

И.В. Ноздрин, Л.С. Ширяева, В.В. Руднева

Сибирский государственный индустриальный университет

ПЛАЗМЕННЫЙ СИНТЕЗ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ АТТЕСТАЦИЯ НАНОКАРБИДА ХРОМА

Высший по содержанию углерода карбид Cr_3C_2 (износо- и коррозионностойкий, твердый, химически инертный материал) востребован в современных технике и технологиях для изготовления защитных покрытий металлов и керметов, в качестве компонентов и легирующих добавок безвольфрамовых твердых сплавов. Анализ современного состояния отечественного и мирового производства и применения карбида хрома показывает, что можно выделить три группы способов получения карбида хрома Cr_3C_2 с точки зрения агрегатного состояния сырья и основных областей применения: карботермическое восстановление оксида хрома в насыпном или компактированном виде в неокислительной атмосфере (азоте, водороде, вакууме, инертном газе); карботермическое восстановление оксида хрома в расплаве; карботермическое восстановление оксида хрома в газовой фазе. Вещество Cr_3C_2 , полученное способами первой группы, применяется в порошковой металлургии в технологии керметов, второй группы – для напыления и наплавки защитных покрытий, третьей группы – в наноматериалах. Дальнейшие перспективы применения карбида хрома связаны с производством его в наносостоянии, т.е. нанокарбида хрома. Разработанная и освоенная в 80-х годах 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 карбида хрома и реализуется с использованием трехструйного прямоточного 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 нанокарбида хрома, близкого по составу к стехиометрическому, в виде нанопорошков с размером частиц 30 – 70 нм и возможность выделения в товарном виде нанодисперсного пиролитического углерода и продукта улавливания цианистого водорода – технического цианида натрия. Наряду с достоинствами в рассматриваемой технологии имеются такие недостатки, как техническая и экономическая нецелесообразность использования в качестве карбидизатора пропан-бутановой смеси, требующей для переработки

сложной по составу и генерации азотно-аммиачно-водородной плазмы, а также лабораторный уровень реализации.

Целью настоящей работы является создание научных и технологических основ плазменного синтеза карбида хрома, а также его физико-химическая аттестация, для достижения которой ставились и решались следующие задачи: проведение анализа современного состояния производства и применения карбида хрома Cr_3C_2 ; определение характеристик трехструйного плазменного реактора; модельно-математическое исследование взаимодействия сырьевого и плазменного потоков; прогнозирование основных технологических показателей плазмометаллургического производства карбида хрома на основе результатов моделирования и выбор оптимального технологического варианта; реализация плазмометаллургической технологии производства карбида хрома, его физико-химическая аттестация и определение технико-экономических показателей.

В настоящее время в Сибирском государственном индустриальном университете (СибГИУ) накоплен значительный опыт, обобщенный в работах [1 – 3], исследования и эксплуатации трехструйного прямоточного плазменного реактора с работающими на азоте электродуговыми плазмотронами и применения его для синтеза тугоплавких карбидов, боридов, их композиций. Показано, что оптимальной следует считать конструкцию реактора с равномерным расположением плазмотронов по окружности, с углом наклона плазменных струй к оси реактора 30 – 45° и тепловой защитой интенсивно охлаждаемых стенок, обеспечивающую оптимальный режим работы камеры смешения, высокую равномерность радиального распределения температуры и скорости при минимальных потерях тепловой энергии. Однако описанные в работах [1 – 3] результаты получены для лабораторного плазменного реактора мощностью 30 – 50 кВт, не содержат проектно-технологических предложений и рекомендаций по выходу на промышленный уровень, а также полной информации о его теплотехнических и технологических характеристиках.

