

А. А. УЛЬТАРАКОВА, М. А. НАЙМАНБАЕВ, М. И. ОНАЕВ, Г. К. МАЛДЫБАЕВ,
Н. Ш. АЛЖАНБАЕВА*

*АО «Центр наук о Земле, металлургии и обогащения», Алматы, *ult.alma@mail.ru*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ОБЖИГА И МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ НИЗКОТИТАНИСТЫХ ТИТАНОМАГНЕТИТОВ

Одними из основных стадий технологии комплексной переработки титаномагнетитов месторождения Масальское являются восстановительный обжиг и мокрая магнитная сепарация с целью максимального перевода железа и ванадия в металлизированную фракцию. В качестве твердого восстановителя использовали шубаркульский уголь и антрацит. Проведены опыты по твердофазному восстановительному обжигу масальского титаномагнетитового концентрата (ТМК) с шубаркульским углем в интервале температур от 600 до 1400 °С. Затем проведена мокрая магнитная сепарация огарка класса –0,1 мм при напряженности магнитного поля 200 эрстед. С повышением температуры обжига повышается степень металлизации от 2,4 до 93,0 %. Начиная с температуры 1200 °С образуется металлическая фракция +0,1 мм. При температуре 1300 °С среди фракции +0,1 мм выявляются частицы металла крупностью до 1–2 мм. С целью сравнения показателей восстановительного обжига ТМК с различными видами восстановителя были проведены опыты по обжигу масальского ТМК с антрацитом в интервале температур от 700 до 1400 °С. Огарки после измельчения до класса –0,1 мм подвергались мокрой магнитной сепарации при напряженности магнитного поля 200 эрстед. С увеличением температуры обжига увеличивается степень металлизации с 1,4 до 95,6 %. Начиная с температуры 1200 °С образуется металлическая фракция +0,1 мм. При температуре 1400 °С среди фракции +0,1 мм образуются частицы металла крупностью до 1 мм. В аналогичных условиях были проведены опыты по восстановительному обжигу ТМК с шубаркульским углем и добавлением соды в интервале температур 600–1400 °С. Огарки класса –0,1 мм подвергались мокрой магнитной сепарации. С увеличением температуры обжига степень металлизации железа возрастает с 3,8 до 91,4 %. Установлен температурный режим восстановительного обжига масальского ТМК: нагрев до 900 °С и выдержка в течение 60 мин, подъем температуры до 1450 °С и выдержка в течение 20 мин. Определен оптимальный состав шихты для обжига титаномагнетитового концентрата, %: 77,2 ТМК; 17,2 антрацита, 4 соды и 1,6 связующего. При этом степень металлизации железа составляет 98 %. Оптимальным параметром магнитной сепарации для эффективного разделения фракций является напряженность магнитного поля 200 эрстед.

Ключевые слова: титаномагнетит, металлическое железо, ванадий, восстановительный обжиг, огарок, магнитная сепарация

Введение. Рудные титаномагнетитовые концентраты (ТМК) по содержанию диоксида титана подразделяются на бедные (до 4 % TiO_2) и высокотитанистые (14–16 % TiO_2). Восстановительную плавку бедных ТМК с получением ванадиевого чугуна с 0,3–1,5 % V ведут в доменных печах (Россия, Китай) или руднотермических электропечах (ЮАР, Новая Зеландия). Ванадиевый чугун перерабатывают далее до стали дуплекс-процессом с получением ванадиевых шлаков.

В настоящее время в России ванадиевую продукцию получают доменной плавкой на Нижне-Тагильском металлургическом комбинате (НТМК) и Чусовском металлургическом заводе (ЧусМЗ) при переработке титаномагнетитов Качканарского месторождения. Содержание TiO_2 в агломерате 2,6 %, в доменных шлаках – 10–12 %, из которых титан не извлекают. Предприятие «ВанадийТулаЧерМет» перерабатывает ванадиевый шлак НТМК с получением пентаоксида ванадия и феррованадия.

Проплавка в доменных печах НТМК окатышей и агломерата, офлюсованных до основности 1,2–1,3

ед, показала, что при этом не устраняется одна из главных трудностей плавки титаномагнетитов – образование тугоплавких карбонитридов титана на поверхности кокса, в гарнисаже и в шлаковом расплаве. Заращение коксовой насадки и затрудненный транспорт продуктов плавки при выпуске приводят к снижению газопроницаемости столба шихты и неритмичной работе печей [1–3].

В связи с истощением запасов богатых железных руд титаномагнетиты станут основным источником железорудного сырья. Данные руды обладают рядом преимуществ – они легкообогатимы, содержат малое количество вредных примесей (фосфор и сера). К железорудному сырью относятся титаномагнетитовые руды, в которых содержание TiO_2 не более 2 %. Это Гусевогорское и Качканарское месторождения в России. Также к этой категории можно отнести титаномагнетитовые руды Теминбулакского (Республика Узбекистан), Масальского и Велиховского месторождений (Казахстан) [4].

С развитием технологии твердофазной металлизации рудогольных окатышей из железно-

рудного сырья вначале металлизацию проводили во вращающихся трубчатых печах (способ СЛ-РН, способ Круппа, способ завода «Сибэлектросталь») [5-6]. Основными недостатками способа были: высокая энерго- и фондоемкость; низкая (не более 85 %) степень металлизации железа в результате образования твердых растворов FeO с низшими оксидами титана; большая вероятность «закозления» печи; трудности магнитной сепарации спеков в результате прорастания тонкодисперсного железа в шлаковую фазу; разрушение окатышей в процессе перекачивания в печи. Для предотвращения разрушения окатышей и настылеобразования, снижения удельного расхода топлива и повышения производительности был внедрен процесс металлизации рудоугольных окатышей на конвейерной обжиговой машине колосникового типа с регулируемой по составу газовой атмосферой. Металлизация происходит при 1200-1250 °С за счет твердого углерода, нагрев – за счет сжигания природного газа и фильтрации теплоносителя через слой окатышей. В результате низкой температуры, степень металлизации не более 70 %, металлизированный продукт, минуя магнитную сепарацию, направляется в горячем виде на разделительную электроплавку.

