

ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА КРУПНОТОННАЖНЫХ МАРГАНЦЕВЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ

Анотація. Розглянуто пріоритетні напрямки підвищення ефективності виробництва великотоннажних марганцевих феросплавів, якими є зниження питомої витрати шихтових матеріалів, підвищення коефіцієнта корисного вилучення марганцю, зниження споживання природного газу і коксуючого газу, питомої витрати електричної енергії при виплавці ферросилікомарганцю та високоуглецевого ферромарганцю і вирішення екологічних проблемних завдань з охорони навколишнього середовища.

Ключові слова. Марганцеві феросплави, моделювання процесів, агломерат, природний газ, феррогаз, антрацит, технологія ферросилікомарганцю, пічний магнезійний шлак, електричні режими, сепарація відвального шлаку, металоконцентрат, екологія, ефективність.

Аннотация. Рассмотрены приоритетные направления повышения эффективности производства крупнотоннажных марганцевых ферросплавов. Они являются снижение удельных расходов шихтовых материалов, повышение коэффициента извлечения марганца, снижение потребления природного газа и коксика, расхода электрической энергии при выплавке ферросилicomарганца и высокоуглеродистого ферромарганца и решение экологических задач по охране окружающей среды.

Ключевые слова. Марганцевые ферросплавы, моделирование процессов, агломерат, природный газ, феррогаз, антрацит, технология ферросилicomарганца, печной магнезильный шлак, электрические режимы, сепарация отвального шлака, металлоконтрат, экология, эффективность.

Annotation. Considered priority areas to improve production efficiency of large manganese ferroalloys . They are reducing the unit costs of charge materials, increased coefficient of manganese extraction, reducing consumption of natural gas and coke fines, electricity consumption in the smelting of ferrosilicomanganese and high carbon ferromanganese and solution of environmental problems on the protection of the environment .

Keywords. Manganese ferro-alloys, process modeling, sinter, natural gas, ferroalloy gas, hard coal, the technology ferrosilicomanganese, magnesia furnace slag, power modes, separation of slag dumping, metal-slag mixture, environment, efficiency.

В общей структуре производимых в мире ферросплавов (комплексных раскислителей и легирующих для сталеплавильной промышленности) марганцевые ферросплавы по объёму производства и удельному расходу при выплавке стали в конвертерах и электропечах занимают лидирующее положение и потребность сталеплавильной промышленности в них системно повышается. Основной продукцией Никопольского завода ферросплавов является высокоуглеродистый и среднеуглеродистый ферромарганец и ферросилicomарганец. При производстве 603,4 тыс. т в 2015 году мы поставили на рынок 3,4 процента мирового объёма марганцевых ферросплавов и являемся самым крупным производителем этой продукции. Выпускаем также электродную массу и марганцевый агломерат, щебень, граншлак и шлаковое литьё из шлака ферросилicomарганца. На заводе разработана и внедрена система менеджмента качества в соответствии с требованиями

международных стандартов ISO 9001-2000, и система менеджмента окружающей среды в соответствии с ISO 14001-2004.

Сегодня наш завод полностью удовлетворяет потребности украинских металлургов в марганцевых ферросплавах и 76% продукции отправляется на экспорт.

Установленная мощность потребителей электроэнергии ПАО НЗФ составляет 1366 МВА, что соответствует 10% выработки Днепровской электроэнергетической системы или 2,5% потребляемой электрической энергии всей Украины.

На протяжении 50-летнего периода работы завода велись и продолжают вестись многоплановые научно-технологические работы по повышению качества, эффективности и конкурентоспособности производимых крупнотоннажных марганцевых ферросплавов. Несмотря на достигнутые высокие показатели работы завода имеется ряд проблемных научно-технологических и экологических задач, которые успешно решаются при проведении системных теоретических, экспериментальных исследований и опытно-промышленных работ с широким внедрением их результатов в производство.

Среди приоритетных направлений повышения эффективности производства крупнотоннажных марганцевых ферросплавов перспективными и значимыми являются снижение удельных расходов исходных шихтовых материалов, повышение коэффициента полезного сквозного извлечения марганца в товарные марганцевые ферросплавы, снижение потребления природного газа и коксика при агломерации марганцеворудного сырья, удельного расхода электрической энергии при выплавке ферросиликомарганца и высокоуглеродистого ферромарганца и решение сложных экологических проблемных задач по охране окружающей среды. Обобщение и анализ теоретических данных, разработка и исследование новых технологий производства марганцевого агломерата и выплавки с его использованием крупнотоннажных марганцевых ферросплавов с решением задач ресурсо- и энергосбережения является актуальной научно-технической проблемой, решение которой в последние десятилетия позволили существенно повысить эффективность производства марганцевых ферросплавов на ПАО НЗФ.

