

Прогнозирование выхода жидкой стали в конвертере

Поставлена задача повышения эффективности конвертерного производства за счет прогнозирования выхода жидкой стали при управлении плавкой. Получена модель оптимального расчета по основным параметрам, которые влияют на выход жидкой стали (масса лома, масса известняка, среднеинтегральное за продувку расстояние фурмы от уровня спокойного металла, расход дутья на плавку). В процессе оптимизации модели установлено, что расчет шихты методом линейного программирования позволил увеличить выход годного в среднем на 0,4 %, а динамическая коррекция массы жидкого металла с применением контроля выходных параметров продувки позволила повысить выход годного по сравнению с предыдущим в среднем на 0,2 %.

Ключевые слова: конвертерная плавка, сталь, модель плавки, выход полезного, режим продувки, управления плавкой

Введение

Материальный баланс конвертерной плавки свидетельствует о том, что только около 95 % железа, поступающего с шихтой, переходит в сталь. Остальное превращается в оборотный продукт (шлак) или теряется вовсе (выносы, выбросы) [1]. В себестоимости конвертерной стали наибольшее удельное значение имеют расходы на шихту, поэтому особое внимание уделяется мерам, которые направлены на увеличение выхода жидкого металла без дополнительных затрат на сырье за счет оптимального определения компонентов шихты и рационального ведения режима продувки. Существующие модели управления конвертерной плавкой [2, 3] не решают эту проблему, хотя именно в ней заключается наиболее дешевый способ повышения эффективности производства.

Приведенные в статье исследования проводились в Национальном техническом университете Украины «КПИ» по теме «Математические модели и алгоритмы системы управления кислородным конвертером», государственный регистрационный номер 0110U002880.

Постановка задачи

Целью исследований является повышение эффективности конвертерного производства путем создания модели прогнозирования выхода жидкой стали как составляющей системы управления конвертерной плавки.

Результаты исследований

Выход жидкого металла можно представить линейной функцией от некоторых технологических параметров

$$\Phi(x_i) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i, \quad (1)$$

где x_i – параметры, α_0 , α_i – коэффициенты влияния; n – количество параметров.

Статистической обработкой экспериментальных данных 160-тонного конвертера по программе мно-

жественной регрессии получено выражение функции (1) для расчета массы жидкого металла

$$m_m = 45,5 + 0,35m_l - 0,08m_{ик} + 3,05H - 0,006v + 0,02m_{ч}Mn_{ч} + 6,54m_{ч}S_{ч} - 0,0003m_{ч}t_{ч} - 0,0014V + 0,014m_{и} - 4,72C_3 + 0,008t_3 - (R = 0,75, \sigma = 1,7 \text{ т}, P > 0,99), \quad (2)$$

где m_m , m_l , $m_{ик}$, $m_{ч}$, $m_{и}$ – масса соответственно жидкого металла, металлалома, известняка, чугуна и извести, т; H – среднее интегральное за продувку расстояние фурмы от уровня спокойного металла, м; v – интенсивность дутья, м³/мин; $Si_{ч}$, $Mn_{ч}$, $S_{ч}$ – содержание кремния, марганца и серы в чугуне, %; $t_{ч}$ – температура чугуна, °C; V – расход дутья на плавку, м³; C_3 – заданное конечное содержание углерода в металле, %; t_3 – заданная конечная температура металла, °C; R – совокупный коэффициент корреляции; σ – остаточное среднеквадратическое отклонение; P – достоверность коэффициента корреляции.

В уравнение (2) включены параметры с достоверностью коэффициента корреляции выше 0,99.

