

Математическое моделирование поверхностного натяжения шлаков ЭШП

Разработаны математические модели зависимости поверхностного натяжения шлаков ЭШП от их состава и температуры. Рассчитанные модели прошли проверку на адекватность и могут быть использованы в инженерных расчётах и компьютерных программах, позволяющих быстро и точно определять параметры шлаков по их составу и температуре, а также подбирать состав шлаков для обеспечения заданных параметров.

Ключевые слова: шлак ЭШП, математическая модель, поверхностное натяжение, температура

Введение. С поверхностным натяжением шлака связана смачиваемость металла шлаком и угол смачивания, что влияет на поверхность взаимодействия металла со шлаком, и как следствие этого – способность шлака рафинировать металл от неметаллических включений, вредных примесей и газов.

При заданных составах металла и неметаллических включений для рафинирования необходимо, чтобы поверхностное натяжение шлака на границе с металлом было максимально возможным, а на границе с неметаллическим включением – минимальным.

Постановка задачи. Исследованию поверхностного натяжения оксидных и оксифторидных шлаков, к которым относятся рафинирующие шлаки ЭШП, посвящено большое количество работ, результаты которых обобщены в изданиях [1-5].

Анализ литературных данных показал, что нет адекватных математических моделей по расчёту этого параметра, а в источнике [6] даны рекомендации по его улучшению.

За рубежом существуют математические модели определения свойств шлаков [7], но они очень громоздки и неудобны в использовании. Кроме этого, они рассчитаны для составов шлаков, которые отличаются от отечественных. Поэтому существует актуальная потребность в создании адекватных математических моделей по определению поверхностного натяжения шлаковых систем в зависимости от их состава и температуры, а также по определению требуемого состава и температуры шлака для обеспечения заданного значения поверхностного натяжения.

Для расчёта математических моделей зависимости поверхностного натяжения шлаков от их состава и температуры использовались литературные данные [1-6], дополненные собственными исследованиями. Расчёт моделей и проверка их адекватности осуществлялись в пакете MS Excel 2010.

Результаты математического моделирования. Система $\text{CaF}_2\text{-CaO}$. Наибольшее распространение при ЭШП получили шлаки на базе фтористого кальция с добавками прочных оксидов. При использовании шлака из рафинированного CaF_2 (АНФ-1П) наблюдается снижение скорости переплава при большом расходе электроэнергии вследствие высочайшей электрической проводимости этого шлака.

Добавленные в шлак оксиды (Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , MgO и др.) снижают электрическую проводимость флюорита, обеспечивая при этом более высокие технико-экономические показатели процесса и увеличенную рафинирующую способность шлака. В электрошлаковых переплавах широко используются шлаки фторидно-оксидной системы $\text{CaF}_2\text{-CaO}$ (АНФ-7, 70 % CaF_2 -30 % CaO). Главным недостатком этих шлаков является их склонность к гидратации на воздухе, что предъявляет повышенные требования к условиям их хранения и подготовки к использованию.

Математическая модель поверхностного натяжения шлака данной системы:

$$\sigma = 0,485 + 2,33 \cdot 10^{-3} \cdot \% \text{CaO} - 1,29 \cdot 10^{-4} \cdot t$$

где σ – поверхностное натяжение шлака, Н/м; $\% \text{CaO}$ – содержание в шлаке CaO , %; t – температура шлака, °С.

Степень достоверности аппроксимации математической модели составляет 0,94 при уровне надёжности 95 %.

Для обеспечения заданной степени достоверности аппроксимации содержание компонентов и температура должны находиться в следующих диапазонах:

- содержание CaF_2 – от 30 до 100 %;
- содержание CaO – от 0 до 70 %;
- температура – от 1400 до 1900 °С.

Система $\text{CaF}_2\text{-MgO}$. Увеличение содержания MgO в шлаках системы $\text{CaF}_2\text{-MgO}$ приводит к росту поверхностного натяжения и снижает электрическую проводимость флюорита, обеспечивая наиболее высокие технико-экономические показатели процесса.

Математическая модель поверхностного натяжения шлака данной системы:

$$\sigma = 0,575 + 2,87 \cdot 10^{-3} \cdot \% \text{MgO} - 1,84 \cdot 10^{-4} \cdot t$$

где σ – поверхностное натяжение шлака, Н/м; $\% \text{MgO}$ – содержание в шлаке MgO , %; t – температура шлака, °С.

