

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ПОКАЗАТЕЛИ ВЫПЛАВКИ ФЕРРОСИЛИКОМАРГАНЦА

В. С. Куцин¹, В. А. Гладких², В. И. Ольшанский¹,
А. В. Рубан², С. Н. Кузьменко¹, И. Ю. Филиппов¹

¹ ПАО «Никопольский завод ферросплавов» (г. Никополь, Украина),

² Национальная металлургическая академия Украины (г. Днепропетровск, Украина)

Исследовано влияние интегральных (ток, напряжение, мощность) и дифференциальных (сопротивление шихты, дуги, расплава) электрических характеристик на технико-экономические (расход электроэнергии, извлечение марганца, производительность) показатели выплавки ферросиликомарганца в сверхмощной рудовосстановительной электропечи

Ключевые слова: ферросиликомарганец, рудовосстановительная электропечь, корреляционная связь, электрические характеристики, технико-экономические показатели.

В соответствии с государственными стандартами ДСТУ 3547–97, ДСТУ 3548–97 и требованиями зарубежных потребителей на ферросплавных заводах Украины выплавляют основной объем марганцевых ферросплавов различного химического состава и качества по содержанию марганца, железа, кремния, углерода, фосфора и серы среди стран СНГ и Европы. При этом в производстве используют передовые технологические схемы предварительной подготовки исходного сырья, рудовосстановительной плавки, разливки и фракционирования закристаллизованных слитков [1, 2].

Исходя из результатов аналитических и экспериментальных исследований, имеются реальные возможности в вопросах интенсификации электротермических процессов производства марганцевых ферросплавов в мощных рудовосстановительных электропечах с целью улучшения качества конечной продукции при использовании различного по свойствам марганцеворудного сырья и отходов собственного производства, а также решения задач, связанных с разработкой и внедрением новых направлений в оптимизации и оперативном управлении технологическим ходом работы электропечи [3]. Большое значение при этом уделяется вопросам использования компьютерных технологий по анализу, прогнозированию, моделированию и управлению технологическими процессами получения конечной продукции [4].

Опыт разработки и внедрения локальных и автоматизированных систем управления технологическими процессами в ПАО НЗФ показал ряд преимуществ и ряд недостатков регулирования электрического режима по одному только электрическому току. Прежде всего оперативного решения требуют вопросы влияния ложной подины, избытка или недостачи кокса в шихте на положение рабочей зоны в ванне печи, определения доли мощности, которая выделяется в этих зонах, в том числе и в электрической дуге.

В ферросплавных электропечах источник тепловой мощности — электрическая энергия. Исследование электрических характеристик углеродовосстанови-

тельных процессов, а именно особенностей и закономерностей распределения тока, напряжения и мощности, следовательно, формирования электрических и температурных зон в ванне печи имеет определяющее значение в достижении высоких технико-экономических показателей выплавки марганцевых ферросплавов.

Общепринятое представление о наличии в ванне ферросиликомарганцевой печи четырех структурных зон: твердой шихты, размягченной полурасплавленной шихты (магмы), шлаковой зоны и зоны металла должно быть дополнено признанием существования также и зоны слоя кокса, которая играет роль не только восстановителя, но и одного из основных проводников тока — электронагревателя сопротивления [5]. Образование коксового слоя в промышленной рудовосстановительной электропечи, выплавляющей ферросиликомарганец, связывают с разностью температур между плавлением марганцевых материалов и началом процесса восстановления, а также разницей в скоростях восстановления марганца и кремния и накопления оксидного расплава.

При проведении металлургической оценки качества исходного марганецсодержащего сырья и предварительно подготовленных материалов необходимо исходить из обобщенных требований к комплексу химических, физико-минералогических свойств, степени восстановления химических элементов, к уровню значений электрических характеристик. Ферросплавная электропечь представляет собой многофакторную систему, в которой взаимосвязанно протекают физико-химические, электротехнические и термические процессы.

В данной работе приведены результаты корреляционного анализа промышленных данных по выплавке ферросиликомарганца в рудовосстановительной электропечи типа РПЗ-68И1, включающие исследование влияния контролируемых в процессе рудовосстановительной плавки стандартных электрических характеристик — тока электрода $I_э$, напряжения на электроде $U_э$, активной мощности $P_а$ и активного сопротивления

печи R_3 — и определяемых нами по разработанной методике его составляющих — сопротивлений дуги-шихты $R_{дш}$ и расплава R_p [6] — на конечные показатели процесса.