Для определения промышленного уровня мощности трехструйного реактора проведено его теплотехническое обследование в диапазоне мощности 80 – 250 кВт, включающее определение теплового КПД плазмотро-

нов, достигаемой удельной энтальпии плазменного потока на входе в реактор, массового расхода генерируемого в этих условиях плазмообразующего газа. Установлено, что сочетание теплового КПД, требуемой удельной энтальпии плазмообразующего газа и его массового расхода, близкое к оптимальному, достигается при мощности реактора 150 кВт. Дальнейшее повышение уровня мощности нецелесообразно, поскольку при возможном конструктивном выборе плазмотронов не обеспечивается требуемая удельная энтальпия плазменного потока. Для трехструйного реактора с внутренним каналом диам. 0,054 м и мощностью 150 кВт среднемассовая температура плазменного потока на длине 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 изменяется в пределах 800 – 350 и 1900 – 850 К соответственно. Удельная электрическая мощность достигает 1214 МВт/м³, что значительно превышает этот показатель (обычно около 0,2 МВт/м³) для традиционного электротермического оборудования. Расчетный ресурс работы электродов составляет для медного анода 4700, вольфрамового катода 111 ч. Прогнозируемое загрязнение карбида хрома продуктами эрозии электродов не превышает 0,00010 % меди и 0,00002 % вольфрама. По совокупности характеристик трехструйный плазменный реактор мощностью 150 кВт может быть отнесен к высокоэффективному, надежно работающему современному электротермическому оборудованию.

Модельно-математическое исследование взаимодействия сырьевого и плазменного потоков включало проведение термодинамического и кинетического анализов. В связи с использованием в процессах синтеза в качестве хромсодержащего сырья – хрома, оксида Cr₂O₃ и трихлорида CrCl₃, углеводородного сырья – метана и плазмообразующего газа – азота объектами исследования являлись системы С – Н – N, Cr – О – С – Н – N, Cr – Cl – С – Н – N, Cr – С – Н – N.

Термодинамический анализ процессов синтеза проведен с целью прогнозирования оптимальных параметров получения карбида хрома (соотношения компонентов и температуры), определения для квазиравновесных условий, исключающих присутствие конденсированного углерода, показателей (степени превращения сырья в карбид, составов газообразных и конденсированных продуктов) процесса, оценки вклада в процессы карбидообразования газофазных реакций, обеспечивающих в условиях плазменных технологий эффективную переработку дисперсного сырья. Необходимые для анализа составы газообразных и конденсированных продуктов рассчитывались «константным» методом, основанном на совместном решении уравнений закона действующих масс, материального баланса, суммарного числа молей газовой смеси, существования конденсированной фазы, закона Дальтона с исполь-

зованием программы компьютерного моделирования высокотемпературных сложных химических равновесий «PLASMA» (ИХТТИМ СО РАН), имеющей встроенную базу данных продуктов взаимодействия для оксидо-, боридо-, карбидо- и нитридообразующих систем [4]. При расчетах рассматривалась область температур 1000 – 6000 К при общем давлении в системе 0,1 МПа. Термодинамический анализ выбранных технологических вариантов показал, что в системах Cr – О – С – Н – N и Cr – С – Н – N 100 %-ый выход карбида хрома возможен при стехиометрических соотношениях Cr:C и C:H и температуре 2000 – 2200 К. В системе Cr – С – Cl – Н – N 100 %-ый выход карбида хрома достигается при стехиометрическом соотношении Cr:C, 3-х кратном избытке водорода и температуре 2000 – 2200 К. Образование карбида хрома происходит с участием конденсированного хрома и циановодорода по механизму «пар – расплав – кристалл», что позволяет предположить возможность достижения его высокого выхода в реальных условиях синтеза.

Многовариантное модельно-математическое исследование макрокинетических параметров испарения дисперсного хромсодержащего сырья проведено с использованием усовершенствованной математической модели взаимодействия плазменного и сырьевого потоков А.Л. Моссе – И.С. Бутова – Г.В. Галевского, основанной на совместном решении уравнений движения частиц сырья, межкомпонентного теплообмена и теплообмена плазменного потока со стенками реактора и учитывающей влияние на интенсивность теплообмена дисперсного сырья и искусственной теплоизоляции канала [5].

