



УДК 621.783:519

Поступила 08.11.2017

УПРАВЛЕНИЕ ШЛАКОВЫМ РЕЖИМОМ В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ MANAGEMENT OF THE SLAG ADJUSTMENT IN ARC FURNACES

С. В. КОРНЕЕВ, И. А. ТРУСОВА, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: korneev@bntu.by

S. V. KORNEEV, I. A. TRUSOVA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: korneev@bntu.by

Рассмотрены шлаковый режим при выплавке стали в дуговых сталеплавильных печах, условия вспенивания шлака и газовая нагрузка при разном количестве подаваемого кислорода и различном содержании углерода в расплаве. Определено количество вдуваемых углеродсодержащих материалов в сталеплавильную ванну.

The slag adjustment during steel smelting in arc steelmaking furnaces, the conditions for sponging and the gas load at different amounts of supplied oxygen and the various contents of carbon in the melt were considered. The amount of blown carbon-containing materials in the steelmaking bath is determined.

Ключевые слова. Дуговая сталеплавильная печь, шлаковый режим, вспенивание шлака, окисление углерода, газовая нагрузка.
Keywords. Arc steel-smelting furnace, slag regime, sponging, carbon oxidation, gas load.

Введение

Шлаковый режим в электродуговых печах можно охарактеризовать отдельными составляющими, такими, как химический состав шлака, общее его количество и структурное состояние. Отметим, что эти составляющие взаимосвязаны и изменение одной из составляющих может отражаться на других составляющих. Химический состав шлака должен соответствовать условиям удаления фосфора или серы, кроме того, не оказывать значительного деструктивного воздействия на огнеупорные материалы сталеплавильной ванны. Количество шлака будет определяться начальным содержанием компонентов, переходящих в шлак из шихтовых материалов, и таких параметров, как основность и окисленность шлака, также связанных с его химическим составом. Исходя из термодинамики процессов удаления вредных примесей, большее количество шлака положительно влияет на результаты удаления фосфора и серы, однако приводит к дополнительным тепловым потерям, так как тепловая энергия скачанного жидкого шлака, как правило, не используется. Большее количество шлака положительно сказывается на его экранирующей способности и структурном состоянии (вспененное состояние или нет, гомогенный или гетерогенный шлак). Состояние шлака в свою очередь также отражается на его экранирующей и реакционной способности. Таким образом, воздействие на параметры шлака, оказываемое с одной целью, может положительно или отрицательно отражаться на других составляющих шлакового режима.

Шлаковый режим в высокомоощных электродуговых печах характеризуется использованием основных процессов, интенсивным периодом расплавления и коротким периодом рафинирования. Это приводит к возрастанию роли кинетики реакций и увеличению важности вопросов структурного состояния шлака.

Условия для вспенивания шлака. Типовой состав шлака приведен ниже.

Оксид	CaO	SiO ₂	FeO	MnO	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅
Содержание, %	30–40	15–18	20–35	4–9	8–12	5–10	1–1,5

Теплосодержание (энтальпия) шлака $i_{ш}$ незначительно зависит от его состава. В интервале температур 1200–1600 °С оно может быть рассчитано по формуле:

$$i_{\text{ш}} = 0,276 (T - 273) + 0,569 \cdot 10^{-3} (T - 273)^2, \text{ кДж/кг},$$

из которой следует, что энтальпия и теплоемкость шлака значительно выше, чем у железа (при 1600 °С): $c_{\text{ш}} = 2,09 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Таким образом, с жидким шлаком уносится много теплоты. Например, при количестве шлака 10% от массы металла (100 кг/т) шлак уносит 186 700 кДж/т стали. Чем ниже начальное содержание вредных примесей и пустой породы, тем меньше требуется извести и тем ниже в итоге энергозатраты, однако при этом возрастают требования к точности определения количества извести и режиму вспенивания шлака. При увеличении содержания MgO в шлаке свыше 12% шлак может налипать на футеровку, в результате чего сокращается объем печи.

В ряде работ указаны оптимальные составы шлака для получения максимального индекса вспенивания шлака, а также показано влияние таких параметров, как размер пузырьков и температура шлака. При этом по химическому составу выделяют области пенящихся и не пенящихся шлаков. Обобщая исследования различных авторов, можно отметить, что оптимальная основность шлака находится в диапазоне 2,0–2,5 при содержании FeO в диапазоне 20–30%. Кроме того, большое влияние на вспенивание шлака оказывает температура, так как с повышением температуры изменяется как плотность шлака, так и его вязкость. Данные различных исследователей показывают, что высота пены при увеличении температуры шлака от 1690 до 1750 °С может изменяться более чем в 2 раза.