Для решения поставленных задач первоочередно проделан критический анализ современного состояния отечественной марганцеворудной базы Марганецкого и Орджоникидзевского горно-обогатительных комбинатов и электропечных мощностей ПАО НЗФ. Выполнено научное обоснование современных технологических схем и процессов в тесной взаимосвязи с металлургическим качеством марганцевых руд и концентратов, в том числе импортных. Существенное внимание уделено анализу обеспеченности ферросплавного производства электроэнергией, восстановителями, газообразными и твердыми энергоносителями.

Мировые запасы марганцевых руд на начало XXI века оценивались в 17,6-18,0 млн. т, в том числе, по регионам (%): Африка (ЮАР, Габон, Гана) – 80,6; Украина – 12,6; Южная Америка (Бразилия, Мексика) – 2,9; Австралия – 2,4; прочие – 1,5 .

Как известно по существующей классификации марганцевые руды подразделяются на окисные, окисленные, карбонатные и окисно-карбонатные. В зависимости от вида руд выбирается наиболее эффективная схема их обогащения, подготовки к плавке и технология выплавки ферросплавов

Естественное, по мере отработки месторождений, изменение качества добываемых руд требует систематического пересмотра нормативных документов, определяющих технические требования к качеству марганцевых концентратов. Важнейшими показателями качества являются содержание марганца и удельное содержание в них фосфора $\eta_P = (\%P)/(\%Mn)$, определяющее возможность производства марганцевых ферросплавов с регламентируемым содержанием фосфора.

Выполненный анализ (рис. 1) показывает, что в никопольских марганцевых рудах фосфорный модуль $\eta_P = 0,004...0,008$ (линии 1-2, заштрихованные области), что позволяет отнести их к низкокачественным и получать с их использованием высокофосфористый ферросиликомарганец марки МнС17Р06 и высокоуглеродистый ферромарганец – ФМн78Р07. Это обстоятельство вынуждает к поиску высококачественных марганцевых руд, характеризующихся, наряду с высоким содержанием марганца, низким фосфорным модулем. Импортные марганцевые руды (линии 3-8) имеют относительно низкие значения η_P : 0,0017...0,00195 (Австралия); 0,0008 (ЮАР); 0,0018 (Бразилия); 0,00196 (Габон). Это позволяет получать низкофосфористые марки ферросиликомарганца МнС17Р30, МнС17Р20, МнС17Р15 без подшихтовки низкофосфористого марганцевого сырья. Использование импортных руд в смеси с никопольскими концентратами, а также подшихтовка передельного марганцевого шлака, получаемого при выплавке ФМн78 бесфлюсовым процессом в одну технологическую стадию, позволяют выплавлять низкофосфористые марганцевые сплавы.

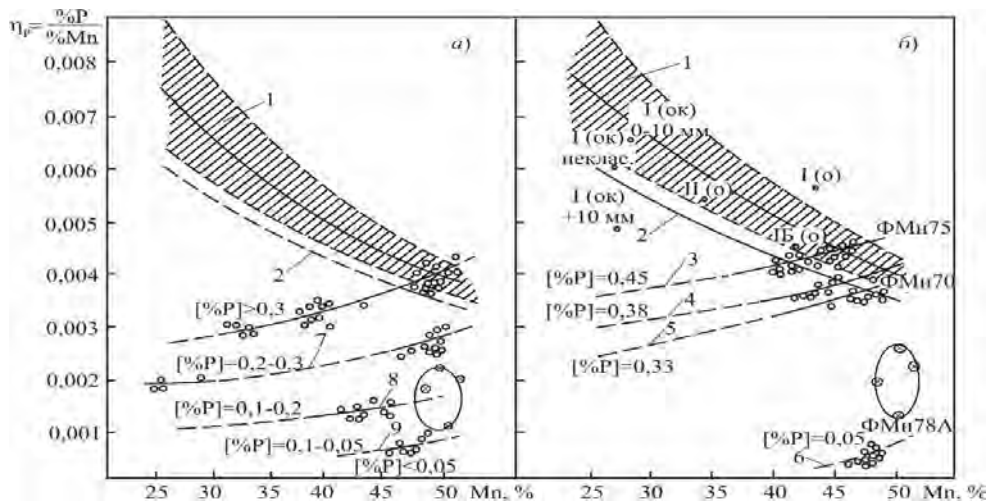


Рисунок 1 – Взаимосвязь фосфорного модуля η_P с содержанием марганца в марганцевых концентратах и критические значения η_P , обеспечивающие получение ферросиликомарганца (а) и высокоуглеродистого ферромарганца (б) с заданным содержанием фосфора

