

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2023.i4.02>

Processing of low-quality manganese-containing raw materials to obtain pellets for production ferromanganese alloys. Review

A.Ye. Tastanova, Ye.I. Kuldeyev, S.S. Temirova*, G.Zh. Abdykirova, A.A. Biryukova

Satbayev University, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: s.temirova@satbayev.university

Abstract. Substandard ores and technogenic wastes can be considered as an additional source of raw materials due to the limited resources of mineral raw materials with a high content of manganese. The article presents an overview of studies intended to process low-quality manganese-containing raw materials by beneficiation of them with the production of manganese concentrates, agglomeration of manganese fines with the formation of pellets, and smelting of agglomerates into ferromanganese alloys. The main raw material sources of manganese are characterized. Manganese ores are divided into three main types - oxide, siliceous and carbonate ones. The method to beneficiate the raw material is chosen depending on the raw material type. The application areas of manganese alloys are described - they are used in the form of ferromanganese and ferrosilicomanganese to produce steel and cast iron in ferrous metallurgy; as an alloying metal in bronze, brass, most aluminum and magnesium alloys in non-ferrous metallurgy. The beneficiation processes for low-quality manganese-containing raw materials - substandard ores and technogenic wastes are considered. A promising direction in the beneficiation of ferromanganese ores is magnetic separation. The extraction of manganese from technogenic sources - ore fines, sludge tailings of processing plants is of great ecological and practical importance. Methods for agglomeration of manganese fines with the production of pellets, briquettes, the influence of the content of acidic and basic oxides, the composition of binder materials on the properties of pellets are described. Data on the influence of various factors on the manganese ferroalloy smelting process, the reduction of manganese ore pellets, and the phase transformations occurring during the process are specified.

Keywords: *manganese-containing industrial waste, beneficiation, pellets, smelting, alloys.*

1. Введение

Спрос на марганцевые сплавы в различных отраслях промышленности определяет развитие технологий переработки марганецсодержащего сырья.

Крупнейшими резервами марганцевого сырья обладают ЮАР, Австралия, Бразилия и Украина. В 2019 году мировая добыча марганцевой руды достигла 65.4 млн тонн сырой руды. Основными производителями товарной марганцевой руды и концентратов являются ЮАР, Китай, Австралия, Гана и Габон [1, 2].

Мировые ресурсы марганца подразделяются на три основные категории: оксидные, кремнистые и карбонатные руды [3]. Методы гравитационного разделения применяются для кремнистых руд и используются в промышленной практике в Индии и Бразилии. Минералы железа всегда встречаются как примесь во всех видах марганцевых руд, их удаляют с помощью различных процессов магнитной сепарации. Карбонатные руды, добываемые в Украине, Китае и Южной Африке, обогащаются, в основном, с помощью процессов гравитационной и магнитной сепарации.

При извлечении Mn и Fe из железомарганцевых руд установлено, что увеличение разницы в магнетизме, растворимости или плавкости имеет решающее значение для разделения металлов [4].

Предложена классификация, согласно которой марганцевые руды подразделяются на богатые ($> 3\%$ Mn, отношение Mn/Fe > 3), руды со средним содержанием

Mn ($15\% < Mn < 30\%$, отношение Mn/Fe < 3) и бедные ($< 15\%$ Mn).

Выбор процесса обогащения марганцевых руд зависит от природы руды: кремнистая, карбонатная или оксидная [3]. Для окисленных руд требуется обеспечить необходимое соотношение Mn/Fe, поскольку железистые руды с соотношением Mn/Fe ниже 1.5 не подходят для металлургической переработки. Основные заводы по обогащению марганцевой руды, такие как GEMCO в Австралии (Groote Eylandt Mining Company часть группы South 32) и COMILOG в Габоне (часть группы Eramet), используют методы гравитационного разделения, такие, как методы плотной среды и отсадка.

При производстве марганцевых ферросплавов от руды до готовых сплавов теряется порядка 50% марганца, образуется большое количество побочных продуктов: шлаки, отсевы мелких фракций рудного сырья и готовой продукции, шламы, пыли и ряд других материалов [5]. Так, с отвальными шламами процессов обогащения марганцевых руд теряется до 20% марганца, содержащего в руде.

Переработка отходов марганцевого производства имеет большое практическое и экологическое значение, так они представляют важный сырьевой источник марганца.

2. Применение ферромарганцевых сплавов

Марганец в основном используется в черной металлургии: в виде ферромарганца и ферросиликомарганца его

добавляют в сталь, чтобы повысить ее технические характеристики: ковкость, прочность, износоустойчивость [6]. Марганец необходим для процессов легирования, десульфурации, раскисления сталей. В цветной металлургии марганец используется как легирующий металл в составе бронзы, латуни, большинства алюминиевых и магниевых сплавов для улучшения их прочности и устойчивости к коррозии; при изготовлении сплава из марганца, меди и никеля, отличающегося высоким сопротивлением и востребованного в электротехнике. Силикомарганец (SiMn) применяется в основном в производстве стали в качестве источника кремния и марганца. Силикомарганец обычно содержит не менее 4% железа, более 30% марганца, более 8% кремния и не более 3% фосфора.

Мировое производство SiMn в 2019 году составляло 18.2 млн тонн. Крупнейшими странами-производителями являлись Китай, Индия, Украина [2]. Производство высокоуглеродистого ферромарганца в мире в 2019 году находилось на уровне 4.4 млн тонн. Лидирующие позиции занимали Китай, Индия и Япония.

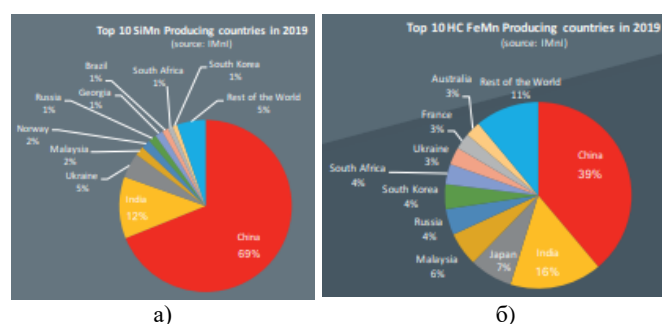


Рисунок 1. Страны-лидеры по производству силикомарганца (а) и высокоуглеродистого ферромарганца (б) [2]

Низкоуглеродистый силикомарганец представляет собой ферросплав следующего состава: не менее 55% марганца, 27% кремния, 4% железа, не более 0.1% фосфора, 0.1% углерода и 0.05% серы [6]. Низкоуглеродистый силикомарганец используется в производстве нержавеющей стали и специальных сортов углеродистой стали, таких, как сталь для ламинирования двигателей, содержание углерода в которых должно быть очень низким.

