

УДК 669.18:621.746.27:001.57

Анисимов К.Н., Гусев М.П., Куклев А.В., Лонгинов А.М., Топтыгин А.М., Божесков А.Н.

ВЫБОР РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ВЯЗКОСТИ ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СМЕСЕЙ

Аннотация. В работе выполнен анализ известных моделей прогнозирования вязкости шлакового расплава по его химическому составу на существующей базе данных. Определены модели, обеспечивающие наибольшую точность прогнозирования вязкости.

Ключевые слова: шлакообразующая смесь, кристаллизатор, вязкость, расчетная модель, непрерывная разливка стали.

Шлакообразующая смесь для непрерывной разливки стали играет важнейшую роль при получении высококачественной непрерывнолитой заготовки и обеспечивает стабильный процесс разливки стали. Одним из основных параметров, характеризующих работу ШОС в процессе разливки, является вязкость.

Вязкость шлакового расплава является характеристикой работы ШОС и одним из основных критериев разработки и подбора смеси. Авторы работы [1] выделяют влияние вязкости (η) ШОС на следующие параметры разливки:

- 1) расход порошка и, следовательно, смазка оболочка;
- 2) захват шлака металлом;
- 3) скорость эрозии погружного стакана;
- 4) глубина следов качания на заготовке.

Вязкость ШОС определяется на высокотемпературных вискозиметрах: ротационного или вибрационного типа. Для быстрой оценки вязкости шлакового расплава применяются специальные модели. В настоящее время существует большое количество моделей прогнозирования вязкости оксидных расплавов. Для шлакообразующих смесей, в состав которых входит плавиковый шпат, были разработаны конкретные модели оценки вязкости [2-11]. В работе [12] отмечается, что для описания температурной зависимости вязкости могут быть использованы эмпирические данные [2,3], уравнение Аррениуса [4-8] или Френкеля-Веймана [9,10], а также термодинамические модели [11]. Оценка вязкости в зависимости от химического состава представляет собой более сложную задачу и включает в себя следующие методы: эмпирический [2,3,9-11], оптической основности [4], квазиструктурный [5-8].

В полностью эмпирических моделях, как правило, не существует фундаментальной связи между математическим описанием и физико-химическими свойствами ШОС. В работе [3] на основе большого объема экспериментальных данных была построена модель с использованием

обучающихся нейронных сетей. Модель показывает хорошие результаты прогнозирования 15 - компонентной шлаковой системы при температурах 1300 и 1400 °С, но для обучения данной модели необходимы большие массивы данных. В случае прогнозирования вязкости состава, отличающегося от обучающих данных, модель показывает некорректные значения.

В большинстве моделей [2,4-7] используют уравнение Аррениуса для описания температурной зависимости вязкости:

$$\eta_A = A_A \cdot \exp\left(\frac{B_A}{T}\right), \quad (1)$$

где η_A – вязкость; A_A , B_A – постоянные; T – температура, К.

В модели, разработанной К. Миллсом [4], композиционная зависимость связана с скорректированной оптической основностью шлака (A^{corr}), которая может быть рассчитана или получена из эксперимента. В основе моделей [5,6,8] лежат предположения о степени деполимеризации силикатного расплава в зависимости от концентрации модифицирующих оксидов. Причём авторы [8] в своей модели принимают, что CaF_2 не участвует в разрыве связей $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$. В модели [6] автор вводит «сетевой параметр» и связывает его с индексом основности.

Во многих случаях [12] было установлено, что модели, использующие зависимость Франкеля-Веймана, лучше согласовались с экспериментальными данными, чем модели, использующие выражения Аррениуса. Зависимость Франкеля-Веймана выглядит следующим образом:

$$\eta_\Phi = A_\Phi T \cdot \exp\left(\frac{B_\Phi}{T}\right), \quad (2)$$

где η_Φ – вязкость; A_Φ , B_Φ – постоянные; T – температура, К.

Наибольшее распространения получила модель П. Рибу [9], в которой температурная зависимость выражена уравнением Франкеля-Веймана. Автор классифицировал компоненты шлака на пять различных категорий, в зависимости от их способности разрывать или образовывать полимерные цепи в расплавленном шлаке. Проанализировав экспериментальные данные, для параметров A и B

были получены выражения в зависимости от мольных долей компонентов в составе шлака. Автором [10] были предложены модифицированные выражения для параметров А и В с учётом экспериментальных данных работ [4,11] и классификацией компонентов на шесть категорий. Полученная модель показывает лучшие результаты расчетной вязкости для шлаков с бóльшим содержанием Na₂O и K₂O в составе, чем модель Рибу.

