

УДК 669.168:669-97

Величко Б. Ф., Куцин В. С., Беспалов О. Л., Овчарук А. Н.,
Ольшанский В. И., Филиппов И. Ю., Бобуцкий В. И.

**РУДОВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОПЕЧИ
ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ – НОВЫЙ ЭТАП В
РАЗВИТИИ ЭЛЕКТРОТЕРМИИ НА СТЫКЕ ДВУХ ТЫСЯЧЕЛЕТИЙ**

Анотація. Проаналізовано умови роботи основних елементів конструкції футеровки рудовідновних печей підвищеної потужності, що виплавляють марганцеві феросплави на Нікопольському заводі феросплавів. Встановлено причини руйнування проектних футеровок, розроблені параметри, запропоновані конструкція і матеріали, які були впроваджені на заводі при капітальному ремонті печей, що дозволило підвищити термін служби до 20–25 років. Виконано порівняльний аналіз стійкості футеровок сучасних печей, що виплавляють різні сплави за шлаковою технологією, викладені припущення про причини їх аварійних зупинок.

Ключові слова: рудовідновні печі, марганцеві сплави, фосфор, футеровка, хімічна ерозія, карбід кремнію, набивка, холоднонабивна маса, термін служби футеровки.

Аннотация. Проанализированы условия работы основных элементов конструкции футеровки рудовосстановительных печей повышенной мощности, выплавляющих марганцевые ферросплавы на Никопольском заводе ферросплавов. Установлены причины разрушения проектных футеровок, разработаны параметры, предложены конструкция и материалы, которые были внедрены на заводе при капитальном ремонте печей, что позволило повысить срок службы до 20–25 лет. Выполнен сравнительный анализ стойкости футеровок современных печей, выплавляющих различные сплавы по шлаковой технологии, изложены предположения о причинах их аварийных остановок.

Ключевые слова: рудовосстановительная печь, марганцевые сплавы, фосфор, футеровка, химическая эрозия, карбид кремния, набивка, холоднонабивная масса, срок службы футеровки.

Annotation. The conditions of operation of the main structural elements of the lining of high-power ore reduction furnaces, smelting manganese ferroalloys in the Nikopol Ferroalloy Plant were analyzed. The causes of the destruction of the design of linings were determined, parameters were designed, design and materials were proposed and have been implemented at the plant during overhaul of furnaces, thus improving the service life of up to 20-25 years. A comparative analysis of the resistance lining modern furnaces, smelting different alloys of the slag technology, outlines assumptions about the reasons for their emergency stops.

Keywords: ore reduction furnace, manganese alloys, phosphorus, lining, chemical erosion, silicon carbide, padding, service life of lining.

Наибольшая концентрация мощности по производству марганцевых ферросплавов в мире сосредоточена на Никопольском заводе ферросплавов, на котором установлено 16 рудовосстановительных печей, мощность 14 из которых оставляет от 63 до 81 МВ·А [1].

Освоение технологии производства марганцевых ферросплавов в закрытых и герметизированных печах началось 27 августа 1968 г. с момента ввода в эксплуатацию печи N 11 цеха N 2. Печи типа РКЗ-16,5 (N 11 и 12) предназначались для проведения дефосфорации марганцевого сырья Никопольского месторождения (Марганецкий и Орджоникидзевский ГОКи),

характеризующегося высоким удельным содержанием фосфора, электрометаллургическим способом.

В печи N 11 начали осваивать технологию производства силикомарганца. В процессе освоения были отработаны основные технологические параметры ведения процесса – определено оптимальное соотношение агломерата и концентрата в шихте, навеска восстановителя, основность шлака, оптимальное значение фактической мощности и др., которые легли в основу технологических режимов работы печей повышенной мощности. В кратчайшее время печь была выведена на проектную мощность, обеспечила производительность 100 т/сутки и была признана «типичной» печью такой мощности для производства силикомарганца. В дальнейшем, с пуском печей повышенной мощности для производства марганцевых ферросплавов и возникшей необходимостью обеспечить получение сплавов с требуемым содержанием фосфора, печи N 11 и N 12 были переведены на выплавку малофосфористого марганцевого шлака. На этих печах была освоена технология производства высокоуглеродистого ферромарганца с особо низким содержанием фосфора – 0,05 %.