Таким образом, наибольшее применение среди марганцевых сплавов находит ферросиликомарганец. Потребление рафинированного ферромарганца определяется увеличением спроса на высокопрочную и специальную стальную продукцию, а также на использование его как заменителя металлического марганца.

3. Обогащение низкокачественного марганецсодержащего сырья

Растущий промышленный спрос на марганец делает актуальной разработку процессов извлечения марганца из низкосортных марганцевых руд и техногенных отходов [7-14].

Значительные различия в вещественном составе низкосортных марганецсодержащих руд и их минералогических характеристиках требуют выбора соответствующего процесса обогащения.

Ресурсы марганцевой руды с высоким содержанием железа становятся основным сырьевым источником марганца из-за сокращения запасов высокосортных марганце-

вых руд. Магнитная separация является перспективным направлением в обогащении железомарганцевых руд.

Для переработки низкосортной железосодержащей марганцевой руды с комплексным извлечением железа и марганца использована технология суспензионно-восстановительного обжига и магнитной separации (SRMS) [13]. Фазовые превращения минералов в процессе обжига исследовались с помощью рентгеноструктурного анализатора (XRD) и просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения (HRTEM). При оптимальных условиях восстановления: температура восстановления 680°C, время восстановления 30 мин, концентрация CO 20% и размер частиц -0.9 мм получен концентрат железа с содержанием железа 67.38% при извлечении 87.14% и марганцевый концентрат с содержанием марганца 30.51% при извлечении 87.02%.

Магнетит FeO·Fe₂O₃, преобразованный из гематита Fe₂O₃, обогащался в концентрат магнитной separации, а манганозит MnO, трансформированный из пиролюзита MnO₂ и браунита Mn₂O₃·MnSiO₃, – в хвосты магнитной separации. Предложенный процесс может обеспечить полную утилизацию компонентов железосодержащей марганцевой руды.

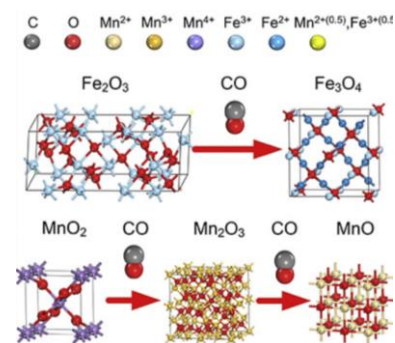


Рисунок 2. Реакция восстановления минералов [13]

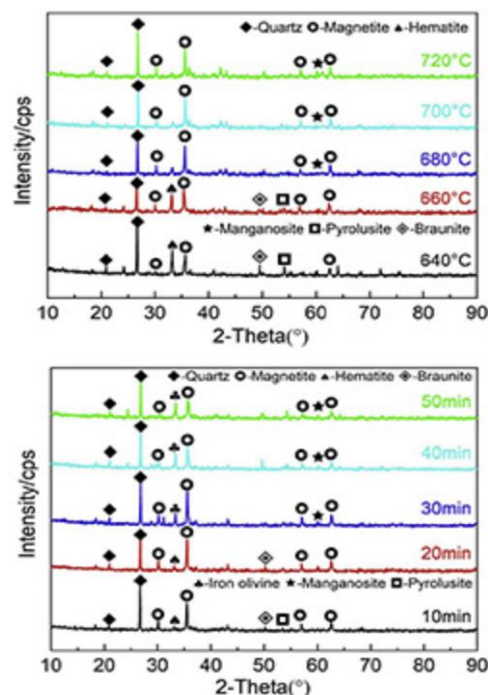


Рисунок 3. Фазовые превращения минералов железа и марганца [13]

Получены результаты по обогащению рудного сырья месторождения Чарагах (Иран), содержащего 17% пиролюзита, 78% кальцита и 4% кварца [16]. Посредством отсадочной машины получен пиролюзитовый концентрат с содержанием оксида марганца 20%, при последующей магнитной сепарации высокой интенсивности удалось повысить содержание MnO до 44.3% при извлечении 61.3%.

С применением магнитной сепарации после предварительного обжига марганцевой руды получен концентрат с достаточно высоким содержанием Mn ($> 44\%$ Mn) и соотношением Mn/Fe (> 7.5) [17]. Установлена корреляция между минералогией, содержанием Mn и Fe в руде и качеством полученного концентрата.

Предложен способ селективного восстановления низкосортной марганцевой руды с последующей магнитной сепарацией для получения марганцевого концентрата [18]. Оптимальные параметры: температура обжига 1050°C , время обжига 6 ч, крупность марганцевой руды 8-13 мм, отношение связанного углерода в угле к восстанавливаемому кислороду железа и марганца в марганцевой руде 2.5. При напряженности магнитного поля 100 мТл коэффициенты извлечения Mn (RMn), Fe (RFe) и общее содержание Mn (TMn) в немагнитном продукте достигают значений 71.00%, 93.60% и 56.20 масс. %, соответственно. Отношение Mn к Fe составляет до 10.85, что соответствует требованиям выплавки ферромарганцевых сплавов.

Обогащение двух видов индонезийских марганцевых руд с низким содержанием марганца было выполнено путем гравитационного разделения и восстановительно-обжигового процесса с последующей магнитной сепарацией для улучшения соотношения Mn/Fe [9]. Исследовано влияние размера частиц и температуры восстановительного обжига на процесс обогащения. Полученные продукты охарактеризованы с применением рентгенофлуоресцентного и рентгенодифракционного анализа. Установлено, что оксид марганца в форме пиролюзита (MnO_2) обогащается легче, чем в форме пироксмангита (MnSiO_3) и марганцевого гроссуляра ($\text{Ca}_{1.3}\text{Mg}_{0.1}\text{Mn}_{0.8}\text{Fe}_{0.8}\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$). Оптимальные результаты получены в результате восстановительного обжига низкосортной марганцевой руды в $-40+60$ меш при температуре 700°C с последующим процессом магнитной сепарации, соотношение Mn/Fe в низкосортной марганцевой руде повысилось с 1.39 до 4.0.

При добыче высококачественного марганцевого сырья, содержащего пиролюзит, образуются отходы – хвосты пиролюзита, которые представляют собой важный вторичный ресурс для извлечения марганца [19]. Разработан метод эффективного извлечения марганца из пиролюзитовых хвостов путем их обжига с отходом титанового производства – копперас ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), являющимся восстановителем и сульфатирующим агентом, с последующим выщелачиванием водой. Результаты показали, что 89.8% Mn может быть извлечено при оптимальных условиях процесса: размер частиц 200-300 меш, температура обжига 650°C , соотношение меди и пиролюзитовых хвостов 3:1.

Таким образом, выбор способа обогащения марганцевосодержащего сырья зависит от типа руды, минералогического и вещественного состава, дисперсности и структуры материала.

