковы и равны среднемассовой; частицы монодисперсны, имеют температуру, равную их среднемассовой, распределены равномерно по поперечному сечению реактора, не сталкиваются друг с другом и со стенками реактора. Начальные условия при $x = 0$; начальная ($\tau = 0$) температура частицы равна 300 К; количество тепла, переданное частице в момент времени $\tau = 0$, равно 0. Граничные условия: диаметр реактора постоянен; температура плазмы больше температуры частицы, температуры плавления и испарения перерабатываемых материалов – заданные величины.

Отличительной особенностью подмодели является использование для отображения теплообмена плазменного потока со стенками канала реактора расчетной зависимости, полученной авторами для реальных условий образования борида и карбида титана в плазменном реакторе (промышленный уровень мощности реактора – 150 кВт; трехструйный вариант камеры смешения с углом наклона плазменных струй 30° , обеспечивающий вынужденную турбулизацию плазменного потока; футеровка канала реактора имеет толщину 0,005 м из диоксида циркония и снижает теплоотдачу от плазменного потока на 20 %; в плазменный поток, разнообразный по фазовому составу, дисперсности и теплофизическим свойствам, вводится высокодисперсное сырье (титан, оксид титана, бор, пиролитический углерод); расходная массовая концентрация высокодисперсного сырья (0,12 кг/кг) близка к максимальной и снижает теплоотдачу от плазменного потока на 15 %). Уравнение имеет вид

$$St = (0,672 \pm 0,155) Re_{f,x}^{-0,425 \pm 0,081} Pr_{f,x}^{-0,05}, \quad (4)$$

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

Моделирование обеспечивает при заданных характеристиках сырья, геометрических характеристиках и параметрах работы реактора расчет следующих величин: расстояния, которое частица пролетает в реакторе; продолжительности «жизни» частиц; температуры плазменного потока, частицы и стенки канала реактора; скоростей плазменного потока и частицы; степени испарения частиц; долей энергии, переданных

газом стенке реактора, частицам и оставшейся в потоке.

Для прогнозирования характеристик сырья, предлагаемого к использованию при плазменном синтезе борида и карбида титана, и оценки гидродинамических и энергетических режимов его эффективной переработки проведено модельно-математическое исследование влияния на степень испарения начальной температуры плазменного потока, крупности сырья и массовой расходной концентрации.

Степень плазменного испарения бор- и титаносодержащего дисперсного сырья определяется такими факторами, как энергетические и гидродинамические характеристики плазменного потока, крупность частиц, 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 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 частиц 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 поз-