Для взаимодействия дисперсного хромсодержащего сырья с высоконагретым потоком газа в плазменном реакторе рассчитана степень испарения сырья для синтеза карбида 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 %-ая степень испарения для частиц хрома крупностью 10 – 30 мкм при массовой расходной концентрации 0,14 – 0,12 кг порошка хрома/кг газа-теплоносителя. Для оксида хрома (III) и хлорида хрома (III) эти показатели составляют соответственно 5 – 20 мкм и 0,14 – 0,10 кг/кг, 30 – 70 мкм и 0,16 – 0,14 кг/кг. На основании полученных результатов выбраны сырьевые материалы для синтеза карбида хрома.

Результаты модельно-математического исследования позволили спрогнозировать технологические показатели плазмометаллургического производства карбида хрома для различного вида хромсодержащего сырья и выбрать оптимальный технологический вариант (см. таблицу). При расчете показателей учитывались потери сырья в реакторе в количестве 4 % и потери продуктов синтеза в системе улавливания в количестве 5 %. Можно видеть, что оптимальным технологическим вариантом является карбидизация хрома природным газом.

Прогнозируемые технологические показатели плазмотехнологического производства карбида хрома

Показатели процесса	Технологические варианты		
	Карбидизация хрома метаном	Восстановление Cr ₂ O ₃ метаном	Восстановление CrCl ₃ метаном
Степень превращения сырья	0,95	0,95	0,95
Выход карбида хрома, %	92,0	90,0	91,8
Производительность по карбиду хром, кг/ч	3,42	2,79	1,69
Интенсивность производства, кг/(ч·м ³)	1368	1116	676
Расход хромсодержащего сырья, кг/кг	0,9	1,3	2,76
Расход газа-теплоносителя, кг/кг	9,47	11,6	19,7
Расход метана, кг/кг	0,175	0,58	0,18
Расход эл. энергии, кВт·ч /кг	65,79	80,65	133,14

Технологические исследования проводились в условиях НПФ «Полимет» на базе промышленного плазмотехнологического комплекса мощностью 150 кВт, подробно описанного в работе [6] и включающего трехструйный прямоточный плазменный реактор, системы электро-, газо-, водоснабжения, дозирования шихтовых материалов и улавливания продуктов синтеза.

Для генерации плазменного потока в реакторе используются три электродуговых подогревателя (плазмотрона) ЭДП-104А мощностью до 50 кВт каждый, установленные в камере смешения под углом 30° к оси реактора. Камера смешения соединена с секционированным водоохлаждаемым каналом, имеющим внутренний диам. 0,064 м. Для снижения радиального градиента температуры в пристеночной зоне реактор футерован цилиндрическими вставками из диоксида циркония с толщиной стенки 0,005 м и наружным диам. 0,064 м, уменьшающими диаметр его канала до 0,054 м. Изменение длины реактора и подача в плазменный поток холодного газа (азота) через закалочное кольцо, устанавливаемое на выходе из реактора, позволяют проводить закалку продуктов синтеза в различных температурных зонах. Подача высокодисперсного сырья в камеру смешения осуществляется с помощью водоохлаждаемой фуры.

Электропитание промышленного плазменного реактора осуществляется от тиристорного преобразовательного агрегата серии АТП-750/600. Для дозирования порошкообразного сырья применяется дозатор смешанного электромеханического и газовихревого типа периодического действия со съёмным цилиндром – приемником порошкообразного сырья. Система улавливания продуктов синтеза включает осадительную камеру, где улавливается до 10 % нанопорошка и температура технологических газов снижается до 873 К, и два работающих поочередно рукавных фильтра, улавливающих до 85 % нанопорошков.

В качестве плазмообразующего газа использовался азот технической чистоты с содержанием кислорода до 0,5 % (объемн.), хромсодержащего сырья – хром металлический марки ПХ-1М (ТУ 14-1-1474 – 75, изм.), кар-

бидизатора – природный газ с содержанием метана до 94 % (объемн.) (остальное – этан, пропан, бутан).

