

УДК 669.15-198**С.Г. ГРИЩЕНКО**, докт. техн. наук, профессор, генеральный директор

Центр управления проектами «Трансгеорудмет», г. Киев

А.Н. ОВЧАРУК, докт. техн. наук, профессор, **А.Ю. ТАРАН**, ассистент

Национальная металлургическая академия Украины (НМетАУ), г. Днепропетровск

В.И. ОЛЬШАНСКИЙ, директор по производству, **И.Ю. ФИЛИППОВ**, канд. техн. наук, начальник ПТО

ПАО «Никопольский завод ферросплавов», г. Никополь

С.А. МЕДЯНЦЕВ, канд. техн. наук, руководитель направления

ПрАО «Донецксталь», г. Донецк

В.И. ЧАЛЕНКО, генеральный директор,**В.Н. ДУДЯК**, заместитель генерального директора, **С.В. ПАВЛЕНКО**, специалист

ПАО «Ясиновский коксохимический завод», г. Макеевка

ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ ФЕРРОСИЛИКОМАРГАНЦА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОРЕАКЦИОННЫХ ВОССТАНОВИТЕЛЕЙ

В условиях Никопольского завода ферросплавов проведена опытно-промышленная кампания по выплавке ферросиликомарганца с использованием нового вида восстановителей – спецкокса, полученного из шихты, содержащей малометаморфизованные газовые угли. На основе опытных плавов установлена высокая эффективность применения специального опытного кокса, обладающего повышенным удельным электрическим сопротивлением и значительной реакционной способностью, что позволяет организовать целевой выпуск на Ясиновском коксохимзаводе новых видов специальных высокорекреационных восстановителей для ферросплавного производства.

Ключевые слова: ферросплавное производство, специальные виды кокса, высокорекреационный восстановитель.

Качество углеродистых восстановителей имеет важное значение для выплавки ферросплавов в рудовосстановительных электропечах, во многом определяя полноту и кинетику извлечения из рудных материалов в сплав ведущих компонентов, структуру рабочего пространства печи, скорость схода шихтовых материалов и, как следствие, основные энергетические характеристики ферросплавного передела [1, 2].

Для восстановителей, используемых при выплавке электроферросплавов, большое значение имеет такой параметр, как электросопротивление, поскольку именно электросопротивление кокса определяет величину этого параметра для ферросплавных шихт в целом, особенно в верхних горизонтах ванны печи. На колошнике печи, как известно, основные виды шихтовых материалов (руды, флюсы) фактически являются электрическими изоляторами, проводимость которых на порядок ниже, чем у используемых углеродистых восстановителей (за исключением металлической стружки, применя-

емой в отдельных технологических процессах). Иными словами, «подавить» нежелательные процессы, связанные с прохождением тока через шихту и ее перегревом в районе колошника, можно прежде всего путем увеличения удельного электрического сопротивления восстановителя – наиболее проводящего компонента шихты.

Учитывая особенности проведения плавки ферросплавов в низкошахтных рудотермических печах, конструктивно отличающихся от высокошахтных доменных печей, допустимо некоторое снижение требований к ферросплавным восстановителям по прочности, зольности и т.д. (по отношению к доменному коксу). Однако взамен этому углеродистые материалы должны удовлетворять специфическим требованиям по электротехнологическим характеристикам и реакционной способности при умеренной стоимости восстановителя за счет использования в шихте для коксования недорогих и недефицитных видов углей [3].

На Ясиновском коксохимзаводе (ЯКХЗ), где совместно с Углекимическим институтом (УХИН) разработана техно-



логия предварительной термической подготовки шихты, в 2006–2007 гг. были проведены исследования, в результате которых установлена возможность получения специальных видов кокса для производства ферросплавов из низкоспекающихся высоколетучих углей начальной стадии метаморфизма [4]. Нарботанные в тот период опытные партии высокорекреакционных восстановителей были испытаны в промышленных условиях Никопольского и Стахановского заводов ферросплавов для производства ферросиликомарганца и 65 % ферросилиция взамен кокса-орешка. Как показано в наших работах [5–7], использование спецкокка, даже в ходе кратковременных испытаний: печи работали стабильно, их производительность повысилась, улучшилась посадка электродов в шихте, увеличилось извлечение в сплав ведущих элементов (марганца и кремния), снизился расход электроэнергии (на 50–300 кВт·час/т – в зависимости от марки сплава).