4. Способы агломерации марганцевой мелочи

При добыче, дроблении, обогащении и транспортировке богатых марганцевых руд около 30% сырья превращается в марганцевую рудную мелочь (-10 мм) с низким содержанием марганца [5].

Мелкие частицы марганцевой руды, образующиеся на различных этапах переработки марганцевых руд, не могут непосредственно использоваться в печах при производстве ферросплавов, так как они могут нарушить поток CO- и CO₂-газов через шихту, что приводит к снижению степени предварительного восстановления марганцевых соединений. Поэтому мелкие фракции должны быть агломерированы в более крупные куски, чтобы обеспечить равномерный поток газа. Это может быть достигнуто с помощью различных процессов.

Мелкие марганцевые руды (концентраты) и шламовые отходы подвергают окусковыванию с получением агломератов, брикетов и окатышей. Для получения окатышей обычно используют некондиционный концентрат мелкой фракции, в состав шихты также вводят некоторое количество различных видов связующих компонентов.

Исследованы плавящиеся и восстановительные свойства агломерата и окатышей, а также эффект добавления таких флюсов, как доломит и кварц [20]. Установлено, что повышенное содержание кислотных оксидов снижает температуру плавления и впоследствии увеличивает скорость восстановительных процессов.

Проведен сравнительный анализ основных геометаллургических характеристик кусковой руды из рудника Азул (Бразилия) и окатышей, изготовленных из мелких частиц, образующихся при обогащении этой кусковой руды [21]. Отмечено, что в окатышах содержание оксидов марганца больше, чем в кусковой руде. В окатышах явления дезинтеграции горячих и холодных частиц минимальны по сравнению с явлениями, обнаруженными в кусковой руде. Кусковая руда может быть эффективно восстановлена в твердом состоянии, в то время как большая часть марганцевых минералов в окатышах уже восстановлена до MnO. Сделан вывод, что окатыши могут использоваться в качестве источника марганца и действовать как агенты, способствующие увеличению проницаемости руды.

Получены окатыши класса до 6.4 мм, который подвергали восстановительному магнетизирующему обжигу при $820-850^{\circ}\text{C}$, доизмельчали до крупности -0.147 мм и проводили магнитную сепарацию, затем окомковывали в тарельчатом грануляторе с добавкой в качестве связующего бентонита. Окатыши сушили, обжигали при температуре 1300°C и охлаждали. После отсева мелочи на плавку направляли окатыши класса 6.4-19.0 мм, которые по физическим свойствам удовлетворяли требованиям ферросплавного производства.

Описаны консолидационные свойства агломератов высокожелезистых марганцевых руд с естественной основностью [22]. Установлено, что для спекания руды с высоким содержанием Fe и Mn требуется высокая дозировка коксовой мелочи (около 9.9 масс. %). Методами рентгенофазового анализа (XRD) и сканирующей электронной микроскопии с элементами полуколичественного анализа (SEM-EDS) показано, что основные минеральные фазы в агломератах включают оксиды Fe-Mn ($\text{Fe}_x\text{Mn}_{3-x}\text{O}_4$), ферротейфрайт ($\text{Fe, Mn}_2\text{SiO}_4$), Ca-, Al-, Mn-,

железосодержащие силикатные расплавы, небольшое количество гаусманнита (Mn_3O_4) и свободного кварца (SiO_2). Оптическая микроструктура и СЭМ-изображения показали, что оксиды Fe-Mn и силикатные расплавы, содержащие Ca, Al, Mn, Fe, и частицы ферротейфрита тесно взаимосвязаны друг с другом. Образование оксидов Fe-Mn и ферротейфрита способствует повышению прочности спекания.

Характеристики и поведение при прокаливании низкосортной марганцевой руды были изучены с помощью методов рентгенофлуоресцентного анализа (XRF), ex-situ XRD, in-situ XRD и SEM-EDS [23]. Эксперименты по прокаливанию проводились при температуре не выше $900^\circ C$ в атмосфере воздуха и аргона. Доминирующими механизмами прокаливания являются термическое разложение и реактивная диффузия. Атмосфера и присутствие других элементов сильно влияют на реакции прокаливания Mn сырья. Биксбиит и гематит реагируют с гаусманнитом, магнетитом и более сложными фазами.

Исследованы превращения низкосортной марганцевой руды при обжиге на воздухе при температурах до $1200^\circ C$ с применением методов XRD и TGA-DTA [24]. Выявлено, что MnO_2 превращается в низший оксид Mn_5O_8 при $500^\circ C$, а затем в биксбиит (Mn_2O_3) при $600^\circ C$. Далее биксбиит переходит в гаусманнит (Mn_3O_4) при $800^\circ C$. Повышение температуры обжига до $900^\circ C$ индуцирует реакцию между гематитом и гаусманнитом и приводит к образованию небольшого количества твердого раствора ферритной шпинели $MnFe_2O_4$. При повышении температуры до $1000^\circ C$ происходит образование твердого раствора браунита (Mn_7SiO_{12}), который разлагается до родонита ($MnSiO_3$) при $1200^\circ C$.

Установлено влияние основности (отношение CaO/SiO_2) и содержания MgO на металлургические характеристики окатышей бразильского спекулярита [25]. Гранулы с различной основностью (от 0.12 до 1.20) и содержанием MgO (от 0.08% до 3.0%) подвергали испытаниям на RI (индекс восстанавливаемости) и RSI (индекс уменьшения набухания). С увеличением основности или содержания MgO значения RI и RSI улучшались. В диапазоне основности ниже 0.20 или выше 0.80 гранулы демонстрировали низкие значения RSI. В диапазоне основности от 0.20 до 0.80 происходило аномальное набухание, RSI превышал 20%, что объясняется появлением большего количества шлаков с низкой температурой плавления. При производстве окатышей с использованием бразильского спекулярита рекомендовано исключить для композиций основность от 0.20 до 0.80.

Проведено сравнение различных образцов мелкозернистой марганцевой руды для последующего производства агломератов способом спекания [26]. Анализ физико-химических свойств образцов марганцевой руды из Боснии (1) и Герцеговины (2) показали, что гранулометрия образцов влияет на их химический состав. Марганцевый агломерат 1 подходит для дальнейшего использования в производстве $FeSiMn$ с точки зрения низкого содержания фосфора и подходящего фазового состава, агломерат 2 из-за высокого содержания SiO_2 не соответствует по прочностным характеристикам.

При агломерации мелочи марганцевого сырья расходуется значительное количество кокса. Для уменьшения расхода кокса рекомендуется частичная замена его на углеводородсодержащие материалы [27, 28]. Проведены

исследования по агломерации марганцесодержащего сырья при соотношении кокса и нефтебитуминозной породы 1:1 и 1:2.