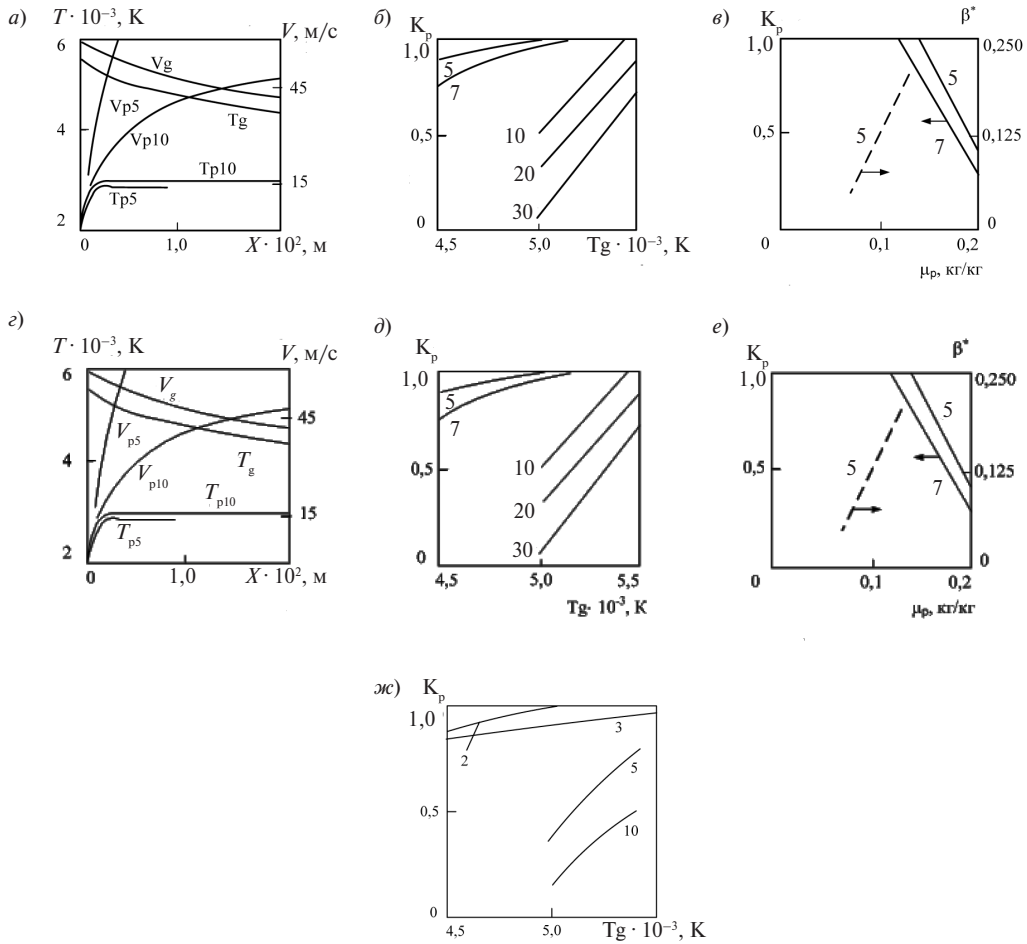


Рис. 2. Гидродинамические и энергетические режимы переработки титана (а–в), диоксида титана (з–е) и бора (ж): а) изменение среднемассовой температуры и скорости плазменного потока (T_p, V_p) и частиц титана (T_g, V_g) по длине реактора; б) влияние начальной температуры плазменного потока (T_g) на степень испарения частиц титана (K_p); в) влияние массовой расходной концентрации (μ_p) на степень испарения частиц титана (K_p) и долю энергии, переданной частицам (β^*); з) изменение среднемассовой температуры и скорости плазменного потока (T_p, V_p) и частиц диоксида титана (T_g, V_g) по длине реактора; д) влияние начальной температуры плазменного потока (T_g) на степень испарения частиц диоксида титана (K_p); е) влияние массовой расходной концентрации (μ_p) на степень испарения частиц диоксида титана (K_p) и долю энергии, переданной частицам; ж) влияние начальной температуры плазменного потока (T_g) на степень испарения частиц бора (K_p): 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30 – размер частиц, мкм

воляет 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 влияния на межкомпонентный теплообмен. Полное испарение частиц бора крупностью 2–3 мкм при массовой расходной концентрации 0,077 кг/кг достигается при экс-

тремальных энергетических характеристиках плазменного потока, соответствующих начальной температуре 5400 К.

Подмодель «Борирование, карбидизация сырья и формирование частиц»»: структура, особенности, результаты моделирования

Подмодель «Борирование, карбидизация сырья и формирование частиц» включает блоки

изменения технологических условий и формирования нанодисперсного продукта.