5 марта 1969 года была введена в эксплуатацию печь N 13 типа РПЗ-48М01 с прямоугольной ванной шестиэлектродная, предназначенная для выплавки силикомарганца и высокоуглеродистого ферромарганца непрерывным процессом.

Основные параметры головного образца печи следующие:

Номинальная мощность трансформаторов печи	63000 кВ·А (ЗЧ21000)
Максимальный ток на фазе	11200 А
Число фаз	3
Тип электрода	самоспекающийся
Количество электродов	6
Размеры электрода в сечении	650Ч2800 мм
Расстояние между электродами	3300 (3200 – 3400) мм
Средняя скорость перемещения электродов	0,5 м/мин.
Ход электрода	1200 мм
Число контактных щек на один электрод	8
Размеры плавильного пространства:	
- длина	20340 мм
- ширина	6000 мм
- высота	2800 мм
Число леток	3
Расход воды на охлаждение печи	520 м ³ /час
в т.ч. на охлаждение свода	240 м ³ /час
Вес футеровки	900 т
Расстояние между осями леток	6600 мм

Особенностями конструкции данного агрегата является прямоугольная форма ванны печи, наличие 6 прямоугольных электродов, расположенных в линию. Печь закрыта секционным водоохлаждаемым сводом с прямоугольными окнами для электродов и загрузки шихты, снабжена системой мокрой газоочистки с шестью газозаборными каналами. Перепуск и маневрирование электродами осуществляется с помощью гидравлических устройств, управляемых дистанционно с пульта управления. Впервые в мировой практике электротермического производства осуществлен глубокий ввод высокого напряжения – 154 кВ непосредственно к печным трансформаторам. В печных трансформаторах устроены дополнительные обмотки, составляющие совместно с высоковольтными конденсаторами устройство продольной емкостной компенсации (УПК) реактивной мощности.

Пусковой период печи N 13 характеризовался постепенным набором мощности, отработкой технологических параметров процесса производства силикомарганца и устранением существенных недостатков конструктивных элементов печи. Так, к концу марта фактическая мощность печи достигала 27 МВт, а ее производительность была уже 116 т/сутки при удельном расходе электроэнергии 5482 кВт·ч/баз.т силикомарганца, а в апреле эти показатели были в пределах 31,2 МВт, 159,6 т/сутки и 4625 кВт·ч/баз.т соответственно.

Существенными недостатками проектной конструкции печи являются, прежде всего, слишком громоздкая тяжеловесная система подвески свода печи, выполненная из магнитной стали, система загрузки шихты с установкой промежуточных бункеров, обеспечивающих подачу шихтовых материалов в загрузочные воронки электродов, что обуславливало перетекание тока по труботечкам от электрода к электроду, величина которого достигала 630 А, особенно на труботечках между электродами разных фаз [2, 3, 4], что приводило к их прогару, нарушению сплошности и просыпанию шихтовых материалов на свод печи.

При капитальном ремонте головного образца печи РПЗ-48 N 13 постепенно устраняли недостатки системы загрузки шихты, подвески свода печи, его конструкции и системы охлаждения. В настоящее время на современных печах повышенной мощности все конструктивные элементы свода печи, его подвески, наконечники загрузочных воронок выполняются из немагнитной стали, что значительно снижает энергетические потери за счет уменьшения токов наводки и увеличивает срок их службы.

