

The regression equations, reflecting interaction of the slag characteristics and its chemical composition, are received on the basis of multivariate regressive analysis using empirical evidence. Statistical estimate of degree of influence of the slag composition factors on foaming index and parameter considering surface tension, density and viscosity of slag is presented.

В. Ф. СОБОЛЕВ, БНТУ, Н. В. АНДРИАНОВ, РУП «БМЗ», А. А. ЧИЧКО, БИТУ

УДК 669.27

СТАТИСТИЧЕСКИЙ ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ШЛАКОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Одной из важнейших технических проблем сталеплавильного производства является получение устойчивых шлаковых пен в расплавах сталей, находящихся в дуговых печах. Способность шлака образовывать пену в стали оказывает существенное влияние на такие его функции, как защита поверхности металла от насыщения газами, снижение тепловых потерь и выноса пыли, экранирование излучения дуг. Известно, что процесс пенообразования зависит от состава шлака. Однако в большинстве литературных источников [1] процесс пенообразования в шлаках сталеплавильного производства рассматривается через взаимосвязь с такими физическими свойствами шлака, как плотность, вязкость, поверхностное натяжение. В то же время взаимосвязь между составом шлака и его способностью образовывать пену до сих пор остается во многом малоизученным вопросом теории металлургических шлаков.

Цель настоящей работы — статистический факторный анализ влияния химического состава шлака на свойства его пенообразования в сталях.

Для реализации цели работы в качестве метода использовали многомерный регрессионный анализ и экспериментальные данные работы по свойствам шлаков различного химического состава. В качестве модели регрессионного анализа использовали линейную функцию вида:

$$Y_i = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n, \quad (1)$$

где Y_i — анализируемое свойство шлака; X_i — факторы химического состава шлака; B_i — коэффициент, учитывающий вклад данного фактора в анализируемое свойство. В качестве исследуемого свойства шлака использовали Y_1 — индекс вспенивания, с^{-1} , который определяется как:

$$Y_1 = H / V,$$

где H — равновесная высота столба пены, м; V — скорость газа через площадь основания пены, м/с.

В качестве факторов, влияющих на свойства шлака в условиях, близких к выплавке стали в дуговой сталеплавильной печи (ДСП), были выбраны: X_1 — температура, К; X_2 — основность шлака; X_3, X_4, X_5, X_6 — соответственно содержание $\text{CaO}, \text{SiO}_2, \text{FeO}, \text{MgO}$, мас.%.
В дополнение к индексу вспенивания шлака была введена характеристика химического взаимодействия компонентов шлака, которую определяли на основе данных [2] по экспериментальному значению индекса вспенивания Y_1 исходя из зависимости [3, 4]:

$$Y_2 = Y_1 \mu^{-1.2} \sigma^{0.2} \rho D^{0.9}, \quad (2)$$

где μ — вязкость, Па·с; σ — поверхностное натяжение, Н/м; ρ — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; D — средний диаметр пузырька в шлаковой пене принят равным среднему экспериментальному значению, м. Значения Y_2 обозначены как у.е. и определены как $\text{кг}/\text{Н} \cdot \text{с}^{0.2} \cdot \text{м}^{0.5}$.

В качестве математического аппарата для построения моделей свойств шлака использовали метод регрессионного анализа [5, 6], в качестве характеристик регрессионных зависимостей — множественный коэффициент корреляции R , значения Фишера F , а также коэффициенты регрессии B_j . В качестве исходной матрицы были взяты нормированные элементы, которые вычисляли как:

$$X_j^n = \frac{X_{ij}}{\bar{X}_j}, \quad (3)$$

где i — номер состава; j — номер фактора; \bar{X}_j — среднее значение по j -му фактору.

Обсуждение результатов

На первом этапе исследования был проведен одномерный факторный анализ для всех перечисленных свойств Y_i ($i = 1, 2$) с использованием

уравнений $Y_i = B_0 + B_1 X_k$. На рис. 1 показана зависимость коэффициента информативности R от характеристик шлака.