Задача оптимизации сформулирована следующим образом. Необходимо найти, при каких значениях m_l , H , V и $m_{и}$ выражение соответствует критерию управления $m_m \rightarrow \text{макс}$ при выполнении ограничений и граничных условий, которые связаны с технологией процесса и мощностью используемого оборудования

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{и} \geq m_{и.мин}; \\ 0 \leq m_{ик} \leq m_{ик.макс}; \\ H_{мин} \leq H \leq H_{макс}; \\ v_{мин} \leq v \leq v_{макс}; \\ V_{ф} \geq V; \\ \gamma(m_l + m_{ч}) = m_m, \end{array} \right. \quad (3)$$

где γ – коэффициент, учитывающий угар металла; индекс «ф» – фактическое значение параметра.

Первое ограничение вытекает из того, что масса извести на плавку не должна быть меньше значения, определяемого из расчета шихты [4], и обеспечивает необходимую для удаления нежелательных примесей основность шлака

$$m_{\text{и}}^{\text{р}} = m_{\text{и}}^0 - 0,1(m_{\text{л}} - m_{\text{л}}^0) + 0,08(m_{\text{ч}}\text{Si}_{\text{ч}} - m_{\text{ч}}\text{Si}_{\text{ч}}^0), \quad (4)$$

где индексы «р» и «0» соответственно означают расчетное значение параметра и его значение на плавке положительного опыта.

Второе ограничение определяет требование переработки максимально возможного количества лома, то есть охлаждение плавки надо проводить ломом, а известняк использовать только для коррекции температуры.

Третье ограничение определяется рабочими пределами расстояния фурмы до уровня спокойного металла (при $H \leq H_{\text{мин}}$ начинается размывание футеровки днища конвертера, а при $H \geq H_{\text{макс}}$ происходит значительное переокисление шлака и возникает вероятность образования выбросов металла и шлака из конвертера).

В четвертом ограничении нижняя граница интенсивности дутья определяется требованиями к обеспечению производительности конвертера, а верхняя – пропускной способностью кислородопровода или газоотводящего тракта. Расчетное значение интенсивности находят после определения расстояния фурмы до уровня спокойного металла. Для этого используют формулу, связывающую параметры режима дутья,

$$v_3/H_3 = v^0/H^0 + 0,3(m_{\text{л}} - m_{\text{л}}^0) - 0,1(t_{\text{ч}} - t_{\text{ч}}^0) - 25,1(\text{Si}_{\text{ч}} - \text{Si}_{\text{ч}}^0) + 14,3(\text{Mn}_{\text{ч}} - \text{Mn}_{\text{ч}}^0) - 334(\text{S}_{\text{ч}} - \text{S}_{\text{ч}}^0) + 2(1/C_3^{\text{мин}} - 1/C_{\text{п}}^0) + 0,3(t_3 - t_{\text{п}}^0) + 21,3(m_{\text{ш}}^{\text{р}} - m_{\text{ш}}^0), \quad (5)$$

где $m_{\text{ш}}$ – масса шпата, t ; индексы «з», «п» и «мин» соответственно означают заданное значение параметра на продувку, значение во время повалки и минимальное значение, которое обусловлено маркой.

В пятом ограничении обеспечивается окисление нужного количества углерода, кремния и марганца.

Предельное равенство шесть обусловлено садкой конвертера.

Поставленная задача решается симплексным методом линейного программирования с использованием алгоритма n -последовательного улучшения плана для случая одностороннего ограничения переменных [5].

Значения $m_{\text{л}}$, H и $m_{\text{и}}$, которые рассчитаны перед подстановкой в выражение (2), корректируют. По уравнению расчета шихты вычисляют $m_{\text{ик}}$, подставляя при этом найденные значения $m_{\text{л}}$, H и $m_{\text{и}}$

$$m_{\text{ик}}^{\text{р}} = m_{\text{ик}}^0 - 0,285(m_{\text{л}} - m_{\text{л}}^0) - k_1(m_{\text{л}} + m_{\text{ч}})(t_3 - t_{\text{п}}^0) + 0,126(m_{\text{ч}} - m_{\text{ч}}^0) +$$