Таким образом, расширение рудной базы в направлении использования высокомарганцевых низкофосфористых импортных руд положительно отразилось на технико-экономических показателях производства марганцевых ферросплавов, повышении их качества и конкурентоспособности. Кроме того, это позволило перейти от неэффективной флюсовой технологии высокоуглеродистого ферромарганца к бесфлюсовой и получать при этом два продукта в одну стадию: товарный ферромарганец ФМн78 и передельный низкофосфористый марганцевый шлак ШМП-78 при сквозном извлечении марганца до 97-98%.

Структура себестоимости марганцевых сплавов такова, что 40-42% затрат приходится на марганцевое сырье, 8-10% – на восстановитель, 24-26% – на электроэнергию, 24-26% – прочие расходы по переделу. Несмотря на невысокую долю восстановителя в структуре себестоимости проблема замены коксика антрацитом актуальна. Определяющую роль играет не только стоимость, но и дефицит металлургического кокса ферросплавного класса крупности, поэтому обоснование замены сортированного коксика антрацитом при учете всех факторов и на всех стадиях производства (прежде всего в агломерации, и, собственно, в

составе шихты на плавку) приводит к существенному повышению технико-экономических показателей процесса выплавки марганцевых ферросплавов.

Производство марганцевых ферросплавов характеризуется высокой энергоемкостью. В этой связи обеспеченность электроэнергией и ее стоимость является важнейшим фактором управления эффективностью производства марганцевых ферросплавов. Из детального анализа стоимости электроэнергии для основных мировых производителей ферросплавов в сравнении с Украиной, в совокупности с данными производства марганцевых ферросплавов и динамикой среднемесячного потребления электроэнергии ПАО НЗФ, следовала необходимость разработки и внедрения рациональных электрических режимов работы электропечей, обеспечивающих максимальную производительность при минимальной плате за электроэнергию в условиях её зонной тарификации.

Для решения приведенных выше задач проводились теоретические обобщения, исследования и внедрения на всех стадиях технологического процесса подготовки сырья, производства агломерата и ферросплавов, технологических и электрических режимов работы печей, переработки шлаков, технологий крупнотоннажного производства с вовлечением вторичных сырьевых материалов и энергоносителей. Проанализированы требования стандарта ПАО НЗФ к качеству марганцевого агломерата по назначению для выплавки ферросиликомарганца, высокоуглеродистого ферромарганца и передельного высокомарганцевого низкофосфористого шлака. Рассмотрены в физико-химическом и технологическом аспектах основные стадии сквозной технологической схемы подготовки исходных сырьевых материалов, энергоносителей (коксыка, антрацита) и аглосмесей для спекания марганцевого агломерата. Проанализированы научно-методологические подходы к оптимизации аглосмесей, особенности режимов смешения, увлажнения и окомкования аглошихты для производства марганцевого агломерата. Приведен анализ влияния гранулометрического состава аглосмесей на газопроницаемость слоя при спекании агломерата.

Анализ теоретических положений технологии агломерационных процессов основан на классических работах Г.Г.Ефименко, А.А.Сигова, В.А.Шурхала, В.И.Коротича, Е.Ф.Вегмана и др. Особое внимание уделено теплотехническому анализу процесса зажигания агломерационной шихты. По проектной и действовавшей на ПАО НЗФ технологии для зажигания шихты при спекании агломерата использовался природный газ. На основании анализа особенностей теплотехнических процессов зажигания аглошихты и научно-методологических подходов и результатов собственных исследований, научно обоснована возможность замены при зажигании марганцевой аглошихты природного газа феррогазом – колошниковым газом от ферросплавных электропечей, выплавляющих марганцевые ферросплавы. Колошниковый газ имеет состав (% об.): 82-87 CO, 2-3 CO₂, 4-6 H₂, 1-2 CH₄, 0,5-0,7 N₂ и 0,8-1,2 O₂, калорийность его 9200 кДж/моль (состав природного газа 92-94% CH₄, 2-4% C₂H₂ и его калорийность 36800 кДж/моль). Для обеспечения процесса зажигания 400-450 мм слоя аглошихты насыпной плотностью 1750-1800 кг/м³ удельный расход феррогаза составляет 1800-2500 м³/ч. На основе теоретических расчетов разработана и внедрена технология зажигания шихты феррогазом при производстве марганцевых агломератов на агломашине АКМ-5-105. По результатам внедрения разработанной технологии зажигания аглошихт феррогазом в аглоцехе ПАО НЗФ существенно снижено использование природного газа.

