

УДК 661.665

И.В. Ноздрин, В.В. Руднева, Г.В. Галевский

Сибирский государственный индустриальный университет

ПЛАЗМЕННЫЙ СИНТЕЗ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ АТТЕСТАЦИЯ ДИБОРИДА ХРОМА

Аннотация. Разработаны научные и технологические основы плазменного синтеза борида хрома, включающие анализ современного состояния производства и применения борида хрома CrB_2 , определение характеристик трехструйного плазменного реактора, модельно-математическое исследование взаимодействия сырьевого и плазменного потоков, прогнозирование технологических показателей плазменного синтеза борида хрома на основе результатов моделирования, выбор оптимального технологического варианта, реализацию плазмометаллургической технологии производства борида хрома, его физико-химическую аттестацию и определение технико-экономических показателей производства.

Ключевые слова: плазменный синтез, диборид хрома, плазмометаллургическая технология.

PLASMA SYNTHESIS AND PHYSICAL-CHEMICAL CERTIFICATION OF CHROMIUM BORIDE

Abstract. The scientific and technological bases of plasma synthesis of chromium boride, including analysis of the current state of production and use of chromium boride CrB_2 , the characterization of three-jet plasma reactor, the model-a mathematical study of the interaction of raw and plasma flows, forecasting technological parameters of the plasma synthesis of chromium boride based on simulation results and the choice of optimal technology option, the implementation of plasma metallurgical technology of chromium boride, its physic-chemical certification and determination of technical and economic indicators of production are investigated.

Keywords: plasma synthesis, chromium boride, plasma metallurgical technology.

Диборид хрома CrB_2 – твердый и износостойкий, жаропрочный и химически инертный материал – востребован в технике для изготовления защитных покрытий металлов и керметов, в качестве компонентов и легирующих добавок твердых сплавов. Анализ современного состояния отечественного и мирового производства, а также применения борида хрома показывает, что можно выделить три группы способов его получения, основанных на борировании хрома или продуктов карбидотермического (карботермического) восстановления оксида хрома (смеси оксидов хрома и бора) в неокислительной атмосфере (вакуум, инертная среда), продуктов магнетермического восстановления соединений хрома, хрома или его соединений в газофазных хром-бор-водородсодержащих смесях. Борид хрома, полученный способами первой группы, применяется в порошковой металлургии, второй – для напыления и наплавки защитных покрытий, третьей – в композиционных материалах. Дальнейшие перспективы применения борида хрома связаны с производством его в наносостоянии: модифицирование сплавов, композиционные гальванические покрытия и другие сферы. Разработанная и освоенная в 80-х гг. в рамках комплексной научно-технической программы государственного значения «Сибирь» под руководством академика РАН М.Ф. Жукова и профессора Г.В. Галевского технология плазмометаллургического синтеза относится к третьей группе способов получения борида хрома и реализуется с использованием трехструйного прямого

плазменного реактора мощностью до 50 кВт и азота в качестве плазмообразующего газа. Реализация предлагаемой плазмометаллургической технологии в полной мере делает ее экологически безопасной, обеспечивающей получение борида хрома в виде нанопорошков с размером частиц 30 – 40 нм. Наряду с достоинствами в рассматриваемой технологии имеются такие недостатки, как использование не самого концентрированного по хрому сырья (оксида хрома Cr_2O_3), а также лабораторный уровень реализуемых технологических и конструкторских решений.

Целью настоящей работы является создание научных и технологических основ промышленного варианта плазменного синтеза диборида хрома и его физико-химическая аттестация, для достижения которой ставили и решали следующие задачи: проведение анализа современного состояния производства и применения борида хрома; определение характеристик промышленного трехструйного плазменного реактора; модельно-математическое исследование взаимодействия сырьевого и плазменного потоков; прогнозирование основных технологических показателей плазмометаллургического производства борида хрома на основе результатов моделирования и выбор оптимального технологического варианта; реализация промышленной плазмометаллургической технологии производства борида хрома, его физико-химическая аттестация и определение технико-экономических показателей.