$$+ 0,0252(t_{\text{ч}} - t_{\text{ч}}^0) + 5,7(\text{Si}_{\text{ч}} - \text{Si}_{\text{ч}}^0) + 1,35(\text{Mn}_{\text{ч}} - \text{Mn}_{\text{ч}}^0) - 5,25[f(C_3^{\text{мин}}) - f(C_{\text{п}}^0)] + 0,15(m_{\text{и}}^{\text{р}} - m_{\text{и}}^0) + 0,6(m_{\text{ш}}^{\text{р}} - m_{\text{ш}}^0) - [f(\tau_{\text{п}}) - f(\tau_{\text{п}}^0)] - [f(N_{\text{ф}}) - f(N_{\text{ф}}^0)] + 1,95(H - H^0), \quad (6)$$

где k_1 – статистический коэффициент, определяемый периодической настройкой; $f(C)$, $f(\tau_{\text{п}})$, $f(N_{\text{ф}})$ – функциональные зависимости, значения которых приведены в [2]; $\tau_{\text{п}}$ – время простоя конвертера, мин; $N_{\text{ф}}$ – номер плавки по кампании футеровки.

Проверяется выполнение условия $0 \leq m_{\text{ик}} \leq m_{\text{ик,макс}}$. Если $m_{\text{ик}} < 0$, то, приняв $m_{\text{ик}} = 0$, вычисляют новое значение H ; если $m_{\text{ик}} > m_{\text{ик,макс}}$, то, приняв $m_{\text{ик}} = m_{\text{ик,макс}}$, находят новое значение $m_{\text{л}}$.

По найденным значениям $m_{\text{л}}$, H и $m_{\text{и}}$ определяется расход дутья на плавку

$$V = V^0 + 30(m_{\text{л}} - m_{\text{л}}^0) + 2,9|m_{\text{ч}} - m_{\text{ч}}^0|(m_{\text{ч}} - m_{\text{ч}}^0) + 190(\text{Si}_{\text{ч}} - \text{Si}_{\text{ч}}^0) - k_2[f_1(C_3) - f_1(C^0)] - [f(m_{\text{ик}}) - f(m_{\text{ик}}^0)] + 40(m_{\text{и}} - m_{\text{и}}^0) + 130(m_{\text{ш}} - m_{\text{ш}}^0) + 10(H - H^0), \quad (7)$$

где k_2 – статистический коэффициент, определяемый периодической настройкой; $f_1(C)$, $f(m_{\text{ик}})$ – функциональные зависимости, значения которых приведены в [2].

Расчет шихты методом линейного программирования позволил увеличить выход годного в среднем на 0,4 %. Достоверность полученного результата, проверенная по критерию Стьюдента, соответствует уровню значимости 0,99.

Расчет прогнозируемой массы жидкой стали $m_{\text{ст}}^{\text{р}}$, t , производится непрерывно во время продувки по формуле

$$m_{\text{ст}}^{\text{р}} = (1 - \gamma_1 \frac{\tau_{\text{пр}}}{\tau_{\text{пр}}^{\text{р}}}) \times [m_{\text{ч}} + m_{\text{жст}} + m_{\text{л}}(1 - e^{-\gamma_2 \Phi(\mu, m_{\text{л}}) \frac{\tau_{\text{пр}}}{\tau_{\text{пр}}^{\text{р}}}})], \quad (8)$$

где γ_1 , γ_2 – статистические коэффициенты, определяющие соответственно угар металла и скорость расплавления лома; $\tau_{\text{пр}}$ – продолжительность продувки, мин; $m_{\text{жст}}$ – масса жидкой стали, заливаемой в конвертер, t ; $\Phi(\mu, m_{\text{л}})$ – функция, зависящая от насыпной плотности лома μ и его массы. Для тяжеловесного лома $\Phi(\mu, m_{\text{л}}) = 0,7m_{\text{л}}/m_{\text{ср}}$, для лома средней насыпной плотности – $\Phi(\mu, m_{\text{л}}) = 1,0m_{\text{л}}/m_{\text{ср}}$, для легковесного – $\Phi(\mu, m_{\text{л}}) = 1,5m_{\text{л}}/m_{\text{ср}}$. При отсутствии информации о насыпной плотности лома принимаем $\Phi(\mu, m_{\text{л}}) = 1,0$. Здесь $m_{\text{ср}}$ – средняя за кампанию масса лома. Расчетная продолжительность продувки $\tau_{\text{пр}}^{\text{р}}$ определяется как отношение расхода дутья на плавку V , м^3 , определенного из (7), к интенсивности дутья v , $\text{м}^3/\text{мин}$.

