

УДК 669.184.001.57

Сокол С.П.*

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ

Рассмотрены вопросы применения статистических методов для построения модели конвертерной плавки. Предложены варианты двух статистических моделей для определения результата плавки. Даны рекомендации по уточнению коэффициентов моделей.

В настоящее время во всем мире наиболее распространен конвертерный процесс производства стали с верхней продувкой ванны кислородом. Для получения качественной стали с заданным химическим составом и температурой важно иметь надежную систему управления ходом продувки, которая бы не только стабилизировала параметры процесса, но и на основании проведенных ею расчетов выдавала советы по дальнейшему ходу плавки.

Рассмотрев примеры существующих решений реализации управления конвертерной плавкой [1 – 3], можно выделить два основных направления оптимизации процесса:

– использование новейшего оборудования, позволяющего получить более точную и более полную информацию об объекте; применение микроконтроллеров для управления процессом;

– применение математических моделей, рассчитывающих заданные значения управляющих воздействий, позволяющих за наиболее короткое время достичь результатов, наиболее приближенных к требуемым.

Причем, каждый комбинат реализует либо первое направление, либо второе, либо оба сразу. Однако, математическое описание процессов, происходящих в конвертере, является достаточно громоздким и не слишком точным, ввиду большого количества неучтенных и неизмеряемых факторов.

Целью данной статьи является разработка статистической прогнозирующей модели для определения основных выходных параметров плавки: температуры стали и содержания углерода в стали, на основании входных параметров плавки.

Для определения того, какие входные параметры будут участвовать в составлении модели, необходимо оценить тесноту связи между выходными величинами и входными параметрами путем определения коэффициентов парной корреляции между каждой выходной величиной и каждым из входных параметров.

После проведения корреляционного анализа выбраны по 5 входных параметров, для которых коэффициент корреляции больше 0,41 для C_{cm} и больше 0,2 для t_{cm} .

Для содержания углерода в стали C_{cm} это температура чугуна $t_{ч}$, содержание кремния в чугуне $Si_{ч}$, содержание марганца в чугуне $Mn_{ч}$, количество продутого кислорода V_{O_2} , масса присаживаемого доломита $G_{дол}$; для температуры стали t_{cm} – $Si_{ч}$, $Mn_{ч}$, $G_{дол}$, содержание серы в чугуне $S_{ч}$, положение кислородной фурмы $H_{ф}$. Была построена линейная статистическая модель вида (1, 2) для каждой выходной величины.

$$C_{cm} = a_0 + a_1 t_{ч} + a_2 Si_{ч} + a_3 Mn_{ч} + a_4 V_{O_2} + a_5 G_{дол}; \quad (1)$$

$$t_{cm} = b_0 + b_1 Si_{ч} + b_2 Mn_{ч} + b_3 S_{ч} + b_4 H_{ф} + b_5 G_{дол}, \quad (2)$$

где $a_0 - a_5$ и $b_0 - b_5$ – коэффициенты регрессии.

*ПГТУ, ассистент

Для определения коэффициентов регрессии был использован метод наименьших квадратов, с учетом данных всех паспортов плавков за контрольный период. В результате были получены следующие уравнения регрессии:

$$C_{cm} = -0,358 + 0,000335t_c + 0,0766Si_c - 0,0257Mn_c - 0,00377V_{O_2} + 0,000632G_{ool} \quad (3)$$

$$t_{cm} = 1738 + 24,01Si_c - 72,42Mn_c + 36,96S_c + 10,9H_\phi - 0,85G_{ool} \quad (4)$$

В данной модели среднее квадратическое отклонение содержания углерода в стали составляет 0,011 %, а температуры стали – 14,8 °С. Распределение содержания углерода в стали и температуры стали представлено на рисунке 1.

