

УДК 669.4.432

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА ФЛЮСУЮЩИХ ДОБАВОК СВИНЦОВОЙ ПЛАВКИ

В. Н. Косенко

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра металлургии цветных металлов
Запорожская государственная инженерная академия
пр. Ленина, 226, г. Запорожье, Украина, 69006
Контактный тел.: (0612) 32-62-31, 223-82-82
E-mail: vova-ochinskij@yandex.ru

Розглянуто можливості застосування методів математичного моделювання у свинцевої галузі металургії. Стаття є заключним етапом багаторічних досліджень промислових шлаків вторинної свинцевої плавки та лабораторних випробувань. Запропоновано математичну модель складу шахтної плавки свинцю

Ключові слова: шлак, математична модель, втрати металів, оптимізація плавки

Рассмотрены возможности применения методов математического моделирования в свинцовой отрасли металлургии. Статья является завершающим этапом многолетних исследований промышленных шлаков вторичной свинцовой плавки и лабораторных испытаний. Предложена математическая модель состава шлака шахтной свинцовой плавки

Ключевые слова: шлак, математическая модель, потери металлов, оптимизация плавки

Possibilities of application of methods of mathematical design are considered in leaden industry of metallurgy. The article is the finishing stage of long-term researches of industrial slags of the secondary leaden melting and alpha tests. The mathematical model of composition of slag of the mine leaden melting is offered

Key words :slag, mathematical model, losses of metals, optimization of melting

Введение

Совершенствование промышленного потенциала страны невозможно без инновационных ресурсоэнергосберегающих технологий, использующих вторичные ресурсы. Вопросы интенсификации производства особенно актуальны для металлургической отрасли, в частности, для свинцового производства. С другой стороны, постоянная интенсификация пирометаллургических процессов выплавки металлов способствует увеличению их потерь с силикатными отходами. Поэтому одним из важнейших аспектов совершенствования металлургического производства является его оптимизация, которая позволяет за счет изменения вещественного состава сырья, флюсующих компонентов, обеспечить повышение степени извлечения ценных цветных металлов.

Пирометаллургическое производство тяжелых цветных металлов характеризуется высоким выходом шлаков по отношению к выплавленному металлу – до 120%. Поэтому, хотя содержание цветных металлов в шлаке относительно невелико (0,1-2,0%), общие потери составляют внушительную цифру. Снижение потерь металла со шлаком в металлургии тяжелых цветных

металлов – одна из важнейших и наиболее трудных проблем. Недаром к решению этой задачи неоднократно обращались крупнейшие металлурги, физики, химики, как у нас в стране, так и за рубежом.

Задачей исследований в данной работе являлось построение математической модели состава шлака вторичной свинцовой плавки с целью получения в нем минимальных потерь свинца.

Ранее авторами [1, 2] был проведен регрессионный анализ промышленных шлаков вторичной свинцовой плавки, проведены лабораторные исследования, предложен и запатентован оптимальный состав шлака вторичной свинцовой плавки, который позволяет значительно сократить потери свинца в силикатном расплаве.

Применение статистических методов обработки данных, планирования эксперимента, позволило научно обосновать программу исследований и обеспечить достоверную оценку полученных результатов.

Следующим этапом оптимизации процесса вторичной шахтной свинцовой плавки стало построение математической модели состава шлака. Модельное прогнозирование позволяет минимизировать потери свинца в шлаке при различных комбинациях входных параметров процесса (составе шлака, температуре

плавки, времени выдержки расплава в печи, расходе восстановителя).

Математическую зависимость между результирующим показателем Y и шестью входными параметрами $\bar{X} = (X_1; X_2; X_3; X_4; X_5; X_6)$ построим в форме модели множественной линейной регрессии:

$$\bar{Y} = a_0 + \sum_{i=1}^6 a_i \cdot X_i, \quad (1)$$

где \bar{Y} - модельное (теоретическое) значение результирующего показателя (соответствует содержанию свинца в шлаке); $a = (a_0; a_1; a_2; a_3; a_4; a_5; a_6)$ - вектор неизвестных параметров регрессии; $X_i, i = \overline{1,6}$ - значение i -го фактора: X_1 - изменение содержания SiO_2 в шлаке (31...40%); X_2 - изменение содержания FeO в шлаке (31-40 %); X_3 - изменение содержания CaO в шлаке (31...40%); X_4 - температура процесса (1250...1300°C); X_5 - время выдержки расплава в печи (45...60 минут); X_6 - расход восстановителя (9...11%).