В Сибирском государственном индустриальном университете (СибГИУ) накоплен значительный опыт исследования и эксплуатации плазмотехнологических комплексов на основе трехструйного прямого плазменного реактора с работающими на азоте электродуговыми плазмотронами и применения их для синтеза тугоплавких карбидов, боридов, их композиций, обобщенный в работе [1]. Однако описанные в ней результаты получены для лабораторного плазменного реактора мощностью 30 – 50 кВт, не содержат проектно-технологических предложений и рекомендаций по выходу на промышленный уровень и полной информации о его теплотехнических и технологических характеристиках. В связи с этим для экспериментального исследования плазменного синтеза боридов хрома на базе НПФ «Полимет» создан промышленный плазмотехнологический комплекс, превосходящий известные лабораторные и опытно-промышленные варианты по мощности в 4 – 5 раз, ресурсу работы – в 3 – 4 раза, производительности – в 2,5 – 3,5 раза. Для этого проведена модернизация практически всех систем комплекса – от плазмотронов до фильтров для улавливания нанопорошков. Усовершенствованные конструкции плазмотронов, камеры смешения реактора, рукавных фильтров защищены патентами^{1, 2, 3}.

Плазмотехнологический комплекс включает трехструйный реактор и системы электро-, газо-, водоснабжения и вентиляции, контрольно-измерительных приборов и автоматики, дозирования шихтовых материалов, улавливания нанодисперсных продуктов и обезвреживания отходящих технологических газов.

Для генерации плазменного потока используются три электродуговых подогревателя газа (плазмотрона) ЭДП-104АМ конструкции, разработанной в СибГИУ, мощностью до 50 кВт каждый, установленные в камере смешения под углом 30° к оси реактора. Плазмотроны ЭДП-104АМ работают на постоянном токе при следующих параметрах электрической дуги: напряжение дуги до 250 В, ток до 200 А. Стабилизация электрической дуги – газовихревая за счет тангенциального ввода плазмообразующего газа через специальное закруточное кольцо. Аноды плазмотронов выполнены медными водоохлаждаемыми с внутренним диам. 0,008 м с практически неограниченным при наличии охлаждения и эксплуатации в камере смешения с углом наклона плазменных струй 30° ресурсом работы. Катоды плазмотронов состоят из медных водоохлаждаемых корпусов и катодных вставок из торированного вольфрама (для снижения работы выхода электронов) диам. 0,003 м с ресурсом работы 100 – 120 ч. Включение плазмотронов осуществляется с помощью осциллятора. Тепловой КПД плазмотрона мощностью 50 кВт при минимальном расходе плазмообразующего газа составляет

50 – 52 %. В отличие от базовой модели в плазмотронах ЭДП-104АМ в качестве плазмообразующего газа может использоваться азот технической чистоты с содержанием кислорода до 1,5 – 2,0 % (объемн.), что в настоящее время соответствует реальному составу поставляемого технического азота. Электропитание плазмотронов осуществляется от тиристорного преобразовательного агрегата серии АТ4 – 750/600.

Конструкция камеры смешения, разработанная в СибГИУ, обеспечивает эффективные ввод в реактор высокодисперсного сырья, перемешивание его с плазменным потоком и практически неограниченный ресурс работы анодов плазмотронов. Камера смешения соединена с секционированным водоохлаждаемым каналом, имеющим внутренний диам. 0,054 м. Подача высокодисперсного сырья в камеру смешения осуществляется с помощью водоохлаждаемой фурмы. Для снижения радиального градиента температуры в пристеночной зоне канал реактора может быть футерован изнутри высокотемпературным теплоизоляционным материалом.

Для дозирования порошкообразного сырья применяется дозатор смешанного электромеханического и газовихревого типов периодического действия со съемным цилиндром – приемником порошкообразного сырья конструкции, разработанной в КБ ИХТТИМ СО РАН.

Система улавливания включает осадительную камеру, в которой улавливается до 10 % нанопорошка и снижается температура технологических газов до 873 К, а также два работающих поочередно рукавных фильтра, улавливающих до 85 % нанопорошков, конструкции, разработанной в СибГИУ. Фильтры выполнены с водоохлаждаемым корпусом и регенерацией фильтрующего рукава обратной продувкой сжатым газом (азотом). Диаметр и длина рукава составляют 0,5 и 2,5 м.