Накопленный в лаборатории ООО «Северо-Запад Огнеупор» (г. Череповец) массив данных по вязкости и химическому составу шлаков даёт возможность использовать его для оценки адекватности моделей вязкости, приведённых в работах [2, 4-10]. Данные по вязкости получены ротационным методом на приборе VIS 403 и методом наклонного жёлоба. Химический состав измерялся

рентгеноспектральным методом. Химические составы были пересчитаны на 100 мас. % за вычетом содержания углерода и других элементов. Расчёт вязкости по моделям [2,4-10] производился в программе Excel. Всего в модели использовалось 65 различных составов ШОС с диапазоном вязкости от 0,16 до 0,75 Па·с.

По результатам расчётов были построены графики сравнения измеренных и рассчитанных данных. Графики представлены на рис. 1 (а,б). Модели [2, 4,5,7] (рис. 1, б) показывают плохую сходимость результатов. Модели авторов [4,5] показывают заниженные значения вязкости, а модели [2,7] - завышенные значения по отношению к измеренным. Модели, представленные на рис. 1, а, показывают хорошую сходимость рассчитанных и измеренных значений.

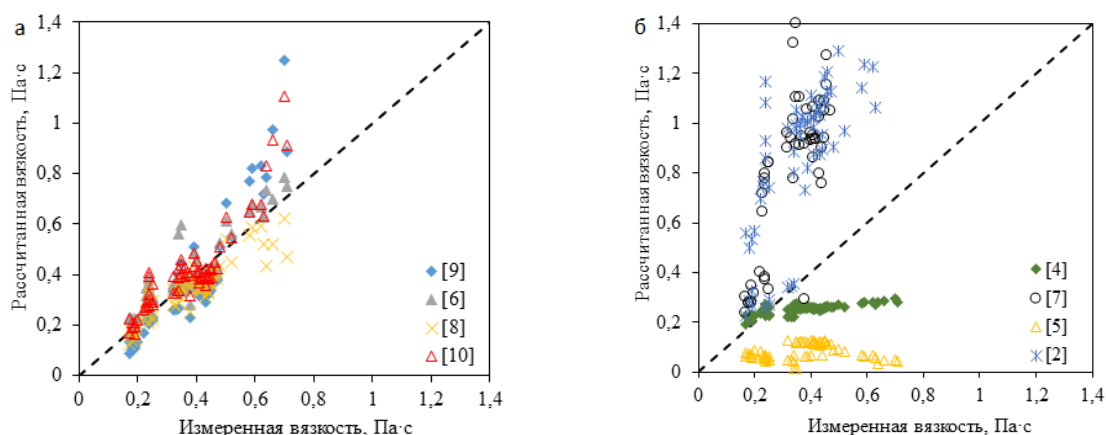


Рис. 1. Сравнение измеренной и рассчитанной вязкости по лабораторным данным для моделей [6,8-10] (а) и [2,4,5,7] (б)

Для оценки адекватности исследуемых моделей было посчитано стандартное отклонение прогнозируемых значений вязкости от измеренных по формуле

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{v_{рас} - v_{изм}}{v_{изм}} \right)^2}, \quad (3)$$

где N – количество наблюдений;
 $v_{рас}$ - рассчитанная вязкость, Па·с;

Таблица 1
 Стандартное отклонение для моделей вязкости

Модель	[2]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]
Δ по данным СЗО, %	±166,3	±35,1	±76,6	±22,7	±824,5	±17,1	±25,8	±21,7

По данным табл. 1, лучшей прогнозирующей моделью является модель автора [8]. Погрешность определения вязкости составляет ±17,12%.

Также выполнены расчёты с применением литературных данных, представленных в работах

$v_{изм}$ - измеренная вязкость, Па·с.

Стандартное отклонение для моделей показано в табл. 1.

По данным табл. 1, лучшей прогнозирующей моделью является модель автора [8]. Погрешность определения вязкости составляет ±17,12%.

Также выполнены расчёты с применением литературных данных, представленных в работах [4,13,14]. Всего проанализированы тридцать составов ШОС. Результаты представлены на рис. 2.