Опираясь на результаты вышеуказанных работ, на ЯКХЗ был введен в действие специализированный участок предварительной термической подготовки шихты, возобновлены (в 2013 г.) производство специальных восстановителей и их более длительные испытания при производстве ферросплавов.

С целью оптимизации технологии в условиях Никопольского завода ферросплавов (НЗФ) проведены опытно-промышленные испытания выплавки ферросиликомарганца с использованием опытной партии высокорекреакционного восстановителя, произведенного ЯКХЗ, при этом в состав шихты для коксования вводилось 80 % высокорекреакционных молодых малометаморфизованных газовых углей. Для улучшения качества производимого целевого продукта коксовая шихта подвергалась специальной термической подготовке исходя из требований ферросплавного производства касательно высоких значений удельного электрического сопротивления (УЭС) и реакционной способности восстановителя.

Поступивший на завод спецкокк производства ЯКХЗ характеризовался (по данным входного анализа) следующими показателями: содержание мелкой фракции 10–0 мм – 2,9 %, кусковой фракции + 25 мм – 18,8 %, твердого углерода – 86,4 %, золы – 10,6 %, летучих – 1,7 %, влаги (среднее) – 4,9 %. Опытная партия специального восстановителя после складирования подготавливалась к плавке по обычной схеме, действующей на НЗФ для сортированного кокса. Кокс подавался на четырехвалковые дробилки, затем на грохот с ячейками 10×10 мм. После отсева подрешетная фракция 10–0 мм направлялась для использования в качестве аглотоплива на аглофабрику завода, а надрешетная (сортированный кокс фракции +10 мм) через систему промежуточных бункеров и конвейеров поступала в печные бункера для дозировки.

После сортировки фракционный состав спецкокка характеризовался следующими показателями: содержание фракции 5–0 мм – 6–10 %, а фракции +25 мм – до 5 %, что полностью соответствовало приведенным выше требованиям технологической инструкции. Выход фракций после дробления и отсева при сортировке спецкокка составил: 5–0 мм – 14 %, 25–5 мм – 86 %, что также соответствует типичным данным. От подготовленных партий спецкокка были отобраны представительные образцы для выполнения комплекса лабораторных исследований.

Исследования металлургических свойств образцов специальных восстановителей и стандартного кокса-орешка включали определение их физических характеристик (плотности, пористости и прочности), УЭС и реакционной способности (горючести). Истинную и кажущуюся (объемную) плотности определяли пикнометрическим способом, а прочность кусков – методом разрушения образцов неправильной формы на испытательной машине ZDM 10/91. Значения УЭС образцов определяли на установке УЭСП-1 по методике пособия [8]. Учитывая отсутствие общепринятых или стандартизованных специальных методов оценки реакционной способности восстановителей для ферросплавного производства, а также близость понятий «реакционная способность» и «горючесть» для кокса, в ходе исследований определялась именно горючесть представленных образцов (по методу, описанному в работе [9]).

Как показали исследования, истинная и объемная плотности всех представленных проб имеют близкие значения и составляют в среднем для опытных проб спецкокка 1,88 и 1,00 т/м³, а для проб обычного кокса – 1,81 и 0,95 т/м³ соответственно. Значения пористости образцов колеблются от 44,4 до 51,3 %; средняя пористость опытных проб на 1,38 % выше, чем у образцов стандартного кокса. Прочность кусков исходной крупности по пробам от 233 до 320 кг/образец, при этом прочность проб опытного кокса незначительно (на 3,4 %) выше прочности базовых образцов проб. Значения УЭС, измеренные для всех образцов кокса в классе крупности 6–3 мм, попадают в интервал 1,05–2,10 Ом·м. УЭС опытного кокса составляет в среднем 1,34 Ом·м, в то время как среднее УЭС для обычного кокса из углей Донецкого бассейна равно 1,10 Ом·м. Таким образом, среднее значение УЭС проб опытного специального восстановителя на 11,63 % выше аналогичного параметра базовых образцов.

Динамика изменения массы проб при определении реакционной способности (горючести) образцов восстановителей показана на рис. 1, а графики скорости убыли массы образцов в этих опытах представлены на рис. 2, 3.