Следующим этапом развития аппаратного оформления двухстадийной технологии плавки титаномагнетитов была разработка в ИМЕТ УрО РАН каскада из двух трубчатых печей, в первой из которых идет процесс металлизации, а во второй, короткой печи роторного типа – быстрый нагрев металлизированных окатышей до температуры выплавки железа и пиропластичности шлака (1300-1400 °С). Горячие газы из роторного типа печи используются для нагрева шихтовых материалов в восстановительной печи. Чугун из печи выпускается периодически, шлак – непрерывно через разгрузочный порог. Вероятность настылеобразования удастся снизить путем загрузки металлизированных окатышей на слой с быстрым их прогревом до температур выплавки чугуна, но полностью это явление исключить нельзя.

Для исключения спекания гранул и «закозления» печи с 90-х годов начал отработываться процесс получения губчатого железа (ГЖ) на пилотной установке печи с вращающимся подом (ПВП) в техническом центре фирмы «Midrex» в США (процесс FASTMET). Рудоугольные окатыши после сушки загружали на вращающуюся подину печи слоем в 1-3 окатыша, где они при температуре 1290-1345 °С за один оборот печи восстанавливались до железа на 85-95

%, частично науглероженного с образованием Fe_3C . [7,8].

Последний, наиболее перспективный, вариант двухстадийного процесса разработан японской компанией «Kobe Steel», названный ITmk-3 и являющийся комбинацией технологии FASTMET и электродуговой печи. Рудоугольные окатыши непрерывно загружают на углеродистую постель вращающегося пода карусельной печи, где они за один оборот проходят все стадии обработки: нагрев, металлизацию, шлакообразование, плавление, довосстановление, коагуляцию чугуна и охлаждение. Шлаковая фаза образуется и нагревается медленнее металлической и после достижения ею пиропластического состояния расплавленный восстановленный металл быстро коагулирует. Весь процесс длится около 12 минут. После затвердевания и охлаждения образуются так называемые «железные пельмени» (наггеты), которые выгружают через окно выдачи, грохочением отделяют от них оборотный уголь, измельчают, сепарируют, и чугун направляют в электроплавку на сталь. Наггетами считают чугунные гранулы диаметром более 2 мм, хорошим результатом – выход наггетов 100 % от загружаемого с шихтой железа. Выход, превышающий 100 %, говорит о наличии в наггетах примесей (углерода, шлака, легирующих элементов) [8].

Устойчивая тенденция увеличения выплавки высококачественной стали в электропечах и возрастания дефицита металлолома требуют вовлечения в производство его заменителей – железа прямого получения. Металлизация титаномагнетитов особенно перспективна в связи с содержанием в них ванадия, степень извлечения которого при внедоменной переработке почти в два раза выше, чем по схеме «доменная печь – конвертер» [9,10].

Цель данной работы – установление оптимальных температурно-временных условий восстановления Масальского концентрата, выбор новых составов и восстановителя, обеспечивающих при металлизующем обжиге и последующей магнитной сепарации селективность и полноту отделения железа от титаносодержащих соединений и шлаковых составляющих.

Методика проведения эксперимента. Объектом исследований являлся титаномагнетитовый концентрат (ТМК) Масальского месторождения, имеющий следующий состав, мас. %: 65,2 Fe; 1,1 Ti; 0,4 V; 3,17 SiO_2 ; 1,8 Al_2O_3 ; 1,1 MgO; 1,13 CaO; 0,082 K_2O ; 0,12 Mn; 0,15 Na_2O ; 0,089 P_2O_5 ; 0,046 SO_3 ; 0,025 ZnO; 0,077 Cr_2O_3 . В качестве углеродсодержащего восстановителя использовали антра-

цит и шубаркульский газовый уголь. Технические характеристики: антрацита, %: 87,0 С; 0,46 влага; 6,32 летучие; 6,22 зола; шубаркульского угля, %: 60,5 С; 3,84 влага; 24,76 летучие; 10,9 зола. В качестве связующего использовали мелассу (отход свеклосахарного производства) в количестве 1 % от массы концентрата, а в качестве флюса - кальцинированную соду марки «х.ч.». Из шихты готовили брикеты, которые формировались с помощью ручного таблетпресса. Полученные брикеты весом около 14,4 г имели цилиндрическую форму диаметром 15 мм, высотой 18 мм и обладали удовлетворительной прочностью за счет сушки при температуре 100-110 °С. Твердофазный восстановительный обжиг проводили в камерной печи фирмы «Kejia» (Китай). Нагрев, выдержку при заданной температуре и охлаждение печи проводили в атмосфере аргона. Режим проведения опытов в печи: нагрев до заданной температуры со скоростью 15 градусов в минуту, время восстановительного обжига 2 ч, время охлаждения печи около 3 ч.

При каждом опыте в графитовый тигель помещали по три брикета, сверху закрывали графитовой крышкой с отверстием для выхода газов и помещали в печь. После восстановительного обжига огарок измельчали и пропускали через сито 0,1 мм. Класс +0,1 мм был представлен металлизированной фракцией восстановленного железа. Класс -0,1 мм направляли на мокрую магнитную сепарацию.