Агломераты, как спеченные, так и брикеты, часто используются в качестве сырья в печи с погруженной дугой, производящей ферромарганец. Известно положительное влияние агломератов на структуру потока газа, а также как охлаждающих агентов.

Таким образом, окатыши в качестве шихты доменной печи обладают следующими преимуществами: однородный размер и физическая прочность. Металлургические характеристики окатышей играют важную роль в снижении расхода кокса и удельного расхода электроэнергии, повышении производительности доменной печи и извлечении марганца. На качество окатышей влияет природа руды или концентрата, связанная с ними пустая порода, тип и количество добавляемых флюсов, и их последующая обработка. Эти факторы приводят к изменению физико-химических свойств сосуществующих фаз и их распределения при отверждении гранул. В технологии производства ферромарганца и силикомарганца применяют также предварительный подогрев шихтовых материалов, что обеспечивает условия для эффективного восстановления марганца и улучшает экономические показатели процесса.

5. Процесс плавки агломератов

Тонкодисперсное марганцевое сырье невозможно плавить непосредственно в печи с погруженной дугой, так как мелкие частицы будут препятствовать равномерному прохождению газа через шихту. Низкая газопроницаемость шихты приведет к снижению степеней предварительного восстановления руды и увеличению углеродоемкости и энергоемкости процесса. Для использования мелочи марганцевой руды ее агломерируют в агломераты, окатыши или брикеты.

Исследованы плавящиеся и восстановительные свойства агломерата и окатышей, эффект добавления флюсов, таких, как доломит и кварц [20]. Установлено, что добавление кварца снижает температуру плавления из-за образования легкоплавких силикатов марганца. Высокое содержание кварца также приводит к снижению энергии активации процессов плавления и восстановления.

Доломит оказывает противоположный эффект, повышая температуру плавления. Энергия активации повышается с увеличением содержания доломита, что приводит к более медленному восстановлению. Гранулы с естественным высоким содержанием CaO и MgO также имеют низкую скорость плавления/восстановления. Агломерат с высоким содержанием SiO_2 имеет самую высокую скорость плавления и восстановления среди исследованных сырьевых материалов.

Высокое содержание кислотных оксидов приводит к снижению температуры плавления и увеличению количества жидкой фазы, доступной для восстановления. Наличие легкоплавких силикатных и алюминатных фаз в сырье приводит к снижению температуры плавления и повышению скорости восстановления соединений марганца в большей степени, чем SiO_2 , добавляемый в шихту.

С использованием высокотемпературной углеродной трубчатой печи исследовано восстановление окатышей марганцевой руды, содержащих углерод [29]. Результаты

экспериментов показали, что процесс восстановления металлов происходит в две стадии: скорость взаимодействия на первой стадии определялась химическими реакциями между FeO, MnO и углеродным восстановителем, энергия активации составляла 28.85 кДж/моль. На второй стадии, когда углеродный восстановитель заменялся CO, скорость реакции регулировалась диффузией CO в твердые продукты, и соответствующая энергия активации составляла 86.56 кДж/моль. Скорость реакции второй стадии была меньше, чем первой.

Высокая пористость угольных окатышей влияет на механическую прочность и степень предварительного восстановления, в то время как форма и размер углеродистых окатышей оказывают сильное влияние на сегрегацию и газопроницаемость при восстановлении руды.

Изучена реакционная способность египетских марганцевых руд для использования в производстве ферромарганцевых сплавов в электродуговой печи с погруженным [30]. Установлено, что основными минералогическими фазами трех руд являются пиролюзит MnO_2 и гематит Fe_2O_3 . Определена пористость выбранных марганцевых руд. Реакционная способность руд определялась путем их предварительного восстановления смесью газов CO и CO_2 при 900°C и 1100°C с использованием термовесов. Восстановленные руды исследовали с помощью рентгенофазового анализа и сканирующего электронного микроскопа. Результаты показали, что пиролюзит в рудах с высоким и средним содержанием марганца полностью превращается в MnO при 1100°C, в рудах с низким содержанием марганца формируются MnO и Mn_3O_4 . Следовательно, руды с высоким и средним содержанием MnO_2 , как более реакционноспособные, востребованы в производстве высокоуглеродистого ферромарганца.

Железистые марганцевые руды содержат высокие концентрации железа и имеют низкое соотношение Mn/Fe и не подходят для производства силикомарганца стандартного качества [31]. Термохимическое моделирование процесса плавки силикомарганца с использованием рудной смеси из железомарганцевой руды (60 мас. %) и шлака производства высокоуглеродистого ферромарганца (40 мас. %) успешно предсказало химический состав шлака и его влияние на распределение Mn и Si между шлаком и сплавом.

Сплав силикомарганца SiMn является наиболее востребованным среди марганцевых сплавов. Силикомарганец получают путем совместного плавления в погружной электродуговой печи источников кремния, марганца, железа и углеродсодержащего восстановителя, обычно угля и кокса [6]. Основными источниками марганца являются марганцевая руда и железомарганцевый шлак, являющийся побочным продуктом производства ферромарганца. Источниками кремния являются природный кварц (речной гравий) или шлак, закупаемый у производителей ферросилиция. Сырье объединяется в шихту (которая может также включать древесную щепу, доломит и флюс) и вводится в печь, где система электрического трансформатора подает сильнооточный низковольтный ток в шихту через углеродные электроды. Заряд нагревается до температуры 1300-1400°C. Примеси из руды или других источников марганца высвобождаются и образуют шлак, который поднимается вверх печи и плавает поверх расплавленного силикомарганца.

После плавки расплавленный силикомарганец и шлак удаляют («выпускают») из печи. Расплавленный силикомарганец заливают в большие формы (так называемые «отливы»), где он охлаждается и затвердевает. После того, как сплав затвердеет, кокилы опорожняют, а сплав измельчают на мелкие кусочки и просеивают до достаточно однородных размеров. На рисунке 4 представлен основной процесс производства силикомарганца и ферромарганца на заводе Eramet Marietta.