Динамическая вязкость шлаков колеблется в широких пределах (0,01–0,4 Па·с) и служит важнейшим фактором, определяющим скорость всех диффузионных процессов в сталеплавильной ванне. Вязкость гомогенного (физически однородного) шлака непрерывно снижается с ростом его основности B . Вязкость гетерогенного шлака растет с увеличением основности B , что обусловлено повышением количества нерастворенных в шлаке частиц извести. При наличии гетерогенных шлаков повышение B неэффективно для удаления из металла серы и фосфора (степень десульфурации и дефосфорации металла оказывается значительно ниже теоретически возможной, которая достигается лишь при наличии гомогенного шлака). Повышение температуры и присадка раскислителей (бокситов, плавикового шпата, окалины) снижают вязкость шлака и увеличивают оптимальный верхний предел его основности, что способствует растворению в шлаке твердых частиц оксидов кальция и магния.

Вспенивание шлака зависит как от его состава, так и газосодержания слоя, а также от интенсивности генерации газа в слое, т. е. от газовой нагрузки. Причем высота вспененного шлака пропорциональна газовой нагрузке.

Например, в работе [1] высоту вспененного шлака находили из выражения:

$$H_{\gamma} = \frac{\xi Q}{S_c}, \text{ м},$$

где Q – интенсивность газовыделения, $\text{м}^3/\text{с}$; ξ – индекс вспенивания, с; S_c – площадь поперечного сечения пены, м^2 .

Поскольку индекс вспенивания ξ является характеристикой шлака и зависит от таких его свойств, как вязкость (μ , $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$), величина поверхностного натяжения (σ , $\text{Н}/\text{м}$) и плотность ($\rho_{\text{ш}}$, $\text{кг}/\text{м}^3$), то его уровень можно оценить по эмпирическому выражению:

$$\xi = \frac{115\mu^{0,5}}{\sigma^{0,2}\rho_{\text{ш}}D^{0,9}},$$

где D – диаметр пузырька CO в шлаке, м.

Из приведенного выражения следует, что при снижении вязкости ($\mu \rightarrow \min$) и увеличении плотности шлака ($\rho_{\text{ш}} \rightarrow \max$) индекс вспенивания уменьшается.

Плотность шлака $\rho_{\text{ш}}$ колеблется в пределах 2800–3200 $\text{кг}/\text{м}^3$. Повышение температуры на 100 °С снижает $\rho_{\text{ш}}$ на 70 $\text{кг}/\text{м}^3$. Увеличение количества (FeO) и (MnO) способствует возрастанию $\rho_{\text{ш}}$, так как $\rho_{(\text{FeO})} = 5800 \text{ кг}/\text{м}^3$ и $\rho_{(\text{MnO})} = 5700 \text{ кг}/\text{м}^3$.

В работе [1] показано, что на индекс вспенивания ξ наибольшее влияние оказывает графитовый порошок при содержании (FeO) $\approx 25\%$. Наибольший уровень подъема пены над шлаком H_{γ} наблюдается при использовании коксового и графитового порошка. В этом случае в исходном шлаке значения содержания (FeO) примерно одинаковы ($\approx 25\%$). При увеличении окисленности шлака (FeO $\rightarrow \max$) происходит снижение высоты вспененного шлака, что, видимо, вызвано изменением свойств шлака, а именно

снижением его вязкости и увеличением плотности. Этот вывод подтверждается максимальным значением индекса вспенивания ξ при «критическом» значении $(\text{FeO}) \approx 25\%$.

Современные методы контроля шлакового режима в электродуговых печах. В настоящее время существуют три принципиальных метода контроля наличия вспененного шлака возле электрической дуги: оптический, звуковой (виброакустический) и звуковой с токовыми сигналами.