Неизвестные параметры регрессии найдены методом наименьших квадратов с использованием статистической базы, которая сформирована по результатам проведенных 24 экспериментов (8 серий экспериментов по 3 в каждой) и представлена в агрегированном виде в табл. 1.

Таблица 1

Статистическая база моделирования

Эксперимент	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	\bar{Y}
1	40	24	24	1300	60	11	2,4
2	40	20	24	1250	60	9	1,4
3	31	24	24	1250	45	9	1,2
4	40	24	15	1300	45	9	2,3
5	31	20	24	1300	45	11	0,9
6	40	20	15	1250	45	11	1,6
7	31	24	15	1250	60	11	2,0
8	31	20	15	1300	60	9	1,9

Вычисленный для данной модели регрессии коэффициент множественной детерминации $R^2 = 0,9841$ свидетельствует о высоком качестве данной модели (максимальное значение $R^2 = 1$, что характерно для ситуации, когда все модельные (теоретические) значения результирующего показателя с любой точностью совпадают с его фактическими значениями для каждого эксперимента) и показывает, что выбраны шесть факторов вместе на 98,41% определяют вариацию результирующего показателя Y (все другие факторы влияют на вариацию результирующего показателя Y лишь на 1,59 %).

Математическая модель зависимости потерь свинца от шести факторов приобретает такой вид:

$$Y = -11,72222 + 0,04722 \cdot X_1 + 0,13125 \cdot X_2 - 0,05278 \times X_3 + 0,0065 \cdot X_4 + 0,028333 \cdot X_5 + 0,0125 \cdot X_6 \quad (2)$$

Проверка данной модели на адекватность проводилась с применением критерия Фишера: расчетное значение этого критерия $F_p = 10,333$ больше табличного значения $F_{табл}(0,95;6;17) = 2,699$ для заданного уровня вероятности $P = 0,95$ и соответствующих степеней свободы $k_1 = 6$ (количество факторов, включенных в модель регрессии) и $k_2 = 17$ (отражает соотношение между количеством экспериментальных данных, на основе которых строится модель регрессии (24 эксперимента) и количества неизвестных параметров регрессии, которые оцениваются (семь параметров)). Это свидетельствует об адекватности построенной модели (2), которую можно использовать в дальнейшем для теоретического (модельного) воспроизведения исследуемого процесса при разном соотношении значений выбранных шести факторов, взятых в определенных диапазонах.

Рассмотрим значимость параметров модели регрессии (1). Для этого рассчитаем t -статистику Студента для каждого из параметров по формуле:

$$t_{ip} = \frac{|a_i|}{\sigma_i}, i = \overline{1,6}, \quad (3)$$

где t_{ip} - t -статистика для i -го параметра регрессии a_i для заданного уровня вероятности p ; σ_i - средние квадратичные отклонения оценок параметров регрессии a_i .

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Табличное значение t -статистики для уровня вероятности $P=0,95$ и количества степеней свободы $k_1 = 17$ равняется $t_{табл}(0,95;17) = 2,1098$. Поскольку $|t_{i,0,95}| > t_{табл}(0,95;17)$ для всех параметров регрессии, кроме параметра a_6 , то можно считать влияние факторов X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 на показатель Y значимым (статистически значимым) и их следует учитывать при расчетах, а влияние фактора X_6 - незначимым.