Общепризнано, что показатели реакционной способности кокса как восстановителя являются наиболее

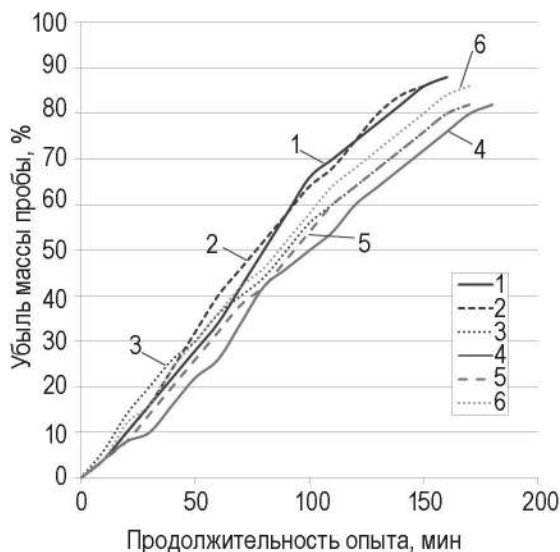


Рисунок 1 – Динамика изменения массы проб при определении реакционной способности (горючести) углеродистых восстановителей по методу НМетАУ:

1, 2, 3 – кокс-орешек (базовый); 4, 5, 6 – спецкокс производства ЯКХЗ

объективными характеристиками качества по сравнению с обычно используемыми на практике показателями дробимости и истираемости кокса. Именно поэтому представленные пробы исследовались на горючесть. Поскольку горючесть (или реакционная способность по кислороду) кокса с высокой степенью достоверности имитирует реакционную способность по CO_2 (ГОСТ-100089-89) и индекс реакционной способности (CRI по стандарту ASTM D 5341-99), то представленные на рис. 1, 2 результаты можно считать обоснованными.

Анализируя результаты, приведенные на этих рисунках, следует отметить, что реакционная способность по кислороду (скорость убыли массы) для всех проб отвечала требованиям, предъявляемым к металлургическому коксу. Пробы 4–6 опытного восстановителя имели более высокое качество по этому показателю (что подтверждается данными рис. 2) и более равномерную скорость убыли массы. Это подтверждает большую структурную прочность и меньшую разрушаемость опытных образцов указанных проб.

Таким образом, комплекс проведенных лабораторных исследований показал более высокие металлургические свойства опытного специального восстановителя производства ЯКХЗ по сравнению со стандартным коксом-орешком.

Выплавка ферросиликомарганца на НЗФ велась в печи № 6 (РПЗ-63И1 – герметичная печь со стационарной прямоугольной ванной, оборудована шестью самоспекающимися электродами). Фактическое использование ее мощности в 2013 г. характеризуется следующими данными: май

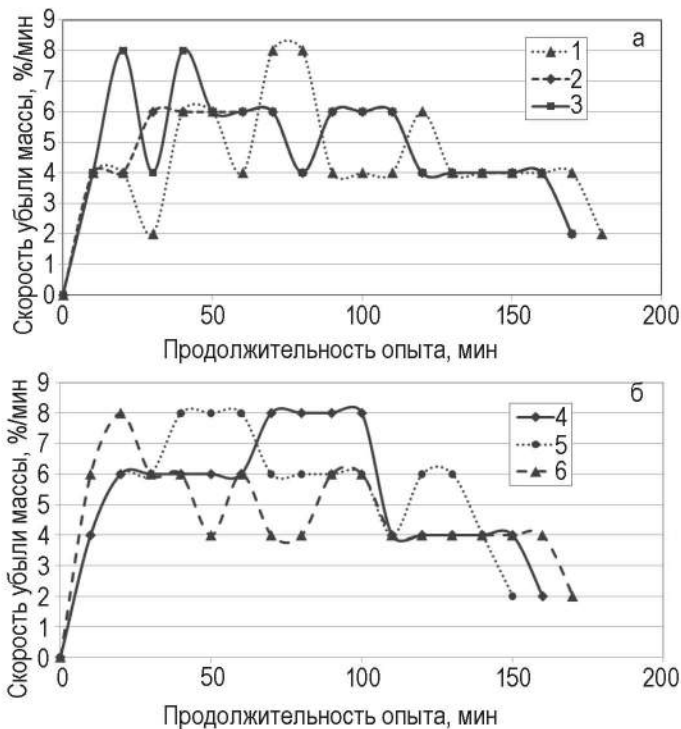


Рисунок 2 – Скорость убыли массы проб в течение опыта по определению реакционной способности (горючести) углеродистых восстановителей по методу НМетАУ:

а) пробы 1, 2, 3 – кокс-орешек (базовый);
б) пробы 4, 5, 6 – спецкокс производства ЯКХЗ

(предшествующий период) – 33,13 МВт, июнь (опытный период) – 32,73 МВт, июль (опытный период) – 33,76 МВт, август (после окончания опытной кампании) – 33,88 МВт, т.е. в опытный период фактическое использование мощности печи № 6 примерно соответствовало обычным (базовым) показателям, заложенным в качестве нормы.