Прогнозирование массы жидкой стали используется для расчета массы раскисляющих и легирующих материалов.

Прогнозирование массы жидкой стали по формуле (8) производится по некоторым средним показателям процесса и не учитывает индивидуальные особенности конкретной плавки. Самый распространенный способ решения этой проблемы – введение обратной связи по ходу процесса. Учитывая, что потери железа со шлаком составляют до 50 % его общих потерь, авторы изучили возможность использования для обратной связи тепловых характеристик водоохлаждаемого оборудования конвертера во время продувки. Исследовали температуру воды на продувочной фурме и линейное удлинение экранных труб охладителя конвертерных газов (ОКГ).

Тепловой поток на фурму зависит от уровня ванны, то есть площади поверхности фурмы, которая контактирует с металло-шлако-газовой эмульсией, а также от ее температуры. Интенсивный барботаж ванны вследствие высокой скорости обезуглероживания приводит, с одной стороны, к повышению уровня ванны и в конечном счете к возрастанию температуры охлаждающей воды на выходе фурмы, а с другой – к снижению массовой доли оксидов железа в шлаке.

Линейное удлинение экранных труб ОКГ связано с тепловым потоком, поступающим от сгорания газообразных продуктов. В свою очередь, тепловой поток определяется расходом газа, который зависит от скорости обезуглероживания, и его температуры, связанной с температурой ванны.

Связь между суммарной массовой долей оксидов железа в шлаке $\sum FeO_k$ и температурой воды на выходе из продувочной фурмы t_{ϕ} исследовали для таких комплексов: температура воды на выходе из фурмы в момент окончания продувки $t_{\phi,к}$, максимальное значение этого параметра по ходу продувки $t_{\phi,макс}$, разница максимального и конечного значений, интеграл изменения температуры воды во времени в начальный период продувки (до $0,25 \tau_{пр}$), интеграл изменения температуры во времени в конечный период продувки (после достижения максимального значения температуры $\tau_{макс}$), интеграл изменения температуры во времени в течение всей продувки. Относительно линейного удлинения экранных труб охладителя конвертерных газов Δl исследованы такие комплексы: линейное удлинение в момент окончания продувки Δl_k , интеграл изменения удлинения в начальный период и в течение всей продувки.

В конечное совокупное уравнение включены только те комплексы, достоверность коэффициентов корреляции которых превышала 0,95. Уравнение прогноза суммарной массовой доли оксидов железа в конечном шлаке, %, имеет вид

$$\sum FeO_k = 20,64 - 0,88 (t_{\phi,макс} - t_{\phi,к}) + 0,95 \Delta l_k + \int_0^{0,25\tau_{пр}} (0,72 t_{\phi} - 0,16 \Delta l) dt - 0,03 \int_{\tau_{макс}}^{\tau_k} t_{\phi} dt \quad (9)$$

$$(R = 0,736, \sigma = 0,62 \%, P > 0,95).$$

Исследованием влияния на угар железа ряда исходных параметров получена зависимость для непрерывного определения массы оксидов железа в шлаке

$$m_{\sum FeO} = \Delta m_{\sum FeO} - (0,0388 + 5,34 v_c + 0,052 t_{\phi} - \int_{(\tau)} 0,0041 v - 0,046 \Delta l) dt \quad (10)$$

$$(R = 0,821, \sigma = 0,388 \%, P > 0,99),$$

где v_c – скорость обезуглероживания, %.