Технологические исследования проводились с привлечением метода планируемого эксперимента, что позволило найти зависимости содержания в продуктах синтеза близкого по составу к карбиду карбонитрида хрома и сопутствующих ему примесей от определяющих факторов в виде следующих уравнений:

$$[Cr_3(C_{0,8}N_{0,2})_2] = 66,12 + 0,03T_0 - 0,42C_{H_2} - 0,14C_{NH_3} - 0,00002T_3C_{NH_3}; \quad (1)$$

$$[Cr_{своб}] = 147,95 - 0,027T_0 - 0,34C_{H_2} - 1,37C_{NH_3} - 0,00003T_0C_{NH_3}; \quad (2)$$

$$[C_{своб}] = -150,30 - 0,002T_0 + 1,3C_{H_2} + 13,5C_{NH_3} - 0,00008T_0C_{NH_3} + 0,0002T_3C_{H_2}; \quad (3)$$

$$[Cr_2O_3] = 41,80 - 0,0069T_0 - 0,208C_{CH_4} + 0,00004T_0C_{CH_4}; \quad (4)$$

$$[N_{связ}] = 1,74 + 0,001T_0 - 0,012C_{H_2} - 0,03C_{NH_3} - 0,00001T_3C_{NH_3}, \quad (5)$$

где $[Cr_3(C_{0,8}N_{0,2})_2]$, $[Cr_{своб}]$, $[C_{своб}]$, $[Cr_2O_3]$ и $[N_{связ}]$ – содержание, % (по массе), в продуктах синтеза карбонитрида, свободных хрома и углерода, оксида хрома (III) и связанного азота; T_0 и T_3 – начальная температура плазменного потока и температура закалки, К; C_{CH_4} – количество углеводорода от стехиометрически необходимого для карбидизации хрома, %; C_{H_2} – концентрация водорода в плазмообразующем газе, % (объемн.); C_{NH_3} – количество атомарного азота в плазмообразующем газе, $N(NH_3)/C(CH_4)$, % от стехиометрического.

При этом средний размер формирующихся в плазменном потоке частиц карбида хрома, рассчитанный по величине удельной поверхности, пропорционален среднемассовой температуре потока в степени –2,96:

$$\bar{d} = (726 \pm 35,1) T^{(-2,96 \pm 0,436)}. \quad (6)$$

Оптимальные значения технологических факторов и допустимые пределы их изменения, а также основные характеристики синтезируемого при этих условиях карбонитрида хрома, полученные при пятикратном дублировании опытов, приведены ниже:

Параметры синтеза и характеристики карбонитрида хрома	Значение
Состав газа-теплоносителя, % (объемн.):	
– азот	100
Состав карбидизатора, % (объемн.):	
– метан	93,6
– этан	3,0
– пропан	2,2
– бутан	1,2
Состав хромосодержащего сырья, % (по массе):	
– хром металлический	99,3
Крупность хромосодержащего сырья, мкм	–10
Производительность по сырью, кг/ч	3,11
Количество карбидизатора, %, от стехиометрического	120 – 140
Начальная температура плазменного потока, К	н.м. 5400
Температура закалки, К	2000 – 2200
Фазовый состав	$Cr_3(C_{0,80}N_{0,20})_2$
Химический состав, % (по массе):	
– $Cr_3(C_{0,8}N_{0,2})_2$	91,8 – 93,45
– хром свободный	2,10 – 1,80
– углерод свободный	1,30 – 1,10
– оксид хрома (III)*	4,00 – 3,00
– летучие	0,80 – 0,60
Выход карбонитрида хрома, % (по массе)	92,0
Удельная поверхность, м ² /кг	32 000 – 37 000
Размер** частиц, нм	30 – 35
Форма частиц	шаровидная
Окисленность нанопорошка карбонитрида хрома*** × 10 ⁷ , кг O ₂ /м ²	2,56
Производительность, кг/ч	3,42
Интенсивность, кг/(ч·м ³)	1368

Примечание. *, **, *** – значения, рассчитанные по содержанию кислорода, по величине удельной поверхности, после выдержки на воздухе в течение 24 ч.