Коэффициент информативности вычислялся на основе коэффициента корреляции без учета его знака. При оценке влияния химического состава шлака на устойчивость пены можно отдельно выделить его влияние на физические свойства, благоприятствующие вспениванию, и влияние на химическую природу шлака (безразмерная характеристика Y_2). Первое влияние отражено зависимостью для Y_1 , второе — для Y_2 . Как видно из рисунка,

наиболее сильное влияние на индекс вспенивания Y_1 и на введенное свойство Y_2 оказывает содержание CaO (X_3). В то же время для фактора X_4 (SiO_2) степени взаимосвязи с Y_1 и Y_2 различаются. Это может быть объяснено тем, что рассмотрение одной только концентрации SiO_2 не позволяет надежно предсказать такое важное для стабилизации пены свойство, как вязкость шлака, если не известно относительное содержание основных оксидов (CaO, MgO), способствующих разрушению протяженных кремнекислородных комплексов. Это подтверждается большим коэффициентом информативности для X_2 (основность R_0 шлака или $\%[CaO] / \%[SiO_2]$). В то же время для зависимости Y_2 высокие значения коэффициентов информативности для X_3 (CaO), X_4 (SiO_2), а также X_6 (MgO) могут быть обусловлены с тем, что в качестве поверхностно-активных комплексов, с которыми связаны адсорбционные явления на границе раздела «шлак-газ», выступают кремнекислородные анионы. Их концентрация определяется концентрацией SiO_2 , а строение — содержанием основных оксидов, наибольшим влиянием среди которых обладает CaO.

На следующем этапе исследования была произведена комплексная оценка взаимосвязей характеристик устойчивости пены и химического

Значения регрессионных коэффициентов в уравнениях зависимости свойств шлака от факторов состава и температуры

Свойства	Регрессионные коэффициенты							R	F
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6		
Y_1	9,546	-1,996	-0,436	-2,861	-1,431	-1,010	-0,951	0,900	0,223
Y_2	1368	370,0	-63,87	-560,3	-512,8	-234,6	-225,1	0,916	0,175

Построение корреляционной зависимости Y_2 от состава показало, что наибольшим влиянием обладают CaO и SiO_2 . Влияние физических свойств шлака на динамическую устойчивость шлаковой пены, за исключением поверхностного натяжения

состава шлака. Для этого были построены многомерные нелинейные модели вида:

$$Y_i = b_0 + b_1 T + b_2 R_0 + b_3 CaO + b_4 SiO_2 + b_5 FeO + b_6 MgO.$$

Следует отметить, что перечисленные выше связи установлены для следующих условий: $17,21\% < CaO < 38,18\%$; $26,55\% < SiO_2 < 40,99\%$; $10,24\% < FeO < 31,52\%$; $6,17\% < MgO < 28,12\%$. В результате анализа (см. таблицу) было установлено, что наибольшее влияние на пенообразование оказывает CaO ($b = -2,8611$) а также температура ($b = -1,9962$), более слабое влияние — SiO_2 , еще более незначительное — FeO и MgO. Полученный результат согласуется с экспериментальными данными, согласно которым для определенного интервала концентраций повышение содержания CaO в шлаке будет приводить к разрушению протяженных кремнекислородных анионов, ответственных за снижение поверхностного натяжения и повышение вязкости. — факторов, способствующих устойчивости пены. Единственным оксидом, способствующим снижению поверхностного натяжения, является SiO_2 . Сильное возрастание поверхностного натяжения связано с содержанием CaO в шлаке. Объяснением может служить зависимость поверхностной активности кремнекислородных комплексов от их степени полимеризации, а следовательно, от их основности.

σ, не предполагает рассмотрения состояния поверхностных слоев, химическая природа вещества не учитывается, расплав считается полностью однородным по своим свойствам на макро- и микроуровне. Влияние химического состава на

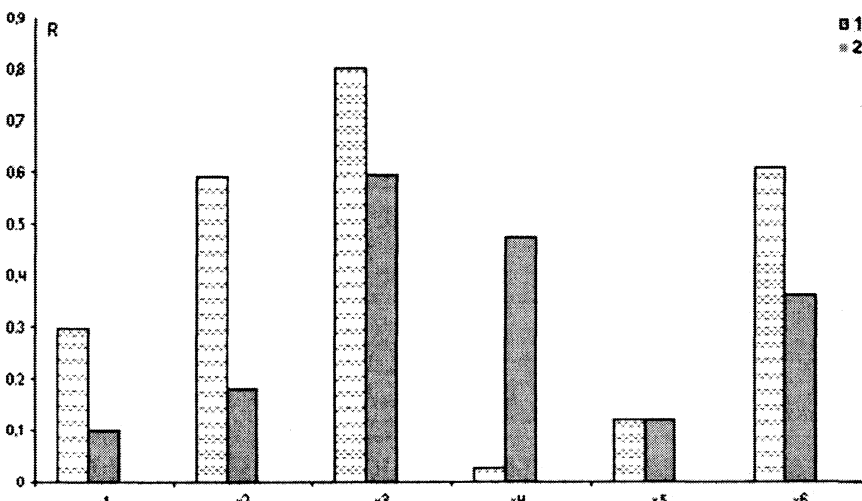


Рис. 1. Значения коэффициентов информативности между свойством шлака Y_i и характеристиками шлакообразования X_i ($i = 1, 2$): 1 — Y_1 ; 2 — Y_2