Исследования по магнитной сепарации промпродуктов проводили на универсальном электромагните УЭМ-1Т, который предназначен для разделения минералов сухим и мокрым методами в магнитном поле. Прибор состоит из электромагнита с автотрансформатором и выпрямителем тока, помещенным в дюралюминиевый корпус. В комплект аппарата входят набор сменных полюсных наконечников, предназначенных для выделения сильно-, слабо- и среднемагнитных минералов, а также приставка для сепарации «мокрым» методом. Принцип действия прибора основан на разделении минеральных проб с различными магнитными свойствами с помощью электромагнитного поля, создаваемого электромагнитом. В зависимости от магнитной восприимчивости исследуемых минералов, устанавливалась определенная сила тока и тем самым создавалась необходимая напряженность поля между полюсными наконечниками магнита. Лучшие результаты по разделению промпродуктов были достигнуты при напряженности магнитного поля 200 эрстед.

Продукты карботермического восстановительного обжига масальского ТМК и огарки мо-

крой магнитной сепарации класса -0,1 мм исследованы методами химического и рентгенофлуоресцентного анализа.

Экспериментальная часть и обсуждение результатов. Проведены исследования твердофазного восстановительного обжига масальского титаномагнетитового концентрата с шубаркульским углем в интервале температур 600 - 1400 °С. Шихта состояла из 76 % ТМК, 23 % шубаркульского угля и 1 % связующего - мелассы. Результаты восстановительного обжига 8 проб показаны на рисунке 1, кривая 1. Установлено, что с ростом температуры восстановительного обжига повышается степень металлизации от 1,4 до 93,0 %. Степень восстановления железа рассчитывалась по формуле $e = \text{Fe}_{\text{восст}} / \text{Fe}_{\text{исх}} \times 100 \%$, где $\text{Fe}_{\text{восст}}$ - содержание восстановленного железа в обожженном брикете, $\text{Fe}_{\text{исх}}$ - содержание железа в исходном брикете. Начиная с температуры 1200 °С образуется металлическая фракция +0,1 мм, при температуре 1300 °С среди фракции +0,1 мм обнаруживаются частицы металла крупностью 1-2 мм.

Также были проведены 8 опытов твердофазного восстановительного обжига масальского ТМК с антрацитом в интервале температур 700 - 1400 °С. Шихта состояла из 78,5 % ТМК, 19,5 % антрацита и 2 % связующего - мелассы. Результаты восстановительного обжига с антрацитом показаны на рисунке 1, кривая 2. Выход класса +0,1 мм при обжиге концентрата с антрацитом при 1400 °С увеличился на 35 % по сравнению с выходом класса +0,1 мм при температуре обжига 1200 °С. Видно, что с увеличением температуры обжига растет степень металлизации с 1,2 до 95,6 %. Начиная с температуры 1200 °С образуется металлическая фракция +0,1 мм, при температуре 1400 °С среди фракции +0,1 мм выявляются частицы металла до 1 мм.

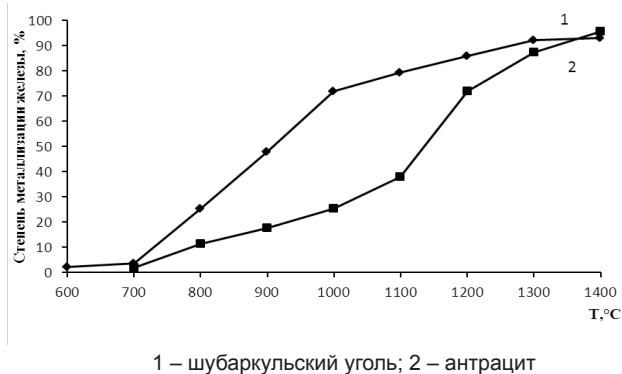


Рисунок 1 – Зависимость степени металлизации железа от температуры при восстановительном обжиге масальского ТМК с шубаркульским углем и антрацитом

При сравнении зависимостей степени металлизации железа от температуры при восстановительном обжиге масальского ТМК с шубаркульским углем и антрацитом, можно наблюдать, что восстановление оксидов железа шубаркульским углем идет лучше по сравнению с антрацитом в интервале от 700 до 1300 °С. По-видимому, в восстановлении железа при низких температурах участвуют летучие составляющие шубаркульского угля. По мере повышения температуры восстановительного обжига ТМК с антрацитом степень металлизации железа выравнивается в районе 1200-1300 °С, а при 1400 °С степень металлизации с антрацитом составляет 95,6 %.

Известно, что добавка карбоната натрия, как щелочного агента, является катализатором процесса восстановления оксида железа. Влияние соды может быть связано, во-первых, с образованием поверхностных химических соединений, облегчающих акты адсорбционно-химического взаимодействия на поверхности оксида и железа, во-вторых, идет процесс шлакообразования с внедрением атомов или ионов натрия в решетку реагирующих веществ, позволяющих коагулировать железо при восстановлении в более крупные частицы.

Для сравнения зависимостей восстановления масальского ТМК от температуры при добавлении соды были проведены аналогичные опыты с шубаркульским углем и антрацитом. Опыты проводились в интервале температур от 600 до 1400 °С. Шихта состояла из 72,0 % ТМК, 21,4 % шубаркульского угля, 5,6 % Na_2CO_3 (соды) и 1 % связующего - мелассы. Результаты восстановительного обжига масальского титаномагнетитового концентрата шубаркульским углем с добавлением Na_2CO_3 показаны на рисунке 2, кривая 1.

