



УДК 669.

Поступила 05.08.2013

В. С. БОГУШЕВСКИЙ, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, С. В. ЖУК, НТУУ «КПИ», С. Г. МЕЛЬНИК, ФТИМС НАН Украины, Е. Н. ЗУБОВА, НТУУ «КПИ»

ЗАМКНУТАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКОЙ

В работе с привлечением положений теории критических концентраций разработана математическая модель обезуглероживания Fe – C-расплава. Модель учитывает кинетику процесса удаления углерода из расплава во внешне-диффузионной и внутридиффузионной областях лимитирования процесса обезуглероживания. Алгоритм модели реализован в автоматизированной системе управления технологическим процессом конвертерной плавки. Опытное-промышленное апробирование математической модели обезуглероживания в АСУТП кислородно-конвертерной плавки показало существенное улучшение технико-экономических показателей выплавки стали.

The mathematical model of Fe – C-melt decarbonization, with the assistance of the theory of critical concentrations was developed in this work. The model takes into account the kinetics of the process of removing carbon from the melt in the foreign – and intradiffusion limiting process of decarburization. The algorithm of the model is implemented in an automated process control system of converter smelting. Pilot plant testing of a mathematical model of decarburization process control BOF melt showed a significant improvement of technical and economic parameters of steelmaking.

Доминирующим условием научно-технического прогресса и роста эффективности кислородно-конвертерного производства, улучшения качества и расширения сортамента стали, разработки ресурсосберегающих и экологически чистых технологий является автоматизация на основе систем контроля и прогнозирования протекания технологического процесса с использованием адекватных математических моделей. Анализ моделей передовых иностранных фирм показывает, что они не пригодны для использования в условиях отечественного производства в связи с ограничениями по количеству марок стали и слабой подготовкой и усреднением сырьевых материалов. Отечественные модели, построенные на отдельно взятых принципах, позволяют получить некую «среднюю» плавку, а задача моделирования на порядок сложнее.

Построение замкнутой системы управления конвертерно-кислородной плавкой базируется на комплексном сочетании всех технологических операций, физико-химических и тепло- и массообменных процессов. Целью построения замкнутой системы является увеличение эффективности кислородно-конвертерной плавки путем использования разных способов моделирования: детерминированного, вероятностного и эвристического.

Разработанная замкнутая система синтезирует управление по отклонению входящих параметров с обеспечением воспроизведения протекания реак-

ции обезуглероживания, процесса нагрева ванны и ускорения процесса шлакообразования. Быстрое растворение заранее непрогретого лома вызывает замедление шлакообразования и десульфурации, а также из-за низкой температуры металла переокисление ванны. Ухудшение процесса шлакообразования, особенно в начале продувки приводит к увеличению выносов и выбросов металла из конвертера, зарастанию фурмы и горловины конвертера. Поэтому замкнутая система должна обеспечить параметры для оптимального управления процессом.

Замкнутое управление конвертерно-кислородным процессом базируется на использовании статической, динамической и замкнутой моделей управления, которые построены с помощью детерминированных и статистических методов, методов автоматической классификации и положительного опыта предыдущего управления. Структура предлагаемой замкнутой модели управления конвертерным процессом показана на рисунке. Статическая модель замкнутой системы обеспечивает расчет шихтовки плавки (расход чугуна и лома на плавку в соответствии с заданными параметрами – масса жидкой стали, химический анализ и температура стали); расчет количества охладителей на плавку и материалов, которые вносят дополнительное тепло; расчет необходимого количества кислорода на плавку; расчет продолжительности продувки; расчет массы раскислителей на плавку.

Динамическая модель обеспечивает расчет прогнозированной массы жидкой стали; динамические расчеты скорости обезуглероживания и содержания углерода при продувке и додувке; динамический контроль температуры конвертерной ванны и процесса шлакообразования.

Ведущей составляющей общей динамической модели является модель расчета скорости обезуглероживания и содержания углерода. В основу модели положены исследования С. И. Филиппова, которые показали, что процесс обезуглероживания протекает в диффузионном режиме и при $[C] < 0,15-0,20$ % происходит замена адсорбционного слоя на поверхности металла, т. е. реакция переходит в стадию лимитирования переноса углерода из объема ванны к поверхности реагирования [1–3]. Продолжение этих исследований для конвертеров садкой 160 и 350 т [4, 5] позволило развить теорию и доказать, что критическое содержание углерода, при котором происходит переход, зависит от технологических параметров процесса.