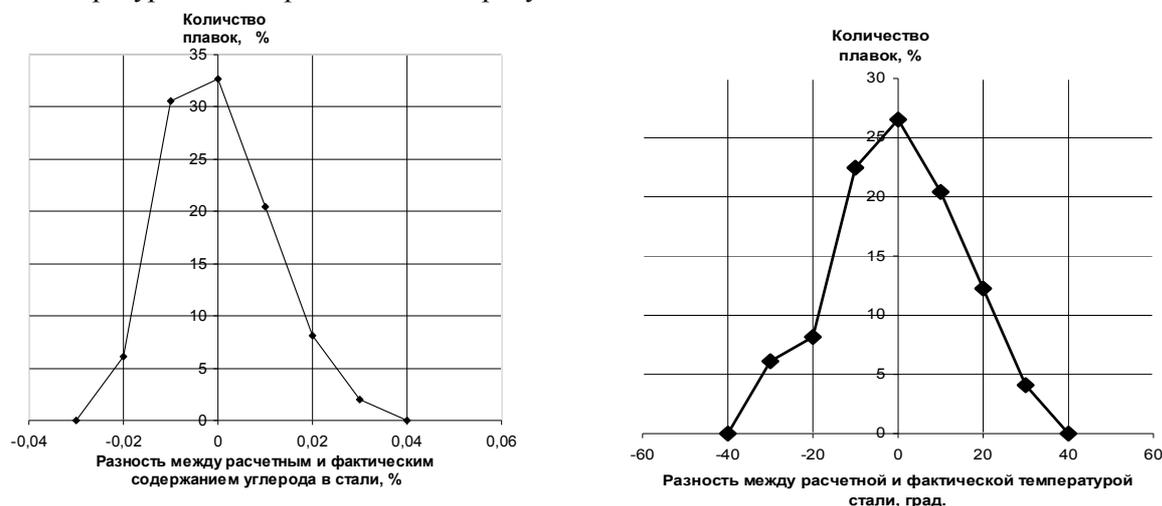


Рис. 1 – Распределение содержания углерода в стали и температуры стали

Как видно из рисунка 1, доля плавков, в которых отклонение расчетного содержания углерода в стали от фактического не превышает абсолютной погрешности измерения (0,01 %), составляет 55 %, а доля плавков, в которых отклонение расчетной температуры стали от фактической не превышает абсолютной погрешности измерения (15 °С), составляет 69 %. Эти данные свидетельствуют о том, что разработанная модель является недостаточно точной.

Для повышения точности модели было решено составить не линейное, а квадратичное уравнение регрессии вида:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + a_{11}x_1^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + \dots + a_{1n}x_1x_n + a_{22}x_2^2 + \dots + a_{23}x_2x_3 + \dots + a_{nn}x_n^2. \quad (5)$$

Для оценки совместного влияния двух входных параметров на выходную величину используется коэффициент множественной корреляции, определяемый по формуле [4]

$$R_{y,x_i,x_j} = \sqrt{\frac{R_{yx_i}^2 + R_{yx_j}^2 - 2R_{yx_i}R_{yx_j}R_{x_ix_j}}{1 - R_{x_ix_j}^2}} \quad (6)$$

где R_{yx_i} , R_{yx_j} и $R_{x_ix_j}$ – коэффициенты парной корреляции.

После проведения множественного корреляционного анализа были отобраны те входные параметры и их сочетания, для которых коэффициент корреляции больше 0,56 для C_{cm} и больше 0,32 для t_{cm}

После подстановки этих параметров в уравнение (5) и определения коэффициентов регрессии методом наименьших квадратов, были получены уравнения (7) и (8).

В этой модели среднее квадратическое отклонение содержания углерода в стали составляет стало равным 0,0086 %, то есть уменьшилось в 1,33 раза, а среднее квадратическое отклонение температуры стали – 13,7 °С, то есть уменьшилось в 1,1 раза. Распределение

содержания углерода в стали и распределение температуры стали для данной модели представлено на рисунке 2.