Во время исследований производственная программа данной печи предполагала выплавку ферросиликомарганца с содержанием фосфора 0,25 % и в опытный период, и в базовый, поэтому состав шихты рассчитывался с учетом обеспечения производства сплава именно с таким содержанием фосфора, что достигалось использованием в шихте импортных низкофосфористых руд и передельного шлака от выплавки высокоуглеродистого ферромарганца.

Сведения о химическом составе сырья при проведении опытных плавов в условиях НЗФ приведены в табл. 1.

Соотношение масс восстановителя, рудных компонентов и кварцита в опытный период рассчитывалось исходя из условия поддержания в шихте следующих отношений: $C_{тв}/Mn = 0,44-0,47$ и $SiO_2/Mn = 0,95-1,0$. При этом согласно принятой на НЗФ технологии 15 % вносимого твердого углерода ($C_{тв}$) обеспечивалось за счет использования в шихте антрацита, а 85 % – спецкокса.

Следует отметить, что в силу ряда организационных причин (наличие и поступление импортного сырья)



Таблица 1 – Химический состав марганцеворудного сырья при проведении плавки ферросиликомарганца на НЗФ с использованием спецкокса производства ЯКХЗ

Вид сырья	Содержание компонентов, % масс.							
	Mn	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe	P	W _{вл}
Агломерат АМНВ-2П	38,1	21,2	8,9	5,5	–	2,3	0,11	–
Руда ЮАР КК37	37,2	6,3	15,8	3,3	0,7	6,6	0,023	3,4
Руда ЮАР КК42Т	43,4	4,9	7,3	1,1	0,6	13,4	0,039	1,8
Руда Австралия КК49НЖ	52,6	6,8	1,0	0,9	0,9	3,2	0,032	3,0
Руда Гана МК28	28,5	12,8	6,5	4,6	2,2	1,3	0,067	2,8

в ходе опытной кампании состав рудной части шихты претерпевал существенные изменения. Анализ показал, что с учетом изменений в видах и количестве используемого сырья (как через агломерат, так и непосредственно в печной шихте), целесообразно рассматривать три периода по используемым рудным материалам: подкампания 1 – марганцевый агломерат АМНВ-2П, руды ЮАР КК37 и КК42, а также значительное количество вторичных материалов – СШМС, ВМС, СГМ; подкампания 2 – марганцевый агломерат АМНВ-2П в сочетании с большей (по сравнению с подкампанией 1) навеской руды ЮАР КК37 и подшихтовкой железной руды; подкампания 3 – марганцевый агломерат АМНВ-2П и импортные руды – Австралия КК49НЖ и Гана МК28.

Работа печи при использовании специального восстановителя в опытный период в целом характеризовалась стабильными газовым и электрическим режимами, удовлетворительным выпуском расплава, отсутствием затруднений с обслуживанием леточного узла. Режим перепуска электродов был близок к оптимальному; во время кампании перепуск электродов осуществлялся равномерно по всем фазам и составил 31 мм на

100 тыс. кВт·час съема электроэнергии. Фактическое содержание марганца и кремния в готовом ферросплаве соответствовало ДСТУ 3548-97 (Ферросиликомарганец. Общие технические условия). Во второй подкампании содержание марганца в сплаве тоже удовлетворяло ДСТУ, но на более низком уровне, при этом наблюдалось пониженное (но в пределах нормы, предусмотренной заводской технологической инструкцией) содержание марганца и в рудной части шихты – 35,16 %, что было связано с вводом в шихту железной руды.

Показатели работы печи в опытный период приведены на рис. 3.