Для комплексной физико-химической аттестации продуктов синтеза методами рентгеновского и химического анализов исследовались кристаллическая решетка, фазовый и химический составы, а методами просвечивающей (ПЭМ) и растровой (РЭМ) электронной микроскопии – дисперсность и морфология частиц. Установлено, что продуктом плазменного синтеза является тройное соединение – карбонитрид хрома. Рентгенограмма соединения $Cr_3(C_{0,8}N_{0,2})_2$ приведена на рис. 1. Это вещество идентифицировано как ромбический карбонитрид с кристаллической структурой,

отличающейся от структуры карбида наличием октаэдрических структурных элементов, внутри которых расположены атомы азота. В исследуемом диапазоне изменения параметров синтеза состав карбонитрида хрома практически не меняется и в пределах точности анализа и расчета соответствует соединению $Cr_3(C_{0,8}N_{0,2})_2$. Содержание в продуктах синтеза нанокарбонитрида хрома составляет 91,8 – 93,5 % (по массе). Микрофотографии нанокарбонитрида хрома приведены на рис. 2 и 3 соответственно. Нанопорошок карбонитрида хрома представлен агрегатами шарообразной или близкой к ней формы размером от 600 до 150 нм, образованными сообществом глобулярных частиц достаточно широкого размерного диапазона – от 20 до 80 нм, число которых в агрегате зависит от его крупности. Наноуровень и морфология частиц позволяют рассматривать их как продукты науглероживания 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.

Кристаллическая структура карбонитрида хрома неустойчива и при низкотемпературном (1073 – 1273 К) обжиге в инертной среде или азоте в присутствии свободного углерода перестраивается в карбидную предельного состава Cr_3C_2 . Переход карбонитрида хрома Cr_3C_2 , слабо выраженный при температуре 1073 К, полностью завершается при 1273 К в течение 0,5 ч. Условия превращения карбонитрида хрома в карбид Cr_3C_2 и его основные характеристики приведены ниже:

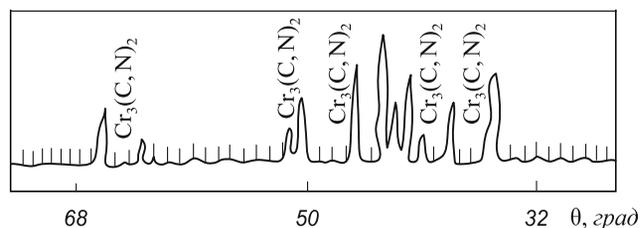


Рис. 1. Фрагмент рентгеновской дифрактограммы нанокарбонитрида хрома



Рис. 2. Микрофотография нанокарбонитрида хрома (ПЭМ)

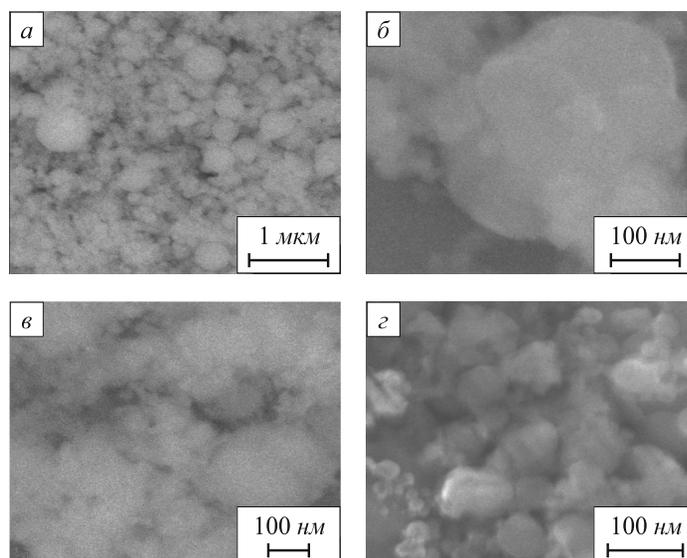


Рис. 3. Микрофотографии нанокарбонида хрома (РЭМ):
a – внешний вид; *б* – морфологическая картина агрегата; *в* – ансамбль частиц и агрегатов; *г* – отдельные частицы