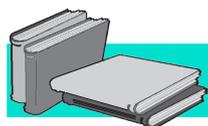
Динамическая коррекция массы жидкого металла с применением контроля выходных параметров продувки позволяет повысить выход годного по сравнению с расчетом по методу линейного программирования в среднем на 0,2 %.

Выводы

Модель оптимального статического расчета управляющих параметров, оптимизирующих выход годного, массы лома и извести, а также расход дутья на плавку и расстояния фурмы до уровня спокойного металла позволяет без дополнительных затрат повысить эффективность конвертерного производства за счет повышения выхода годного на 0,4 %.

Модель динамического прогнозирования выхода жидкого металла с введением обратной связи по выходным параметрам плавки дополнительно повышает выход годного на 0,2 %.

Дальнейшие исследования будут направлены на введение разработанных моделей как составляющих в систему управления конвертерной плавкой.



ЛИТЕРАТУРА

1. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підручник / Д. Ф. Чернега, В. С. Богушевський, Ю. Я. Готвянський та ін. – Київ: Вища школа, 2006. – 503 с.
2. Математические модели и системы управления конвертерной плавкой / В. С. Богушевский, Л. Ф. Литвинов, Н. А. Рюмшин, В. В. Сорокин. – Киев: Киевский институт автоматики, 1998. – 304 с.
3. Розрахунок металеві частини шихти киснево-конвертерної плавки / В. С. Богушевський, В. Ю. Сухенко, К. О. Сергеева, С. В. Жук // Металлургическая и горнорудная пром-сть. – 2010. – № 7. – С. 266-269.
4. Богушевський В. С., Сухенко В. Ю., Сергеева К. О. Система прийняття рішень при керуванні киснево-конвертерною плавкою // Нові технології. – 2009. – № 1. – С. 98-101.
5. Завельский М. Г. Оптимальное планирование на предприятии. – М.: Наука, 1970. – 396 с.

Анотація

Богусhevський В. С., Скачок О. Е.

Прогнозування виходу рідкої сталі в конвертері

Поставлено задачу підвищення ефективності конвертерного виробництва за рахунок прогнозування виходу рідкої сталі при керуванні плавкою. Отримано модель оптимального розрахунку за основними параметрами, які впливають на вихід рідкої сталі (маса брухту, маса вапняку, середньоінтегральна за продувку відстань фурми від рівня спокійного металу, витрата дуття на плавку). В процесі оптимізації моделі встановлено, що розрахунок шихти методом лінійного програмування дозволив збільшити вихід придатного в середньому на 0,4 %, а динамічна корекція маси рідкого металу з застосуванням контролю вихідних параметрів продувки дозволила підвищити вихід придатного в порівнянні з попереднім в середньому на 0,2 %.

Ключові слова

конвертерна плавка, сталь, модель плавки, вихід корисного, режим продувки, керування плавкою

Summary

Bogushevskiy V. S., Skachok A. E.

Forecasting the output of liquid steel in a converter

It is set a task of improving the efficiency of converter output by predicting the output of liquid steel while melting control. The obtained model for optimal calculation of the main parameters that influence on the output of liquid steel (scrap weight, weight of limestone, mediumintegral distance of lance for blowing-time from the level of a quiet metal, blast consumption per fusing). During optimization of model there was found that calculation of charge by linear programming lets to increase the yield on average at 0,4 %, and dynamic correction of molten metal mass with use of control of the purge output parameters has improved the yield comparatively with the previous one on average at 0,2 %.

Keywords

converter smelting, steel, smelting model, recovery, blowdown, melting control

Поступила 04.02.13

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

Статьи в редакцию журнала «Металл и литье Украины»

необходимо присылать по адресу:

Украина, 03680, г. Киев-142, бул. Вернадского, 34/1,

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины.

Телефон: (044) 424-04-10, 424-34-50; факс: (044) 424-35-15;

адрес электронной почты: mlu@ptima.kiev.ua; сайт: www.ptima.kiev.ua.