По действовавшей ранее технологии производства марганцевого агломерата в качестве топлива использовался коксик фракций менее 5 мм. Выполнен комплекс исследований с целью замены части дорогого и дефицитного коксика мелких фракций антрацитом. Установлено, что при удельном расходе антрацита 11,6-18,9 кг/т марганцевого агломерата качество его соответствует стандарту предприятия. Разработанная технология реализована в промышленном масштабе в аглоцехе ПАО НЗФ при производстве марганцевого агломерата.

Учитывая положительное влияние MgO в печных шлаках на показатели плавки ферросиликомарганца, научно обоснована возможность использования в качестве MgO-содержащего компонента аглошихты магнезиального силикатного шлака выплавки богатого ферроникеля на Побужском ферроникелевом комбинате. Исследованы термодинамические равновесия фаз реальных составов марганцевых агломератов, полученных по действующей и опытной технологиям с учетом девяти оксидов MnO, SiO₂, CaO, MgO, Al₂O₃, FeO, TiO₂, K₂O и Na₂O в интервале температур 900-1300°С. Методом компьютерного моделирования (программный модуль «Equilib» программы «FactSAGE 6.0», баз данных FToxid, ФАСТ и ФАСТ53) выявлены термодинамически предпочтительные (стабильные) фазы: жидкая фаза, включая расплав, который может содержать оксиды 25 элементов и до 10% мас. серы; монооксид – твердый раствор оксидов Me²⁺O; оливин – твердые растворы силикатов Me₂SiO₄; перовскит (твердый раствор фаз со структурой типа Ca₂Ti₂O₆); родонит – твердые растворы силикатов MeSiO₃.

Построена поверхность ликвидус (в интервале 1000-1500°С) 4-х компонентной системы MnO-SiO₂-MgO-5%CaO наиболее близкой по химическому составу к обычным марганцевым агломератам, содержащим 2-4% MgO. Опытный агломерат имеет содержание MgO 8-9%. Результаты компьютерного моделирования обобщены и представлены на рис.2.

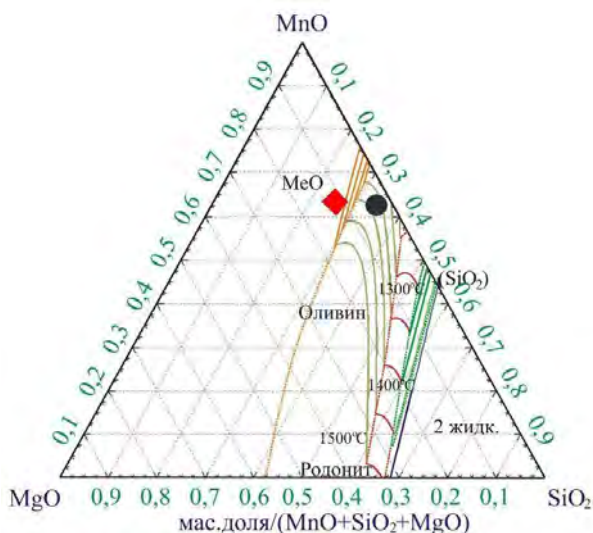


Рисунок 2 – Проекция поверхности ликвидус системы MnO-SiO₂-MgO-5%CaO.

Черная точка – эквивалентный состав обычного агломерата АМНВ-2,
красный ромб - эквивалентный состав опытного агломерата АМНВ-2М.

Цвет линий означает фазу, граничащую с жидкостью

Показано, что в опытном магнезиальном агломерате (АМНВ-2М) марганец имеет тенденцию концентрироваться преимущественно в монооксидной фазе, что повышает его восстанавливаемость, а в базовом агломерате (АМНВ-2) – в оливиновой фазе.

Опытный агломерат имеет более высокую температуру ликвидус $t_L(°C) = 47(\% \text{MgO})/(\% \text{CaO}) + 27(\% \text{CaO})/(\% \text{Al}_2\text{O}_3) - 10,7\% \text{MnO} + 1952$, что имеет важное значение для обоснования температурного режима выплавки ферросиликомарганца.