Условия получения и характеристики карбида Cr ₃ C ₂	Значение
Химический состав карбонитрида, % (по массе):	
– Cr ₃ (C _{0,8} N _{0,2}) ₂	92,70
– хром свободный	1,50
– углерод свободный	2,60
– оксид хрома (III)	2,80
– летучие	0,40
Размер частиц, нм	33
Форма частиц	шаровидная
Тип электротермической установки для обжига карбонитрида	электродпечь сопротивления трубчатая СУОЛ-0.25.1/12/11
Среда для проведения обжига карбонитрида	аргон, азот
Температура обжига, К	1273
Продолжительность обжига, ч	0,5
Химический состав карбида хрома, % (по массе):	
– Cr ₃ C ₂	94,90
– хром свободный	1,54
– углерод свободный	0,21
– азот общий	0,47
– оксид хрома (III)	2,88
Выход карбида хрома, % (по массе)	93,0
Удельная поверхность, м ² /кг	10 000 – 12 000
Размер частиц, нм	92 – 98
Форма частиц	дендритная
Окисленность нанопорошка карбида хрома ×10 ⁷ , кг O ₂ /м ²	0,91

Можно видеть, что переходу карбонитрида в карбид соответствует уменьшение содержания в исследуемом образце азота и свободного углерода, причем содержание свободного углерода снизилось с 2,60 до 0,21 % (по массе). По-видимому, при переходе карбонитрида

в карбид свободный углерод диффундирует в образующийся дефектный по углероду карбид. Определение параметров кристаллической решетки образующегося карбида хрома, проведенное на образцах, полученных при различной (1073 – 1273 К) температуре обжига в области углов отражения $\theta = 23 - 33^\circ$, показало, что они соответствуют параметрам решетки карбида хрома стехиометрического состава: $a = 0,2831 \pm 0,0002$ нм, $b = 0,5531 \pm 0,0003$ нм, $c = 1,1462 \pm 0,0005$ нм. Переход карбонитрида в карбид сопровождается укрупнением порошка и изменением формы частиц: средний размер увеличивается почти в 3 раза (с 30 – 35 до 92 – 98 нм), а карбидные частицы имеют преимущественно дендритную форму (рис. 4). Такой характер изменения морфологии обусловлен известной способностью тугоплавких металлоподобных соединений в наносостоянии к твердофазной коалесценции (первичной рекристаллизации) внутри агрегатов при относительно низкотемпературном нагреве – 0,4 – 0,6 от температуры плавления.

Оценка экономической эффективности плазмометаллургического производства нанокарбида хрома показывает, что при объеме производства 3,7 т

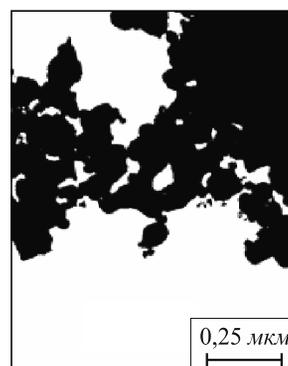


Рис. 4. Микрофотография нанокарбида хрома (ПЭМ)

нанокарбида хрома в год (в расчете на один реактор) и себестоимости 2869 тыс. руб/т отпускная цена составляет 220 долл. США/кг, что свидетельствует о его конкурентоспособности на мировом рынке нанопорошковых материалов. В настоящее время ведущими зарубежными производителями нанопорошков карбидов, среди которых научно-производственные фирмы «Nanostructured & Amorphous Materials. Inc.» (США), «Tokyo Tekko Co» (Япония), «Hefei Nanotechnology & Development htd. Co» (Китай), «Neomat Co» (Латвия), «Plasma Chem GmbH» (Германия), установлен диапазон цен на нанопорошки карбидов в пределах 400 – 2000 долл. США/кг. Срок окупаемости капиталовложений составляет 1,5 года, что подтверждает экономическую и технологическую целесообразность организации производства нанокарбида хрома. При этом одной из наиболее предпочтительных сфер применения этого соединения является технология композиционно-го электроосаждения защитных покрытий [7].