Математическую модель (2) можно использовать для прогнозирования результирующего показателя Y при разных вариантах проведения модельного эксперимента:

Таблица 2

Проверка параметров модели регрессии (1) на статистическую значимость

Статистический показатель	Значение статистического показателя для фактора						
	свободный член	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
a_i	-11,7222	0,0472	0,1313	-0,0528	0,0065	0,0283	0,0125
σ_i	3,3964	0,0139	0,0313	0,0139	0,0025	0,0083	0,0625
$ t_{i,0,95} $	3,4514	3,4	3,4	3,8	2,6	3,4	0,2

$$\bar{X}_i^{прогноз} = (X_{i1}^{прогноз}; X_{i2}^{прогноз}; X_{i3}^{прогноз}; X_{i4}^{прогноз}; X_{i5}^{прогноз}; X_{i6}^{прогноз})$$

Результаты модельных экспериментов для базовых данных и прогнозных комбинаций, а также их доверительные интервалы представлены в табл. 3 и проиллюстрированы на рис. 1.

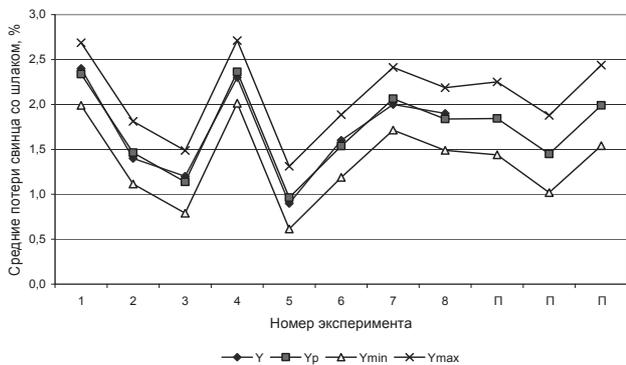


Рис. 1. График фактических данных, линии регрессии и их доверительные интервалы

Выводы

Полученная математическая модель позволяет варьировать содержание оксида кальция, оксида железа, оксида кремния, оксида алюминия в шлаке шахтной свинцовой плавки, а так же время выдержки расплава в печи и расход восстановителя с целью получения минимальных потерь свинца.

Такая возможность теоретического прогнозирования потерь металлов со шлаком позволяет исключить затратные лабораторно- промышленные испытания, избежать расходов на дополнительную переработку силикатных отходов, а также получить шлаки пригодные для применения в промышленном и гражданском строительстве.

Таблица 3

Результаты модельных экспериментов

Тип эксперимента	Номер серии эксперимента	Фактическое значение						Теоретическое (модельное) значение				
		факторов (управляемый параметр)						результатирующего показателя (неуправляемый параметр)	отклонение модельное от фактических данных	граница надежного интервала		
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆			Y	Y _p	нижняя Y _{min}
Реальный	1	40	24	24	1300	60	11	2,4	2,3375	0,0625	1,988622	2,686378
	2	40	20	24	1250	60	9	1,4	1,4625	-0,0625	1,113622	1,811378
	3	31	24	24	1250	45	9	1,2	1,1375	0,0625	0,788622	1,486378
	4	40	24	15	1300	45	9	2,3	2,3625	-0,0625	2,013622	2,711378
	5	31	20	24	1300	45	11	0,9	0,9625	-0,0625	0,613622	1,311378
	6	40	20	15	1250	45	11	1,6	1,5375	0,0625	1,188622	1,886378
	7	31	24	15	1250	60	11	2,0	2,0625	-0,0625	1,713622	2,411378
	8	31	20	15	1300	60	9	1,9	1,8375	0,0625	1,488622	2,186378
Модельный	$\bar{X}_1^{прогноз}$	35	23	20	1285	52	10	-	1,844583	-	1,439456	2,24971
	$\bar{X}_2^{прогноз}$	33	21	16,5	1260	50	9,6	-	1,448194	-	1,018186	1,878203
	$\bar{X}_3^{прогноз}$	37,5	22,5	23	1294	58,5	10,7	-	1,990097	-	1,541517	2,438677

Литература

- 1.Определение оптимального со става шлака в свинцовом производстве методом математической статистики. / Крысенко Н.С., Косенко В.Н., Коломийцева Т.А. // Металлургия и горнорудная промышленность. - 1999. - N1. - С.54-55.
2. Об оптимизации состава шлаков шахтной плавки вторичного свинецсодержащего сырья. / Косенко В.Н., Пожув В.И., Грицай В.П., [и др.] // Металургія : Наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя : ЗДІА, 2006. – Вип.14. - С.118-120.