Изменение содержания марганца в рудной части шихты по подкампаниям показано на рис. 4. Относительно низкое содержание Mn в рудной части шихты в период второй подкампании, как отмечено выше, было связано с использованием большей навески железной руды в шихте. Общеизвестное позитивное влияние железа на полноту и кинетику восстановления оксидов марганца [2], а именно снижение активности марганца в сплаве при его разбавлении железом (в подкампании 1 среднее содержание марганца в сплаве составило 67,33 %, в то время

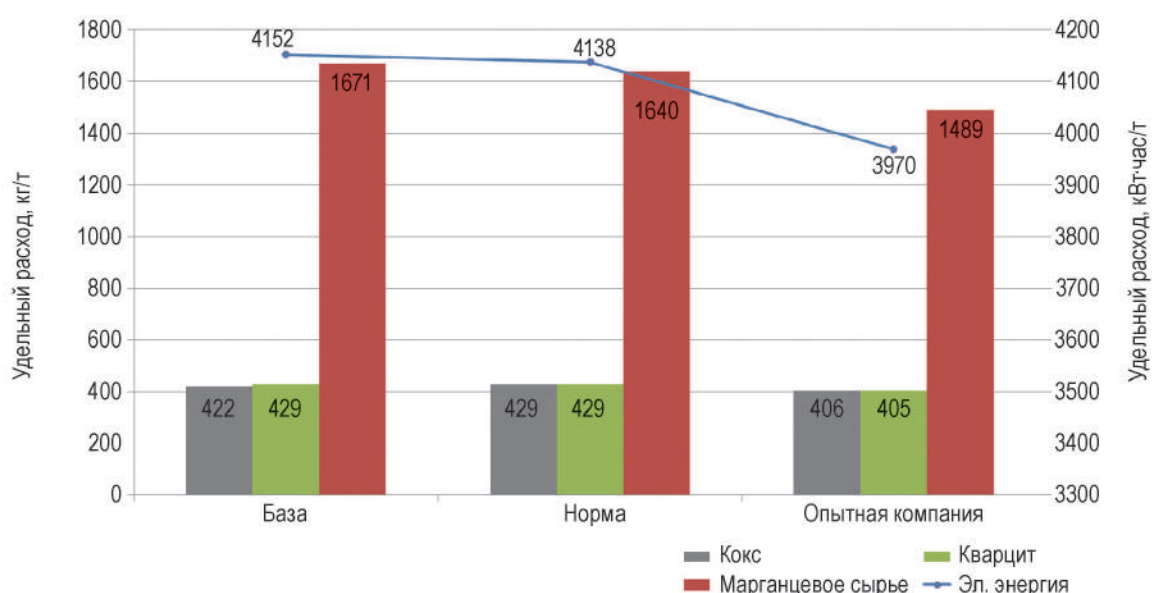


Рисунок 3 – Расход шихтовых материалов и электроэнергии на выплавку 1 баз. т SiMn в опытный период по сравнению с базовым периодом и нормой (расход марганцевого сырья приведен в пересчете на базовое сырье 48 % Mn)

как в подкампаниях 2 и 3 оно достигало 71–72 %), привело к снижению кратности шлака с 1,42–1,44 в подкампаниях 1 и 3 до 1,32 в подкампании 2 (рис. 5).

В период опытной кампании наблюдалось фактическое снижение расхода марганцевого сырья (на 10,9 %) и электроэнергии (на 4,4 %) по сравнению с базовыми показателями, а в первую подкампанию имело место также снижение расхода восстановителя на 8,3 %.

Фактическое снижение удельного расхода электроэнергии в опытный период по сравнению с базовым (нормой) составило 168 кВт·час/баз. т, а фактические удельные расходы марганцевого сырья, кокса и кварцита снизились на 32, 21,2 и 23,9 кг/баз. т соответственно. Извлечение марганца в опытный период выросло на 7,42 % – с 83,7 % до 91,12 %.

Всего в ходе 28-суточной опытной кампании, проведенной на НЗФ в 2013 г., было выплавлено 5,603 тыс. т ферросиликомарганца. Из-за разного количества использованных металлизированных отходов в базовый (норма) и опытный (дополнительно 84 кг отходов/баз. т) периоды потребовалось внести корректировки в фактические показатели. Было учтено также влияние отклонений в содержании марганца в рудной части шихты для обоих периодов. Технико-экономические показатели (ТЭП) выплавки ферросиликомарганца весьма существенно зависят от этого фактора [10]: при увеличении содержания Mn в шихте на 1 % его извлечение в сплав возрастает на 0,7 %, расход электроэнергии снижается на 50 кВт·час/т и производительность печи повышается на 13 баз. т/сутки. В нашем случае, как показано выше, содержание марганца в рудной части шихты менялось в подкампаниях опытного периода и отличалось от базового значения (рис. 4), при этом средневзвешенное содержание в опытный период составило 37,69 %, что на 1,27 % ниже расчетного показателя (38,96 %), характерного для базового периода.