Исследование теплотехнических, ресурсных и технологических характеристик трехструйного прямого вертикального реактора с внутренним каналом 0,054 м мощностью 150 кВт показало, что среднемассовая температура плазменного потока на длине реактора 12 калибров изменяется в пределах 5500 – 2650 К для нефутерованного канала и 5500 – 3200 К при теплоизоляции его цилиндром из диоксида циркония толщиной 0,005 м. При этом температура внутренней поверхности стенки изменяется в пределах 800 – 350 К и 1900 – 850 К соответственно. Удельная электрическая мощность достигает 1214 МВт/м³, что значительно превышает этот показатель для традиционного электротермического оборудования (обычно около 0,2 МВт/м³). Расчетный ресурс работы электродов составляет для медного анода 4700 ч, вольфрамового катода 111 ч. Прогнозируемое загрязнение боридов хрома продуктами эрозии электродов составляет 0,0001 % Cu и 0,00002 % W. По совокупности характеристик трехструйный плазменный реактор мощностью 150 кВт может быть отнесен к высокоэффективному, надежно работающему современному электротермическому оборудованию.

¹ Пат. РФ № 66877.

² Пат. РФ № 107440.

³ Пат. РФ № 108319.

Экспериментальному изучению предшествовало модельно-математическое исследование взаимодействия сырьевого и плазменного потоков, включающее проведение термодинамического и кинетического анализов. В связи с использованием в процессах синтеза в качестве хромсодержащего сырья – хрома, его оксида Cr_2O_3 и трихлорида CrCl_3 ; углерод- и борсодержащего сырья – метана и бора, плазмообразующего газа – азота объектами исследования являлись системы В – Н – N, Cr – O – C – В – Н – N, Cr – Cl – В – Н – N, Cr – В – Н – N.

Термодинамический анализ процессов синтеза проведен с целью прогнозирования оптимальных параметров получения боридов хрома (соотношения компонентов и температуры), определения для квазиравновесных условий, исключающих присутствие конденсированного бора, показателей процесса (степени превращения сырья в борид, составов газообразных и конденсированных продуктов), оценки вклада в процессы боридообразования газофазных реакций, обеспечивающих в условиях плазменных технологий эффективную переработку дисперсного сырья. Необходимые для анализа составы газообразных и конденсированных продуктов рассчитывали «константным» методом, основанном на совместном решении уравнений закона действующих масс, материального баланса, суммарного числа молей газовой смеси, существования конденсированной фазы, закона Дальтона с использованием программы «PLASMA» (ИХТТИМ СО РАН) компьютерного моделирования высокотемпературных сложных химических равновесий, имеющей встроенную базу данных продуктов взаимодействия для оксидо-, боридо-, карбидо- и нитридообразующих систем [2]. При расчетах рассматривали область температур 1000 – 6000 К при общем давлении в системе 0,1 МПа. Термодинамический анализ выбранных технологических вариантов показал, что в системах Cr – В – O – C – Н – N и Cr – В – Н – N 100 %-й выход боридов хрома CrB_2 возможен при стехиометрическом соотношении Cr:В, трехкратном избытке водорода, обеспечивающего «газификацию» бора, при температуре 2150 – 2800 К. В системе Cr – В – Cl – Н – N 100 %-й выход боридов хрома возможен при стехиометрическом соотношении Cr:В, шестикратном избытке водорода для восстановления соединения CrCl_3 до Cr и «газификации» бора при температуре 2150 – 2800 К. Образование боридов хрома возможно по предполагаемому механизму «пар – расплав – кристалл» с участием борводорода состава BH_2 , что позволяет прогнозировать возможность достижения высокого выхода боридов хрома в реальных условиях синтеза.

Многовариантное модельно-математическое исследование макрокинетических параметров испарения дисперсного хром- и борсодержащего сырья проведено с использованием усовершенствованной математической модели взаимодействия плазменного и сырьевого потоков А.Л. Моссэ – И.С. Бурова – Г.В. Галевского,

основанной на совместном решении уравнений движения частиц сырья, межкомпонентного теплообмена, теплообмена плазменного потока со стенками реактора и учитывающей влияние на интенсивность теплообмена дисперсного сырья и искусственной теплоизоляции канала [3].