Блок изменения технологических условий описывает зависимость содержания карбида и бориды титана в продуктах синтеза от степени испарения сырья и основных технологических факторов в виде полученных для синтеза регрессионных уравнений следующего вида (вариант 1 – синтез из Ti, вариант 2 – синтез из TiO₂):

$$[\text{TiC} (1)] = -182,277 + 0,05187T_0 + 0,000927T_3 + 0,9428[\text{CH}_4] - 0,4464\{\text{H}_2\} - 0,1208[\text{N}] - 0,0001878T_0[\text{CH}_4]; \quad (5)$$

$$[\text{TiC}(2)] = 17,3211 + 0,0105T_0 - 0,0156T_3 + 0,1859[\text{CH}_4] - 3,432\{\text{H}_2\} - 0,4078[\text{N}] + 0,000004562T_0T_3 + 0,000782T_0\{\text{H}_2\} - 0,0000567T_3[\text{CH}_4] - 0,000435T_3\{\text{H}_2\} + 0,0001353T_3[\text{N}]; \quad (6)$$

$$[\text{TiB}_2 (1)] = -412,41 + 0,09489T_0 + 2,196[\text{B}] + 0,1597\{\text{H}_2\} - 0,00061T_0[\text{B}]; \quad (7)$$

$$[\text{TiB}_2 (2)] = 4,59 + 0,0156T_0 + 0,00213T_3 - 0,0688\{\text{CH}_4\} - 0,214[\text{B}]\{\text{H}_2\}, \quad (8)$$

где T_0 – начальная температура плазменного потока (5000–5400 K); T_3 – температура закалки

(2600–2800 K); [B] – содержание бора в шихте (100 – 120 % от стехиометрически необходимого); {CH₄} – количество восстановителя (метана) (100–120 % от стехиометрически необходимого); {H₂} – концентрация водорода в плазмообразующем газе (0–0,25 % об.); [N] – количество атомарного азота в плазмообразующем газе от стехиометрически необходимого для образования циановодорода (0–15 %).

Расчетные зависимости содержания в продуктах синтеза карбида и бориды титана для вариантов 1 и 2 приведены на рис. 3.

Блок формирования нанодисперсного продукта обеспечивает количественные прогнозы наноуровня карбида и бориды титана. Температурная зависимость размера наночастиц рассчитывается по экспериментально полученным авторами уравнениям:

для карбида

$$d = (0,085 \pm 0,005) T^{-(1,81 \pm 0,361)}; \quad (9)$$

для бориды

$$d = (1,46 \pm 0,025) \cdot 10^{-5} T^{(0,741 \pm 0,165)}; \quad (10)$$

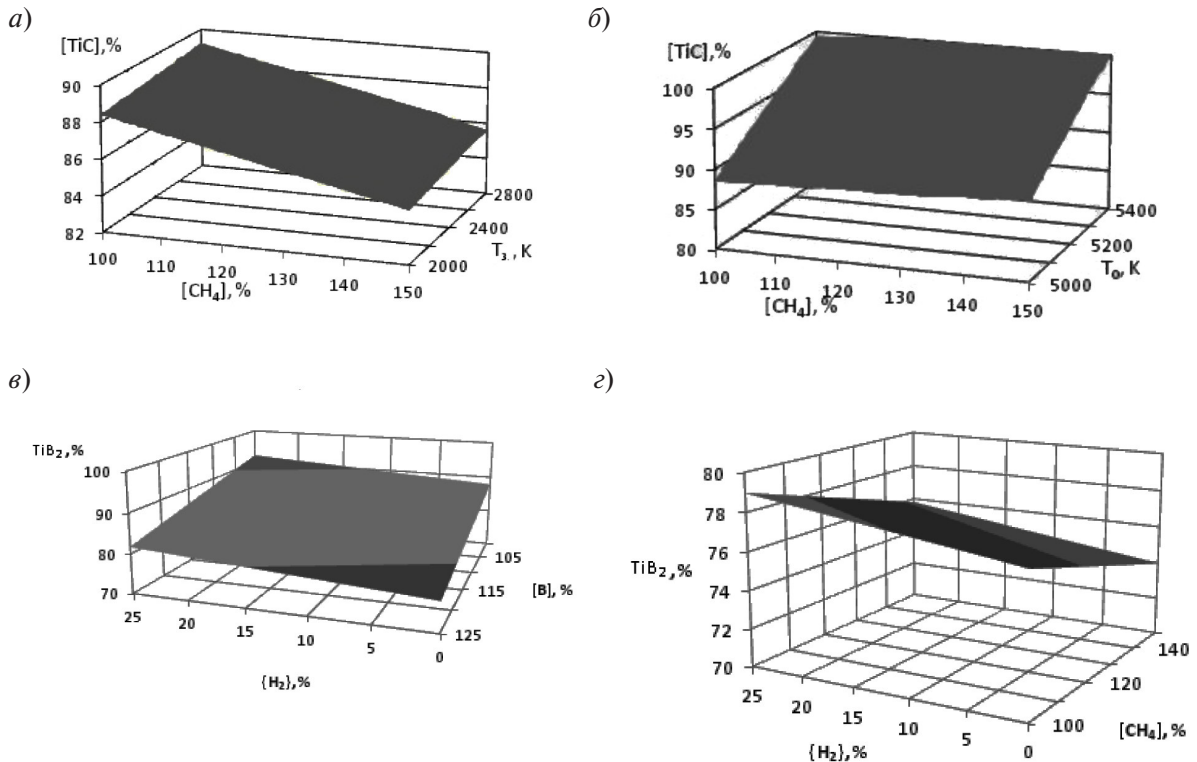


Рис. 3. Содержание карбида и бориды титана в продуктах синтеза: а) $T_0 = 5400$ K; б) $T_3 = 2800$ K; в) $T_0 = 5400$ K; г) $T_0 = 5400$ K; $T_3 = 2600$ K; [B] = 112,5 %

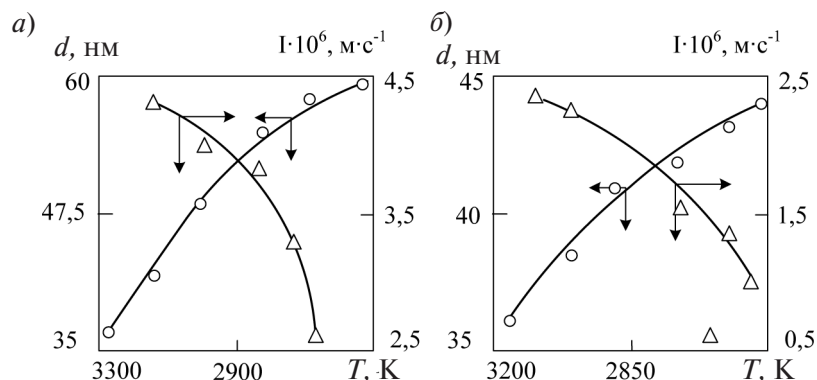


Рис. 4. Зависимость размера наночастиц d и линейной скорости их роста I от температуры плазменного потока для карбида a и борида b титана

Температурная зависимость размера наночастиц и линейной скорости их роста приведены для карбида и борида титана на рис. 4, $a, б$.

Для реализации моделей разработаны компьютерные программы, подробное описание и примеры реализации которых приведены в [12–16]. Программы представляют собой законченный программный продукт, который может быть реализован на компьютерах класса IBM PC AT под управлением MS Windows версии не ниже 2000 и установленным Microsoft Access версии не ниже 2000. В качестве языка программирования выбран Visual Basic for Application. Разработанные программы позволяют осуществлять многовариантные исследовательские и инженерные расчёты параметров эффективной переработки титаносодержащих сырьевых материалов в карбид и борид и анализ параметрической чувствительности процессов карбидо- и боридообразования.

Оценка точности моделей боридо- и карбидообразования

Для оценки точности разработанных моделей использованы проверочные выборки, полученные при плазменной переработке в борид и карбид промышленных производственных отсеков порошка титана крупностью 63 – 100 мкм при двух температурных режимах (5400 и 5000 K) и стехиометрических на борид TiB_2 и карбид TiC соотношениях компонентов. Результаты сравнения расчетного содержания в продуктах синтеза борида и карбида титана с экспериментально определенным представлены в таблице.