[4,13,14]. Всего проанализированы тридцать составов ШОС. Результаты представлены на рис. 2.

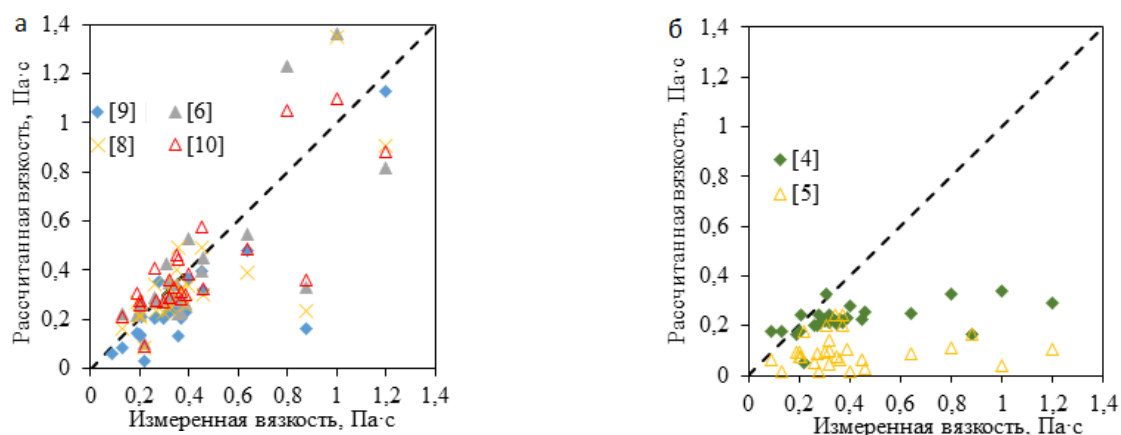


Рис. 2. Сравнение измеренной и рассчитанной вязкости по литературным данным [4,13,14] для моделей [6,8-10] (а) и [2,4,5,7] (б)

Таблица 2

Среднее отклонение вязкости, рассчитанной с помощью моделей [2, 4-10]

Модель	[2]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]
Δ по данным [24,158,176], %	-	$\pm 47,39$	$\pm 73,03$	$\pm 32,20$	-	$\pm 37,28$	$\pm 41,41$	$\pm 33,59$

Стандартное отклонение для рассматриваемых моделей приведены в табл. 2. Погрешность всех моделей не укладывается в интервал $\pm 25\%$, который принято считать оптимальным. Данное обстоятельство может быть связано с различиями в методиках определения вязкости, а также химического состава ШОС. Наименьшая погрешность прогнозирования вязкости шлакового расплава по данным, представленным в литературе, наблюдается на модели автора [6]. Погрешность прогнозирования вязкости для данной модели составляет $\pm 32,2\%$.

Таким образом, лучшими моделями для прогнозирования вязкости шлаковых расплавов являются модели, представленные в работах [6] и [8]. Применение данных моделей позволит оценивать вязкость при разработке опытных составов ШОС без проведения лабораторных исследований.

Список литературы

1. Mills K.C. et al. The performance and properties of mould fluxes // Ironmak. Steelmak. 2005. Vol.32. No. 1. P. 26–34.
2. Dey A. Development of viscosity calculation method for mould powders // Ironmak. & Steelmak. 2014. Vol. 41. No. 2. P. 81–86.
3. Hanao M. et al. Evaluation of viscosity of mold flux by using neural network computation // ISIJ Int. 2006. Vol. 46. No. 3. P. 346–351.
4. Mills K., Sridhar S. Viscosities of ironmaking and steelmaking slags // Ironmak. & Steelmak. 1999. Vol. 26. No. 4. P. 262–268.

5. Zhang G.-H., Chou K.-C., Mills K. A Structurally based viscosity model for oxide melts // Metall. Mater. Trans. B. 2014. Vol. 45. Iss. 2. P. 698–706.

6. Iida T et al. Equation for estimating viscosities of industrial mold fluxes // High Temp. Mater. Processes. 2000. Vol.19. No. 3–4. P.155–164.

7. Miyabayashi Y. et. al. Model for estimating the viscosity of molten aluminosilicate containing calcium fluoride // ISIJ Int. 2009. Vol. 49. No. 3. P. 343–348.

8. Shu Q., Chou K.-C. Viscosity estimations of multi-component slags // Steel Research. 2011. Vol. 82. No. 7. P. 779–785.