Для взаимодействия дисперсного хром- и борсодержащего сырья с высоконагретым потоком газа в плазменном реакторе рассчитана степень испарения сырья для синтеза боридов хрома в зависимости от энергетических параметров реактора, крупности, скорости ввода в плазменный поток и массовой расходной концентрации. При подводимой к реактору мощности 75 кВт 100 %-я степень испарения для частиц хрома крупностью 10 – 30 мкм достигается при массовой расходной концентрации 0,14 – 0,12 кг порошка хрома/кг газа-теплоносителя. Для оксида хрома (III), хлорида хрома (III) и бора эти показатели составляют соответственно 5 – 20 мкм и 0,14 – 0,10 кг/кг, 30 – 70 мкм и 0,16 – 0,14 кг/кг, 1 – 3 мкм и 0,12 – 0,11 кг/кг. Время полного испарения частиц исследуемых порошков в размерных пределах 5 – 20 мкм не превышает $1 \cdot 10^{-3}$ с, а соответствующая длина пути – $2 \cdot 10^{-2}$ м. На основании полученных результатов выбраны сырьевые материалы для синтеза боридов хрома: хром металлический марки ПХ-1М (ТУ 14-1-1474 – 75, изм.), оксид хрома Cr_2O_3 металлургический марки ОХМ-0 (ГОСТ 2912 – 79, изм.), хром треххлористый (ТУ 6-09-02-269 – 77, изм.), бор аморфный марки В96.

Результаты модельно-математического исследования позволили спрогнозировать технологические показатели плазменного синтеза боридов хрома для различного хромсодержащего сырья (табл. 1). При расчете показателей учитывали потери сырья в реакторе в количестве 4 % и продуктов синтеза в системе улавливания – 5 %. Можно видеть, что наиболее перспективным технологическим вариантом является борирование хрома в азотно-водородном плазменном потоке.

Технологические исследования проводили с привлечением метода планируемого эксперимента, что позволило найти зависимость содержания в продуктах синтеза боридов хрома от определяющих факторов в виде следующих уравнений:

$$[\text{CrB}_2]_1 = -413,53 + 0,09695T_0 + 2,283[\text{B}] + 0,1736\{\text{H}_2\} - 0,00058T_0[\text{B}]; \quad (1)$$

$$[\text{CrB}_2]_2 = -3,171 + 0,015T_0 + 0,016[\text{H}_2] - 0,056[\text{B}]; \quad (2)$$

$$[\text{CrB}_2]_3 = -66,74 + 0,03T_0 + 0,002T_3 - 0,064[\text{CH}_4] - 0,2[\text{B}] + 0,073\{\text{H}_2\}, \quad (3)$$

где $[\text{CrB}_2]_1$, $[\text{CrB}_2]_2$, $[\text{CrB}_2]_3$ – содержание боридов хрома в продуктах синтеза трех технологических вариантов, % (по массе); T_0 и T_3 – начальная температура плазмен-

Прогнозируемые технологические показатели плазменного синтеза боридов хрома

Показатели процесса	Значение показателей для технологического варианта		
	Борирование хрома (вариант 1)	Борирование продуктов восстановления CrCl ₃ водородом (вариант 2)	Борирование продуктов восстановления Cr ₂ O ₃ метаном (вариант 3)
Мощность реактора, кВт	150	150	150
Начальная температура плазменного потока, К	5400	5400	5400
Температура закалки продуктов синтеза, К	2800	2800	2800
Массовая расходная концентрация, кг сырья/кг газа-теплоносителя	0,12	0,14	0,12
Степень превращения сырья	0,96	0,96	0,96
Выход боридов хрома, %	93,0	91,9	93,0
Производительность по бориду хрома, кг/ч	3,69	1,74	2,76
Интенсивность производства, кг/(ч·м ³)	1477	696	1104
Расход хромосодержащего сырья, кг/кг	0,81	2,83	1,18
Расход бора, кг/кг	0,35	0,35	0,35
Расход метана, кг/кг	–	–	0,32
Расход водорода, кг/кг	–	0,58	–
Расход газа-теплоносителя (азота), кг/кг	8,78	18,60	11,74
Расход эл. энергии кВт·ч/кг	40,65	86,21	54,35

ного потока и температура закалки, К; [B] – содержание бора в шихте, % от стехиометрически необходимого для получения CrB₂; [CH₄] – количество подаваемого метана, % от стехиометрически необходимого для восстановления оксида хрома до хрома; [H₂] – количество подаваемого восстановителя, % от стехиометрически необходимого для восстановления трихлорида хрома до хрома; {H₂} – концентрация водорода в плазмообразующем газе, % (объемн.).