устойчивость шлаковой пены при одинаковых физических свойствах расплава обусловлено протеканием процессов (адсорбция – десорбция анионных комплексов, кислорода из атмосферы) на границе раздела «шлак – газ», в том числе проявлением эффекта Марангони, заключающегося в наличии неравновесной величины поверхностного натяжения. Данный эффект, возможный лишь при наличии в растворе поверхностно-активных комплексов, оказывает влияние на формирование пузырьков шлаковой пены и ее устойчивость, как это следует из выражения (3). Для случая шлакового расплава в роли поверхностно-активных веществ выступают кремнекислородные комплексы, структура и поверхностная активность которых в основном определяется соотношением CaO и SiO₂.

По полученной регрессионной зависимости $Y_2 = f(X_2, X_3)$ была построена трехмерная диаграмма, которая показывает влияние основности (соотношение CaO/SiO₂) и окисленности (содержание FeO) шлака на величину свойства Y_2 (рис. 2).

Из приведенной диаграммы видно, что повышению устойчивости пены в анализируемом интервале концентраций будут способствовать низкая основность и высокое содержание FeO. Из рис. 2 видно, что значения Y_2 с достаточной надежностью могут быть предсказаны в приближении линейной взаимосвязи свойств шлака и его состава.

Таким образом, в результате проведенного исследования получены многомерные регрессионные уравнения, описывающие влияние химического состава и температуры на свойства шлака. Полученные результаты хорошо согласуются с известными представлениями о природе шлаковых расплавов. Специфическое влияние химической природы компонентов шлака на устойчивость

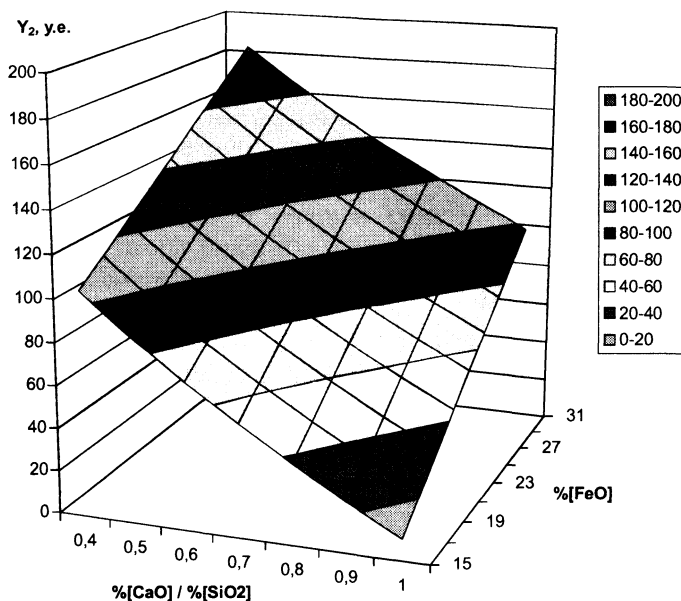


Рис. 2. Зависимость моделируемого свойства шлака $Y_2 = f(X_2, X_3)$ для различных составов

шлаковой пены выражено нелинейными зависимостями с их содержанием, отражающими сложный характер наблюдаемых явлений.

Литература

1. Есин О. А., Гельд П. В. Физическая химия пирометаллургических процессов. М.: Металлургия, 1966.
2. Sung-Mo Jung, Richard J. Fruehan. Foaming characteristics of BOF slags // ISIJ International. 2000. Vol. 40. N. 4. P. 348–355.
3. Nexhip C., Shouyi Sun, Jahanshahi S. Physicochemical properties of foaming slags // International Materials Reviews. 2004 (October). Vol. 49. N 5. P. 286–298(13).
4. Zhang Y., Fruehan R.J. Effect of bubble size and chemical reactions on slag foaming // Metallurgical and materials transactions B. 1995. Vol. 26B. N.4. P. 803–812.
5. Аренс Х., Лейтер Ю. Многомерный дисперсионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1985.
6. Чичко А.Н. Математическое моделирование технологических процессов. Мн.: БНТУ, 2001.