Оптический способ основан на различном соотношении ультрафиолетового и инфракрасного излучения открытой и закрытой дуги и осуществлен в электродуговых печах путем установки оптического устройства непосредственно на манипуляторе, посредством которого происходит ввод через технологическое окно порошка углерода и кислорода. Звуковой способ основан на том, что открытая или закрытая дуга испускает звуковые волны различной интенсивности и частоты, что может использоваться для анализа состояния шлака (не вспененный, частично вспененный или вспененный). Современная модификация системы, основанной на виброакустическом способе контроля SIMELT FSM, была установлена на ОАО «БМЗ» в 2009 и 2011 гг. на двух из трех печей. Данная система построена на одновременном использовании трех виброакустических датчиков, расположенных в корпусе печи напротив электродов. Также анализируются колебания токовых сигналов от фаз, что в совокупности позволяет оперативно направлять материалы в необходимую зону печи при открытии дуг. Моделирование облученности стен печи при разной степени экранирования дуг вспененным шлаком показало, что использование системы контроля состояния шлака позволяет снизить энергопотребление на 2–10 кВт·ч/т (при общем снижении расхода электрической энергии за счет вспенивания шлака 20–30 кВт·ч/т), что согласуется с данными производственной эксплуатации печей с установленными системами SIMELT FSM. Кроме того, контроль вспенивания позволяет повысить надежность эксплуатации водоохлаждаемых корпусов и сводов и снизить простои, связанные с перегревом водоохлаждаемых панелей.

Определение газовой нагрузки при кипении ванны. Содержание кислорода в стали и шлаке увеличивается с уменьшением содержания углерода в соответствии с уравнением Вашера-Гамильтона:

$$\%C \cdot \%O = 0,0026 \text{ при } 1600 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (1)$$

На рис. 1 представлена зависимость содержания кислорода в стали от содержания углерода согласно уравнению (1), а также приведены опытные данные производственных плавок в 100-тонных электродуговых печах Белорусского металлургического завода в конце окислительного периода.

Как следует из рисунка, условия окисления углерода в действующих электродуговых печах близки к условиям равновесия.

Скорость обезуглероживания можно определить из дифференциального уравнения [2]:

$$V_C = -\frac{d[\%C]}{d\tau} = \frac{0,75V_{O_2}}{1 + \frac{a}{[\%C]^2}}, \quad (2)$$

где V_{O_2} – скорость подвода кислорода в ванну, %/ч; a – коэффициент, учитывающий накопление кислорода в металле и шлаке ($a = 0,012\text{--}0,020$).

При удельных расходах кислорода 20–40 м³/т его удельный расход в килограммах (плотность кислорода – 1,429 кг/м³) составит 29–57 кг/т. При времени продувки, равной 25 мин, скорость подвода кислорода в ванну составит $(2,9\text{--}5,7) \cdot 60/25$ или 7–13,7%/ч. При удельном расходе кислорода 20 м³/т можно принять среднюю скорость обезуглероживания от 0,4 до 0,1%[C], равной 3,8%/ч.

Время окисления углерода можно определить, зная процент окисляемого углерода и скорость его окисления:

$$\tau_{ок} = K_{ок} (\tau_0 + \%C/V_C), \quad (3)$$

где %C – абсолютный процент окисления углерода; V_C – скорость обезуглероживания, %/ч; τ_0 – суммарное время наведения шлака и выдержки металла, ч; $K_{ок}$ – коэффициент, учитывающий возможное изменение длительно-

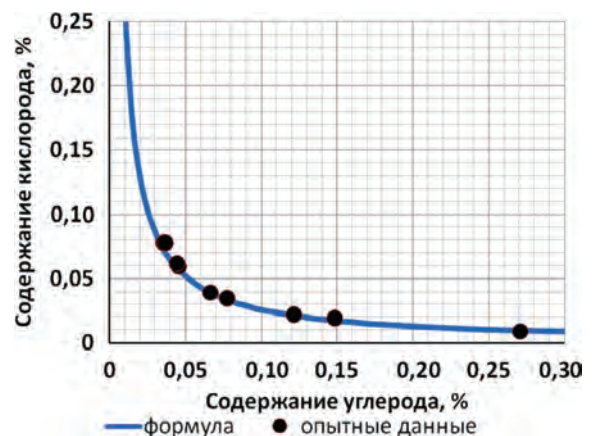


Рис. 1. Зависимость содержания кислорода в стали от содержания углерода

сти окислительного периода благодаря сокращению времени наведения шлака, выдержки или увеличения скорости обезуглероживания.

Средняя скорость окисления углерода при продувке газообразным кислородом в современных электродуговых печах составляет 3–5%/ч (0,05–0,08%/мин), а в случае использования твердого окислителя ~0,4%/ч (0,007%/мин).