Предложен алгоритм контроля массовой доли углерода в ванне:

по балансу для содержания углерода не ниже 0,6 % [6]:

$$C = \frac{C_{\text{ч}}m_{\text{ч}} + C_{\text{л}}m_{\text{л}} + C_{\text{ик}}m_{\text{ик}} - 15,4 \cdot 10^{-3} K_0 \int_{(\tau)} M_{\text{CO}_2} v_{\tau} d\tau}{m_{\text{ч}} + m_{\text{л}} + 0,22m_{\text{ик}} - 0,72\tau}; \quad (1)$$

по разности объемной плотности излучения факела в двух спектральных областях¹ для содержания углерода ниже 0,6 %:

$$C = 10^{-1} v_{\Gamma} (0,607 + 1,62M_{\text{CO}_2} - 1,06M_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (2)$$

$$(R = 0,75, \sigma = 0,03 \%, P > 0,99),$$

где $m_{\text{ч}}$, $m_{\text{л}}$, $m_{\text{ик}}$ – масса соответственно чугуна, лома, известняка, т; C , $C_{\text{ч}}$, $C_{\text{л}}$, $C_{\text{ик}}$ – содержание углерода соответственно в ванне, чугуне, ломе, известняке, %; K_0 – стехиометрический коэффициент пропорциональности между массой и объемом газообразного вещества при нормальных условиях, равный для углерода 0,536 кг/м³; M_{CO_2} , $M_{\text{H}_2\text{O}}$ – показания пирометра, пропорциональные объемной плотности монохроматического излучения факела в инфракрасном спектре, соответствующем максимуму поглощения CO₂ и H₂O, мВ; R – коэффици-

¹ Это позволяет уменьшить влияние в конце продувки на процесс вводимых в конвертер добавок сыпучих, так как увеличение объемной плотности излучения CO₂, Вт/м³, вследствие повышения его объемной доли в отходящем газе после ввода добавки сопровождается одновременным возрастанием объемной плотности излучения паров H₂O, выделяющихся из сыпучих.

ент множественной корреляции; σ – среднее квадратическое отклонение для содержаний углерода 0,06–0,40 %; P – достоверность коэффициента корреляции.

Переход от алгоритма (1) к алгоритму (2) при содержании углерода 0,6 % (для 160-тонных конвертеров) связан с переходом реакции окисления углерода от первого кинетического периода, в котором скорость обезуглероживания является функцией объемного расхода дутья, ко второму, в котором скорость окисления углерода определяется его содержанием.

Определение содержания углерода по балансу сопряжено с погрешностью, что связано с неточным расчетом содержания углерода в шихте (в частности, в ломе) и ошибками в определении мгновенной скорости обезуглероживания, которое при интегрировании накапливается. Поэтому, как только плавка переходит во второй кинетический период, определение углерода по зависимости (2) предпочтительнее, так как не требует знания начального содержания углерода.

Расчетным методом по балансу водяных паров определяют расход отходящего газа:

$$v_{\Gamma} = \frac{(\rho_{\text{д0}}v + \rho_0v_{\text{в0}})(1 + 1580\alpha M_{\text{CO}_2})}{7,31M_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{д0}}$, ρ_0 – абсолютная влажность соответственно дутья и воздуха при нормальных условиях, г/м³; v , $v_{\text{в0}}$ – объемный расход дутья и подсосанного воздуха, м³; α – температурный коэффициент объемного расширения газа, равный 1/273 К⁻¹.

Известно, что расход эжектируемого воздуха прямо пропорционален разрежению в кессоне [7]:

$$v_{\text{в0}} = 55,8\delta p, \quad (4)$$

где 55,8 – коэффициент пропорциональности для 160-тонного конвертера с охладителем конвертерных газов ОКГ-100-2, м³/(мин·Па); δp – разрежение в нижней плоскости кессона, Па.

Использование указанной информации позволило получить зависимость (3) для определения массовой доли углерода в ванне в конце продувки, так как при стабильной подаче дымососной установки с уменьшением расхода отходящего газа, которое сопровождается снижением объемной плотности монохроматического излучения CO₂, увеличивается расход эжектируемого воздуха, следовательно, и излучение паров H₂O.