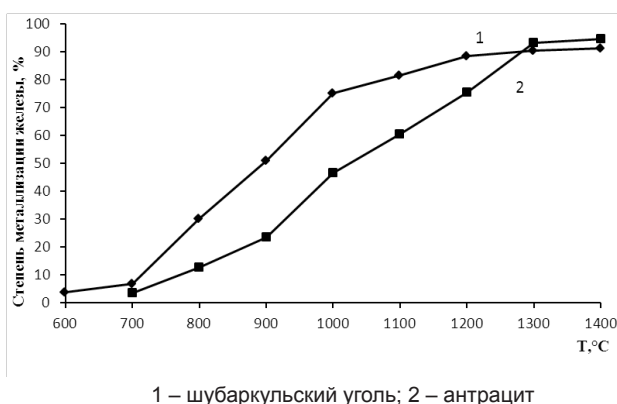


Рисунок 2 – Зависимость степени металлизации железа от температуры при восстановительном обжиге масальского ТМК с шубаркульским углем и антрацитом при добавлении соды

Металлизация железа при 600 °С составляет 3,8 %, с увеличением температуры обжига в интервале от 700 до 1100 °С резко возрастает степень металлизации железа с 6,8 до 81,7 %. Это вероятнее всего происходит благодаря высокому содержанию летучих в шубаркульском угле и каталитическому действию соды, что подтверждают результаты термогравиметрического анализа. При температурах от 1200 до 1400 °С степень металлизации практически остается на одном уровне и составляет 88,5-91,4 %.

Шихта для проведения опытов по твердофазному восстановительному обжигу масальского ТМК с антрацитом и добавлением соды состояла из 74 % ТМК, 19 % антрацита, 6,0 % соды (Na_2CO_3) и 1,0 % связующего - мелассы. Зависимость степени металлизации от температуры показана на рисунке 2, кривая 2. По результатам видно, что с увеличением температуры обжига от 700 до 1200 °С увеличивается степень металлизации железа с 3,5 до 75,37 % с уменьшением выхода огарка. Класс +0,1 мм стал появляться при температуре 1050 °С и с повышением температуры некоторые частицы восстановленного железа имели размер 2-3 мм. При температурах 1300-1400 °С степень металлизации составила 93,4-94,7 % соответственно. При высоких температурах, начиная с 1000 °С, антрацит начинает интенсивнее восстанавливать железо из титаномагнетита, также сказывается каталитическое действие соды. Начиная с температуры 1100 °С появились более крупные скоагулированные частицы железа сферической формы, а при температуре 1400 °С получили металлические гранулы диаметром 4-7 мм. По всей вероятности при температуре 1200 °С и выше восстановление шихты обеспечивает диффузию щелочного агента и восстановителя на всю глубину брикета. При этом происходит восстановление оксидов железа до металлического состояния с образованием частично восстановленной реакционной массы в виде спека и формирование глобул металлического железа. Образовавшаяся оксидная фаза более хрупкая по сравнению с глобулами металлического железа.

Мокрую магнитную сепарацию проводили с классом -0,1 мм огарков при напряженности магнитного поля 200 эрстед. Магнитная сепарация при восстановительном обжиге масальского ТМК шубаркульским углем показала, что с ростом температуры обжига извлечение ванадия в магнитную фракцию возрастает, а содержание титана, начиная с температуры 1100 °С, увеличивается в

немагнитной фракции. Это связано с тем, что до 1100 °С происходит разрушение ильменита. При 1300 °С извлечение железа в магнитную фракцию составило 98,5, титана – 25,7, ванадия – 97,0 %; в немагнитную фракцию железа – 1,5, титана – 74,3, ванадия – 3,0 %.

По результатам мокрой магнитной сепарации огарков класса - 0,1 мм восстановительного обжига масальского ТМК с антрацитом определено, что с увеличением температуры обжига от 1200 до 1400 °С содержание ванадия в магнитной фракции повышается с 0,41 до 0,46 %, а в немагнитной фракции с 0,86 до 0,93 % соответственно. Извлечение ванадия в магнитную фракцию составляет 71,07-84,7 %, а в немагнитную фракцию 15,3-15,53 %.

Магнитную сепарацию огарков класса -0,1 мм восстановительного обжига масальского ТМК с шубаркульским углем и добавлением соды проводили при напряженности магнитного поля 200 эрстед. Результаты распределения железа и ванадия по продуктам мокрой магнитной сепарации класса -0,1 мм огарков после восстановительного обжига ТМК с шубаркульским углем и добавлением соды приведены в таблице 1. При повышении температуры обжига заметно уменьшается масса огарка, содержание железа и ванадия в магнитной фракции растет, а в немагнитной фракции уменьшается. Совместно с железом в металлическую и магнитную фракции переходит и ванадий.

Проведена мокрая магнитная сепарация огарков класса -0,1 мм восстановительного обжига масальского ТМК с антрацитом и добавкой соды, полученных в интервале температур 700-1400 °С. Магнитная сепарация проводилась при напряженности магнитного поля 200 эрстед. Результаты распределения железа и ванадия по продуктам магнитной сепарации огарков класса -0,1 мм, полученных после восстановительного обжига ТМК с антрацитом и добавлением соды, показаны в таблице 2. При температурах 1000 и 1200 °С извлечение железа в магнитную фракцию составило 81,6 и 92,1 %, извлечение ванадия в магнитную фракцию составило 64,3 и 95,6 %, а в немагнитную фракцию - 35,7 и 4,4 % соответственно. При температурах 1300 и 1400 °С извлечение железа в магнитную фракцию составило 83,5 и 94,1 %, извлечение ванадия в магнитную фракцию составило 92,0 и 95,9 %, в немагнитную фракцию 8,0 и 4,1 % соответственно.