В качестве основных технико-экономических показателей в исследованиях были выбраны следующие: производительность электропечи (Π_n), удельный расход электроэнергии ($Q_{уд}$) и эффективность использования марганецсодержащего сырья (коэффициент извлечения марганца в сплав (η_{Mn})) [7].

Матрица корреляции исходных электрических характеристик и конечных показателей выплавки ферросиликомарганца в мощных электропечах приведена в таблице.

По результатам, приведенным в таблице, высокие коэффициенты корреляции наблюдаются в связях влияния электрических характеристик на активную мощность электрода, производительность электропечи и расход электроэнергии.

Электрический режим электротермических процессов производства марганцевых ферросплавов в высокомоощных ферросплавных электропечах — определяющий фактор в распределении энергетической мощности и, соответственно, достижении необходимой температуры для активного протекания восстановительных процессов в реакционной зоне ванны печи.

Достижение необходимых величин электрических характеристик на практике обеспечивается благодаря постоянным параметрам электропечной установки, переключению ступеней напряжения печного трансформатора и влиянию технологических параметров шихтового режима на изменение текущих значений вышеприведенных электрических характеристик в период плавки.

Основная переменная электрической характеристики рудовосстановительной плавки — электрическое сопротивление приэлектродного пространства (R_3) — интегральный показатель сопротивления рабочего конца электрода и подэлектродного пространства шихты ($R_{ш}$), дуги (R_d) или их обобщенного показателя ($R_{дш}$), а также сопротивления расплава (R_p), методика определения которых была разработана ранее. Сопротивление приэлектродного пространства для мощных прямоугольных электропечей, выплавляющих ферросиликомарганец, изменяется в интервале $0,4 - 1,4 \text{ м} \cdot \text{Ом}$. Из критериальной оценки влияния R_3 на конечные показатели (рис. 1) видно, что в исследо-

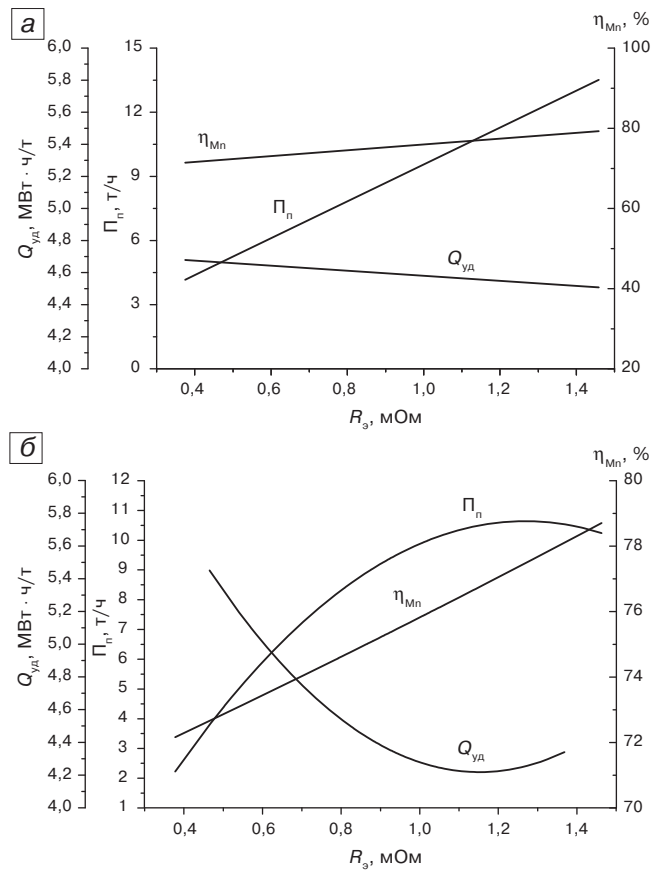


Рис. 1. Зависимость удельного расхода электроэнергии ($Q_{уд}$), коэффициента извлечения марганца (η_{Mn}) и производительности печи (Π_n) от сопротивления подэлектродного пространства (R_3): а — $Q_{уд} = 251,2 \cdot R_3 + 52,2$; $\eta_{Mn} = 1,63R_3 + 73,9$; $\Pi_n = -2,38R_3 + 11,2$; б — $Q_{уд} = 2,61 R_3^2 - 6,0138R_3 + 7,6823$; $\eta_{Mn} = 0,472 R_3^2 + 6,3748 R_3 + 69,097$; $\Pi_n = -15,303 R_3^2 + 36,934 R_3 - 11645$