Зависимости содержания боридов хрома в продуктах синтеза от управляющих параметров для различных вариантов синтеза представлены графически на рис. 1. При этом размер формирующихся в плазменном потоке частиц боридов хрома, рассчитанный по величине удельной поверхности, пропорционален среднemasсовой температуре потока в степени –0,471:

$$d = (2,30 \pm 0,04) \cdot 10^{-6} T^{(-0,471 \pm 0,105)} \quad (4)$$

Оптимальные значения технологических параметров для варианта 1, а также основные характеристики синтезируемого при этих условиях боридов хрома, полученные при пятикратном дублировании, приведены в табл. 2.

Для комплексной физико-химической аттестации продуктов синтеза методами рентгеновского и химического анализов исследовали кристаллическую решетку, фазовый и химический составы, а методами просвечивающей (ПЭМ) и растровой (РЭМ) электронной микроскопии – дисперсность и морфологию частиц. Установлено, что продуктом плазменного синтеза является

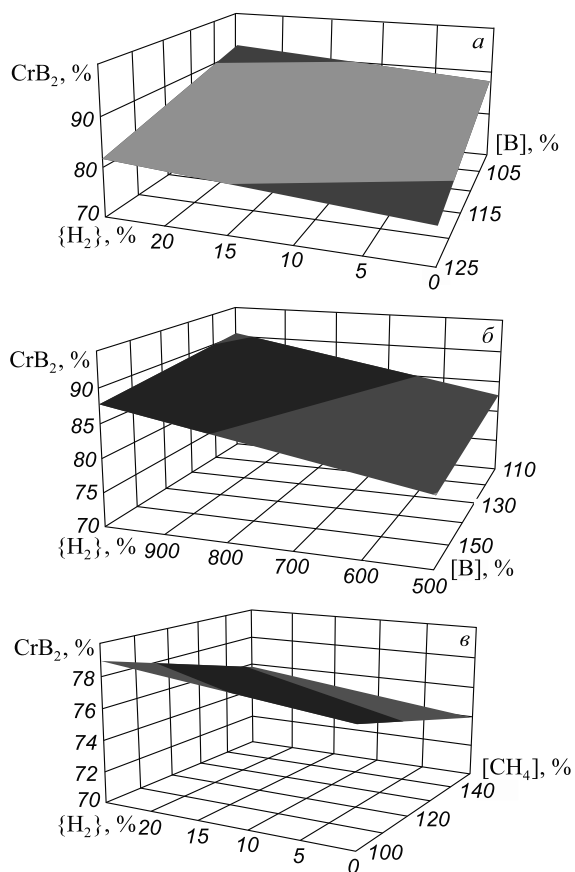


Рис. 1. Зависимость содержания диборида хрома в продуктах синтеза от содержания бора в шихте и водорода в плазменном потоке при температуре T₀ = 5400 К, вариант 1 (а), вариант 2 (б), а также от количества восстановителя (метана) и содержания водорода в плазменном потоке при T₀ = 5400 К, T₃ = 2400 К, [B] = 112,5 %, вариант 3 (в)

Т а б л и ц а 2

Оптимальные значения параметров синтеза борида хрома в промышленном реакторе мощностью 150 кВт и его основные характеристики (вариант I)

Параметры синтеза и характеристики борида хрома	Значение параметра
Состав газа-теплоносителя, % (объемн.):	
– азот	74,5
– водород	25,0
– метан	0,5
Состав хром-борсодержащей шихты, % (по массе):	
– хром	65,0
– бор	35,0
Массовая расходная концентрация шихты, кг/кг газа-теплоносителя	0,12
Начальная температура плазменного потока, К	н.м. 5400
Температура закалки, К	2000 – 2800
Фазовый состав	CrB ₂
Химический состав, % (по массе)	
– CrB ₂	91,21 – 93,12
– хром свободный	2,99 – 1,88
– бор свободный	1,80 – 1,10
– кислород	3,29 – 3,16
– азот	0,71 – 0,74
Выход борида хрома, % (по массе)	92,0
Удельная поверхность, м ² /кг	34 000 – 36 000
Размер* частиц, нм	25 – 30
Форма частиц	Шаровидная
Окисленность нанопорошка борида хрома**, кг O ₂ /м ²	9,23·10 ⁻⁷
Производительность, кг/ч	3,52
Интенсивность, кг/(ч·м ³)	1453

* – рассчитывается по величине удельной поверхности;
** – определяется после выдержки на воздухе в течение 24 ч.