Таблица 1 – Результаты мокрой магнитной сепарации после обжига масальского ТМК с шубаркульским углем и добавлением соды

Наименование продуктов	Температура обжига, °С	Выход		Содержание, %		Извлечение, %	
		г	%	Fe	V	Fe	V
Магнит. фракция Немагн. фракция Итого: Огарок	600	29,3	95,1	44,15	0,33	99,45	95,52
		1,5	4,9	4,7	0,3	0,55	4,48
		30,8	100	42,22	0,32	100,0	100,0
Магнит. фракция Немагн. фракция Итого: Огарок	700	30,65	94,3	44,54	0,34	99,35	95,28
		1,85	5,7	5,2	0,3	0,65	4,72
		32,5	100	42,27	0,34	100,0	100,0
Магнит. фракция Немагн. фракция Итого: Огарок	800	28,66	93,65	45,66	0,35	99,1	94,7
		1,94	6,35	6,17	0,29	0,9	5,3
		30,6	100,0	43,15	34,62	100,0	100,0
Магнит. фракция Немагн. фракция Итого: Огарок	900	22,1	92,51	47,6	0,34	98,43	94,2
		1,79	7,49	9,4	0,05	1,57	5,8
		23,9	100,0	44,74	0,33	100,0	100,0
Магнит. фракция Немагн. фракция Итого: Огарок	1000	19,02	86,06	58,2	0,41	96,22	92,7
		3,08	13,94	14,1	0,2	3,78	7,3
		22,1	100,0	52,05	0,38	100,0	100,0
Магнит. фракция Немагн. фракция Итого: Огарок	1100	18,61	88,64	67,02	0,48	96,86	96,84
		2,38	11,36	16,65	0,12	3,14	3,16
		21,0	100,0	61,21	0,44	100,0	100,0
Магнит. фракция Немагн. фракция Итого: Огарок	1200	18,5	88,15	69,49	0,5	96,54	97,38
		2,48	11,85	18,5	0,1	3,46	2,62
		20,98	100,0	63,44	0,45	100,0	100,0
Магнит. фракция Немагн. фракция Итого: Огарок	1300	19,42	93,83	70,8	0,52	98,2	98,99
		1,28	6,17	19,7	0,08	1,8	1,01
		20,7	100,0	67,65	0,6	100,0	100,0
Магнит. фракция Немагн. фракция Итого: Огарок	1400	18,35	93,15	71,3	0,5	97,9	99,27
		1,35	6,85	20,8	0,05	2,1	0,73
		19,7	100,0	67,8	0,47	100,0	100,0

Таблица 2 – Результаты мокрой магнитной сепарации огарков после обжига масальского ТМК с антрацитом и добавлением соды

Наименование продуктов	Температура обжига, °С	Выход		Содержание, %		Извлечение, %	
		г	%	Fe	V	Fe	V
Магнит. фракция	700	39,5	85,8	50,3	0,28	85,95	73,82
Немагн. фракция		5,7	14,2	49,7	0,6	14,05	26,18
Итого: Огарок		40,2	100,0	50,21	0,32	100,0	100,0
Магнит. фракция	800	33,8	86,2	52,6	0,3	87,4	77,0
Немагн. фракция		5,43	13,8	47,5	0,56	12,6	23,0
Итого: Огарок		39,23	100,0	51,9	0,34	100,0	100,0
Магнит. фракция	900	26,9	63,6	57,3	0,35	64,75	64,3
Немагн. фракция		15,4	36,4	54,5	0,34	35,25	35,7
Итого: Огарок		42,3	100,0	56,3	0,35	100,0	100,0
Магнит. фракция	1000	30,12	75,5	67,6	0,31	81,6	64,3
Немагн. фракция		9,78	24,5	46,9	0,53	18,4	35,7
Итого: Огарок		39,9	100,0	62,5	0,36	100,0	100,0
Магнит. фракция	1100	29,91	80,4	67,9	0,30	86,9	71,94
Немагн. фракция		7,29	19,6	42,0	0,48	13,1	28,06
Итого: Огарок		37,2	100,0	62,82	0,33	100,0	100,0
Магнит. фракция	1200	30,28	82,4	67,12	0,51	92,1	95,6
Немагн. фракция		5,4	15,2	32,12	0,13	7,9	4,4
Итого: Огарок		35,68	100,0	61,8	0,45	100,0	100,0
Магнит. фракция	1300	28,08	88,5	59,96	0,52	83,5	92,0
Немагн. фракция		3,65	11,5	91,18	0,35	16,5	8,0
Итого: Огарок		31,73	100,0	63,55	0,5	100,0	100,0
Магнит. фракция	1400	28,4	87,0	66,96	0,6	94,1	95,9
Немагн. фракция		4,25	13,0	28,1	0,17	5,9	4,1
Итого: Огарок		32,65	100,0	61,9	0,54	100,0	100,0

Для повышения степени металлизации железа при обжиге и определения оптимального содержания соды в шихте была проведена серия опытов по твердофазному восстановительному обжигу масальского ТМК с антрацитом при тем-

пературе 1450 °С с различным количеством соды от 1,2 до 4,0 %.

Подбор температурного режима проведения обжига в печи был следующим: сначала нагревали до 900 °С и выдерживали в течение 60 мин, затем температуру поднимали до 1450 °С и выдерживали в течение 20 мин. Шихта состояла из 78,4 ТМК, 16,6 антрацита, 1,2-4,0 соды и 1,0 % связующего - мелассы. Результаты восстановительного обжига масальского титаномagnetитового концентрата с антрацитом и разным количеством соды при температуре 1450 °С приведены на рисунке 3. Опытами было установлено, что при температуре выше 1450 °С начинается плавление шлакообразующих и железо теряется, переходя в шлак, при этом степень металлизации железа снизилась на 3-5 %.

При повышении содержания соды в шихте с 1,2 до 4,0 % повышается степень металлизации с 85,5 до 98 %. Подобранный температурный режим восстановительного обжига позволил получить укрупненную металлическую фазу восстановленного железа. При содержании соды в шихте 4 % степень металлизации железа составляет 98 %. Содержание в металлизированной фракции, представленной классом +0,1 мм: железа - 89,2, титана - 0,22, ванадия - 0,53 %.