В работе [3] указывается, что при расходе кислорода 1800–2400 м³/ч через водоохлаждаемую фурму скорость окисления углерода составляет 0,025–0,03%/мин, а через расходуемое «копье» – 0,01%/мин.

Для определения газовой нагрузки принимаем, что 100 % С окисляется в жидкой ванне до СО. Исходя из этого, можно найти расход кислорода на окисление примесей:

$$V_{O_2} = \frac{U_i^P M_{O_2}}{M_i}, \text{ кг,}$$

где M_i , M_{O_2} – соответственно молекулярная масса элемента и кислорода.

Расход кислорода на окисление углерода и количество газов при снижении содержания углерода на 1% при массе стали 1000 кг приведены ниже.

Расход кислорода, кг		Масса оксида СО, кг
С-16/12	13,33	23,33

Объем СО = 23,33/1,25 = 18,664 м³ при нормальных условиях. Объем СО при температуре 1600 °С – 128,05 м³.

Используя уравнение (2) и данные о количестве выделяющегося СО при окислении углерода, определяем газовую нагрузку при различном количестве подаваемого кислорода и разном содержании углерода в расплаве. Результаты расчета газовой нагрузки приведены на рис. 2.

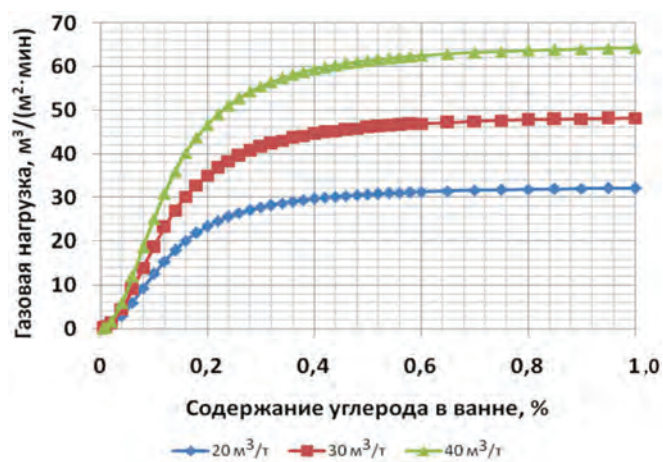


Рис. 2. Зависимость газовой нагрузки от содержания углерода в ванне при различном расходе кислорода

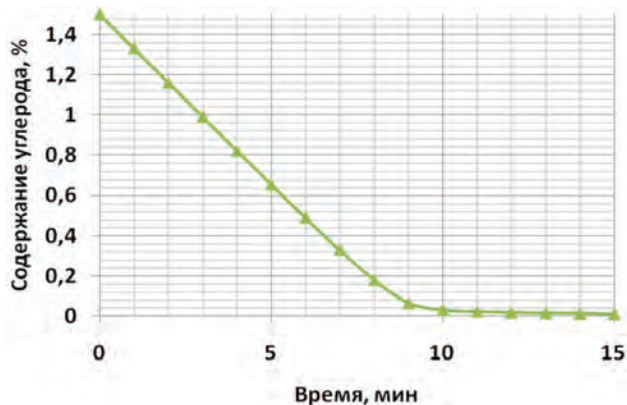


Рис. 3. Изменение содержания углерода в процессе плавки при расходе кислорода 40 м³/т

При концентрации углерода в металле, больше или равной критическому значению, скорость окисления углерода не зависит от концентрации углерода, а полностью определяется интенсивностью снабжения ванны кислородом, т. е. ограничивающей стадией является массоперенос кислорода в зону металла, при $C \geq C_{кр}$. Следовательно, ускорение процесса достигается за счет повышения интенсивности снабжения ванны кислородом.

При снижении содержания углерода ниже 0,3–0,2% газовая нагрузка начинает резко уменьшаться, а при снижении содержания углерода ниже 0,1% генерация газа недостаточна для поддержания вспененного состояния шлака даже при высоких значениях расхода кислорода.

На рис. 3 показано изменение содержания углерода во времени, а на рис. 4 – изменение газовой нагрузки с течением времени.

Характер изменения газовой нагрузки свидетельствует о необходимости подачи в сталеплавильную ванну углеродсодержащих материалов в количестве, компенсирующем снижение газовой нагрузки от окисления углерода в жидкой ванне. При этом подачу углерода можно осуществлять порционно или непрерывно путем дувания, а также комбинацией этих способов.