борид хрома CrB₂. Рентгенограмма продукта синтеза приведена на рис. 2, на которой отсутствуют не связанные в CrB₂ бор и хром. Содержание в продуктах синтеза борида хрома CrB₂ составляет 91,2 – 93,1 % (по массе), ему сопутствуют примеси свободных бора и хрома, кислорода и азота. Микрофотографии нанопорошка

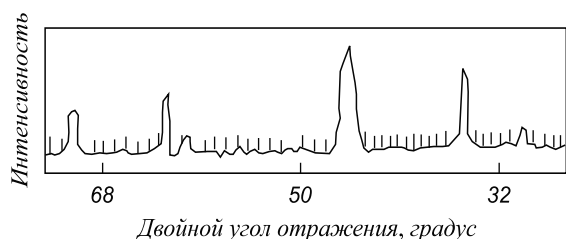


Рис. 2. Фрагмент рентгеновской дифрактограммы дихорида хрома

борида хрома приведены на рис. 3, 4. Нанопорошок борида хрома представлен агрегатами шарообразной или близкой к ней формы размером от 500 до 130 нм, образованными сообществом глобулярных частиц достаточно широкого размерного диапазона 25 – 75 нм, число которых в агрегате зависит от его крупности. Наноуровень и морфология частиц позволяют рассматривать их как продукты борирования микрокапель хрома, образующихся при объемной конденсации его паров, жидкокапельной коалесценции и кристаллизации, а присутствие в исследуемых объектах агрегатов различного объема указывает на высокую вероятность дальнейшего укрупнения наночастиц при понижении температуры путем их коагуляции.

Оценка экономической эффективности плазмометаллургического производства борида хрома показывает, что при объеме производства 4,2 т борида хрома в год (в расчете на один реактор) и себестоимости 4083 тыс. руб/т отпускная цена 1 кг составляет 317 долл. США, что свидетельствует о его конкурен-

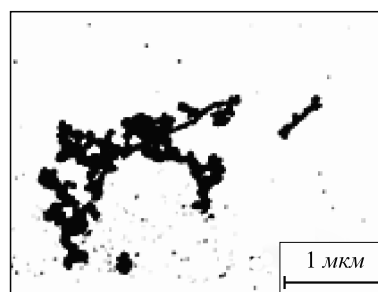


Рис. 3. Микрофотография нанопорошка дихорида хрома (ПЭМ)

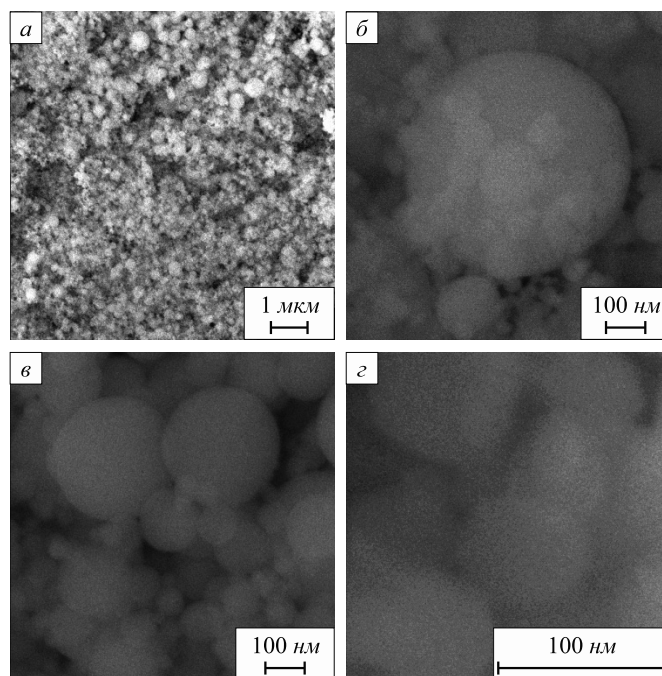


Рис. 4. Микрофотография нанопорошка дихорида хрома (РЭМ): а – внешний вид; б – морфологическая картина агрегата; в – ансамбль частиц и агрегатов; г – отдельные частицы