Удовлетворительные результаты по контролю обезуглероживания получены также при использовании информации о давлении отходящего газа в переходном газоходе [8]. Измерение и иденти-

фикация давления отходящего газа дают возможность следить за динамикой выгорания углерода в ванне, что позволяет использовать параметр для управления продувкой и определения момента окончания плавки на заданной массовой доле углерода.

Результаты химического анализа отходящего газа на CO, CO₂, N₂ и O₂ дают возможность прогнозировать процесс обезуглероживания в ванне. Целесообразно для определения расхода отходящих газов дополнительно измерять содержание аргона. В этом случае расход отходящих газов рассчитывается по формуле:

$$v_{\Gamma} = \frac{Ar_{\text{В}} N_{2\text{Д}} - Ar_{\text{Д}} N_{2\text{В}}}{Ar_{\text{В}} N_{2\Gamma} - Ar_{\Gamma} N_{2\text{В}}} v_{\text{Д}} \quad (5)$$

Объемный расход отходящих газов и эжектируемого воздуха определяется из балансовых соотношений:

$$v_{\Gamma} N_{2\Gamma} = N_{2\text{Д}} v_{\text{Д}} + N_{2\text{В}} v_{\text{В}}, \quad (6)$$

$$v_{\Gamma} Ar_{\Gamma} = Ar_{\text{Д}} v_{\text{Д}} + Ar_{\text{В}} v_{\text{В}}, \quad (7)$$

где Ar_В, Ar_Д, Ar_Г – соответственно содержание аргона в воздухе, дутье и отходящих газах, %; N_{2В}, N_{2Д},

N_{2Г} – соответственно содержание азота в воздухе, дутье и отходящих газах, %.

Рассмотрим возможность использования информации об анализе газа на водород для контроля и управления плавкой.

Водород вносится в конвертер влагосодержащими компонентами, а покидает рабочее пространство в виде газообразного продукта, объемная доля которого в отдельные моменты продувки может достигать в системе без дожигания 20 %. Постоянным источником водорода является влага, поступающая в ванну с кислородом дутья, а также в случае течи кислородной фурмы или кессона. Поступление водорода в металл обычно описывается реакцией H₂O + CO → CO₂ + H₂ с константой равновесия обратной реакции $K = P_{\text{CO}} P_{\text{H}_2\text{O}} / P_{\text{CO}_2} P_{\text{H}_2}$. В присутствии паров оксидов железа в рабочем пространстве конвертера происходит заметная диссоциация влаги, сопровождающаяся эндотермическим эффектом. Как показывают расчеты [9], реакция разложения влаги в конвертере почти необратима.

Масса водяных паров в газообразном кислороде зависит от его температуры, давления и относи-



Математическая модель замкнутой системы управления

тельной влажности. Термодинамический процесс сжатия влажного кислорода близок к экзотермическому вследствие испарения воды, подаваемой для смазки цилиндров (поршневые компрессоры), а также благодаря развитой поверхности водяной охлаждающей рубашки [10]. При изотермическом сжатии влажного газа уменьшение его объема вызывает увеличение плотности пара, которая однако не может превысить предельную плотность насыщения при данной температуре.

Возможность получения информации о векторе состояния конвертерной плавки в любой момент времени по ходу продувки дает возможность управлять самим объектом. Если траектория системы заданная, то при возникновении отклонений можно определить то или иное управляющее воздействие и возвратиться на расчетную траекторию или построить новое программное управление, которое в итоге приведет систему после окончания продувки в границы заданной марки стали. Корректирование можно проводить двумя способами. При использовании первого способа корректирование происходит по заданной программе, при использовании второго – по конечному состоянию.

Управляющие воздействия в первом случае выбираются путем минимизации критерия:

$$I(v, H, m_{из}, m_{и}, m_{ш}) = \sum_{i=1}^n \alpha_i M (\dot{L}_i - \dot{L}_{i*})^2, \quad (8)$$

во втором случае

$$I(V, \bar{H}, \Sigma m_{из}, \Sigma m_{и}, \Sigma m_{ш},) = \sum_{j=1}^k \alpha_j M (L_j - L_{j*})^2, \quad (9)$$

где α_i, α_j – коэффициенты, определяющие важность точности достижения характеристик стали i -й в настоящий момент времени и j -й в момент повалки конвертера; \dot{L}_i, L_j – компоненты вектора состояния i -го в настоящий момент времени и j -го во время повалки; j, L_{j*} – заданные значения параметров i -го в настоящее время и j -го во время повалки; $v, H, m_{из}, m_{и}, m_{ш}$ – управляющие воздействия соответственно интенсивность подачи дутья, высота фурмы над уровнем спокойной ванны, массы известняка, извести и плавикового шпата.