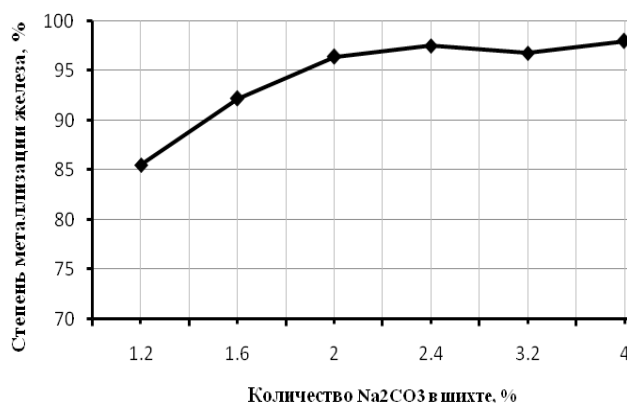


Рисунок 3 – Зависимость степени металлизации железа при восстановительном обжиге масальского ТМК с антрацитом от количества соды в шихте при температуре 1450 °С

Выход огарка -0,1 мм класса при содержании соды в шихте 1,2 % составил 12,97 %; при содержании соды в шихте 1,6 % составил 16,3 %; содержании соды в шихте 2,0 % составил 12,3 %; содержании соды в шихте 2,4 % составил 11,42 %; содержании соды в шихте 3,2 % составил 11,2 %; содержании соды в шихте 4 % составил 13,2 %. С

увеличением количества соды в шихте содержание титана в шлаковой части огарка увеличивалось.

На рисунке 4 показана металлическая фаза, получившаяся при восстановительном обжиге масальского ТМК с антрацитом и различным содержанием соды. При содержании соды в шихте 2 и 4 % железо хорошо скоагулировалось и выделялось в отдельную фазу.



а

б

а - 2,0 %, б - 4 % Na_2CO_3

Рисунок 4 – Металлизированная фаза железа после восстановительного обжига масальского ТМК с антрацитом при различном содержании соды в шихте, температура обжига 1450 °С

Результаты магнитной сепарации огарка класса -0,1 мм восстановительного обжига масальского концентрата с антрацитом и различным количеством соды при температуре 1450°С приведены в таблице 3.

С увеличением количества соды в шихте при обжиге, извлечение титана в немагнитную фрак-

цию при сепарации увеличивается, также повышается извлечение ванадия в магнитную фракцию.

Выводы. При твердофазном карботермическом восстановлении масальского титаномагнетитового концентрата и последующей магнитной сепарации огарка выявлены следующие закономерности: с увеличением температуры обжига увеличивается степень металлизации железа; добавление соды катализирует процесс восстановления масальского титаномагнетитового концентрата и одновременно увеличивает металлизацию железа; ванадий в основном переходит в металлическую фракцию.

Установлен температурный режим восстановительного обжига масальского титаномагнетитового концентрата: нагрев до 900°С и выдержка в течение 60 мин, подъем температуры до 1450°С и выдержка в течение 20 мин.

Определен оптимальный состав шихты для обжига титаномагнетитового концентрата, %: 77,2 ТМК, 17,2 антрацита, 4 соды и 1,6 связующего, при этом степень металлизации железа составляет 98 %. Выход металлических гранул от массы огарка составил 86,8%, а выход остатка, представленной классом -0,1 мм составил 13,2 %. Содержание металлических гранул, %: железа - 89,2, титана - 0,22, ванадия - 0,53.

Показано, что оптимальным параметром магнитной сепарации для эффективного разделения

Таблица 3 – Результаты мокрой магнитной сепарации огарков после обжига масальского ТМК с антрацитом и разным количеством соды при температуре 1450°С

Наименование продуктов	Количество соды Na_2CO_3 , %	Выход		Fe		Ti		V		Степень металлизации Fe, %
		г	%	Содержание, %	Извлечение, %	Содержание, %	Извлечение, %	Содержание, %	Извлечение, %	
Магнит. фракция	1,2	1,04	49,5	30,2	78,7	6,3	89,22	0,27	59,8	85,5
Немагн. фракция		1,06	50,5	8,0	21,3	4,7	10,78	0,17	40,2	
Итого:		2,1	100	18,9	100	22,02	100	21,95	100	
Магнит. фракция	1,6	1,3	52	35,4	81,2	4,6	51,5	0,4	68,4	92,2
Немагн. фракция		1,2	48	8,9	18,8	4,7	48,5	0,2	31,6	
Итого:		2,5	100	22,68	100	4,65	100	0,304	100	
Магнит. фракция	2,0	0,8	44,4	35,0	78,2	4,9	43,9	0,37	63,5	96,4
Немагн. фракция		1,0	55,6	7,8	21,8	5,0	56,1	0,17	36,5	
Итого:		1,8	100	19,88	100	4,95	100	25,88	100	
Магнит. фракция	2,4	1,07	57,2	32,0	83,4	5,2	63,5	0,46	75,5	97,5
Немагн. фракция		0,8	42,8	8,5	16,6	4,0	36,5	0,2	24,5	
Итого:		1,87	100	21,94	100	4,68	100	0,35	100	
Магнит. фракция	3,2	0,8	47,0	30,7	80,5	4,6	43,0	0,34	69,9	96,8
Немагн. фракция		0,9	53,0	6,6	19,5	5,4	57,0	0,13	30,1	
Итого:		1,7	100	17,93	100	5,02	100	0,23	100	
Магнит. фракция	4,0	0,85	41,5	32,4	79,9	5,0	34,6	0,32	69,4	98,0
Немагн. фракция		1,2	58,5	5,8	20,1	6,7	65,4	0,1	30,6	
Итого:		2,05	100	16,84	100	5,99	100	0,19	100	