Разработана технология производства марганцевого магнезиального агломерата АМНВ-2М с использованием в аглошихте магнезиально-силикатного шлака выплавки ферроникеля. Получена промышленная партия такого агломерата и использована для выплавки ферросиликомарганца в электропечи РПЗ-63. Механическая прочность опытного агломерата составляет 77,1%, что соответствует прочности базового по требованиям стандарта ПАО НЗФ.

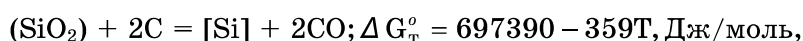
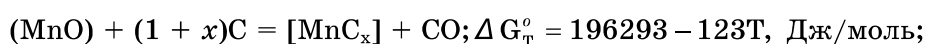
Методом электронной микроскопии исследована структура агломерата АМНВ-2М, рентгеноспектральным микроанализом определены химические составы мономинеральных образований. Показано, что марганец концентрируется преимущественно в «монооксиде» $(\text{Mg}, \text{Mn})\text{O}$, в котором активность марганца существенно выше, чем в его силикатах, что повышает восстановимость агломерата. Тем самым экспериментально подтверждены выводы разработанной физико-химической модели.

По разработанной технологии в условиях аглоцеха ПАО НЗФ получена промышленная партия (2500 т) марганцевого магнезиального агломерата АМНВ-2М с применением шлака выплавки ферроникеля (28-32% MgO ; 48-52% SiO_2).

По содержанию марганца и SiO_2 опытный и базовый агломераты фактически не отличаются. Вместе с тем, при практически равной основности $\%(\text{CaO} + \text{MgO})/\%(\text{SiO}_2)$ существенны различия составов агломератов по отношению $\% \text{MgO}/\% \text{CaO}$, которые составляют для опытного агломерата 1,75-2,07 против 0,26-0,31 для базового, что повышает металлургическую ценность опытного агломерата.

Обобщены и проанализированы материалы теоретических и экспериментальных исследований промышленного внедрения ресурсо- и энергосберегающих технологий выплавки ферросиликомарганца в высокомоощных электропечах с использованием марганцевого агломерата, полученного по разработанным инновационным технологиям.

Выполнен анализ действующего стандарта ДСТУ 3548-97 на ферросиликомарганец с содержанием кремния от 10% до 35% масс. Исходя из данных химических составов различных марок ферросиликомарганца, обобщены данные о фазовых равновесиях в системах Mn-Si, Mn-C, Mn-Si-C. Приведены уточненные данные по термодинамическим свойствам силицидных, карбидных и силикокарбидных фаз, эквивалентных по составу микроструктурным фазам в промышленном ферросиликомарганце. Выявлены условия физико-химических особенностей реакций восстановления марганца и кремния из их оксидов и определены теоретические температуры начала реакций:



которые составляют 1597 К (1324°C) и 1942 К (1669°C), соответственно. Рассмотрены особенности процессов восстановления марганца и кремния из марганцево-силикатной системы MnO-SiO_2 с учетом влияния химического состава расплава на активность оксидов.

Проведены сравнительные термокинетические исследования восстановимости марганцевых агломератов базового и опытного агломерата содержащего 8 % MgO.

В опытных плавках показано, что коэффициент распределения марганца между металлом и шлаком возрастает с увеличением содержания MgO в шлаке (рис. 3.)

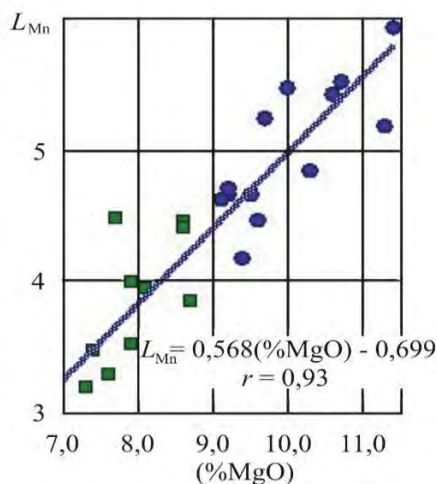


Рисунок 3 – Коэффициент распределения марганца $L_{Mn} = [\% Mn] / [\% Mn]$ в зависимости от содержания (%MgO) в шлаке

