

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 ltd. 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 $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2$ 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 $\text{Fe}_t = 31 \%$, характеризующиеся весьма тонкой рудной вкрапленностью, и железные руды Тамирского месторождения с величиной $\text{Fe}_t = 41 \%$, 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).

рация в переменных магнитных полях; 4 – разделение по крупности с использованием тонкого грохочения.

В настоящей работе использована технология с применением сепарации в переменном магнитном поле. Железные концентраты с массовой долей железа 63 – 67 % получены в лабораторных условиях по схеме со стадийным измельчением и магнитной сепарацией с выделением хвостов после каждой операции измельчения продукта. Измельчение в мельнице выполнено в три стадии. Полученные продукты подвергались обесшламливанию и мокрой магнитной сепарации (два приема, напряженность магнитного поля $B = 0,12$ Тл, частота $f = 200$ Гц). При увеличении тонины помола концентрата в нем повышается массовая доля железа и снижается массовая доля диоксида кремния. Схема обогащения приведена на рис. 1.

Железный концентрат с массовой долей железа 69,5 % получен путем дообогащения концентрата с величиной $Fe_t = 67$ %.

Схема дообогащения (рис. 1) включала измельчение, обесшламливание и сепарацию в бегущем маг-

нитном поле (два приема, $B = 0,14$ Тл, $f = 200$ Гц). Использован сепаратор с бегущим магнитным полем из постоянных магнитов (сплава Nd – Fe – В) собственной конструкции. В нем вращается магнитная система внутри барабана (неподвижного или вращающегося с меньшими оборотами). При этом повышается частота смены полярностей магнитного поля, что приводит к вращению и разрушению магнитных флоккул и прядей, а также высвобождению из них запутавшихся немагнитных частиц и, как следствие, к повышению качества концентрата [1].

Разработанная технология обогащения позволила получить концентраты с высоким содержанием железа, характеристики которых после обогащения представлены ниже:

Концентрат	Массовая доля, %		Доля, %, фракции –0,045 мм
	Fe	SiO ₂	
1	63,07	8,18	87,0
2	65,00	7,48	91,3
3	67,00	5,34	97,1
4	69,50	2,47	99,8

Железные концентраты прошли обогащение магнитным методом, поэтому они представлены в основном сильномагнитным магнетитом. С увеличением массовой доли железа в исходном концентрате массовая доля магнетита в железосодержащей части обогащенного продукта возрастает и стремится к 100 %.

Кроме магнетита, в исследованных концентратах содержатся сростки магнетита с кварцем, гематит и амфиболы (в основном грюнерит). Несмотря на низкие магнитные свойства, эти вещества в незначительном количестве попадают в магнетитовый концентрат вследствие механического захвата их магнетитовыми флоккулами.

Массовая доля железа в магнетите составляет 71,7 – 72,4 % и близка к стехиометрическому значению. Гематит содержит в среднем 98 % Fe₂O₃.

Грюнерит относится к группе моноклинных амфиболов с повышенной (22,67 %) массовой долей железа. Содержание диоксида кремния в грюнерите исследуемой руды составляет 54,58 %.

Полученные материалы использованы для изучения влияния содержания железа Fe_t в концентратах на параметры его восстановления.

Образцы для опытов готовили в виде брикетов размером 21 × 6 мм прессованием смеси концентрата (крупность приведена выше), угля крупностью менее 0,1 мм и 5 % (по массе) бентонита как связующего крупностью –0,02 мм. В качестве восстановителя использовали бурый уголь Шарынгольского месторождения (Монголия), содержащий 77,07 % углерода, 7,67 % золы, 36,88 % летучих компонентов. Ранее было установлено, что этот уголь является эффективным вос-