Максимальное отклонение составляет 14,8 %, что свидетельствует о достаточной сходимости расчетных и фактических данных.

Оценка точности комплексных моделей боридо- и карбидообразования при плазменном синтезе

T, K	Содержание борида / карбида титана, %							Отклонение, %
	Y_p	Y_1^1	Y_2^2	Y_3^3	Y_4^4	Y_5^5	$Y_{эф}$	
5400	33,2	29,8	28,9	30,2	28,3	28,7	29,2	12,0
	32,1	27,9	27,6	27,3	28,4	28,0	27,8	13,4
5000	24,3	20,1	19,9	20,8	21,2	21,6	20,7	14,8
	21,2	20,0	18,1	17,9	18,3	18,0	18,5	12,7

Заключение

Разработаны комплексные многофакторные математические модели процессов боридо- и карбидообразования для плазменной переработки титан-бор-углеродсодержащего сырья и компьютерные программы для их реализации. Подтверждена адекватность моделей описываемым процессам. По результатам моделирования получены графические зависимости содержания в продуктах синтеза борида и карбида титана и их наноуровня для различных видов титаносодержащего сырья, параметров плазменного потока, соотношений компонентов, составов газотеплоносителя.

Выполненные исследования представляют проектную часть государственного задания Минобрнауки России № 11.1531/2014/К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гарбузова А.К., Галевский Г.В., Руднева В.В., Алексеева Т.И.** Применение карбида и карбонитрида титана в порошковой металлургии и композиционных материалах // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. Москва – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2015. В. 35. С. 102–111.
2. **Кипарисов С.С., Левинский Ю. В., Петров А.П.** Карбид титана: получение, свойства, применение. М.: Металлургия, 1987. 216 с.
3. **Панов В.С., Чувилин А.М., Фальковский В.А.** Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них: Учеб. пособие. М.: МИСиС, 2004. 462 с.
4. **Серебрякова Т.И., Неронов В.А., Пешев П.Д.** Высокотемпературные бориды. М.: Металлургия, Челябинское отделение, 1991. 368 с.
5. **Ширяева Л.С., Гарбузова А.К., Галевский Г.В.** Производство и применение карбида титана (оценка, тенденции, прогнозы) // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 2 (195). С. 100–108.
6. **Гарбузова А.К., Галевский Г.В., Руднева В.В., Ширяева Л.С.** Анализ современного состояния производства и применения карбида титана // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2014. № 1(7). С. 34–39.
7. **Галевский Г.В., Руднева В.В., Ефимова К.А.** Разработка научных и технологических основ плазменного синтеза наноборида титана // Научно-технические ведомости СПбГПУ 2015. №2(219) С.141–150. DOI:10.5862.219.15.
8. **Ноздрин И.В., Ширяева Л.С., Руднева В.В., Терентьева М.А.** Модельно-математическое исследование условий эффективной переработки хромосодержащего сырья в плазменном реакторе // Изв. вузов. Черная металлургия. 2012. № 2. С. 13–18.
9. **Ноздрин И.В., Галевский Г.В., Ширяева Л.С.** Синтез и эволюция дисперсности боридов и карбидов ванадия и хрома в условиях плазменного потока // Изв. вузов. Черная металлургия. 2011. № 10. С. 12–17.
10. **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.
11. **Руднева В.В., Галевский Г.В.** Закономерности формирования частиц тугоплавких карбидов в процессах плазменного восстановительного синтеза // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. Новокузнецк : Изд-во СибГИУ, 2009. Вып. 23. С. 120–127.
12. Свидетельство №21093 регистрации электронного ресурса «Программа» «Математическое моделирование процессов карбидообразования при переработке титаносодержащего сырья в плазменном реакторе» в объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование» РАО/ Г.В. Галевский, В.В. Руднева, А.К. Гарбузова. М.: ИУО РАО, 2015.
13. Свидетельство № 18845 регистрации электронного ресурса «Программа» «Обобщенная модель боридообразования при плазменном синтезе» в объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование» РАО/ И.В. Ноздрин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Л.С. Ширяева. М.: ИНИПИ, 2013.
14. Свидетельство № 18396 регистрации электронного ресурса «Программа» «Обобщенная модель карбидообразования при плазменном синтезе» в объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование» РАО/ Л.С. Ширяева, И.В. Ноздрин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева. М.: ИНИПИ, 2012.
15. Свидетельство № 18396 регистрации электронного ресурса «Программа» «Обобщенная модель карбидообразования при плазменном синтезе» в объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование» РАО/ Л.С. Ширяева, И.В. Ноздрин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева. М.: ИНИПИ, 2012.
16. Свидетельство № 9625 об отраслевой регистрации разработки «Расчет эффективности плазмотехнологической переработки кремнийсодержащего сырья в карбид» в Фонде алгоритмов и программ Государственного координационного центра информационных технологий/ В.В. Руднева, Г.В. Галевский, Е.К. Юркова. М.: ВНИТИЦ, 2008 №ГР50200702628