Повышение содержания MgO в печном шлаке приводит к росту активности a_{MnO} в результате образования сложных магнезиальных силикатов $(Mn, Mg)_2Si_2O_6$. Оксид магния, таким образом, «вытесняет» MnO из силикатов, повышая активность MnO, что приводит к росту степени его извлечения в металл. Удельные расходы шихтовых материалов и электроэнергии при выплавке ферросиликомарганца MnC17P60 по действующей и опытной технологиям сопоставлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные данные основных показателей выплавки ферросиликомарганца с использованием марганцевых агломератов АМНВ-2 и АМНВ-2М

Наименование показателей	Действующая технология с агломератом АМНВ-2	Опытная технология с агломератом АМНВ-2М	Изменение расхода материалов и эл.энергии
Мп-сырье, кг/баз*.т	1621	1582	– 39
Извлечение Мп, %	84,3	86,5	+ 2,2
Кварцит, кг/баз.т	349	310	– 39
Извлечение кремния, %	40	39	– 1,0
Коксик, кг/баз.т	409	397	– 12
Электроэнергия, кВт·ч/баз.т	4067	4003	– 64

*Базовая тонна ферросиликомарганца $\Sigma ([\% Mn] + [\% Si]) = 82\%$

Разработанная технология обеспечивает снижение удельных расходов шихтовых материалов и электроэнергии, что характеризует ее как ресурсо- и энергосберегающую.

Анализ теоретических подходов к исследованию распределения электрической мощности между рудно-шлаковым расплавом и дуговым разрядом в электропечах, выплавляющих марганцевые ферросплавы, показал, что для электрической цепи ванны ферросплавной печи, содержащей дуговой разряд, при заданном положении электрода в ванне всякое изменение сопротивления расплава R_p сопровождается изменением сопротивления дуги R_d в обратном направлении, т.е. при изменении параметров отдельных участков электрической цепи ванны дуговой разряд должен изменяться в том направлении, в котором суммарное сопротивление $R_p + R_d$ будет наименьшим, а ток – максимальным.

Теоретические и экспериментальные исследования распределения электрической мощности между рудно-шлаковым расплавом и дуговым разрядом в электропечах РПЗ-63, РПГ-63, РКГ-75, выплавляющих ферросиликомарганец и высокоуглеродистый ферромарганец, показали, что относительная мощность дуги печей, РПЗ-63 и РПГ-63, выплавляющих ферросиликомарганец, изменяется в пределах 3,5-5% ... 8,5-10% от мощности потребляемой от сети.

Работа электропечи РКГ-75 на том же сплаве характеризуется меньшей относительной мощностью электрических дуг – 0,5...5% P_c . Относительная мощность электрических дуг печи РКЗ-63, выплавляющей высокоуглеродистый ферромарганец составляет 3...5,5% P_c . При выплавке ферросиликомарганца на устойчивых магниезиальных шлаках с использованием в шихту марганцевогомагнезиального агломерата повышение содержания MgO в печных шлаках до 7,9-12% сопровождается ростом его удельного электрического сопротивления.

Наилучшие технико-экономические показатели достигаются при следующих параметрах электрического режима: выплавка ферросиликомарганца в печах РПЗ-63, РПГ-63 при силе тока $I_o = 90$ кА и сопротивлении ванны $R_o = 0,85-1,15$ мОм; в печах РКГ-75 при силе тока $I_o = 130$ кА и сопротивлении ванны 0,8-0,95 мОм. Выплавка высокоуглеродистого ферромарганца в печах РПЗ-63, РПГ-63 при силе тока $I_o = 86$ кА и сопротивлении ванны 0,7-0,9 мОм.

Выполнен анализ современного состояния технологии и рациональных параметров переработки отвальных шлаков текущего производства ферросиликомарганца и шлаков шлакоотвала ПАО НЗФ. Высокоуглеродистый ферромарганец выплавляется по разработанной безотходной бесфлюсовой технологии с получением высокомарганцевого передельного шлака, используемого при выплавке ферросиликомарганца с низким содержанием фосфора. Выплавка ферросиликомарганца характеризуются большой кратностью печного шлака (1,2-1,4), с которым уносится 3-5% восстановленного марганца. Шлак ферросиликомарганца по химическому составу относится к многокомпонентной системе SiO_2 -MnO-CaO-MgO- Al_2O_3 -MnS. Содержание SiO_2 в шлаке – 48-51%, это характеризует его как близкий к насыщенному по кремнезему. Твердый шлак обладает высокой механической прочностью и антикоррозионными свойствами; используется в виде щебня в дорожно-строительной индустрии и смежных производствах.

