

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕМПЕРАТУРЫ СТАЛИ В КОНВЕРТЕРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Некрасова Д.А.¹

(ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Липецк)

В данной работе приведены математические модели для расчета массы и химического состава стали и шлака в сталеплавильном производстве в зависимости от массы и химического состава загруженных материалов (чугун, металлический лом, известь, доломит и т.д.), а также параметров работы конвертера. Оценивается точность полученных моделей с помощью коэффициента детерминации и стандартных ошибок моделей.

Ключевые слова: балансовая модель, регрессионная модель, конвертер, коэффициент детерминации.

1. Введение

По мере развития технологии производства стали повышаются требования к качеству продукции. Математические модели дают возможность эффективно управлять процессами.

Наиболее распространенным способом производства стали является кислородно-конвертерный процесс. Сущность данного процесса заключается в том, что в конвертер заливают жидкий чугун, загружают металлический лом, различные добавки и продувают снизу воздухом. Таким образом, кислород окисляет

¹ Некрасова Дарья Алексеевна, студент (brezhneva.darya.pm12@mail.ru).

примеси чугуна, в результате чего он превращается в сталь. При этом выгорают примеси чугуна – углерод, кремний, марганец, сера, фосфор, а продукты реакции переходят в шлак или в газ [5]. Металлический лом используется для охлаждения, так как при окислительных реакциях тепла выделяется больше, чем требуется. Для формирования шлака применяется известь.

Главной задачей управления конвертерной плавкой является получение заданного химического состава и температуры стали при минимальных затратах топливно-энергетических ресурсов, при этом необходимо учитывать возможности производственных факторов процесса [3].

2. Параметры модели

Введем функцию

$$(1) \quad y = f(v, x),$$

где y – выход (химический состав стали);

v – химический состав загруженных материалов;

x – факторы внутреннего состояния процесса.

Основными шихтовыми материалами кислородно-конвертерного процесса являются жидкий чугун, стальной лом, шлакообразующие (известь, доломит, известняк и т.д.):

$$(2) \quad m = m_{\text{ч}} + m_{\text{л}} + m_{\text{шл}},$$

где m – масса шихтовки (т);

$m_{\text{ч}}$ – масса чугуна (т);

$m_{\text{л}}$ – масса металлического лома (т);

$m_{\text{шл}}$ – масса шлакообразующих (т).

Для стали и чугуна рассматриваются следующие химические элементы: Fe, C, S, P, Mn. Расчет массы химического элемента производится с помощью формулы:

$$(3) \quad m_i = Q_{\text{ч}} m_{\text{ч}} + Q_{\text{л}} m_{\text{л}} + Q_{\text{ш}} m_{\text{ш}},$$

где m_i – масса i химического элемента на входе;

$Q_{\text{ч}}$, $Q_{\text{л}}$, $Q_{\text{ш}}$ – процентное содержание химического элемента в чугуне, металлическом ломе и шлакообразующих соответственно.

В табл.1 представлены входящие факторы и факторы внутреннего состояния, которые использовались в модели.

Таблица 1. Факторы модели

Входы	
Химический состав чугуна	-C(%); -Mn(%); -S(%); -P(%); -Fe(%).
Температура чугуна	$T_{\text{ч}}$ (°C)
Масса чугуна	$m_{\text{ч}}$ (т)
Сорт лома	Лом первого сорта: - Fe(%); - C(%); - P(%); - S(%).
Масса лома	$m_{\text{л}}$ (т)
Химический состав извести	-CaO(%); -MgO(%); -SiO ₂ (%); -S(%).
Масса извести	$m_{\text{и}}$ (т)
Химический состав доломита	-CaO(%); -MgO(%).
Масса доломита	$m_{\text{д}}$ (т)
Факторы внутреннего состояния процесса	
Расход кислорода на пл.	Q_{O} (м ³)
Время продувки	τ (мин)
Стойкость футеровки	Φ (пл.)

3. Модель для расчета химического состава стали

Для определения химического состава стали предполагалось, что содержание химического элемента зависит от входящих параметров и факторов внутреннего состояния процесса.

Изначальный набор факторов включает в себя: массу химического элемента на входе, факторы внутреннего состояния процесса, массу шлакообразующих и температуру чугуна.

Модели были построены с помощью регрессионного анализа. Объем выборки – 1830 строк. Коэффициенты регрессии находились с помощью метода наименьших квадратов. С помощью t-критерия оценивалась значимость коэффициентов и исключались из модели факторы, рассчитанное значение t-критерия которых меньше табличного. Линейные регрессионные модели упрощают проектирование по сравнению с другими методами, а доступность вычислений дает прозрачность моделирования [1].

Содержание железа в стали зависит от массы железа на входе:

$$(4) \quad m(Fe) = 0.94916m_{Fe},$$

где $m(Fe)$ – масса железа в стали.