REFERENCES

1. **Garbuzova A.K., Galevskiy G.V., Rudneva V.V., Alekseyeva T.I.** Primeneniye karbida i karbonitrida titana v poroshkovoy metallurgii i kompozitsionnykh materialakh. [Application of carbide and carbonitride of titanium powder metallurgy composites]. *Vestnik gorno-metallurgicheskoy sekcii RAEN. Otdeleniye metallurgii*. Moskva – Novokuznetsk: Izd-vo SibGIU, 2015, V. 35, S. 102–111. (rus.)
2. **Kiparisov S.S., Levinskiy Yu. V., Petrov A.P.** Karbid titana: polucheniye, svoystva, primeneniye [Titanium carbide: production, properties and application]. М.: Metallurgiya, 1987, 216 p. (rus.)
3. **Panov V.S., Chuvilin A.M., Falkovskiy V.A.** Technology and properties of sintered hard alloys and products from them: Proc. Benefit. [Tekhnologiya i svoystva spechennykh tverdykh splavov i izdeliy iz nikh: Ucheb. Posobiye]. М.: Izd-vo MISiS, 2004. 462 p. (rus.)
4. **Serebryakova T.I., Neronov V.A., Peshev P.D.** High temperature borides/[

boridy]. M. : Metallurgiya, Chelyabinskoye otdeleniye, 1991, 368 p.

5. **Shiryayeva L.S., Garbuzova A.K., Galevskiy G.V.** Production and use of titanium carbide (evaluation, trends, forecasts). [Proizvodstvo i primeneniye karbida titana (otsenka, tendentsii, prognozy)]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2014. № 2 (195), S. 100–108. (rus.)

6. **Garbuzova A.K., Galevskiy G.V., Rudneva V.V., Shiryayeva L.S.** Analysis of the current state of the production and use of titanium carbide/ [Analiz sovremennogo sostoyaniya proizvodstva i primeneniya karbida titana]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrialnogo universiteta*. 2014. № 1(7). S. 34–39.

7. **Galevskiy G.V., Rudneva V.V., Yefimova K.A.** Development of the scientific and technological bases of the plasma synthesis of nano titanium boride / [Razrabotka nauchnykh i tekhnologicheskikh osnov plazmennogo sinteza nanoborida titana]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2015. №2(219). S. 141–150. DOI:10.5862/JEST.219.15. (rus)

8. **Nozdrin I.V., Shiryayeva L.S., Rudneva V.V., Terentyeva M.A.** Model-mathematical study of the conditions for effective processing of chlorine-containing materials in a plasma reactor. [Modelno-matematicheskoye issledovaniye usloviy effektivnoy pererabotki khromsoderzhashchego syrya v plazmennom reaktore]. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2012. № 2. S. 13–18.