$$C_{cm} = 0,474 - 0,618Si_q - 0,00125G_qSi_q + 0,0012t_qSi_q - 5,45 \cdot 10^{-5}t_qV_{O_2} +$$

$$+ 1,59 \cdot 10^{-5}t_qG_{изв} + 2,86 \cdot 10^{-6}t_qG_{дол} - 0,84Si_qMn_q + 1,55Si_qS_q - 1,23Si_qP_q -$$

$$- 0,0022Si_qG_l - 0,0068Si_q\tau_{прод} + 0,00538Si_q\tau_{прост} + 0,001Si_q\tau_{пл} +$$

$$+ 0,00195Si_qP_{O_2} + 5,8 \cdot 10^{-6}Si_qV_{O_2} + 0,0057Si_qH_\phi + 0,0381Si_qV_{O_2} -$$

$$- 0,0229Si_qG_{изв} - 0,00242Si_qG_{дол} + 0,0345Mn_qV_{O_2};$$

$$t_{cm} = 1709,3 + 0,0376G_qH_\phi + 1322Si_qS_q - 13,54Si_qH_\phi - 5226Mn_qS_q +$$

$$+ 40,39Mn_qH_\phi + 1716S_qH_\phi - 31,52S_qG_{дол} + 467,2P_qH_\phi + 0,1575G_lH_\phi +$$

$$+ 0,321\tau_{пл}H_\phi - 1,064P_{O_2}H_\phi - 1,479G_{изв}H_\phi - 2,004G_{дол}H_\phi + 0,079G_{изв}G_{дол}.$$

где G_q – масса чугуна, т;
 $G_{изв}$ – масса извести, т;
 P_q – содержание фосфора в чугуне, %;
 G_l – масса лома, т;
 $\tau_{прод}$ – время продувки, мин;
 $\tau_{прост}$ – время простоя, мин;
 $\tau_{пл}$ – общее время цикла плавки, мин;
 P_{O_2} – давление кислорода, атм.

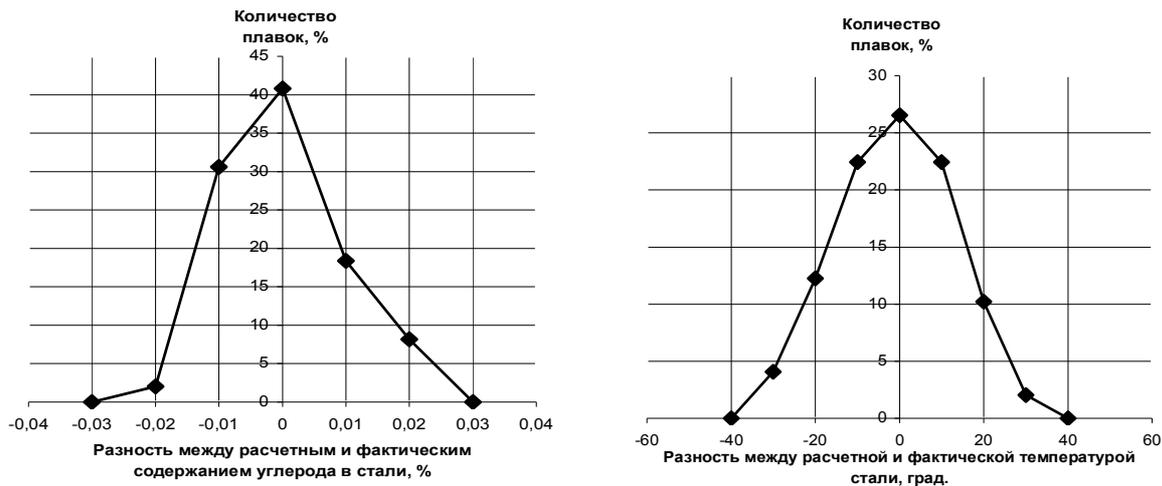


Рис. 2 – Распределение содержания углерода в стали и температуры стали

Как видно из рисунка 2, доля плавков, в которых отклонение расчетного содержания углерода в стали от фактического не превышает 0,01 %, составляет 80 %, а доля плавков, в которых отклонение расчетной температуры стали от фактической не превышает 15 °С, составляет 71 %.

Сравнивая полученные результаты с результатами линейной модели, можно сделать следующие выводы.