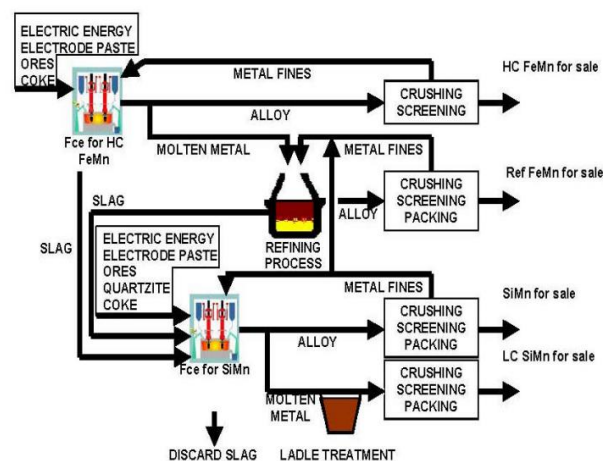


Рисунок 4. Технологическая схема [6]

Силикаты марганца, образующиеся в процессе предварительной обработки марганцевых руд, являются основными соединениями для получения SiMn [32]. Предполагается, что марганец и кремний в силикатах восстанавливаются углеродом до Mn_7C_3 и SiC, соответственно, а затем карбиды взаимодействуют с образованием сплава. Синтезирован $MnSiO_3$, а затем с применением методов рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской фотоэмиссионной спектроскопии и термодинамического анализа исследована реакция взаимодействия силиката марганца с углеродом и предложен механизм восстановления $MnSiO_3$. Показано, что $MnSiO_3$ сначала был восстановлен до карбидов марганца и SiO_2 , а затем SiO_2 был восстановлен карбидами с образованием сплава SiMn. Промежуточный продукт Mn_7C_3 играет решающую роль, поскольку SiO_2 легче восстанавливается расплавленным Mn_7C_3 , чем углеродом. Кроме того, выявлено разложение сплава SiMn до керамики SiC при 1700°C, что свидетельствует о хрупкости промышленного продукта из сплава SiMn.

Изучено каталитическое действие Na_2CO_3 на восстановление железомарганцевой шпинели ($MnFe_2O_4$) с использованием биоугля в качестве восстановителя [33]. Термодинамический анализ показал, что $MnFe_2O_4$ можно восстановить до MnO и Fe при 500-700°C. Экспериментально установлено, что железомарганцевая шпинель подвергалась ступенчатому восстановлению при 1050°C в течение 30 мин. Эффективность восстановления была значительно улучшена при добавлении 5 мас. % Na_2CO_3 , о чем свидетельствует более высокая степень металлизации железа. Добавление Na_2CO_3 также привело к снижению начальной температуры реакции восстановления примерно на 200°C. Расчеты показали, что в результате реакции между Na_2CO_3 и кластером C_4 из биоугля на поверхности Na_2CO_3 образуются кислородные вакансии.

Затем эти вакансии заполняются атомами кислорода CO_2 , образуя CO , который десорбировался с поверхности Na_2CO_3 до того, как он участвовал в восстановлении. Создавая кислородные вакансии в результате реакции с углеродом, Na_2CO_3 играет каталитическую роль в процессе восстановления.

Рассмотрены особенности технологии выплавки силикомарганца в шахтной рудно-термической печи, распределение токов, температурный и шлаковый режимы [34]. Предложен механизм восстановления марганца и кремния, в котором ведущую роль играют образующиеся в коксовом слое комплексы, состоящие из капель высокоуглеродистого расплава Fe-C-Mn и заключенных внутри них мелких частиц углеродистого восстановителя. Показано, что при прохождении таких капель-комплексов через слой шлакового расплава осуществляется довосстановление марганца и кремния из шлака. Проведены промышленные испытания полукокса при выплавке ферросиликомарганца в печах РКО-25 на Таразском металлургическом заводе (Казахстан) и заводе Geoferrmetal (Грузия), которые показали высокую технико-экономическую эффективность применения полукокса взамен 50% коксового орешка.

В промышленной практике для плавки ферросплавов, в основном, применяют доменный кокс и отходы, образующиеся при его сортировке. Одним из таких отходов является коксовый орех, который применяется в качестве восстановителя [35]. Исследована возможность замены коксового орешка высокозольным коксом из углей Куу-чекского месторождения для выплавки ферросиликомарганца. Зола куучекского кокса содержит более 60% диоксида кремния, что позволяет снизить расход кварцита, используемого при промышленной выплавке ферросиликомарганца. Содержание глинозема более 20% в золе кокса приводит к повышению температуры начала шлакообразования и образованию относительно тугоплавких глиноземистых шлаков. Это способствует интенсификации электротермического процесса выплавки ферросиликомарганца. Получена опытная партия ферросиликомарганца состава, в масс. %: $\text{Mn} - 69.59$; $\text{Si} - 18.09$; $\text{P} - 0.11$; $\text{S} - 0.018$; $\text{C} - 2.2$. Этот состав соответствует ферросиликомарганцу марки MnSi_{17} по ГОСТ 4756-91. Коэффициенты извлечения марганца и кремния составили 87.2% и 38.9%, соответственно.

Осуществлена выплавка рафинированных марок ферромарганца с применением кремнийалюминиевого восстановителя [36]. Установлена возможность получения среднеуглеродистого ферромарганца марки FeMn-80C20LP (ИСО 5446-80). Степень извлечения и эффективного использования основных элементов достигает 51.1-51.2% марганца, 54.5-59.8% кремния и 82.5-89.5% алюминия. В связи с тем, что содержание марганца в ферромарганце зависит от его содержания в восстановителе, необходимо использовать алюмосиликомарганец с содержанием марганца не менее 40-45% и высокозольные угли с зольностью менее 42%.

Одним из возможных способов использования побочных продуктов металлургического производства, таких, как металлический лом, шлак, колошниковая пыль и другие отходы, является их использование в качестве сырья для производства промышленных металлов или сплавов. Проведены эксперименты по получению ферросиликомарганцевого сплава с использованием в

качестве сырья марганцевой руды и медеплавильного шлака [37]. Марганцевую руду, медеплавильный шлак и уголь смешивали в различных пропорциях. Смеси прессовали в брикеты на гидравлическом прессе, фотографии брикета до и после восстановления, металлопродукции и шлака представлены на рисунке 5.

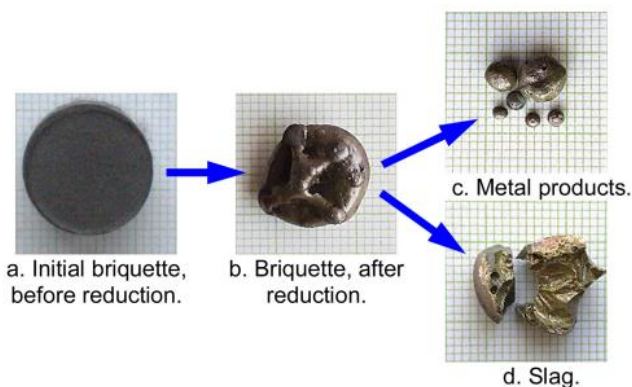


Рисунок 5. Типичный брикет до и после восстановления, 1550°C [37]

Брикеты были восстановлены битуминозным углем при температурах выдержки 1450, 1500 и 1550°C. Установлено, что при добавке меди в плавку до 60% содержание и извлечение марганца и кремния в металлическом продукте увеличиваются с повышением температуры, а железа и меди уменьшаются.