В процессе освоения прямоугольных печей РПЗ-48 проводились многочисленные замеры температуры шихтовых материалов в печи, поверхности колошника, кожуха печи, металла и шлака на выпуске из печи, охлаждающей воды, отходящих газов и др. с целью составления теплового баланса печных агрегатов. Следует отметить, что при работе печи с проектными геометрическими параметрами ванны – высота ванны по футеровке всего 2800 мм, температура поверхности колошника на фактической мощности 40–45 МВт достигала 900–1050°C.

Столь высокая температура колошника и низкая стойкость водоохлаждаемых частей загрузочных воронок свидетельствуют о недостаточной глубине ванны печи. Поэтому при строительстве печи N 16 глубина ванны была увеличена на 400 мм, а высота обстановочных угольных блоков уменьшена на 650 мм. Эксплуатация этой печи подтверждает правильность такого решения. Температура поверхности колошника печи N 16 не превышает 800°C, а в большинстве случаев ниже на 200–300°C. Значительно повысилась также стойкость загрузочных воронок. В течение года работы на печи N 16 заменили только 1 воронку, в то время как на других печах не менее 5.

Замеры токов шихтовой проводимости показывают уменьшение отклонения токов в сторону футеровки, что следует считать положительным фактором.

В результате увеличения глубины печи и изменения футеровки показатели работы печи N 16 оказались лучше, нежели остальных печей, тем не менее на печах N 15, 16 наблюдались симптомы всплытия блоков подины, так как спустя 4 месяца с момента ввода в эксплуатацию и на этих печах наблюдалось нарушение сплошности футеровки подины печей.

В связи с невысокой стойкостью существующих подин была разработана новая конструкция подины, отличающаяся тем, что обработанные угольные блоки (ранее применялись не обработанные) высотой 1000 мм устанавливаются на торец, швы между ними заполняются углеродистой пастой при тщательной подгонке блоков друг к другу. Сверху блоки подины покрываются холодноабивной подовой массой, состав которой разработан специалистами завода и сотрудниками кафедры электрометаллургии НМетАУ. Масса изготавливается на НЗФ в цехе электродной массы [5]. Выпускные отверстия располагаются на 250–350 мм выше уровня подины с целью создания защитного слоя металла на подине. В дальнейшем по такой схеме осуществляется футеровка всех печей НЗФ, что позволяет решить вопрос стойкости футеровки сверхмощных печей и повысить их срок службы до 15–20 лет.

В дальнейшем [2, 6] глубина ванны печи была увеличена до 3800 мм, водоохлаждаемые загрузочные воронки заменены неводоохлаждаемыми, установлена фиксация электродов, усилены леточные блоки и осуществлено их охлаждение, уменьшен ход электрода на 400 мм и внедрен разовый перепуск электродов на 30 мм против 100 мм по проекту. Эти и другие мероприятия позволили вывести печи РПЗ-48 на проектную мощность 55–57 МВт и вплотную приблизиться к проектной производительности.

Первые серьезные нарушения работы футеровки печи типа РПЗ-48 были установлены в конце декабря 1969 г. на печи N 13. В результате прогара около 200 тонн сплава вышло из печи через термодарный канал задней стенки под электродом N 5. Аналогичная авария произошла и на печи N 14 спустя четыре месяца после ее пуска.

Состояние подины печи после покраснения кожуха пытались определить путем зондирования через воронки стальными прутьями. Замеры после прогара печи и выхода расплава 9 сентября 1970 г. показали отсутствие вспучиваний, а максимальное увеличение глубины печи относительно начального уровня подины достигает 1970 мм (под электродом N 2). Углубления зафиксированы по всей ванне между 1 и 6 электродами, что подтверждает возможность всплытия блоков подины в результате ее разрушения.

При остановках печей РПЗ-48 N 13 и 14 на капитальный ремонт впервые в отечественной и мировой практике проводились исследования характера разрушения футеровки, производились отборы проб выломок шихты, продуктов процесса и их петрографический анализ.

На рис. 1 представлен характер разрушения футеровки печи N 13.

