

## Обезуглероживание стали как основной параметр оптимального управления кислородно-конвертерным процессом

*Рассмотрены известные математические описания процесса обезуглероживания стали. Построена модель расчета скорости обезуглероживания и динамики содержания углерода в ванне конвертера во время продувки. Установлено, что динамическая модель контроля обезуглероживания в условиях 160-тонного конвертера удовлетворительно отображает процессы, которые протекают в ванне конвертера.*

**Ключевые слова:** обезуглероживание, конвертер, модель

**Ф**изико-химическую основу производства стали в кислородном конвертере составляют процессы окисления примесей металлического расплава, и в первую очередь углерода, что является основой функционирования автоматизированной системы управления конвертерной плавкой. Прямое измерение массовой доли углерода в ванне конвертера, которая изменяется не только по мере выгорания примесей чугуна, но и по мере проплавления лома, осуществить практически невозможно. Пробы, отобранные по ходу продувки, характеризуют средний состав металла только при полном расплавлении лома.

Кинетика обезуглероживания металлической ванны определяется интенсивностью массопереноса. Известно, что при высоком содержании углерода скорость его окисления определяется интенсивностью подвода кислорода. При низком содержании углерода, скорость обезуглероживания зависит от диффузии углерода в зону реакции, и соответственно от градиента его концентрации. Эти закономерности справедливы и для кислородно-конвертерного процесса, для которого характерна неравномерная скорость обезуглероживания, максимальные значения достигаются в середине плавки.

Среди известных математических описаний процесса обезуглероживания его физико-химическую природу наиболее достоверно отображает модель С. И. Филиппова [1]. В начале продувки при высокой массовой доле углерода скорость его окисления зависит от интенсивности подачи кислорода в зону реакции, потому что обезуглероживание преимущественно протекает на межфазной поверхности в зоне контакта дутьевой струи с ванной. В связи с большим окислительным потенциалом в реакционной зоне одновременно окисляются все элементы чугуна. При этом основное тормозящее влияние на процесс обезуглероживания ванны оказывают процессы окисления кремния и марганца, которые имеют более сильное сродство к кислороду. При температуре расплава 1350-1400 °С начинается интенсивное обезуглероживание конвертерной ванны, причем максимальная скорость окисления углерода достигается в середине плавки.

В конце продувки, когда массовая доля углерода в ванне близка к его критической концентрации, при которой происходит смена лимитирующих звеньев процесса, скорость обезуглероживания уменьшается, потому что лимитирующим звеном процесса становится диффузия элемента, который окисляется в зоне реакции.

В связи с представлениями о двух кинетических периодах окисления углерода первый описывается уравнением, соответствующим пропорциональному звену:

$$-\frac{dC}{d\tau} = \frac{K_1 \eta \nu}{m_M}, \quad (1)$$

где  $\frac{dC}{d\tau}$  – скорость обезуглероживания, % / мин;  $K_1$  – передаточное число объекта для первого кинетического периода, (т · %) / м<sup>3</sup>;  $\eta$  – коэффициент, зависящий от объемной доли кислорода в дутье и степени его использования на обезуглероживание;  $\nu$  – объемный расход кислородного дутья, приведенный к нормальным условиям, м<sup>3</sup>/мин;  $m_M$  – масса металлической ванны, т.

Во втором кинетическом периоде, который наступает при равенстве диффузионных потоков углерода и кислорода, скорость обезуглероживания описывается уравнением, которое соответствует инерционному звену первого порядка:

$$-\frac{dC}{d\tau} = \frac{\beta SC}{V_M}, \quad (2)$$

где  $\beta$  – коэффициент массопереноса углерода в ванне, м/мин;  $S$  – поверхность на которой протекает окисление углерода, м<sup>2</sup>;  $C$  – массовая доля углерода в ванне, %;  $V_M$  – объем металлической ванны, м<sup>3</sup>.

Согласно уравнению (1) изменение доли углерода в первом кинетическом периоде выглядит так:

$$C = C_H \frac{K_1 \cdot V_C}{m_M}, \quad (3)$$

где  $C_n$  – начальная массовая доля углерода в ванне, %;  $V_c$  – объем кислородного дутья на окисление углерода по ходу продувки, м<sup>3</sup>.

Интегрируя (2), получаем уравнения изменения массовой доли углерода во втором кинетическом периоде:

$$C = C_{кр} \cdot \exp\left(\frac{\tau}{\Delta\tau}\right), \quad (4)$$

где  $C_{кр}$  – критическое значение содержания углерода в ванне, %;  $\tau$  – текущее время, которое начинают отсчитывать от начала второго кинетического периода, мин;  $\Delta\tau = V_m / \beta S$  – постоянная времени переходного процесса окисления углерода ванны во втором кинетическом периоде, мин.