Проведены эксперименты по плавке силикомарганца с использованием рудной смеси, состоящей из железисто-марганцевой руды и шлака высокоуглеродистого ферромарганца, на основе моделирования термодинамического равновесия [31].

Эксперименты по плавке проводились в погружной дуговой печи, состоящей из графитового тигля и графитового электрода, стойки держателя электрода, опорной плиты и огнеупорной оболочки. Во время работы электрод и базовая углеродная пластина были подключены к фазовой точке и нейтральной точке источника переменного тока соответственно (рисунок 6).

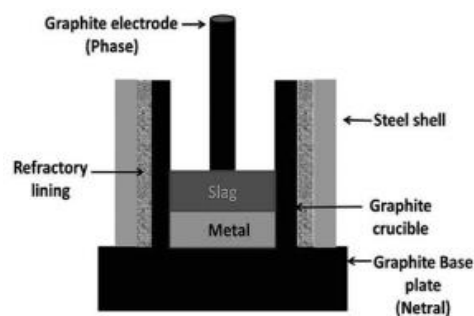


Рисунок 6. Схема экспериментальной установки для исследования плавки [31]

Термодинамические расчеты, основанные на доступных базах данных термодинамики, были использованы для прогнозирования теоретической основности входной шихты и входного значения R ($\text{CaO} + \text{MgO} / \text{Al}_2\text{O}_3$, в масс. %) для оптимального извлечения сплава. Термодинамическое моделирование процесса успешно предсказало химический состав шлака и его влияние на распределе-

ние Mn и Si между шлаком и сплавом. Этот метод может быть распространен на другие процессы плавки ферросплавов на основе кремния.

Изучено влияние содержания Mg на микроструктуру и механические свойства сплава Al-xMg-2.0Si-0.6Mn [38]. Микроструктуру, фазовый состав и морфологию излома сплава определяли методами сканирующей электронной микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Установлено, что с увеличением содержания Mg увеличивается количество упрочняющих фаз. При содержании 5% Mg сплав имеет максимальный предел прочности при растяжении и предел текучести 227.22 МПа и 136.55 МПа, соответственно. Кроме того, выявлено, что точечная фаза Mg₂Si существует в сплаве и сосуществует с точечной α -Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂. Из фазовой диаграммы следует, что фаза α -Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂ является вероятным субстратом для зарождения фазы Mg₂Si.

Синтезирован марганцевый агломерат из шлака производства FeSiMn и марганцевых концентратов, полученных из низкосортных марганцевых руд, с размером частиц 0-2 мм [5]. Конечный марганцевый агломерат, содержащий 32.3% Mn и 28.3% SiO₂, был добавлен как часть загрузки при производстве FeSiMn.

Исследована кинетика селективного окисления сплавов железо-марганец-кремний с различным содержанием кремния при температуре 700°C и парциальном давлении кислорода 2.9·10⁻²² бар в течение до 2 часов [39]. Установлен линейный прирост массы с течением времени. Предполагается, что поглощение кислорода является стадией, контролирующей скорость реакции. Глубина окисления, особенно вдоль границ зерен, значительно возрастает с увеличением содержания кремния. Выявлены различия в микроструктуре и приповерхностной химии сплавов в зависимости от содержания кремния. Результаты указывают на решающую роль тонкого оксидного слоя, твердого раствора между FeO и MnO, в процессе окисления.

Наиболее широко используемым методом производства металлического марганца является пирометаллургический способ плавления марганцевых концентратов в рудно-термической печи. Исследования, проведенные по электроплавке агломератов и окатышей, полученных из рудной мелочи и шламов, показали эффективность их использования для производства ферромарганцевых сплавов. Проведено термодинамическое моделирование процесса плавки для расчета химического состава шлака и распределения основных элементов между шлаком и сплавом. Показано, что процесс восстановления марганца зависит от ряда факторов: конструкции печи, температурного и шлакового режимов, плавящихся и восстановительных свойств марганцевого сырья, природы восстановителей и флюсовых материалов.

6. Выводы

Накопление твердых промышленных отходов создает серьезные экологические проблемы, такие, как загрязнение почвы, грунтовых вод и воздушной среды, оказывает вредное воздействие на здоровье человека. В связи с этим переработка и извлечение ценных компонентов из техногенных источников – рудной мелочи, шламовых хвостов обогатительных фабрик, горных отвалов представляет актуальную экологическую и технологическую задачу.

Вовлечение в промышленную переработку техногенных отходов позволит повысить эффективность марганцевого производства. Доизвлечение марганца из рудной мелочи, шламов гравитационного обогащения марганцевых руд, шламов производства марганцевых сплавов и совершенствование технологических процессов выплавки марганцевых ферросплавов обеспечит повышение сквозного извлечения марганца из минерального сырья.

Финансирование

Исследование финансировалось Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP09258880).

Литература / References

- [1] U.S. Geological Survey. (2022). Mineral commodity summaries. Retrieved from (accessed on 12 April 2023): <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-manganese.pdf>
- [2] International Manganese Institute. (2019). [Mn] Annual Review. Retrieved from (accessed on 12 April 2023): https://www.manganese.org/wp-content/uploads/2021/04/IMnI-2019-Annual-Review_ENG.pdf
- [3] Singh, V., Chakraborty, T. & Tripathy, S.K. (2020). A Review of Low-Grade Manganese Ore Upgradation Processes. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 41(6), 417-438. <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1634567>
- [4] Liu, B., Zhang, Y., Lu, M., Su, Z., Li, G. & Jiang T. (2019). Extraction and separation of manganese and iron from ferruginous manganese ores. A review. *Minerals Engineering*, 131, 286-303. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.016>
- [5] Dashevskii, V.Ya., Aleksandrov, A.A., Zhuchkov, V.I. & Leont'ev, L.I. (2020). Problem of manganese in russian metallurgy. *Izvestiya VUZov. Ferrous Metallurgy*, 63(8), 579-590. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-8-579-590>
- [6] United States International Trade Commission. (2019). Silicomanganese from India, Kazakhstan, and Venezuela Investigation § Nos. 731-TA-929-931 (Third Review). Retrieved from (accessed on 12 April 2023): https://www.usitc.gov/publications/701_731/pub4881.pdf
- [7] Shekhar, S., Sinha, S., Mishra, D., Agrawal, A. & Sahu, K.K. (2021). Extraction of manganese through baking-leaching technique from high iron containing manganese sludge. *Materials Today: Proceedings*, 46(3), 1499-1504. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.637>
- [8] Singh, V., Biswas, A. (2017). Physicochemical processing of low-grade ferruginous manganese ores. *International Journal of Mineral Processing*, 158, 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.11.013>
- [9] Nurjaman, F., Amarella, S., Noegroho, A., Ferdian, D. & Suharno B. (2017). Beneficiation of two different low-grade Indonesian manganese ores to improve the Mn/Fe ratio. *AIP Conference Proceedings*, 1823(1), 020021. <https://doi.org/10.1063/1.4978094>
- [10] Kenzhaliyev, B.K. (2019). Innovative technologies providing enhancement of nonferrous, precious, rare and rare earth metals extraction. *Complex Use of Mineral Resources*, 310(3), 64-75. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.30>
- [11] Yessengaliyev, D.A., Baisanov, A.S., Dossekenov, M.S., Kelamanov, B.S. & Almabekov, D.M. (2022). Thermophysical properties of synthetic slags of the FeO – MnO – CaO – Al₂O₃ – SiO₂ system. *Complex Use of Mineral Resources*, 323(4), 38-45. <https://doi.org/10.31643/2022/6445.38>
- [12] Shevko, V.M., Aitkulov, D.K., Badikova, A.D., Tuleyev, M.A. (2021). Ferroalloy production from ferrosilicon manganese dusts. *Complex Use of Mineral Resources*, 318(3), 43-50. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.27>