Учитывая, что существенное снижение газовой нагрузки (рис. 4) соответствует содержанию углерода 0,5–0,6% (см. рис. 3), данное количество углерода должно поддерживаться его добавкой в количестве не менее 600 кг на 100 т стали. С учетом инерционности процесса при подаче кусковых материалов и более низкого коэффициента усвоения материалов углерод целесообразно в основном подавать в порошкообразном виде на границу металла и шлака.

При этом необходимо принимать во внимание, что излишнее количество вдуваемых углеродсодержащих материалов может сказаться на снижении эффективности их использования, а также увеличении температуры газов в системе газоочистки [4].

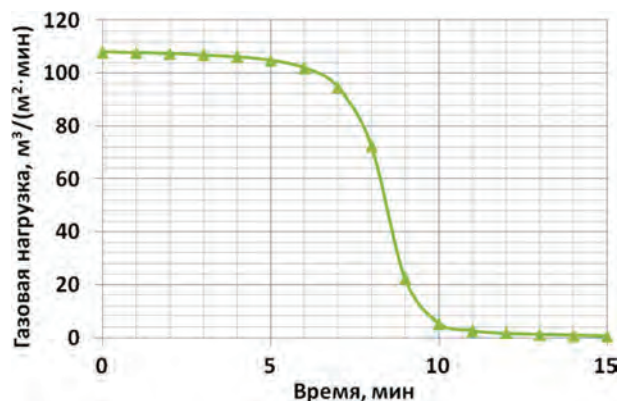


Рис. 4. Изменение газовой нагрузки в процессе плавки при расходе кислорода 40 м³/т

Литература

1. Кем А. Ю., Казарцев В. О., Меркер Э. Э., Харламов Д. А. К вопросу об оптимизации выплавки стали в дуговой печи и ее внепечной обработки в агрегате ковш-печь // Вестн. ДГТУ. 2014. Т. 14. № 2 (77). С. 66–73.
2. Айзатулов Р. С., Харлашин П. С., Протопопов Е. В., Назюта Л. Ю. Теоретические основы сталеплавильных процессов. М.: МИСИС, 2002. 320 с.
3. Фоменко А. П., Эндерс В. В., Якшук Д. С., Лейнвебер Е. И., Дьяченко Ю. В. Исследование технологических процессов выплавки кордовой стали сверхмощной дуговой печи // Сталь 2000. № 5. С. 35–37.
4. Бигеев В. А., Малофеев А. Е., Пантелеев А. В., Федянин А. Н., Брусникова А. В. Окисленность шлака современной дуговой сталеплавильной электропечи // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Metallургия. 2010. Вып. 15. № 34.

References

1. Kem A. Yu., Kazarcev V. O., Merker E. E., Charlamov D. A. K voprosu ob optimizacii vyplavki stali v dugovoj pechi i ejo vnepechnoj obrabotki v agregate kovsh-pech' [On the optimization of steel smelting in an arc furnace and its out-of-furnace treatment in a ladle-furnace unit]. *Vestnik DGTU = Vestnik DGTU*, 2014, Vol. 14, no. 2 (77), pp. 66–73.
2. Ajzatulov R. S., Harlashin P. S., Protopopov E. V., Nazjuta L. Ju. *Teoreticheskie osnovy staleplavil'nyh processov* [Theoretical foundations of steelmaking processes]. Moscow, MISIS Publ., 2002, 320 p.
3. Fomenko A. P., Jenders V. V., Jakshuk D. S., Lejnveber E. I., D'jachenko Ju. V. Issledovanie tehnologicheskikh processov vyplavki kordovoj stali sverhmoshhnoj dugovoj pechi [Investigation of technological processes of melting cad steel of a super-powerful arc furnace]. *Stal' = Steel*, 2000, no. 5, pp. 35–37.
4. Bigeev V. A., Malofeev A. E., Panteleev A. V., Fedjanin A. N., Brusnikova A. V. Okislennoš' shlaka sovremennoj dugovoj staleplavil'noj jelektropечи [Oxidation of the slag of the modern arc steel-making electric furnace]. *Vestnik JuUrGU, serija «Metallurgija = Vestnik SUSU, series «Metallurgy»*, 2010, Vyp. 15, no. 34.