Ведущей составляющей общей динамической модели является модель расчета скорости обезуглероживания и содержания углерода. В основу модели положены исследования [1-3], которые показали, что процесс обезуглероживания в расплаве Fe-C протекает в диффузионном режиме и при [C] < 0,15-0,20 % происходит замена адсорбционного слоя на поверхности металла, то есть реакция переходит в стадию лимитирования путем переноса углерода из объема ванны к реакционной поверхности.

При построении динамической модели процесса считаем, что конвертерный газ как продукт обезуглероживания состоит из CO и CO<sub>2</sub>. В рабочем пространстве конвертера и газоходе оксид углерода частично дожигается в диоксид. Эта реакция, как и реакция горения железа, приводит к уменьшению коэффициента усвоения кислорода углеродом ванны и тем самым уменьшает выгорание самого углерода [4].

С учетом этого представим скорость обезуглероживания через объемный расход кислородного дутья:

$$v_c = 10^{-3} \frac{2 \cdot 12}{22,4} \left[ v \gamma_{чд} (1 - \gamma_{вд}) - 10^3 (1 - \gamma_{со}) v_{с \times} \right] \times \frac{22,4}{2 \cdot 12} - 10^3 v_{Fe} \cdot \frac{22,4}{2 \cdot 56}, \quad (5)$$

где  $v_c$  – массовая скорость обезуглероживания ванны, т/мин;  $\gamma_{чд}$  – коэффициент, который характеризует чистоту дутья;  $\gamma_{вд} = 0,01$  – коэффициент, который учитывает потери дутья [5];  $\gamma_{со}$  – массовая доля углерода ванны, окисляющегося до CO в полости конвертера за счет кислорода дутья, численно совпадающая со значением объемной доли;  $v_{Fe}$  – массовая скорость окисления железа ванны, т/мин.

Экспериментальная проверка динамической модели контроля обезуглероживания в условиях 160-тонного конвертера показала удовлетворительное отображение системой процессов, которые протекают в ванне конвертера (рис.1).

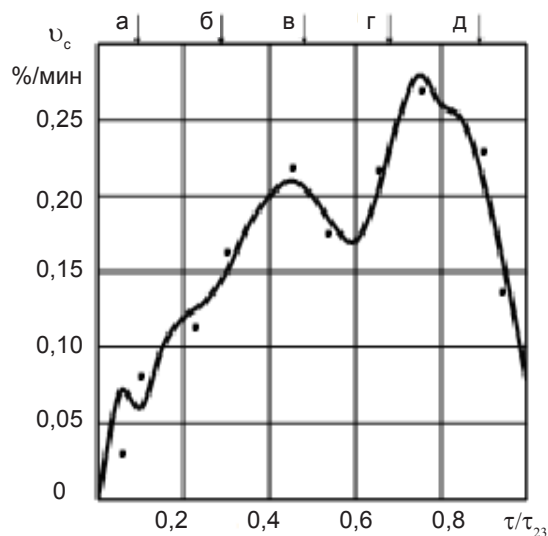


Рис. 1. Изменение скорости обезуглероживания, определенной по анализу отходящих из конвертера газов; точки – скорость обезуглероживания, определенная по химическому анализу проб металла; стрелки – моменты введения присадок в расплав сыпучих материалов; а, б, в – известь (4,0, 2,0 и 1,5 т соответственно); г, д – известняк (по 0,75 т)

Сравнение значений скорости обезуглероживания, определенных по модели [5] и по пробам металла, взятым из ванны в процессе продувки на балансовых плавках, показало следующее. Как для одной плавки, так и для серии из 40 плавков, взаимнокорреляционная функция указывает на отсутствие запаздывания в определении скорости обезуглероживания ванны по модели [5] и достаточно высокую точность (коэффициенты корреляции соответственно: 0,96 и 0,814). Остаточное среднеквадратическое отклонение составляет для одной плавки 0,0047 %/мин, для серии плавков – 0,0078 %/мин. Достоверность коэффициента корреляции выше 0,95.