1. Квадратичная модель для определения содержания углерода в стали показала значительно лучшие результаты, чем линейная: в 1,33 раза уменьшилась дисперсия, на 25 % увеличилось количество плавков, в которых отклонение расчетного содержания углерода в стали от фактического не превышает абсолютной погрешности измерения. Поэтому при расчете содержания углерода в стали целесообразнее использовать квадратичную модель (7).

2. Результаты, полученные с помощью квадратичной и линейной модели для определения температуры стали отличаются довольно незначительно: дисперсия уменьшилась в 1,1 раза, количество плавков, в которых отклонение расчетной температуры стали от фактической не превышает абсолютной погрешности измерения увеличилось всего на 2 %. Это связано с тем, что температура стали имеет слабую корреляционную связь с входными

параметрами. Поэтому при расчетах температуры стали достаточно расчетов с помощью линейной модели (4).

Практика показывает, что при изучении конвертерного процесса достаточно хорошие оценки для коэффициентов регрессии можно получить лишь при условии включения в обработку данных по 800 – 1000 плавков. Но за время накопления такого количества статистических данных параметры объекта могут измениться, и модель будет неадекватной.

Поэтому на практике пользуются статистической моделью конвертерного процесса с переменными коэффициентами, изменяющимися после каждой плавки [5]. Сущность метода заключается в том, что коэффициенты модели отыскиваются методом наименьших квадратов на основании ограниченного числа плавков α . Результат расчета используется для прогнозирования выходного параметра в следующей $(\alpha + 1)$ -й плавке. Затем после ее окончания вновь производится расчет коэффициентов модели с использованием данных α плавков, начиная со второй и кончая $(\alpha + 1)$ -й. Такая процедура ввода в память вычислительной машины новых данных и вывода старых повторяется после каждой плавки.

Число α должно быть достаточно малым, чтобы полученная таким способом модель отражала изменение неконтролируемых параметров. Вместе с тем, оно должно быть достаточно большим, чтобы рассчитанные значения коэффициентов модели были статистически достоверными. Кроме того, большое число наблюдений в какой-то степени гарантирует получение коэффициентов модели, на которых не сказываются разовые или кратковременно действующие факторы.

Дальнейшие разработки в данном направлении будут связаны с созданием статистических моделей с автоматической подстройкой коэффициентов с учетом износа футеровки в течение всей кампании конвертера.

Выводы

1. Разработка и внедрение статистических моделей позволит осуществлять прогнозирование конечного результата конвертерной плавки на основании исходных данных, известных еще до начала продувки.
2. В условиях, когда не разработано достаточно точной математической модели конвертерного процесса, простые статистические модели позволяют выполнять прогноз с необходимой в большинстве случаев степенью точности. Кроме того, при введении обратной связи подобные модели позволят рассчитывать шихтовку плавки.

Перечень ссылок

1. Система управления конвертерной плавкой / *Е.Ф. Литвиненко, В.И. Товкун, С.Д. Коцур, А.Г. Коваленко, А.А. Сенаторов* // *Металлург* – 2004. – № 7. – С. 39 – 41.
2. Особенности разработки и технологические результаты внедрения интеллектуальных систем управления в сталеплавильном производстве ММЗ / *О.П. Кучеренко, Г.Н. Волобуева, А.И. Буряк, А.В. Старосоцкий, С.А. Храпко* // *Металлург*. – 2004. – № 12. – С. 28 – 30.
3. Совершенствование конвертерного производства стали в ОАО ММК / *Р.С. Тахаутдинов, В.Ф. Сарычев, Ю.А. Бодяев, О.А. Николаев* // *Сталь*. – 2002. – № 1. – С. 12 – 14.
4. *Лукомский Я.И.* Теория корреляции и ее применение к анализу производства / *Я.И. Лукомский*. – М.: Госстатиздат, 1961. – 218с.
5. *Туркенич Д.И.* Управление плавкой стали в конвертере / *Д.И. Туркенич*. – М.: Металлургия, 1978. – 360 с.
6. *Кочетков П.А.* Краткий курс теории вероятностей и математической статистики / *П.А. Кочетков*. – М.: МГИУ, 1999. – 51 с.

Рецензент: В.С. Зайцев
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 09. 02. 2009