Проанализированы схемы переработки шлака, приведены характеристики дробильно-сортировочных комплексов ДСК-1 и ДСК-2 проектной производительности по щебню и песку 300 тыс.т в год каждый. При рассеве дробленого шлака выделяют фракции: 10-20 мм, 20-40 мм и 40-70 мм. Наличие в щебне кусков сплава и металлизированного шлака снижает его качество как строительного материала и сопровождается безвозвратными потерями ферросиликомарганца, поэтому мы пошли по пути сепарации щебня, извлекая из него металлоконцентрат. Разработаны

требования к способу и оборудованию для сортировки шлака ферросиликомарганца. В работе подтверждена эффективность применения установки кусковой сортировки МКС/Т1, разработанной ООО НПП «Гамаюн». Показано, что экономически целесообразно использовать металлоконцентрат (смесь шлака и металлической фазы) с содержанием 32% Mn и выше.

Процесс сортировки щебня основан на использовании электронной сенсорики и современных программных продуктов для обработки информационных потоков. Эффективность сортировки обусловлена точностью измерения массы металлической части в каждом куске щебня. Эта задача решается измерительной системой, использующей метод комбинированных масс. В настоящее время ежесуточная выработка СШМ тремя такими модулями составляет до 20 т со средним содержанием 35% Mn.

Приведен анализ требований к качеству марганцевых ферросплавов на международных и внутренних рынках. Показано, что наряду с ужесточением требований по химическому составу, возрастают требования и к гранулометрическому составу. При фракционировании ферросиликомарганца выделяют фракции 20-40 мм, 40-80 мм и др. Фракция -10мм характеризуется как некондиционная и подлежит переработке в товарную продукцию, используя технологию отдельного переплава в реконструированной печи РКЗ-16,5. Осуществляется это с целью повышения сквозного извлечения марганца и снижения материальных и энергетических затрат.

Среди приоритетных направлений повышения эффективности производства крупнотоннажных марганцевых ферросплавов очень важным является решение сложных экологических проблемных вопросов охраны окружающей среды. Для решения поставленных задач на основе математического моделирования проведен анализ процессов формирования и распространения пылегазовых выбросов при производстве марганцевого агломерата и выплавке MnC17 и ФMn78 в условиях ПАО НЗФ, а также оценка естественной радиоактивности исходных материалов производства марганцевых ферросплавов и продуктов их металлургической переработки. Проведена разработка и внедрение инновационной технологии сухой очистки аспирационных пылегазовых образований для минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду.

Анализ нормативных экологических документов Украины показал, что приоритетными направлениями снижения экологической нагрузки на окружающую среду является решение проблем использования феррогаза, снижение эмиссии CO₂. В результате выполненных исследований впервые разработана математическая модель оценки эмиссии CO₂ при агломерации марганцевородного сырья, выплавке ферросиликомарганца и высокоуглеродистого ферромарганца. Использование феррогаза в технологических процессах привело к снижению суммарной эмиссии CO₂ и, вместе с тем, значительная часть феррогаза (550 млн. м³) при работе завода на оптимальных мощностях сжигается на свечах. В связи с этим, научно обосновано строительство когенерационной станции электрической мощностью 60 МВт.

С целью дальнейшего снижения выделения пыли в атмосферу, образующейся при производстве марганцевых ферросплавов, с использованием полученных в работе исходных данных УкрГНТЦ «Энергосталь» (г. Харьков) разработаны проекты газоочисток, построены и введены в эксплуатацию газоаспирационные станции ГАС-5, В-21,22 с рукавным фильтрами. Эффективность введенных в

експлуатацію установок подтверждена выполненными исследованиями отходящих газовых выбросов от технологического оборудования.