ванном интервале изменения R_3 производительность печи и коэффициент извлечения марганца повышаются, а удельный расход электрической энергии снижается с ростом R_3 . Рабочие значения соответствуют сопротивлению R_3 , равному $1,1 - 1,2 \text{ м} \cdot \text{Ом}$, величина мощности дуги (P_d), которая выделяется в результате сопротивления дугового промежутка (R_d), для шлакового процесса выплавки ферросиликомарганца составляет $10 - 15 \%$ активной мощности электрода (P_a).

При небольшом значении R_3 энергетической мощности, которая выделяется в приэлектродном пространстве, для высокой интенсивности протекания

Матрица корреляций

Переменные	I_3	U_3	R_3	$R_{дш}$	R_p	P_a	Π_n	$Q_{уд}$	η_{Mn}
I_3	1	0,55	-0,01	0,13	-0,10	0,74	0,56	0,44	0,14
U_3	0,55	1	0,81	0,75	0,71	0,96	0,81	0,65	0,16
R_3	-0,01	0,81	1	0,86	0,94	0,64	0,57	0,44	0,07
$R_{дш}$	0,13	0,75	0,86	1	0,63	0,65	0,51	0,40	0,05
R_p	-0,10	0,71	0,94	0,63	1	0,54	0,52	0,40	0,08
P_a	0,74	0,96	0,64	0,65	0,54	1	0,82	0,67	0,16
Π_n	0,56	0,81	0,57	0,51	0,52	0,82	1	0,47	0,23
$Q_{уд}$	0,44	0,65	0,44	0,40	0,40	0,67	0,47	1	0,44
η_{Mn}	0,14	0,16	0,08	0,05	0,10	0,16	0,23	0,45	1

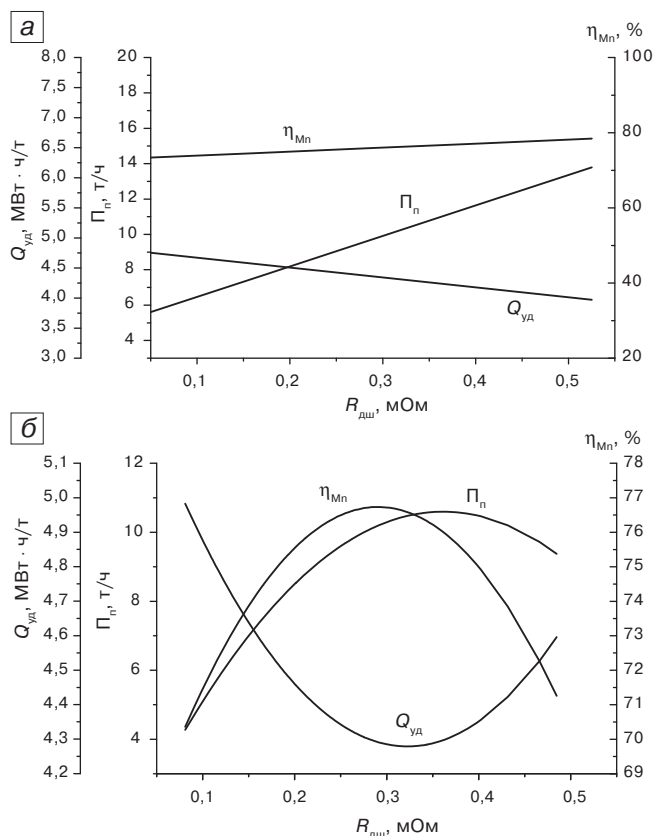


Рис. 2. Зависимость удельного расхода электроэнергии ($Q_{уд}$), коэффициента извлечения марганца (η_{Mn}) и производительности печи (Π_n) от сопротивления дуги и шунта ($R_{дш}$):
 а — $Q_{уд} = 513,7R_{дш} + 160,3$; $\eta_{Mn} = 10,5R_{дш} + 72,9$;
 $\Pi_n = 17,2R_{дш} + 4,74$; б — $Q_{уд} = 12,055R_{дш}^2 - 7,778R_{дш} + 5,5336$; $\eta_{Mn} = -1,4513R_{дш}^2 + 0,8434R_{дш} + 0,6448$;
 $\Pi_n = -80,42R_{дш}^2 + 58,134R_{дш} + 0,09$

эндотермических реакций углеродовосстановительного процесса оксидов марганца и кремния недостаточно, чем объясняется снижение коэффициента извлечения марганца в сплав.