фракций является напряженность магнитного поля 200 эрстед. В данных условиях при мокрой магнитной сепарации огарка класса -0,1 мм выход магнитной фракции составил 41,5%, в котором содержание железа составило 32,4 %, титана – 5,0 %, ванадия – 0,32 %, выход немагнитной фракции составил 58,5 %, в котором содержание железа – 5,8 %, титана – 6,7 %, ванадия – 0,1 %.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Леонтьев Л.И., Ватолин Н.А., Шаврин С.В., Шумаков Н.С. Пирометаллургическая переработка комплексных руд. – М.: Металлургия, 1977. – С. 432.
- 2 Зайко В.П., Жучков В.И., Леонтьев Л.И., Карноухов В.Н., Воронов Ю.И. Технология ванадийсодержащих ферросплавов. – М.: Академкнига, 2004. – 515 с.
- 3 Смирнов Л.А., Дерябин Ю.А., Шаврин С.В. Металлургическая переработка ванадийсодержащих титаномагнетитов. – Челябинск: Металлургия. Челябинское отделение, 1990. – 256 с.
- 4 Газалеева Г.И., Шихов Н.В., Сопина Н.А., Мушкетов А.А. Современные тенденции переработки титансодержащих руд // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР: тр. науч.-практич. конф. с междунар. участием и элементами школы для молод. ученых. – Екатеринбург, Россия, 3-5 июня 2015. – С. 32-39.
- 5 Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. Металлургия железа: учебник для вузов. – М.: Академкнига, 2007. – 464 с.
- 6 Усачев А.Б., Роменец В.А., Баласанов А.В. Управление процессом жидкофазного восстановления РОМЕЛТ // Черные металлы. – 2000. – №8. – С. 10-14.
- 7 Юсфин Ю.С., Данышин В.В., Базилевич Т.Н. Влияние содержания железа в связке на свойства окатышей // Сталь. – 1981. – № 3. – С. 9-11.
- 8 Леонтьев Л.И., Ватолин Н.А., Шаврин Н.С., Шумаков Н.С. Пирометаллургическая переработка комплексных руд. – М.: Металлургия, 1997. – 432 с.
- 9 Тлеугабулов С.М. Теоретические положения прямого производства стали восстановительной плавкой // Сталь. – 2003. – №8. – С. 18 – 21.
- 10 Рощин В.Е., Асанов А.В., Рощин А.В. Возможности двухстадийной переработки концентратов титаномагнетитовых руд // Электрометаллургия. – 2010. – №6, – С. 15-25.

REFERENCES

- 1 Leont'ev L.I., Vatolin N.A., Shavrin S.V., Shumakov N.S. *Pirometallurgicheskaya. pererabotka kompleksnykh rud* (Pyrometallurgical processing of complex ores). Moscow: Metallurgiya., 1977. 432 (in Russ.).
- 2 Zajko V.P., Zhuchkov V.I., Leont'ev L.I., Karnoukhov V.N., Voronov Yu.I. *Tekhnologiya. vanadijsoderzhashchikh ferrosplavov* (Technology of vanadium ferroalloys). Moscow: Akademkniga, 2004. 515 (in Russ.).
- 3 Smirnov L.A., Deryabin Yu.A., Shavrin S.V. *Metallurgicheskaya. pererabotka vanadijsoderzhashchikh titanomagnetitov* (Metallurgical processing of vanadium titaniferous magnetites). Chelyabinsk: Metallurgy. Chelyabinsk branch, 1990. 256 (in Russ.).
- 4 Gazaleeva G.I., Shikhov N.V., Sopina N.A., Mushketov A.A. *Sovremennye tendentsii pererabotki tiansoderzhashchikh rud* (Modern trends in the processing of titanium ore). *Perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroeniya s ispol'zovaniem zavershennykh fundamental'nykh issledovaniy i NIOKR: Tr. nauch.-praktich. konf. s mezhdunar. uchastiem i ehlementami shkoly dlya molodykh uchenykh* (Prospects of development of metallurgy and mechanical engineering with using results of completed fundamental researches: proceedings of sci.-pract. conf. with international participation and elements of school for young. Scientists) – Ekaterinburg, Russia, 3-5 June 2015. 32-39 (in Russ.).
- 5 Yusfin Yu.S., Pashkov N.F. *Metallurgiya zheleza* (Metallurgy of iron): *uchebnik dlya vuzov* (textbook for higher schools). Moscow: Akademkniga, 2007. 464 (in Russ.).
- 6 Usachev A.B., Romenets V.A., Balasanov A.B. *Upravlenie processom zhidkofaznogo vosstanovleniya ROMELT* (Managing the process of liquid-phase recovery ROMELT) *Chernye metally = Ferrous metals*. 2000. 8. 10-14 (in Russ.).
- 7 Yusfin Yu.S., Dan'shin V.V., Bazilevich T.N. *Vliyanie soderzhaniya zheleza v svyazke na svoystva okatyshej* (Influence of iron content in a bunch on pellet properties). 1981. 3. 9-11 (in Russ.).
- 8 Leont'ev L.I., Vatolin N.A., Shavrin N.S., Shumakov N.S. *Pirometallurgicheskaya pererabotka kompleksnykh rud* (Pyrometallurgical processing of complex ores). Moscow: Metallurgy, 1997. 432 (in Russ.).
- 9 Tleugabulov S.M. *Teoreticheskie polozheniya pryamogo proizvodstva stali vosstanovitel'noj plavkoj* (Theoretical position of direct production of steel by reduction smelting). *Stal' = Steel*. 2003. 8. 18–21 (in Russ.).
- 10 Roshchin V.E., Asanov A.V., Roshchin A.V. *Vozmozhnosti dvukhstadijnoj pererabotki koncentratov titanomagnetitovykh rud* (Prospects of two-stage processing of titaniferous magnetite ores concentrates) *Ehelektrometallurgiya = Electrometallurgy*. 2010. 6. 15-25 (in Russ.).