- [13] Zholdasbay, Ye.Ye., Tazhiev, Ye.B., Argyn, A.A., Kaplan, A.V., Koishina, G.M. & Dosmukhamedov N.K. (2023). Selection and justification of charge preparation based on manganese waste from ore dressing. *Engineering Journal of Satbayev University*, 145(2), 13-19. <https://doi.org/10.51301/ejsu.2023.i2.02>
- [14] Mukhambetgaliyev, Ye. K., Zhuniskaliyev, T.T., Smagulov, A.K. & Smailov, S.A. (2021). Thermodynamic modeling of the complex alloy melting from high-active Al-Mn-Ca-Si elements. *Vestnik KazNRTU*, 143(6), 64-70. <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i6.09>
- [15] Yuan, S., Zhou, W., Han, Y. & Li Y. (2020). An innovative technology for full component recovery of iron and manganese from low grade iron-bearing manganese ore. *Powder Technology*, 373, 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.032>
- [16] Mehdilo, A., Irannajad, M. & Hojjati-Rad M.R. (2013). Characterization and beneficiation of Iranian low-grade manganese ore. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 49(2), 725-741. <https://doi.org/10.5277/ppmp130230>
- [17] Elliott Richard, Barati Mansoor. (2020). A review of the beneficiation of low-grade manganese ores by magnetic separation. *The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science*, 59(1), 1-16. <https://doi.org/10.1080/00084433.2020.1711654>
- [18] Gao Lihua, Zhenggen Liu, Mansheng Chu, Ran Wang, Zhihao Wang, Cong Feng. (2019). Upgrading of low-grade manganese ore based on reduction roasting and magnetic separation technique. *Separation Science and Technology*, 54(1), 195-206. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1504795>
- [19] Yang Chen, Duan Xinxu, Zhang Xiufeng, Rohani Sohrab, Wu Hongli, He Minyu, Gao Yuxiang, Liu Qingai, Yang Jian, Kong Ming, Liu Weizao. (2023). Acid-free extraction of manganese from pyrolusite tailings by in situ redox interaction with waste copperas. *Process Safety and Environmental Protection*, 169, 149-158. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.026>
- [20] Brynjulfson, T., Tangstad, M. (2013). Melting and reduction of manganese sinter and pellets. *Proceedings of the Thirteenth International Ferroalloys Congress «Efficient technologies in ferroalloy industry»*, Almaty, Kazakhstan
- [21] Faria, G.L., Tenório, J.A.S., Jannotti, Jr. N. & da S. Araújo, F.G. (2015). A geometallurgical comparison between lump ore and pellets of manganese ore. *International Journal of Mineral Processing*, 137, 59-63. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.03.003>
- [22] Zhang Yuanbo, Liu Bingbing, You Zhixiong, Su Zijian, Luo Wei, Li Guanghui. (2016). Consolidation Behavior of High-Fe Manganese Ore Sinters with Natural Basicity. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 37(5), 333-341. <https://doi.org/10.1080/08827508.2016.1218870>
- [23] Cheraghi Alireza, Becke Hanka, Eftekhari Hosna, Yoozbashizadeh Hossein, Safarian Jafar. (2020). Characterization and calcination behavior of a low-grade manganese ore. *Materials today communications*, 25, 101382. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101382>
- [24] Ali Heba, Mohamed El-Sadek, Hesham Ahmed. (2023). Investigation of transformations of low-grade manganese ore during the roasting process. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 132(1), 62-72. <https://doi.org/10.1080/25726641.2022.2161736>
- [25] Zhu, D., Chun, T., Pan, J. & Zhang J. (2013). Influence of basicity and MgO content on metallurgical performances of Brazilian specularite pellets. *International Journal of Mineral Processing*, 125, 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.09.008>
- [26] Semanová Zuzana, Legemza Jaroslav. (2014). Analysis and use of Mn ore fines. *Acta Metallurgica Slovaca*, 20(4), 402-409. <https://doi.org/10.12776/ams.v21i1.554>
- [27] Zhunusov, A., Tolymbekova, L., Abdulabekov, Ye., Zholdubayeva, Zh. & Bykov P. (2021). Agglomeration of manganese ores and manganese containing wastes of Kazakhstan. *Metallurgija*, 60(1-2), 101-103. <https://hrcak.srce.hr/file/357485>
- [28] Zhunusov, A., Bykov, P., Kenzhebekova, A., Zhunusova, A., & Rahmat, A. N. (2023). Study of the isothermal kinetics of reduction of sinter from mill scale. *Complex Use of Mineral Resource*, 328(1), 59-67. <https://doi.org/10.31643/2024/6445.07>
- [29] Zhang, Bo, Xue, Zheng-Liang. (2013). Kinetics Analyzing of Direction Reduction on Manganese Ore Pellets Containing Carbon. *International Journal of Nonferrous Metallurgy*, (2), 116-120. <https://doi.org/10.4236/ijnm.2013.23017>
- [30] Fahim, M., El Faramawy, H., Ahmed, A., Ghali, S. & Kandil, A. (2013). Characterization of Egyptian Manganese Ores for Production of High Carbon Ferromanganese. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 1(2), 68-74. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2013.12013>
- [31] Sahu Nilamadhaba, Biswas Arijit, Kapure Gajanan U, Randhawa Navneet Singh. (2019). Thermochemical analysis of smelting of ferruginous manganese ore for silicomanganese production. *Calphad*, 66, 101637. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2019.101637>
- [32] Zhang Li, Liu Bingbing, Zhang Yuanbo, Han Guihong, Huang Junjie, Ye Jing & Li Yuelong. (2021). New perspective on the interface reaction and morphology evolution in the reduction of manganese silicate for silicomanganese alloy production. *Applied Surface Science*, 539, 148210. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148210>
- [33] Ye Qing, Peng Zhiwei, Li Guanghui, Liu Yong, Liu Mudan, Ye Lei, Wang Liancheng, Rao Mingjun, Jiang Tao, Zhao Boxin. (2021). Catalytic role of sodium carbonate in reduction of ferromanganese spinel. *Powder Technology*, 377, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.070>
- [34] Yakushevich, N.F., Strakhov, V.M., Volodin, O.N., Slepnev, V.V. & Gorbachenko I.V. (2018). Peculiarities of silicomanganese smelting technology and its efficiency increase by semi-coke application. *Ferrous metallurgy bulletin*, 11, 58-68. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2018-11-58-68>
- [35] Gabdullin, S., Baisanov, S., Kim, S. & Mukhtar A. (2021). Melting of ferrosilicon manganese with the use of high ash rock coal as a reducing agent. *Metallurgija*, 60(1-2), 82-84
- [36] Issagulov, A., Ospanov, N., Bayssanov, A., Makhambetov, Ye. & Issagulova D. (2016). Studying possibility of smelting refined ferromanganese grades using silicon aluminum reducer. *Metallurgija*, 55(4), 709-711
- [37] Zulhan Zulfiadi, Fauzian Irfan Muhammad, Hidayat Taufiq. (2020). Ferro-silico-manganese production from manganese ore and copper smelting slag. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 13625-13634. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.079>
- [38] Yan Xuanjie, Sui Yudong, Zhou Hao, Sun Wenwen, Jiang Yehua, Wang Qudong. (2023). Influence of the Mg content on the microstructure and mechanical properties of Al-xMg-2.0Si-0.6Mn alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 3880-3891. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.046>
- [39] Zhang Xue, da Silva, Cauê Corrê, Zhang Siyuan, Prabhakar Manoj, Lu Wenjun, Vogel Alexandra, Rohwerder Michael. (2021). Investigation of selective oxidation during cooling of hot-rolled iron-manganese-silicon alloys. *Corrosion Science*, 186, 109466. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109466>