Влияние сопротивления дуги-шихты ($R_{дш}$) и расплава (R_p) на производительность печи (Π_n), удельный расход электрической энергии ($Q_{уд}$) и коэффициент извлечения марганца в сплав (η_{Mn}) приведены на рис. 2, 3.

Взаимосвязи тока ($I_э$), напряжения ($U_э$), электрического сопротивления приэлектродного пространства ($R_э$), производительности электропечи (Π_n) с активной мощностью печи (P_a) представлены на рис. 4. Исходя из данных рис. 4, активная мощность, выделяемая под электродом, аддитивно определяется величиной тока, напряжения, сопротивлением рабочего конца электрода и подэлектродного пространства. При увеличении указанных электрических характеристик возрастает и активная мощность электрода. Такая же связь характерна для производительности печи при увеличении активной мощности электрода и, соответственно, печи.

Таким образом, основные технико-экономические показатели работы ферросплавной печи повышенной мощности — 63 МВ · А определяются прежде всего возможностью максимального использования установленной мощности (P_a), которая, в свою оче-

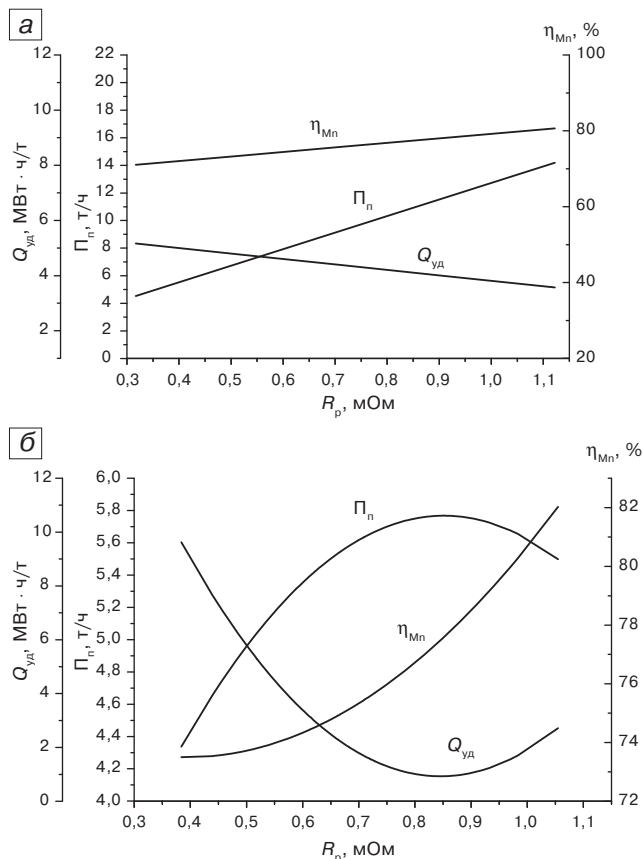


Рис. 3. Зависимость удельного расхода электроэнергии ($Q_{уд}$), коэффициента извлечения марганца (η_{Mn}) и производительности печи (Π_n) от сопротивления расплава (R_p):
 а — $Q_{уд} = 344,4R_p + 49,6$; $\eta_{Mn} = 11,9R_p + 67,2$; $\Pi_n = 12R_p + 0,725$;
 б — $Q_{уд} = 6,8R_p^2 - 11,5R_p + 9,016$; $\eta_{Mn} = 0,19427R_p^2 - 0,1525R_p + 0,7649$; $\Pi_n = -39,2R_p^2 + 66,789R_p + 7,6823$