Выводы. На основании проведенных модельно-математических и технологических исследований определены оптимальные значения параметров синтеза нанокарбида хрома и его физико-химические характеристики. Установлено, что при карбидизации порошка хрома метаном в условиях плазменного потока азота в области температур 5400 – 2000 К может быть получен нанокарбонитрид хрома состава $Cr_3(C_{0,8}N_{0,2})_2$ с нестабильной кристаллической структурой, перестраивающейся в карбидную при обжиге в инертной среде или азоте при температуре 1073 – 1273 К. 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. Гидродинамические и теплотехнические характеристики трехструйного прямоточного реактора для высокотемпературного синтеза тонкодисперсных материалов / Г.В. Галевский, М.Ф. Жуков, А.А. Корнилов и др. – Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1990. – 40 с.
2. Руднева В.В. // Вестник РАЕН: Проблемы развития металлургии в России. 2006. Т. 6. № 3. С. 18 – 30.
3. Галевский Г.В., Руднева В.В., Полях О.А. Технология плазметаллургического производства наноматериалов. Т. 1. Основы проектирования плазметаллургических реакторов и процессов. – М.: Флинта: Наука, 2008. – 228 с.
4. Ноздрин И.В., Галевский Г.В., Руднева В.В. – В кн.: Труды 3-й Всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2011. С. 60 – 64.
5. Ноздрин И.В., Ширяева Л.С., Терентьева М.А. – В кн.: Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2011. С. 464 – 467.
6. Руднева В.В., Юркова Е.К. Наноматериалы и нанотехнологии в производстве карбида кремния / Доп. том. Плазменный синтез и компактирование нанокарбида кремния. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2011. – 241 с.
7. Полях О.А., Руднева В.В. Плазметаллургическое производство карбида кремния для композиционного никелирования и хромирования. – М.: Флинта: Наука, 2006. – 188 с.

© 2012 г. И.В. Ноздрин, Л.С. Ширяева, В.В. Руднева
Поступила 9 апреля 2012 г.

УДК 669.141.247.2:669.181.422

*А.М. Амдур, А.Е. Пелевин, М. Лхамсурэн,
А.Л. Разницина, А.А. Мушкетов*

Уральский государственный горный университет

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТА НА ПАРАМЕТРЫ ЕГО МЕТАЛЛИЗАЦИИ*

Производство металлизированного сырья в мире из-за его известных преимуществ продолжает расти. При этом опережающими темпами развиваются технологии металлизации (SL/RN, Tisco и др.), использующие в качестве восстановителя уголь. Их доля в мировом производстве превысила 23 %. Как правило, для получения металлизированного сырья используют богатые концентраты из магнетитовых руд. Необходимо изучить, как влияет степень обогащения концентрата на скорость восстановления железа.

Обогащению подвергались железистые кварциты Сутарского месторождения (Россия) с общим содержанием железа в руде $Fe_t = 31 \%$, характеризующиеся весьма тонкой рудной вкрапленностью, и железные руды Тамирского месторождения с величиной $Fe_t = 41 \%$, которое является крупнейшим в Монголии. Для обогащения использованы как стандартные схемы при разной степени измельчения готового продукта, так и схема с доводкой рядового концентрата.

К основным технологиям повышения качества железных концентратов (получения суперконцентратов) относятся следующие: 1 – доизмельчение и магнитное обогащение; 2 – обратная катионная флотация; 3 – сепарация.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (международный контракт № 11-08-92207-Монг_а).