На основании визуального анализа характера разрушения футеровки печей РПЗ-48 N 13 и выполненных петрографических исследований выломок элементов футеровки, шихтовых материалов и продуктов плавки было установлено, что основной причиной разрушения подины является тот факт, что при проектировании печей такого типа, предназначенных для производства марганцевых ферросплавов, была принята футеровка печей, выплавляющих кремнистые сплавы, процесс производства которых является практически безшлаковым, а сплав характеризуется химической инертностью к углеродистым материалам и значительно более низким удельным весом по сравнению с марганцевыми ферросплавами, что и исключает разъедание швов между блоками и их всплытие.

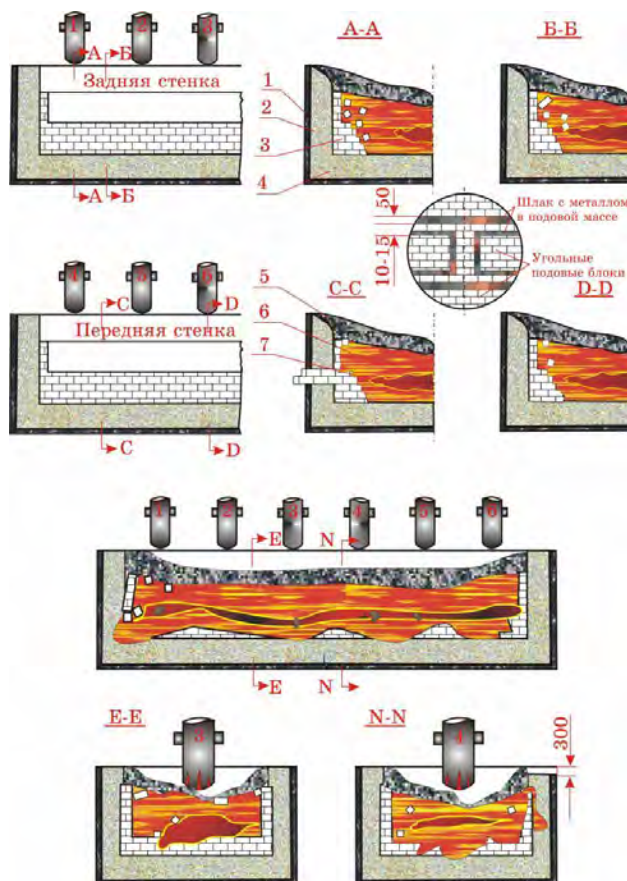


Рисунок 1 – Характер разрушения футеровки печи N 13 – РПЗ-48

Петрографические исследования выломок шихтовых материалов и продуктов плавки позволили установить механизм восстановительных процессов по мере продвижения шихты от колошника печи до подины. Более детально материалы этих исследований изложены в работе [7]. Установлено, что в верхних горизонтах печи происходит восстановление железа, а затем восстанавливается фосфор, содержание которого в корольках металла достигает 30%, что исключает возможность его улета в газовую фазу, и он практически полностью переходит в готовую продукцию. Поэтому для получения низкофосфористых марок марганцевых ферросплавов необходимо использовать высококачественное марганцевое сырье с низким содержанием фосфора или использовать электрометаллургический способ дефосфорации исходного марганцевого сырья, технология которого успешно освоена на НЗФ и позволяет получать конкурентоспособные на мировом рынке марганцевые сплавы требуемого качества [8].

Производство малофосфористого шлака характеризуется работой печи с недостатком восстановителя и большим количеством жидкоподвижного агрессивного, по отношению к углеродистым материалам, шлака. Поэтому разрушение футеровки печей, выплавляющих малофосфористый шлак, происходит путем химической эрозии обстановочных углеродистых блоков за счет его взаимодействия с углеродом футеровки.

С целью повышения стойкости футеровки было предложено изменить параметры печи – увеличить диаметр рабочего пространства, что обеспечило, совместно с орошением кожуха ванны, образование гарнисажа, позволяющего значительно продлить срок ее службы.