Для C, P, S и Mn содержание в стали зависит и от параметров внутреннего состояния:

$$(5) \quad m(C) = (3,0\Phi + 8,0Q_o - 36,0T_{\text{ч}}) \cdot 10^{-6} + 0,007915m_C,$$

$$(6) \quad m(S) = (1,0\Phi + 1,0Q_o) \cdot 10^{-6} + 0.510368m_S,$$

$$(7) \quad m(Mn) = 0,246732m_{Mn} + (770,0T_{\text{ч}} - 6,0m_{\text{шл}}) \cdot 10^{-6},$$

$$(8) \quad m(P) = 0.101364m_P + (1,0Q_o - 0,497m_{\text{шл}}) \cdot 10^{-6}.$$

Построенные модели имеют высокий коэффициент детерминации, что говорит о высоком качестве моделей.

Таблица 2. Коэффициенты детерминации для полученных моделей

Химический элемент в стали	Точность модели
Fe	99.9%
C	92.8%
S	91.8%
Mn	95%
P	89.4%

С помощью критерия Стьюдента произведена оценка коэффициентов. Табличное значение критерия со степенями свободы

Управление техническими системами, технологическими процессами и промышленными установками

$n - k - 1$, где n – объем выборки и k – количество факторов, и уровнем значимости $\alpha = 0,05$, в полученных моделях меньше рассчитанного значения критерия, что подтверждает значимость факторов полученного уравнения (Табл.3).

Таблица 3. Оценка коэффициентов модели с помощью t-критерия

Фактор	Коэффициент	$t_{\text{практ}}$	$t_{\text{теор}} (\alpha = 0.05)$
C			
m_C	0,007915	5,84324	1,961265
Φ	$3 \cdot 10^{-6}$	8,52682	
Q_o	$8 \cdot 10^{-6}$	6,7073	
$T_{\text{ч}}$	$-3,6 \cdot 10^{-5}$	-5,25395	
S			
m_S	0,510368	35,99595	1,961264
Φ	$1 \cdot 10^{-6}$	7,47085	
Q_o	$1 \cdot 10^{-6}$	14,87136	
Mn			
m_{Mn}	0,246732	25,81942	1,961264
$m_{\text{шл}}$	$-6 \cdot 10^{-6}$	-9,51052	
$T_{\text{ч}}$	$-7,7 \cdot 10^{-4}$	13,29565	
P			
m_P	0,101364	8,34597	1,961264
$m_{\text{шл}}$	$-4,97 \cdot 10^{-7}$	-7,75813	
Q_0	$1 \cdot 10^{-6}$	7,99958	

4. Модель для расчета температуры стали

Важнейшим критерием качества стали является температура. Модель отражает зависимость температуры стали от температуры жидкого чугуна и факторов внутреннего состояния:

$$(9) \quad T_k = 7,21163m_{\text{ч}} - 0,003070m_{\text{шл}} + 0,002830\Phi + \\ + 0,484679T_{\text{ч}} + 1,374633\tau,$$

где T_k – температура стали (°C);

$T_{\text{ч}}$ – температура чугуна (°C).

Коэффициент детерминации для полученной модели: $R^2 = 0.9999$. Оценка коэффициентов модели для температуры стали производилась с помощью критерия Стьюдента с вероятностью $\alpha = 0.05$ (Табл.4).

Таблица 3. Оценка коэффициентов модели с помощью t-критерия

Фактор	Коэффициент	$t_{\text{практ}}$	$t_{\text{теор}} (\alpha = 0.05)$
$m_{\text{ч}}$	7,21163	37,41933	1,961264
$m_{\text{шл}}$	-0,0307	-7,3485	
Φ	0,00283	6,34125	
$T_{\text{ч}}$	0,484679	21,63649	
τ	1,374633	2,08779	

Исходя из результатов исследования, получаем, что на химический состав стали влияют содержание химического элемента на входе и факторы внутреннего состояния – время продувки, стойкость футеровки и расход кислорода.

Литература

1. АЙВАЗЯН С.А., МХИТРЯН В.С. *Прикладная статистика и основы эконометрики*. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 320с.
2. БАПТИЗМАНСКИЙ В.И. *Теория кислородно-конвертерного процесса*. – М.: Металлургия, 1975 с.375.

3. БИГЕЕВ А.М. *Математическое описание и расчеты сталеплавильных процессов.* – М.: Металлургия, 1982. – 156с.
4. БИГЕЕВ А.М., КОЛЕСНИКОВ Ю.А. *Основы математического описания и расчеты кислородно-конвертерных процессов.* – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.
5. ВОСКОБОЙНИКОВ В.Г., КУДРИН В.А., ЯКУШЕВ А.М. *Общая металлургия.* – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005 – 768с.

CHEMICAL FORECASTING IN CONVERTER PRODUCTION

Nekrasova Darya Alexeevna, Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk, student (brezhneva.darya.pm12@mail.ru).

Abstract: in this work we presented mathematical models to calculate the mass and chemical composition of steel and slag in the steelmaking process-based on the mass and chemical composition of loaded materials (cast iron, metal scrap, limestone, dolomite, etc.) as well as the operating parameters of the Converter. The estimated accuracy of the obtained models is using the coefficient of determination and standard errors.

Keywords: balance model, regression model, Converter, coefficient of determination.