Как показывают расчеты, этой разнице в содержании марганца в рудной части шихты соответствуют раз-

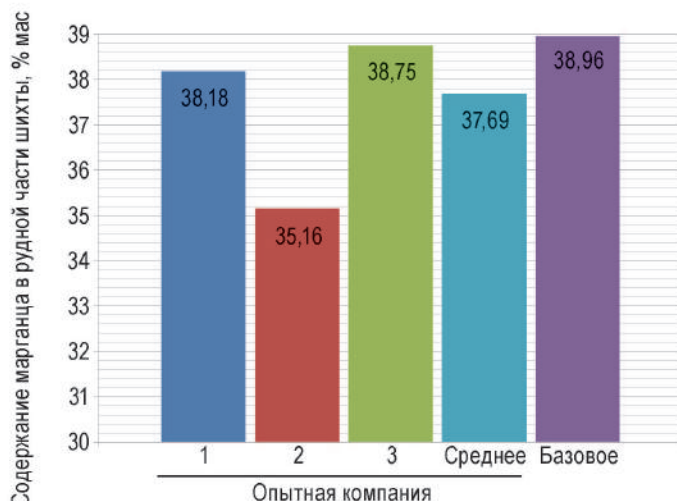


Рисунок 4 – Содержание марганца (% масс.) в рудной части шихты в опытный и базовый периоды выплавки ферросиликомарганца на НЗФ

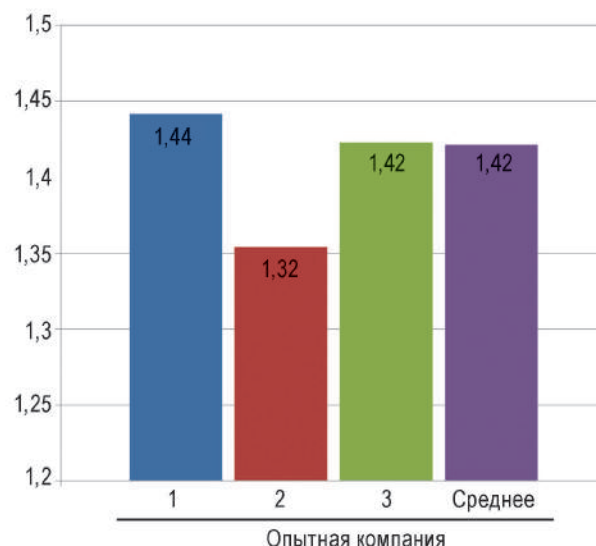


Рисунок 5 – Кратность шлака в подкампаниях 1–3 опытной кампании выплавки ферросиликомарганца и средневзвешенная кратность шлака за всю кампанию

Таблица 2 – Расчетные ТЭП выплавки ферросиликомарганца с использованием спецвосстановителя в условиях НЗФ, приведенные по содержанию марганца в рудной части шихты и использованию отходов

Показатель	Норма (базовый период)	Фактическое значение (опытный период)	Расчетное значение с учетом содержания Mn в шихте и использования отходов (опытный период)	Отклонение расчетного показателя от базового
Расход на 1 баз. т:				
марганцевого сырья (48 % Mn), кг	1640	1608	1612	– 28
кокса, кг	429	419	424	– 5
кварцита, кг	429	425	425	– 4
электроэнергии, кВт·час/баз. т	4138	3970	4070	– 68
Извлечение марганца в сплав, %	83,7	91,1	92,0	+ 8,3



ницы в удельном расходе электроэнергии – 63,5 кВт·час/ баз. т, расходе сырья – 12 кг/баз. т и извлечении марганца – 0,9 %.

Изменения ТЭП, рассчитанные на основании полученных данных (с учетом фактического содержания марганца в рудной части шихты и использования большого количества прометаллических отходов в опытный период), представлены в табл. 2.

Согласно результатам опытных испытаний экономический эффект от применения спецкокса для выплавки ферросплавов в условиях НЗФ составил 34 грн на 1 т ферросиликомарганца (или 95 грн в пересчете на 1 т сортированного специального восстановителя производства ЯКХЗ).