В настоящее время практически все электротермические печи, работающие на производстве многошлаковых сплавов, переводятся на работу с образованием гарнисажа, который образуется за счет орошения кожуха ванны печи или за счет

вмонтирования в футеровку холодильников. Особенно остро проблема повышения стойкости футеровки стоит при электротермической переработке окисленных никелевых руд при получении чернового ферроникеля, кратность шлака при котором составляет 6–10.

В условиях Побужского ферроникелевого комбината произошел прогар футеровки печи мощностью 48 МВ·А, выплавляющей ферроникель, с выходом и попаданием расплава в печную подстанцию, что привело к возгоранию трансформаторного масла в количестве около 40 т, большому разрушению конструкций здания цеха и значительным материальным потерям [9].

Такую же судьбу постигли суперсовременные печи постоянного тока (рис. 2), предназначенные для электротермической переработки мелкодисперсных руд для производства высокоуглеродистого ферромарганца в условиях Актюбинского ферросплавного завода [10]. По истечении примерно 8 месяцев после ввода в эксплуатацию печи, футерованные современными высококремнеземистыми огнеупорными материалами, прогорели.

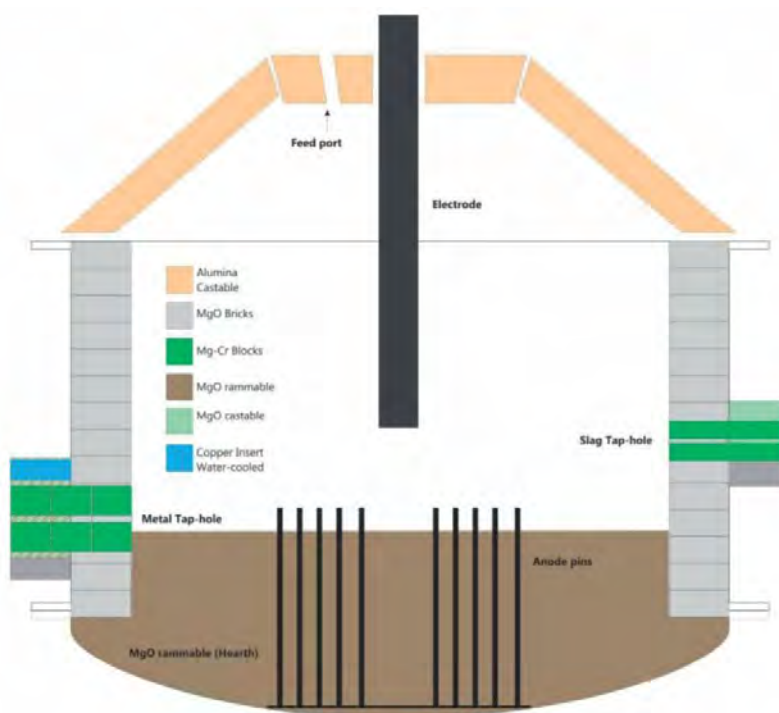


Рисунок 2 – Футеровка печи постоянного тока Mintek Актюбинского ферросплавного завода

На наш взгляд, причиной этому явилось то, что хромистые руды Казахстана характеризуются повышенным содержанием MgO, который при температуре электротермических процессов активно взаимодействует с Al_2O_3 футеровки с образованием шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$, растворимость Al_2O_3 в котором достигает 85,5% молей, что и приводит к разрушению высокоглиноземистой футеровки [11].

Таким образом, при проектировании и строительстве современных рудовосстановительных печей повышенной единичной мощности должно базироваться не только на теплотехнических расчетах и расчетах параметров ванны печи, но и особое внимание необходимо уделять физико-химическим процессам, протекающим в ванне печи при ведении восстановительной плавки, учитывать химический состав продуктов плавки и предусмотреть их возможное взаимодействие с материалами футеровки.