9. **Nozdrin I.V., Galevskiy G.V., Shiryayeva L.S.** Synthesis and evolution dispersion borides and carbides of vanadium and chromium in the plasma flow conditions. [Sintez i evolyutsiya dispersnosti boridov i karbidov vanadiya i khroma v usloviyakh plazmennogo potoka]. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2011. № 10. S. 12–17. (rus.)

10. **Rudneva V.V., Galevskiy G.V., Yurkova Ye.K.** Model-mathematical study modes efficient processing of particulate materials in a plasma reactor. [Modelno-matematicheskoye issledovaniye rezhimov effektivnoy pererabotki dispersnogo syrya v plazmennom reaktore]. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2007. № 5. S. 52–55.

11. **Rudneva V.V., Galevskiy G.V.** Laws of formation of carbides of refractory particles in the processes of synthesis

of plasma reduction. [Zakonomernosti formirovaniya chastits tugoplavkikh karbidov v protsessakh plazmennogo vosstanovitelnogo sinteza]. *Vestnik gorno-metallurgicheskoy sekcii RAEN. Otdeleniye metallurgii Novokuznetsk: Izd-vo SibGIU*. 2009. Vol. 23, S. 120–127.

12. Svidetelstvo №21093 registratsii elektronnoogo resursa «Programma» Mathematical modeling of processes in the processing of titanium-carbide materials in a plasma reactor. [Mathematical modeling of processes in the processing of titanium-carbide materials in a plasma reactor] v obyedinennom fonde elektronnykh resursov «Nauka i obrazovaniye» RAO / Galevskiy G.V., Rudneva V.V., Garbuzova A.K. M.: IUO RAO, 2015. (rus.)

13. Svidetelstvo № 18845 registratsii elektronnoogo resursa «Programma» «The generalized model of carbide formation during plasma synthesis» v obyedinennom fonde elektronnykh resursov «Nauka i obrazovaniye» RAO/ I.V. Nozdrin, G.V. Galevskiy, V.V. Rudneva, L.S. Shiryayeva M.: INIPI, 2013. (rus.)

14. Svidetelstvo № 18396 registratsii elektronnoogo resursa «Programma» «The generalized model of carbide formation during plasma synthesis» v obyedinennom fonde elektronnykh resursov «Nauka i obrazovaniye» RAO/ L.S. Shiryayeva, I.V. Nozdrin, G.V. Galevskiy, V.V. Rudneva M.: INIPI, 2012.

15. Shiryayeva L.S., Nozdrin I.V., Galevskiy G.V., Rudneva V.V. Svidetelstvo № 18396 registratsii elektronnoogo resursa «Programma» The generalized model of carbide formation during plasma synthesis. [The generalized model of carbide formation during plasma synthesis] v obyedinennom fonde elektronnykh resursov «Nauka i obrazovaniye» RAO, M.: INIPI, 2012.

16. Svidetelstvo № 9625 ob otraslevoy registratsii razrabotki «Raschet effektivnosti plazmometallurgicheskoy pererabotki kremniysoderzhashchego syrya v karbid» [The calculation of the efficiency of the plasma processing of metallurgical silicon carbide containing raw materials] v Fonde algoritmov i programm Gosudarstvennogo koordinatsionnogo tsentra informatsionnykh tekhnologiy / Rudneva V.V., Galevskiy G.V., Yurkova Ye.K. M.: VNITITs, 2008 - №GR50200702628

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

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

GALEVSKY Gennadii V. – Siberian State Industrial University.
42, Kirov St, Novokuznetsk, Russia, 654007.
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

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

ГАРБУЗОВА Алина Константиновна – аспирант Сибирского государственного индустриального университета.
654007, Новокузнецк, Ул. Кирова 42.
E-mail: vind09@mail.ru

GARBUZOVA Alina K. – Siberian State Industrial University.
654007, Novokuznetsk, Kirov St. 42.
E-mail: vind09@mail.ru

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

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