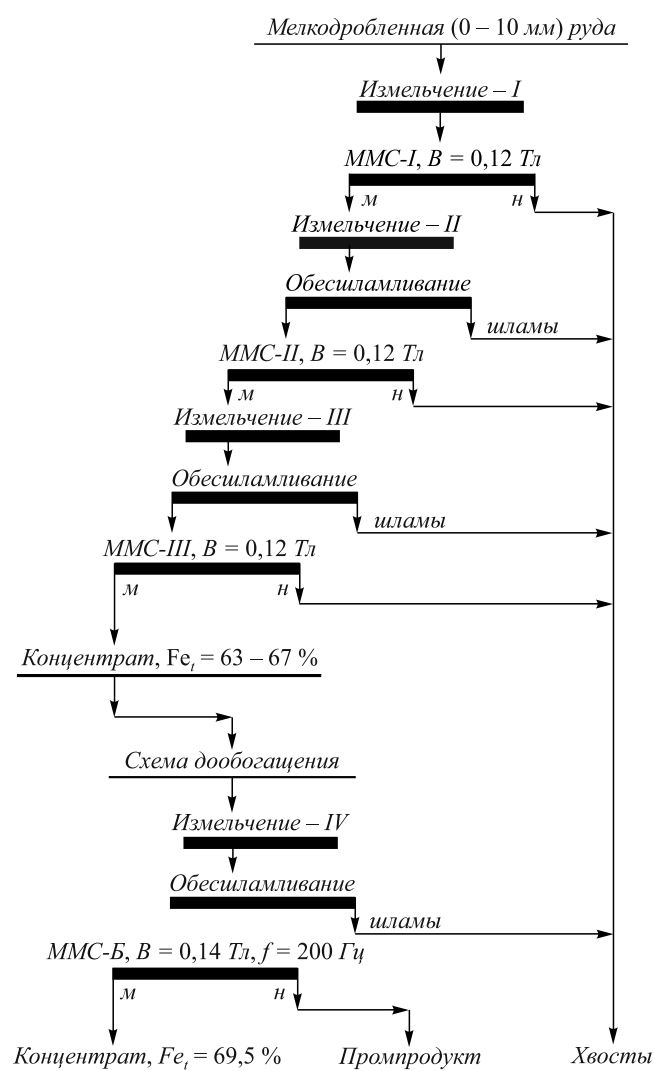


Рис. 1. Схема обогащения руд для получения суперконцентратов

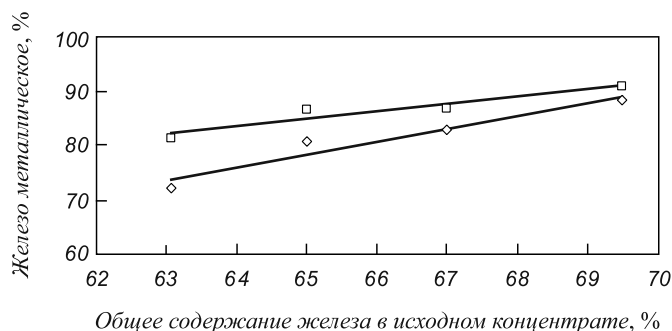


Рис. 2. Восстановление сутарского концентрата бурым углем:
 ◇ и □ – при температуре 1000 и 1100 °C

становителем [2]. Количество углерода в брикете равнялось стехиометрически необходимому для полного восстановления оксидов железа. Плотность образцов составляла около 2300 кг/м³. Для удаления влаги образцы прокачивали 2 ч при температуре 120 °C. Восстановительный обжиг нескольких образцов одновременно осуществляли в печи сопротивления, оборудованной регулятором температуры.

В результате восстановления углем получено губчатое железо со степенью металлизации, превышающей 92 %, и содержанием FeO в диапазоне 7,84 – 11,31 %. Количество железа Fe_г в продукте после металлизации концентрата с исходным содержанием Fe_г = 69,5 % при температуре 1100 °C без использования бентонита как связующего составляет 92 %. Это соответствует значениям, полученным для металлизированного сырья из лебединских суперконцентратов. Таким образом, показана возможность получения губчатого железа восстановлением концентратов углем, которое по своему составу отвечает принятым в мире требованиям к его использованию в качестве шихты в дуговых сталеплавильных печах.

Проведен корреляционный и регрессионный анализы первичных экспериментальных данных в координатах убыль массы – содержание железа в концентрате при различных температурах. Для представления результатов выбрали линейный вид полинома. Установлено, что коэффициент детерминации больше 0,9, что говорит о весьма сильной связи в соответствии со шкалой Чеддока между фактором и функцией. Стандартная ошибка предсказания составила ±1,2 %. Максимальная ошибка предсказания изменения массы после восстановления в диапазоне температур 900 – 1100 °C составляет 3,8 % при доверительной вероятности 95 %. Таким образом, установлено, что убыль массы и соответственно количество металлического железа растет с увеличением содержания железа в исходном

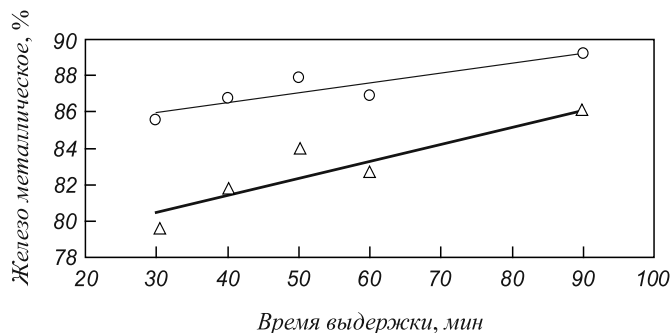


Рис. 3. Восстановление тамирского концентрата бурым углем:
 ○ и △ – исходное содержание железа 63,43 и 66,65 %

концентрате Fe_г по линейному закону и увеличивается с ростом температуры и времени процесса. Это подтверждается данными химического анализа, представленными на рис. 2 и 3, которые следует аппроксимировать линейными уравнениями. Для концентратов Сутарского месторождения

$$[Fe_m] = 2,3484[Fe_g] - 74,199 \text{ при температуре } 1000 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$[Fe_m] = 1,3587[Fe_g] - 3,2889 \text{ при температуре } 1100 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Выявленная зависимость связана с тем, что увеличение содержания железа в концентрате после обогащения сопровождается снижением в нем количества слабомагнитных железосодержащих силикатов, которые трудно восстанавливаемы. В суперконцентрате (Fe_г = 69,50 %), как показано выше, практически все железо находится в виде хорошо восстанавливаемого магнетита. Кроме того, обогащение методами магнитной сепарации сопровождается ростом его реакционной поверхности, что приводит к увеличению скорости восстановления.

Выводы. Показана возможность получения магнетитовых суперконцентратов с использованием сепарации в бегущем магнитном поле из железистых кварцитов с весьма тонкой рудной вкрапленностью. Экспериментально установлено, что с увеличением содержания железа в исследуемом материале скорость его восстановления углем растет.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пелевин А.Е. // Обогащение руд. 2007. № 3. С. 10 – 15.
2. Амдур А.М., Мунхтуул Л., Благин Д.В., Разницина А.Л. // Известия Академии наук Монголии. 2010. № 2. С. 41 – 48.

© 2012 г. А.М. Амдур, А.Е. Пелевин,
 М. Лхамсурэн, А.Л. Разницина, А.А. Мушкетов
 Поступила 13 марта 2012 г.