Выводы

Для решения приоритетных направлений повышения эффективности производства крупнотоннажных марганцевых ферросплавов проанализировано состояние рудно-сырьевой базы марганца, углеродистых восстановителей, обеспеченность производства марганцевых ферросплавов электроэнергией. Определены приоритетные задачи совершенствования технологических схем и процессов, намечены пути их решения. Обосновано использование феррогаза и антрацита в технологии агломерации. Осуществлены исследования и термодинамическое моделирование фазовой структуры магнезиального марганцевого агломерата, выполнено термодинамическое моделирование углеродовосстановительных процессов в системе «ферросиликомарганец – печной шлак – газовая фаза» применительно к выплавке $MnSi7$ с использованием в шихте марганцевого магнезиального агломерата. Установлено, что рост концентрации MgO в печном шлаке повышает извлечение марганца в сплав. Научно обоснован и внедрен в промышленных масштабах алгоритм управления электрическим режимом работы высокоомощных (63...75 МВ·А) электропечей по электрическому сопротивлению ванны $R_{\text{в}}$. Научно обоснованы рациональные электрические режимы в условиях зонной тарификации электроэнергии, обеспечивающие наибольшую производительность при наименьших, при тех же условиях, затрат на электроэнергию. Выполнен анализ современного состояния технологии извлечения металла из отвальных шлаков ферросиликомарганца. Внедрены в производство три модуля кусковой сортировки отвальных шлаков ферросиликомарганца, основанных на электронной сенсорике и современных программных продуктах, с получением шлакометаллической смеси со средним содержанием марганца 35%. Выполнено математическое моделирование распространения пылегазовых выбросов от стационарных источников для различных метеоусловий. С использованием полученных исходных данных разработаны проекты газоочисток и введены в эксплуатацию газоаспирационные станции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Куцин В.С. Электрические и технологические режимы выплавки крупнотоннажных марганцевых ферросплавов в высокоомощных электропечах: монография / В.С. Куцин, О.И. Поляков, М.И. Гасик. – Днепропетровск: ЧМП “Экономика”, 2011. – 316 с.
2. Рудовосстановительные электропечи и технологии производства марганцевых ферросплавов: коллективная монография [под редакцией к.т.н. Куцина В.С. и д.т.н. Гасика М.И.] / В.С. Куцин, Б.Ф. Величко, М.И. Гасик, В.А. Гладких, А.Н. Овчарук, Ю.С. Пройдак, О.И. Поляков. – Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины, 2011. – 508 с.
3. Никопольские ферросплавы: коллективная монография [под редакцией к.т.н. Куцина В.С.] / М.И. Гасик, В.С. Куцин, Е.В. Лапин, В.И. Ольшанский, И.И. Люборец, И.Г. Кучер, А.Н. Овчарук, О.Г. Ганцеровский, А.Г. Лобовко, В.С. Гончаров, В.П. Боев, В.И. Журбенко, Г.Д. Страдомский. – Днепропетровск: ГНПП “Системные технологии”, 2004. – 272 с.
4. Куцин В.С. Производство марганцевого магнезиального агломерата с использованием обогащенной никопольской марганцевой руды и отвального

магнезиально-силикатного шлака выплавки ферроникеля / В.С. Куцин, М.И. Гасик // Сталь. – 2012. – №1. – С. 22-28.

5. Куцин В.С. Разработка сквозной технологической схемы и процессов получения марганцевого магнезиального агломерата и выплавки ферросиликомарганца / В.С. Куцин, М. И. Гасик // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 2011. – № 6. – С. 12-16.

6. Куцин В.С. Ресурсосберегающая технология утилизации некондиционной мелочи марганцевых ферросплавов / В.С. Куцин, В.И. Ольшанский // Сталь. - 2011. – № 6. – С. 41-43.

7. Куцин В.С. Анализ процессов образования и распространения пылегазовых выбросов при агломерации марганцевых концентратов и выплавке ферросплавов на основе математического моделирования и экспериментальных данных / В.С. Куцин, А.В. Жаданос, М.И. Гасик // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – № 4. – С. 22-26.

8. Гасик М.М. Математический анализ экспериментальных данных электропроводности шлаковых расплавов системы $MnO-SiO_2-CaO$ производства марганцевых ферросплавов / М.М. Гасик, В.С. Куцин, М.И. Гасик // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – № 2. – С. 32-37.

9. Определение рациональных параметров выплавки ферросиликомарганца на основе электрических характеристик процесса / В.С. Куцин, В.А. Гладких, С.Н.Кузьменко, А.В. Николаенко, В.И. Журбенко, В.Ф. Лысенко, А.Н. Овчарук // Сталь. – 2010. – №1. – С. 55-57.

10. Утилизация пылевидных отходов фракционирования ферросплавов на ОАО “Никопольский завод ферросплавов” / В.С. Куцин, Е.В. Лапин, В.А. Неведомский, В.И. Ольшанский // Екологія та промисловість. – 2008. – № 1. – С. 67-69.

11. Взаимосвязь между технологическими и электрическими параметрами при выплавке ферросиликомарганца в руднотермической электропечи / В.С. Куцин, С.Н. Кузьменко, В.И. Журбенко, В.А. Гладких, А.В. Николаенко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – № 6. – С. 26-31.

12. Куцин В.С. Комплексные решения по повышению эффективности работы завода / В.С. Куцин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 2. – С. 17-19.