Степень достоверности аппроксимации математической модели составляет 0,96 при уровне надёжности 95 %.

Для обеспечения заданной степени достоверности аппроксимации содержание компонентов и

температура должны находиться в следующих диапазонах: CaF_2 – от 30 до 100 и MgO – от 0 до 70 %; температура – от 1300 до 1900 °С.

Система CaF_2 - CaO - Al_2O_3 . Широкое распространение получил шлак на базе системы CaF_2 - CaO - Al_2O_3 . Замена части фтористого кальция глинозёмом существенно увеличивает удельное электрическое сопротивление шлака, что обеспечивает высокую скорость переплава и малый удельный расход электроэнергии. Также одновременное добавление CaO и Al_2O_3 в шлаковые расплавы на основе CaF_2 повышает их поверхностное натяжение.

Математическая модель поверхностного натяжения шлака данной системы:

$$\sigma = 87,483 - 2,39 \cdot 10^{-3} \cdot \% \text{CaF}_2 - 1,70 \cdot 10^{-3} \cdot \% \text{Al}_2\text{O}_3 + 1,14 \cdot 10^{-1} \cdot t - 3,67 \cdot 10^{-5} \cdot t^2,$$

где σ – поверхностное натяжение шлака, Н/м; $\% \text{CaF}_2$ – содержание в шлаке CaF_2 , %; $\% \text{Al}_2\text{O}_3$ – содержание в шлаке Al_2O_3 , %; t – температура шлака, °С.

Степень достоверности аппроксимации математической модели составляет 0,90 при уровне надёжности 95 %.

Для обеспечения заданной степени достоверности аппроксимации содержание компонентов и температура должны находиться в следующих диапазонах: CaF_2 – от 5 до 95, CaO – от 0 до 70, Al_2O_3 – от 0 до 60 %; температура – от 1300 до 1700 °С.

Система CaF_2 - CaO - SiO_2 - Al_2O_3 - MgO . В ЭШТП очень часто используются шлаки, содержащие четыре и более компонентов [8]. Оксиды кремния являются поверхностно-активными веществами. Фторидные шлаки обладают повышенной адгезией и лучше смачивают включения глинозёма и кремния, чем оксидные шлаки. С повышением температуры поверхностное натяжение шлаков снижается, что свидетельствует о закономерном снижении энергии межчастичного взаимодействия при нагревании расплавов.

Математическая модель поверхностного натяжения шлака данной системы:

$$\sigma = 9,914 + 1,05 \cdot 10^{-3} \cdot \% \text{CaF}_2 + 2,73 \cdot 10^{-3} \cdot \% \text{CaO} + 1,28 \cdot 10^{-2} \cdot \% \text{SiO}_2 + 2,94 \cdot 10^{-3} \cdot \% \text{Al}_2\text{O}_3 - 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot t + 3,65 \cdot 10^{-6} \cdot t^2,$$

где σ – поверхностное натяжение шлака, Н/м; $\% \text{CaF}_2$ – содержание в шлаке CaF_2 , %; $\% \text{CaO}$ – содержание в шлаке CaO , %; $\% \text{SiO}_2$ – содержание в шлаке SiO_2 , %; $\% \text{Al}_2\text{O}_3$ – содержание в шлаке Al_2O_3 , %; t – температура шлака, °С.

Степень достоверности аппроксимации математической модели составляет 0,92 при уровне надёжности 95 %.

Для обеспечения заданной степени достоверности аппроксимации содержание компонентов и температура должны находиться в следующих диапазонах: CaF_2 – от 5 до 65, CaO – от 5 до 60, SiO_2 – от 2 до 20, Al_2O_3 – от 5 до 45, MgO – от 0 до 20 %; температура – от 1400 до 1700 °С.

Система CaO - SiO_2 - Al_2O_3 . В настоящее время, особенно за рубежом, в процессах ЭШП всё чаще применяют шлаки без фтора. Так, разработаны шлаки, состоящие из извести и глинозёма с небольшими добавками оксида кремния. В ряде случаев используют шлаки с высоким содержанием SiO_2 либо FeO для получения сплава с низким содержанием углерода, фосфора и других примесей. Также используются кислые шлаки различных составов, с добавлением оксидов редкоземельных элементов и хлоридов.