9. Riboud P.V. et al. Improvement of continuous casting powders // Fachberichte Huttenpraxis Metallweiterverarbeitung. 1981. No. 19. P. 859–869

10. Shu Q. Viscosity estimation for slags containing calcium fluoride // Jour. of Univ. of Science and Technology Beijing. 2005. Vol.12. No.3. P. 221–224.

11. McCauley W.L., Apelian D. Viscosity of fluxes for the continuous casting of steel // Mineral Matter and Ash in Coal.1986. Vol. 301. Chapter 16. P. 215–222.

12. Kondratiev A., Jak E., Hayes P.C. Predicting slag viscosities in metallurgical systems // Jom.2002.Vol. 54. No. 11. P. 41–45.

13. Watanabe K. et al. Effect of Properties of Mold Powder Entrapped into Molten Steel in a Continuous Casting Process // ISIJ International, 2009. Vol. 49. № 8. P. 1161–1166.

14. Dey A., Riaz S. Viscosity measurement of mould fluxes using inclined plane test and development of a mathematical model // Ironmak. & Steelmak. 2012. Vol. 39. No.6. P. 391–397.

Сведения об авторах

Анисимов Константин Николаевич – младший научный сотрудник Научного центра металлургических технологий, доменного, ферросплавного и сталеплавильного производства им. Н.П. Лякишева ФГУП ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, город Москва, Россия. E-mail: akn@corad.ru

Гусев Михаил Павлович - д-р техн. наук, научный сотрудник Сколковского института науки и техники, город Москва, Россия. E-mail: m.gusev@skoltech.ru

Куклев Александр Валентинович – д-р техн. наук, президент НПФ КОРАД, город Москва, Россия. E-mail: info@corad.ru

Лонгинов Александр Михайлович – канд. техн. наук, технический директор Научного центра металлургических технологий, доменного, ферросплавного и сталеплавильного производства им. Н.П. Лякишева ФГУП ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, город Москва, Россия. E-mail: longinov@corad.ru

Топтыгин Андрей Михайлович – канд. техн. наук, заместитель генерального директора НПФ КОРАД, город Москва, Россия. E-mail: liv@corad.ru

Божесков Алексей Николаевич – начальник отдела технического контроля ПАО «Волжский трубный завод», город Волжский, Россия. E-mail: liv@corad.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DETERMINATION OF VISCOSITY PREDICTION MODEL OF MOLD FLUXES

Anisimov Konstantin Nikolaevich - Junior Researcher of the Scientific Center of Metallurgical Technologies, Blast Furnace, Ferroalloy and Steelmaking Production named after N.P. Lyakisheva FSUE I.P. Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy, E-mail: akn@corad.ru;

Gusev Mikhail Pavlovich - Ph.D., Researcher, Skolkovo Institute of Science and Technology, E-mail: m.gusev@skoltech.ru;

Kuklev Alexander Valentinovich - Doctor of Technical Sciences, President of NPF KORAD, E-mail: info@corad.ru;

Longinov Alexander Mikhailovich - Ph.D., Technical Director of the Scientific Center for Metallurgical Technologies, Blast Furnace, Ferroalloy and Steelmaking. N.P. Lyakisheva FSUE I.P. Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy, E-mail: longinov@corad.ru;

Toptygin Andrei Mikhailovich - Candidate of Technical Sciences, Deputy General Director, NPF KORAD, E-mail: liv@corad.ru;

Bozheskov Alexey Nikolaevich - Head of the Technical Control Department of Volzhsky Pipe Plant PJSC. E-mail: liv @ corad.ru.

Abstracts. The paper analyzes the known models for predicting the viscosity of the mold flux by its chemical composition on the existing database. The models that provide the most accurate viscosity prediction are identified.

Keywords: mold flux, mold, viscosity, prediction model, continuous casting

Ссылка на статью:

Анисимов К.Н., Гусев М.П., Куклев А.В., Лонгинов А.М., Топтыгин А.М., Божесков А.Н. Выбор расчетной модели вязкости шлакообразующих смесей // Теория и технология металлургического производства. 2018. №4(27). С. 37-40.

Anisimov KN, Gusev MP, Kuklev AV, Longinov AM, Toptygin AM, Bozheskov A.N. Determination of viscosity prediction model of mold fluxes. *Teoriia i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2018, vol. 27, no. 4, pp.37-40.

Теория и технология металлургического производства