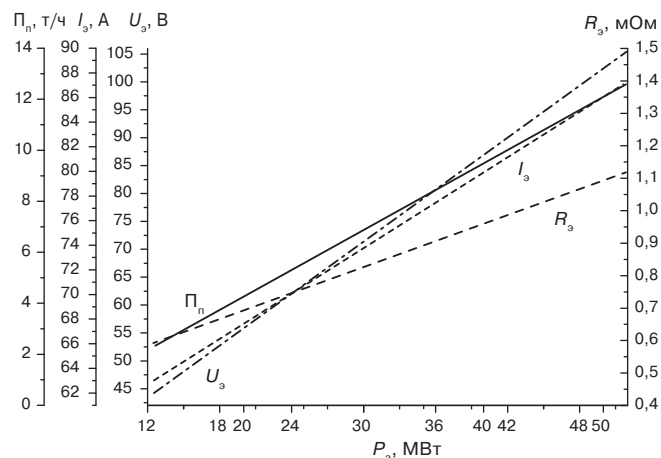


Рис. 4. Зависимость тока ($I_э$), напряжения ($U_э$), сопротивления ($R_э$) и производительности печи (Π_n) от активной мощности печи (P_a): $I_э = 0,6P_a + 55,4$; $U_э = 1,55P_a + 24,7$;
 $R_э = 0,0134P_a + 0,42$; $\Pi_n = 0,26P_a - 0,94$

редь, зависит не только от общего сопротивления подэлектродного пространства, но и от составляющих электрического сопротивления шихты, дуги, металла и шлака. Если при получении стандартного сплава — ферросиликомарганца сопротивление металла

практически не меняется, то сопротивление расплава будет определяться прежде всего физико-химическими свойствами шлака. Поэтому рациональный технологический режим — соотношение рудной части (агломерат, концентрат, кварцит) и восстановителя (коксик, уголь) ($R_{\text{лш}}$), а также формирование шлака соответствующих физико-химических свойств (R_p) — обеспечивает необходимое распределение мощности в ванне печи и оптимальные показатели процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гасик М. И., Лякишев Н. П. Физикохимия и технология электроферросплавов : учебник для вузов. — Днепропетровск : ГНПП «Системные технологии», 2005. — 448 с.
2. Куцин В. С., Величко Б. Ф., Гасик М. И. и др. Рудовосстановительные электропечи и технологии производства марганцевых ферросплавов. — Днепропетровск : НМетАУ, 2011. — 508 с.
3. Гладких В. А., Гасик М. И., Овчарук А. Н., Пройдак Ю. С. Ферросплавные электропечи : учебник для вузов. — Днепропетровск : ГНПП «Системные технологии», 2007. — 259 с.
4. Гасик М. И., Гладких В. А., Михалев А. И. и др. Оптимизация состава многокомпонентной шихты углеродовосстановительной плавки ферросплавов // Электротехнология. 1999. № 3. С. 35 — 40.
5. Куцин В. С., Кучер И. Г., Ольшанский В. И. и др. Механизм образования коксового слоя при выплавке марганцевых ферросплавов // Сталь. 2006. № 6. С. 76 — 78.
6. Куцин В. С., Гладких В. А., Кузьменко С. Н. и др. Определение оптимальных параметров электрического режима при выплавке ферросиликомарганца // Сталь. 2009. № 1. С. 55 — 57.
7. Куцин В. С., Гладких В. А., Кузьменко С. Н. и др. Определение рациональных параметров выплавки ферросиликомарганца на основе электрических характеристик процесса // Сталь. 2010. № 1. С. 55 — 57.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Журнал «Сталь» публикует статьи о новых технологиях и оборудовании, а также о совершенствовании уже применяемых в черной металлургии, о передовом опыте улучшения качества и повышения конкурентоспособности продукции, путях достижения рентабельности производства, уменьшении вредного воздействия на окружающую среду и о других важных для отрасли вопросах.

В статье следует сообщить цель проведения работы, привести фактические данные, их анализ и дать заключение (выводы). Текст статьи объемом не более 12 страниц должен быть дополнен **кратким рефератом** (3 — 5 предложений) и **ключевыми словами на русском и английском языках**, указанием УДК, а также списком подписей к рисункам. Библиографический список следует оформлять в соответствии с ГОСТ 7.1—2003; на труднодоступные источники просьба не ссылаться. Рисунки (рекомендуемая норма — до 5) должны быть четкими, упрощенными и не загроможденными надписями, без масштабной сетки (за исключением номограмм).

К статье должен быть приложен список авторов с указанием ФИО полностью, места работы каждого, телефона и электронного адреса.

Число авторов от 1 — 2 организаций не должно превышать 5 человек. Если статья представлена от большего числа организаций, то допускается в среднем по два человека от каждой организации.

Все материалы статьи редакция просит представлять в электронном виде (текст — в программе Word (Times New Roman, размер шрифта 12, междустрочный интервал 1,5)), рисунки — отдельным файлом в форматах TIFF или JPEG, диаграммы — в формате EXCEL).