Математическая модель поверхностного натяжения шлака данной системы:

$$\sigma = -5,306 + 1,82 \cdot 10^{-3} \cdot \% \text{CaO} + 6,65 \cdot 10^{-4} \cdot \% \text{Al}_2\text{O}_3 + 7,74 \cdot 10^{-3} \cdot t - 2,63 \cdot 10^{-6} \cdot t^2,$$

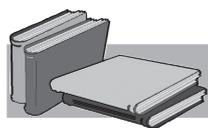
где σ – поверхностное натяжение шлака, Н/м; $\% \text{CaO}$ – содержание в шлаке CaO , %; $\% \text{Al}_2\text{O}_3$ – содержание в шлаке Al_2O_3 , %; t – температура шлака, °С.

Степень достоверности аппроксимации математической модели составляет 0,81 при уровне надёжности 95 %.

Для обеспечения заданной степени достоверности аппроксимации содержание компонентов и температура должны находиться в следующих диапазонах: CaO – от 20 до 60, SiO_2 – от 30 до 70, Al_2O_3 – от 0 до 20; температура – от 1400 до 1700 °С.

Выводы

Рассчитанные математические модели зависимости поверхностного натяжения шлаков ЭШП от их состава и температуры показали высокую эффективность (степени достоверности аппроксимации для различных математических моделей лежат в пределах от 0,81 до 0,96), что позволяет применять их в инженерных расчётах а также в компьютерных программах, способных максимально точно и быстро определять параметры шлаков по их составу и температуре или подбирать состав по заданным параметрам.



ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас шлаков. Справ. изд. [Текст] / Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1985. – 208 с.
2. Акбердин А. А. Физические свойства расплавов CaO - SiO_2 - Al_2O_3 - MgO - CaF_2 . / А. А. Акбердин, И. С. Куликов, В. А. Ким – М.: Металлургия, 1987. – 144 с.

3. *Истомин С. А.* Физико-химические свойства расплавов системы $\text{CaF}_2\text{-MgO-SiO}_2$ / С. А. Истомин, Е. М. Лепинских, С. Н. Кокарев // Изв. АН СССР. Металлы, 1980. – Вып. 3. – С.74-77.
4. *Криночкин Э. В.* Поверхностное натяжение и плавкость оксидных расплавов системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. / Э. В. Криночкин, К. Г. Курочкин, П. В. Умрихин // Физическая химия поверхностных явлений в расплавах. – Киев: Наук. думка, 1971. – 179-183 с.
5. Поверхностное натяжение и плотность шлаковых расплавов системы $\text{CaF}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ с добавками SiO_2 / Д. Я. Поволоцкий, В. Е. Рошин, В. П. Грибанов. – Изв. вузов. Чёр. мет., 1982. – Вып. 12. – С. 1-3.
6. Прогнозирование свойств рафинировочных шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaF}_2$ / А. Ф. Хамхотько, Э. В. Приходько, Д. Н. Тогобицкая, О. В. Кукса // Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии: Сб. научн. тр. – Днепропетровськ.: ИЧМ НАН України, 2004. – Вып. 9. – С. 170-177.
7. *Mills K. C.* Estimating the physical properties of slags. – The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy / K. C. Mills, L. Yuan, R. T. Jones. – October, 2011. – Volume 111. – P. 649-658.
8. Электрошлаковая тигельная плавка и разливка металла / Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, В. М. Мартын и др. Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. – АН УССР, Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. – Киев: Наук. думка, 1988. – 47-49 с.

Анотація

Іванова О. С., Рибак В. Н., Куцик І. Г., Лисюк Р. О.

Математичне моделювання поверхневого натягу шлаків ЕШП

Розроблено математичні моделі залежності поверхневого натягу шлаків ЕШП від їх складу і температури. Розраховані моделі пройшли перевірку на адекватність і можуть бути використані в інженерних розрахунках і комп'ютерних програмах, що дозволяють швидко і точно визначати параметри шлаків за їх складом і температурою, а також підбирати склад шлаків для забезпечення заданих параметрів.

Ключові слова

шлак ЕШП, математична модель, поверхневий натяг, температура

Summary

Ivanova O., Ribak V., Kucik I., Lisuk R.

Mathematical modeling of ESR slag surface tension

The mathematical models of dependence of ERS slag surface tension on its composition and temperature were worked out. The validity of estimated models were checked and they can be used in design calculations and software for quick and precise determination of slag parameters depending its composition and temperature and for slag composition selection for determined parameters.

Keywords

slag ESP, a mathematical model, the surface tension and temperature

Поступила 26.10.2015