ВЫВОДЫ

Проведенные опытно-промышленные испытания показали достаточно высокую эффективность применения специального высокорреакционного восстановителя для выплавки ферросиликомарганца в условиях Никопольского завода ферросплавов. Это свидетельствует о целесообразности организации на Ясиновском коксохимзаводе постоянного производства новых видов специальных высокорреакционных восстановителей с большими удельными электрическими сопротивлениями и их широкого применения на ферросплавных предприятиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мизин В. Г. Углеродистые восстановители для ферросплавов / В. Г. Мизин, Г. В. Серов. – М. : Металлургия, 1976. – 272 с.
2. Гасик М. И. Теория и технология электрометаллургии ферросплавов / М. И. Гасик, Н. П. Лякишев. – М. : СП ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ, 1999. – 764 с.
3. Zubov V. L. Физико-химические свойства, структурные характеристики углеродистых восстановителей и их применение при выплавке ферросилиция / В. Л. Zubov, A. N. Ovcharuk, M. I. Gasik. – Д. : Системные технологии, 2001. – 144 с.
4. Исследование процесса получения рудоугольных материалов в коксовых печах : отчет о НИР ; дог. № 233.2006 / УХИН ; Ковалев Е. Т. и др. – Харьков, 2006. – 34 с. – № ГР 0106U008776.
5. Использование высокорреакционного кокса-орешка при производстве ферросплавов / С. Г. Грищенко, М. И. Гасик, А. Н. Овчарук [и др.] // Сталь. – 2007. – № 8. – С. 53.
6. Повышение эффективности ферросплавного производства за счет применения специальных видов углеродистых восстановителей / С. Г. Грищенко, М. Я. Гаршт, М. И. Гасик [и др.] // Казантип-ЭКО-2011. Инновационные пути решения актуальных проблем базовых отраслей, экологии, энерго- и ресурсосбережения : сборник трудов XIX Междунар. науч.-практ. конф., 6–10 июня 2011 г., г. Щелкино, АР Крым. В 3 т. Т. 1 / УкрГНТЦ «Энергосталь». – Харьков : НТМТ, 2011. – С. 50–54.
7. Production of special kinds of carbonaceous reducing agents for ferroalloy smelting / S. G. Grischenko, M. I. Gasik, A. N. Ovcharuk, Filatov Yu. V., Garsht M. Ya. // Proceedings of INFACON XIII. The thirteenth international ferroalloys congress Efficient Technologies in Ferroalloy Industry. June 9–12.2013. Almaty, Kazakhstan. V. 1. – V.p. 505–510.
8. Скляр М. Г. Химия твердых горючих ископаемых : лабораторный практикум. / М. Г. Скляр, Ю. Б. Тютюнников. – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Вища шк. Головное изд-во, 1985. – 247 с.
9. Разработка рационального состава брикетов на основе коксовой мелочи для электротермического производства ферросплавов и их металлургическая оценка : отчет о НИР ; Овчарук А. Н. и др. / ООО НПФ «Техносплавы». – Днепропетровск, 2013. – 22 с.
10. Овчарук А. Н. Теоретические основы и технологии производства марганцевых ферросплавов углеродтермическим процессом / А. Н. Овчарук. – Д. : Системные технологии, 1997. – 105 с.

Поступила в редакцию 19.05.2014

В умовах Никопольського заводу феросплавів проведено дослідно-промислову кампанію щодо виплавки феросиликомарганцю з використанням нового виду відновників – спецкоксу, отриманого з шихти, що містить малометаморфізовані газові вугілля. На основі досліджуваних плавок встановлено високу ефективність застосування спеціального досліджуваного коксу, який має підвищений питомий електричний опір і значну реакційну здатність. Це надає змогу організувати цільовий випуск на Ясиновському коксохімічному заводі нових видів спеціальних високорреакційних відновників для феросплавного виробництва.

At «Nikopol Ferroalloys Plant» one be made experimental-industrial action to smelt ferrosilicon manganese using new type of regenerators – special coke obtained from burden containing low-metamorphized gas coals. Based on pilot melts one be defined high efficiency of special coke use which has higher specific electric resistance and large reacting capacity, it is allowed to make oriented production of new types of special high-reacting regenerators for ferroalloy process at “Yasinovsky by-product coke plant”.