Разработанная модель включена в общую динамическую модель управления конвертерной плавкой [6], которая позволяет непрерывно по ходу продувки

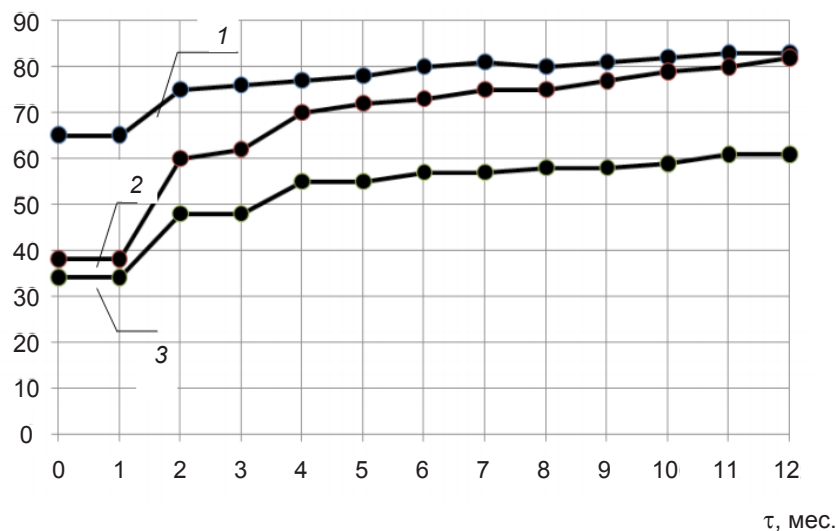


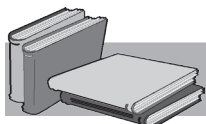
Рис. 2. Процент попадания плавков в заданные пределы химического состава стали с первой повалки по температуре (1), углероду (2) и по углероду и температуре одновременно (3) (данные за год работы конвертера)

контролировать скорость обезуглероживания, изменения температуры и окисления железа.

Анализ массива плавов до и после внедрения модели показал, что количество плавов, которые попали в заданные пределы марки по углероду и температуре, с первой повалки увеличилось с 65 до 80 и с 40 до 80 % соответственно. А количество плавов, которые попали одновременно в заданные границы по углероду и температуре, увеличилось с 35 до 60 % (см. рис. 2).

## Выводы

Разработанная модель расчета скорости обезуглероживания, включена в общую динамическую модель продувки, прошла проверку в условиях 160-тонного конвертера и показала удовлетворительное отображение системой процессов, которые протекают в ванне конвертера. Анализ работы конвертера за один год показал увеличение количества плавов, которые попали в заданные пределы по углероду и температуре с первой повалки от 65 до 85 и от 40 до 80 % соответственно.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Филиппов С. И. Теория металлургических процессов – М.: Металлургия, 1967. – 280 с.
2. Филиппов С. И., Мельник С. Г. Кинетические возможности интенсификации обезуглероживания Fe-C расплавов при воздействии нейтрального газа аргона // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 1977. – № 7. – С. 8-14.
3. Мельник С. Г., Филиппов С. И. Кинетические особенности окисления углерода при введении в металлический расплав раскислителя и азота // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 1977. – № 8. – С. 21-28.
4. Жук С. В. Рівняння масообміну конверторної плавки // Матеріали 8 Міжнародної науково-практичної конференції: Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра – 2010. – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – С.112-115.
5. Богушевский В. С., Рюмшин Н. А., Сорокин Н. А. АСУ ТП производства стали в конвертерах. – К.: Техника, 1991. – 180 с.
6. Богушевський В. С., Сергеева К. О., Жук С. В. Автоматизована система керування конверторною плавкою // Вісник НТУУ «КПІ». – 2011 – № 61, Т 2. – С. 147-151.

### Анотація

Богушевський В. С., Мельник С. Г., Жук С. В.

Зневуглецювання сталі як основний параметр оптимального управління киснево-конвертерним процесом

*Розглянуто відомі математичні описи процесу зневуглецювання. Побудована модель розрахунку швидкості зневуглецювання і вмісту вуглецю в ванні конвертера під час продувки. Встановлено, що динамічна модель контролю зневуглецювання в умовах 160-тонного конвертера задовільно відображає процеси, які протікають у ванні конвертера.*

### Ключові слова

зневуглецювання, конвертер, модель

### Summary

Bogyshevskiy V. S., Melnyk S.G, Zhuk S. V.

Decarburization as the primary parameter of optimal control BOF process

*In this article describes known mathematical description of the decarburization process. Was constructed a calculation model of decarburization speed and carbon content in the bath converter during purging. Was established that the dynamic control model decarburization under 160-ton converter satisfactorily display system processes that is occurring in the bath converter.*

### Keywords

decarburization, converter, model

Поступила 03.02.14