Для реализации замкнутого управления периодами кислородно-конвертерной плавки необходи-

мо повысить точность контроля входящих параметров и математического описания процесса в условиях неполной информации путем использования точных методов контроля режимных параметров и надежной компьютерной техники, которая характеризуется развитой структурой устройств связи с объектом, быстроедействием, неограниченным объемом памяти. При этом в динамике происходит оценка состояния объекта в любой момент времени и управления самим ходом процесса по отклонению от заданных значений. При изменении каких-либо обстоятельств траектории обезуглероживания изменяется траектории нагрева и окисления. Навязывание объекту в этих условиях ранее заданных программных траекторий и попыток поддержки методом регулирования по отклонению приводит к неоптимальным результатам. И, наоборот, использование особенностей внутреннего самодвижения системы (собственных функций объекта), выбор резонансных управлений позволяют достичь конечных результатов с малыми расходами на управления. С этой точки зрения более приемлемым является критерий (9). Также стоит учитывать, что физико-химические процессы, которые протекают в конвертерной ванне, в некоторой мере определяются процессом шлакообразования. Скоротечность конвертерной плавки обуславливает необходимость раннего наведения активного, реакционно-способного шлака с доведением основности конечного шлака не менее чем 2,5. Составом и физическими свойствами шлака определяются металлургические реакции рафинирования (степень удаления серы и фосфора), угар раскислителей, легирующих элементов, потери металла с выбросами и выносами. Поэтому управление процессом шлакообразования целесообразно проводить в соответствии с критерием (8).

В основу построения системы замкнутого управления кислородно-конвертерной плавкой положена идея функционирования модели «система-человек», в которой человеку отводится роль наблюдателя с возможностью вмешательства при необходимости в процесс плавки. Реализация данного принципа позволяет минимизировать человеческий фактор при принятии решений во время плавки и контролировать систему на предмет сбоев в работе.

Литература

1. Филиппов, С. И. Теория металлургических процессов / С. И. Филиппов. М.: Металлургия, 1967.
2. Филиппов, С. И. Кинетические возможности интенсификации обезуглероживания Fe-C расплавов при воздействии нейтрального газа аргона / С. И. Филиппов, С. Г. Мельник // Изв. вузов. Черная металлургия. 1977. № 7. С. 8–14.
3. Мельник, С. Г. Кинетические особенности окисления углерода при введении в металлический расплав раскислителя и азота / С. Г. Мельник, С. И. Филиппов // Изв. вузов. Черная металлургия. 1977. № 8. С. 21–28.

4. Богушевский, В. С. Математическая модель управления дутьевым режимом конвертерной плавки / В. С. Богушевский, В. Ю. Сухенко, Е. А. Сергеева // Изв. вузов. Черная металлургия. 2011. № 8. С. 24–25.
5. Богушевский, В. С. Параметры отходящего газа как индикаторы массо- и теплообменных процессов в ванне конвертера / В. С. Богушевский, С. В. Жук, Е. Н. Зубова // Металл и литье Украины. 2012. № 7. С. 16–20.
6. Сорокин Н. А., Глуховская В. М. Исследование информации о температуре отходящих газов в АСУ конвертерным процессом // Разработка и эксплуатация эффективных систем и средств автоматизации сталеплавильного производства. 1982. С. 13–18.
7. Бережинский А. И., Хомутинников П. С. Утилизация, охлаждение и очистка конвертерных газов. М.: Металлургия, 1967. – 216 с.
8. Автоматическое определение содержания углерода в ванне конвертера по изменению некоторых параметров кислородно-конвертерного процесса / В. С. Богушевский, С. К. Соболев, В. В. Карнаухов и др. // Комплексная автоматизация сталеплавильного производства. Киев: Техніка, 1970. С. 16–23.
9. Бойченко Б. М., Охотський В. Б., Харлашин П. С. / Конвертерне виробництво сталі (теорія, технологія, якість сталі, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія. Дніпропетровськ: РВА „Дніпро-ВАЛ», 2004.
10. Бродянский В. М., Меерзон Ф. И. Производство кислорода. М.: Металлургия, 1970.