тоспособности на мировом рынке нанопорошковых материалов. В настоящее время ведущими зарубежными производителями нанопорошков боридов, среди которых научно-производственные фирмы «Nanostructured & Amorphous Materials. Inc.» (США), «Tokyo Tekko Co» (Япония), «Hefei Nanotechnology & Development ltd. Co» (Китай), «Neomat Co» (Латвия), «Plasma Chem GmbH» (Германия) установлен диапазон цен за 1 кг нанопорошков боридов в пределах 400 – 2000 долл. США. Срок окупаемости капиталовложений составляет 2 года, что подтверждает экономическую и технологическую целесообразность организации производства нанопорошка борида хрома. При этом одной из наиболее предпочтительных сфер применения борида хрома является технология композиционных гальванических покрытий [4, 5].

Выводы. На основании проведенных модельно-тематических и технологических исследований определены оптимальные значения параметров плазменного синтеза борида хрома и его физико-химические характеристики. Установлено, что при борировании порошка хрома в условиях азотно-водородного плазменного потока в области температур 5400 – 2000 К может быть получен борид хрома CrB₂ в виде нанопорошка с размером частиц 25 – 75 нм. Исследованы фазовый

и химический составы, дисперсность, морфология и окисленность продуктов синтеза. Определены такие основные технико-экономические показатели предлагаемой технологии, как производительность, интенсивность, себестоимость, отпускная цена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руднева В.В. Плазмометаллургическое производство карбида кремния: развитие теории и совершенствование технологии. – М.: Флинта: Наука, 2008. – 387 с.
2. Ноздрин И.В., Галевский Г.В., Руднева В.В. – В кн.: Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии. Труды 3-й Всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк: изд. СибГИУ. 2011. С. 60 – 64.
3. Ноздрин И.В., Ширяева Л.С., Герентьева М.А. – В кн.: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк: СибГИУ. 2011. С. 464 – 467.
4. Ноздрин И.В., Галевский Г.В., Руднева В.В. // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 9. С. 46 – 48.
5. Агеев В.Е., Латыпов Р.А. Восстановление и упрочнение деталей машин композиционными гальваническими покрытиями. – Курск: изд. Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2011. – 75 с.

© 2013 г. И.В. Ноздрин, В.В. Руднева, Г.В. Галевский
Поступила 23 января 2013 г.

УДК 669.184.124

**П.С. Харлашин¹, А.К. Харин¹, Р.Д. Куземко¹,
Р.Ф. Калимуллин², Е.В. Протопопов²**

¹ Приазовский государственный технический университет (г. Мариуполь)

² Сибирский государственный индустриальный университет

ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА АЗОТА НА МЕЖФАЗНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРИ ТЕЧЕНИИ ГАЗОВЗВЕСИ В ТОРКРЕТ-ФУРМЕ

Аннотация. С использованием статической модели двухскоростного движения газовзвеси в торкрет-фурме показано, как концентрация порошка, давление несущего газа, плотность частиц, их эквивалентный диаметр, коэффициент формы, разность скоростей и динамическое скольжение фаз влияют на коэффициент аэродинамического сопротивления, силу межфазного взаимодействия, объемную долю газовой фазы, скорость витания.

Ключевые слова: газодисперсный поток, торкрет-фурма, нагрев газа, межфазное взаимодействие.

EFFECT OF NITROGEN HEATING ON THE INTERFACIAL INTERACTION BY THE FLOW OF GAS SUSPENSION IN GUNNING-LANCE

Abstract. Using a static model of two-speed motion of the gas suspension in gunning-lance it is shown how the powder concentration, carrier gas pressure, particle number density, equivalent diameter, shape factor, differential velocity, and dynamic phase slip have an effect on the aerodynamic drag coefficient, interfacial interacting force, inclusion volume fraction of gas phase, and velocity of soaring.

Keywords: gas-dispersed flow, gunning-lance, gas heating, interfacial interaction.

Обобщение зарубежных и отечественных достижений при решении проблемы повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров показало, что технологически наиболее оптимальным вариантом яв-

ляется совместное использование по ходу кампании технологии пневматической раздувки конечного шлака и факельного торкретирования [1]. Так, внедрение технологии горячего ремонта в ПАО «ММК им. Ильича»