Түйіндеме

Темір мен ванадийді металдандырылған фракцияға барынша көп өткізу мақсатында Масальск кен орнының титан магнетиттерін кешенді өндеуде тотықсыздандырып күйдіру және сулы магнетитті айыру (сепарация) технологиялары негізгі сатылардың біреуі болып табылады. Зерттеу барысында жоғары тотықсыздандырғыш ретінде Шұбаркөл көмірі мен антрацит қолданылды. Масальск титанмагнетитті концентратын Шұбаркөл көмірімен қатты фазалық тотықсыздандырып күйдіру бойынша зерттеулер 600 °С-тан 1400 °С-қа дейінгі температура аралығында жүргізілді, содан кейін -0,1 мм іріліктегі күйіндіге 200 эрстед магнит өрісінде сулы магнитті айыру (сепарациясы) жүргізілді. Күйдіру температурасын 600 °С-тан 1400 °С-қа дейін жоғарылатқанда металдану дәрежесі 2,4-тен 93 %-ға дейін жоғарылады. 1200°С температурадан бастап ірілігі +0,1 мм болатындай металдық фракция пайда болды, ал 1300 °С температурада +0,1 мм фракциясынан 1-2 мм болатындай металл бөлшектері байқалды. ТМК-ны тотықсыздандырып күйдірудегі көрсеткіштерді салыстыру мақсатында 700 °С-тан 1400 °С температура аралығында тотықсыздандырғыш түрінде антрацит қолданылып зерттеулер жүргізілді. Күйіндіні 0,1 мм класқа дейін ұсатқаннан кейін 200 эрстед магниттік өрісінде сулы магнитті айырудан (сепарациядан) өткізілді. Температура жоғарылаған сайын 1,4-тен 95,6 %-ға дейін металдану дәрежесі көтерілді. 1200 °С температурадан бастап ірілігі +0,1 мм болатындай металдық фракция пайда болады, ал 1400 °С температура аралығында +0,1 мм фракциясынан 1-2 мм болатындай металл бөлшектері байқалды. ТМК-ны Шұбаркөл көмірімен және сода қосындысымен 600-1400°С аралығында тотықсыздандырып күйдіру бойынша

ұқсас жағдайларда зерттеулер жүргізілді. -0,1 мм кластағы күйінділер сулы магнетитті айырудан (сепарациядан) өткізілді. 600 °C-тан 1400 °C аралығында температураны жоғарылатқанда темірдің металдану дәрежесі 3,8-ден 91,4 %-ға дейін көтеріледі. Масальск ТМК-ның тотықсыздандырып күйдірудің температуралық режимі анықталды: температура 900°C-қа дейін көтеріліп 60 минут бойы ұсталды; температура 1450 °C-қа дейін көтеріліп, 60 минут аралығында ұсталды. ТМК-ны күйдіру үшін шикіқұрамның тиімді құрамы анықталды. Олар: ТМК-77,2 %, антрацит -17,2 %, сода-4 және 1,6 % байланыстырғыш. Сонымен қатар темірдің металдану дәрежесі 98%-ды құрайды. Фракцияларды тиімді бөлу үшін магнитті айырудың (сепарацияның) параметрлерінің бірі - 200 эрстед магнитті өріс кернеулігі болып табылады.

Түйін сөздер: титан магнетиті, металдық темір, ванадий, тотықсыздандырып күйдіру, күйінді, магнитті айыру (сепарация).

Summary

The main stages of technology for complex processing of titaniferous magnetites of deposit Masalskij are reduction sintering and wet magnetic separation to maximize of iron and vanadium transfer into metallic fraction. Shubarkul coal and anthracite were used as a solid reductant. Experiments on solid phase reductive roasting of concentrate of Masalskij titaniferous magnetite with Shubarkul coal were carried out at temperatures from 600 to 1400 °C. Then wet magnetic separation of cinder of class -0.1 mm at magnetic field strength 200 Oe was conducted. With increase of temperature during sintering the metallization degree increases from 2.4 to 93.0 %. Starting from 1200 °C metal fraction +0.1 mm was formed. Among fraction +0.1 mm metal particles with size 1-2 mm were revealed at temperature 1300 °C. To compare the parameters of reductive roasting of the titaniferous magnetite concentrate (TMC) with different types of reductants next experiments were conducted with anthracite as reductant in the temperature range from 700 to 1400 °C. After cinders grinding to class -0.1 mm they were subjected to wet magnetic separation at magnetic field strength 200 Oe. With increase of sintering temperature the metallization degree increases from 1.4 up to 95.6 %. Starting from 1200 °C metal fraction +0.1 mm was formed. Among fraction +0.1 mm metal particles with size 1 mm were formed at temperature 1400 °C. Experiments on TMC reductive roasting were carried out in same conditions by using Shubarkul coal with addition of soda in the temperature range 600-1400 °C. Sinters of class -0.1 mm were subjected to wet magnetic separation. With increasing sintering temperature from 600 up to 1400 °C degree of iron metallization increases from 3.8 up to 91.4 %. Temperature mode for reductive roasting of Masalskij TMC: heating to 900 °C and holding for 60 min, then raising the temperature up to 1450 °C and holding for 20 min. The optimum composition of the charge for sintering titaniferous magnetite concentrate, %: 77.2 TMC; 17.2 anthracite; 4 soda and 1.6 binder. At that a metallization degree of iron is 98%. Optimal parameters of magnetic separation for efficient division of fractions is the magnetic field strength of 200 Oe.

Keywords: titanium magnetite, metallic iron, vanadium, reduction roasting, cinder, magnetic separation

Поступила 30.12.2015