Выводы

Выполненные исследования позволили установить основные причины выхода из строя элементов конструкции головного образца рудовосстановительной печи повышенной мощности типа РПЗ-48 с ванной прямоугольной формы. Разработаны рекомендации и выполнена реконструкция системы подвески свода печи и загрузки шихтовых материалов с использованием немагнитной стали, что значительно снизило потери энергии и повысило срок и службы. Анализ выломов шихтовых материалов и продуктов плавки, отобранных из печи при ее остановке на капитальный ремонт после аварийного выхода расплава через кожух ванны печи, позволил установить характер разрушения подины печи и механизм протекания восстановительных процессов.

Разработана конструкция футеровки ванны печи, технология ее изготовления и материалы позволили довести срок безаварийной службы до 20 – 25 лет.

При проектировании современных рудовосстановительных печей повышенной мощности, этих сложнейших электротермохимических реакторов, необходимо учитывать всю совокупность взаимовлияния электрических, теплотехнических, физико-химических параметров процессов, протекающих в них при выплавке конкретных сплавов, характеризующихся особенностями температурного, шлакового режимов и физико-химических свойств расплава.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рудовосстановительные электропечи и технологии производства марганцевых ферросплавов. Под редакцией д.т.н. Куцина В.С. и академика НАН Украины Гасика М.И. – Днепропетровск: НМетАУ, 2011. – 508 с.
2. Освоение выплавки силикомарганца в прямоугольных ферросплавных печах РПЗ-48. / В.И.Матюшенко, С.И.Хитрик, Ю.В.Чепеленко, А.Н.Овчарук и др. // Бюллетень ЦНИИЧМ. – 1972. – N 2 (670). – С. 30–33.
3. К вопросу электрического режима и параметров печей РПЗ-48, выплавляющих товарный силикомарганец / В.И.Матюшенко, В.А.Кравченко, А.Н.Овчарук и др. // *Металлургия и коксохимия*: К.: Техніка, 1972. – Вып. 31. – С.38–41.
4. Влияние фактической мощности печи РПЗ-48 на основные технико-экономические показатели процесса выплавки силикомарганца / В.И.Матюшенко, Ю.В.Чепеленко, В.А.Кравченко, А.Н.Овчарук и др. // *Металлургия и коксохимия*: К.: Техніка, 1972. – Вып. 31. – С. 32–34.
5. Патент Украины N 49728. Подовая масса для холодной набивки футеровки ванны электропечей.
6. Работа реконструированной печи РПЗ-48 на проектной мощности / Ю.В.Чепеленко, В.И.Матюшенко, А.Н.Овчарук и др. // Сб. НИИМ. Производство ферросплавов. – *Металлургия*, 1974. – N 3. С. 5–10.
7. Петлеваний Л.Ф., Овчарук А.Н., Матюшенко В.И., Чепеленко Ю.В. Характер разрушения футеровок закрытых печей РКЗ-16,5 и РПЗ-48, выплавляющих малофосфористый шлак и товарный силикомарганец // первая научно-техническая конференция ферросплавщиков Украины. – Днепропетровск, 1972. – С. 24–25.
8. Овчарук А. Н. Ресурсосберегающие технологии выплавки конкурентоспособных марганцевых ферросплавов в мощных электропечах на основании рационального использования марганцевых концентратов и вторичных материалов / Дисс. докт. техн. наук. – Днепропетровск: НМетАУ, 1977 г.
9. Соколов К. Д. Совершенствование технологии конкурентоспособного ферроникеля в условиях ООО «ПФК» с использованием сырья зарубежных месторождений / Дисс. канд. техн. наук. – Днепропетровск: НМетАУ, 2012 г.
10. Geldenhuys I. J. Aspects of DC chromate smelting at Mintek – an overview. INFACON XIII, Kazakhstan, Almaty, 2013, p. 31–47.
11. Бережной А.С. Многокомпонентные системы оксидов // К.: Наукова думка, 1970. – С. 120–121.