Құрамында төмен сапалы марганеці бар шикізаттарды өңдеу арқылы ферромарганецті қорытпа өндірісіне арналған түйіршіктер алу. Шолу

А.Е. Тастанова, Е.И. Көлдеев, С.С. Темирова*, Г.Ж. Абдыкирова, А.А. Бирюкова

Satbayev University, Металлургия және кен байыту институты, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: s.temirova@satbayev.university

Андатпа. Құрамында марганец мөлшері жоғары минералдық шикізат ресурстарының шектеулі болуына байланысты сапасыз кендер мен техногендік қалдықтарды қосымша шикізат көзі ретінде қарастыруға болады. Мақалада құрамында марганеці бар шикізаттан марганец концентраттарын алу арқылы байыту, марганец ұсақтарын агломерациялау және агломераттарды ферромарганец түйіршік қорытпаларын балқыту арқылы өңдеу бойынша зерттеулерге шолу жасалған. Марганецтің негізгі шикізат көздері сипатталған. Марганец кендері үш негізгі түрге бөлінеді: оксидті, кремнийлі және карбонатты. Шикізаттың түріне байланысты, байыту әдісінің таңдауы жүзеге асырылады. Марганец қорытпаларының қолдану аймақтары сипатталған: кара металлургияда болат пен шойын өндірісінде ферромарганец және ферросиликомарганец қолданады, түсті металлургияда қола, жез, алюминий және магний қорытпаларының көпшілігінде легирленген қосалқы металл ретінде қолданылады. Құрамында марганец бар төмен сапалы шикізатты - кондициялық емес кендер мен техногендік қалдықтарды байыту процестері қарастырылған. Темір-марганец кендерін байытудың перспективалық бағыты магниттік сепарация болып табылады. Марганецті техногендік көздерден - кенді ұсақ заттардан, байыту фабрикаларының шламды қалдықтарынан алу маңызды экологиялық және практикалық маңызы бар. Марганец ұсақ-түйектерін, брикеттерді алу арқылы агломерациялау әдістері, қышқыл және негізгі оксидтер құрамының, байланыстырушы материалдардың құрамының түйіршіктердің қасиеттеріне әсері сипатталған. Әр түрлі факторлардың марганец ферроқорытпаларын балқыту процесіне, марганец кені түйіршіктерін қалпына келтіруге және процесс барысында болатын фазалық өзгерістерге әсері туралы мәліметтер келтірілген.

Негізгі сөздер: құрамында марганец бар техногендік қалдықтар, байыту, түйіршіктер, балқыту, қорытпалары.

Переработка низкокачественного марганецсодержащего сырья с получением окатышей для производства ферромарганцевых сплавов. Обзор

А.Е. Тастанова, Е.И. Кульдеев, С.С. Темирова*, Г.Ж. Абдыкирова, А.А. Бирюкова

Satbayev University, Институт металлургии и обогащения, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: s.temirova@satbayev.university

Аннотация. В связи с ограниченностью ресурсов минерального сырья с высоким содержанием марганца некондиционные руды и техногенные отходы могут рассматриваться в качестве дополнительного сырьевого источника. В статье представлен обзор исследований по переработке низкокачественного марганецсодержащего сырья путем его обогащения с получением марганцевых концентратов, агломерации марганцевой мелочи с формированием окатышей и плавки агломератов на ферромарганцевые сплавы. Охарактеризованы основные сырьевые источники марганца. Марганцевые руды, подразделяются на три основных типа: оксидные, кремнистые и карбонатные. В зависимости от типа сырья осуществляется выбор способа его обогащения. Описаны области применения сплавов марганца: в черной металлургии их используют в виде ферромарганца и ферросиликомарганца при производстве стали и чугуна; в цветной металлургии как легирующий металл в составе бронзы, латуни, большинства алюминиевых и магниевых сплавов. Рассмотрены процессы обогащения низкокачественного марганецсодержащего сырья – некондиционных руд и техногенных отходов. Перспективным направлением в обогащении железомарганцевых руд является магнитная сепарация. Важное экологическое и практическое значение имеет извлечение марганца из техногенных источников – рудной мелочи, шламовых хвостов обогатительных фабрик. Описаны способы агломерации марганцевой мелочи с получением окатышей, брикетов, влияние содержания кислотных и основных оксидов, состава связующих материалов на свойства окатышей. Приведены данные по влиянию различных факторов на процесс плавки марганцевых ферросплавов, восстановлению окатышей марганцевой руды и фазовым превращениям, происходящим в ходе процесса.

Ключевые слова: марганецсодержащие техногенные отходы, обогащение, окатыши, плавка, сплавы.

Received: 13 May 2023

Accepted: 15 August 2023

Available online: 31 August 2023