



УДК 669.046.587.4

Поступила 11.01.2017

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ШЛАКОВ ЭШП

MATHEMATICAL MODELING OF ELECTRICAL RESISTIVITY OF ESR SLAG

О. С. ИВАНОВА, В. Н. РЫБАК, Национальный технический университет Украины «КПИ им. Сикорского», г. Киев, Украина. E-mail: ivasha09007@gmail.com

O. S. IVANOVA, V. N. RYBAK, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kiev, Ukraine. E-mail: ivasha09007@gmail.com

Разработанные математические модели зависимости удельного электрического сопротивления шлаков ЭШП от их состава и температуры прошли проверку на адекватность и могут быть использованы в инженерных расчетах, АСУТП, имитационных моделях, а также в компьютерных программах, позволяющих быстро и точно определять параметры шлаков ЭШП по их составу и температуре или подбирать состав шлака для обеспечения заданных параметров.

The mathematical models of the electrical resistivity of ESR slag dependence on their composition and temperature are developed. The calculated models are tested for adequacy and can be used in engineering calculations and computer programs, APCS, simulation models and computer programs that permit quickly and accurately determine the parameters of slag in their composition and temperature, as well as to select the composition of slag for the specified parameters.

Ключевые слова. Шлак ЭШП, математическая модель, удельное электрическое сопротивление, температура.

Keywords. ESR slag, mathematical model, electrical resistivity, temperature.

Введение

Процесс электрошлакового переплава (ЭШП) заключается в расплавлении металла и его очистке при прохождении капель жидкого металла через шлаковую ванну. При обычном процессе ЭШП источником тепла служит шлак, через который проходит электрический ток, его сила может быть рассчитана по закону Ома. Важную роль при определении величины электрического тока играет удельное электрическое сопротивление (электропроводность) шлака.

Известно, что при ЭШП с увеличением удельного электрического сопротивления шлака (при прочих равных условиях) повышается температура шлаковой ванны и растет скорость расплавления электрода, определяющая производительность процесса и удельный расход электроэнергии. Поэтому исследованию удельного электрического сопротивления шлаков ЭШП посвящено большое количество работ, результаты которых обобщены в [1–3].

Данные, которые содержатся в указанных работах, представлены в виде таблиц и графиков и не могут быть использованы в автоматических системах управления технологическим процессом ЭШП, разнообразных компьютерных программах и имитационных моделях. Также затруднительно использование этих данных при проведении инженерных расчетов. Намного удобнее в этих случаях использовать готовые математические модели (формулы), связывающие удельное электрическое сопротивление шлака с его составом и температурой.

Проанализировав ряд зарубежных работ, были выделены математические модели, позволяющие рассчитывать свойства шлаков ЭШП [4], но они оказались очень громоздкими и неудобными в использовании. Кроме того, они рассчитаны для составов шлаков, которые отличаются от отечественных. Из этого следует, что проблема создания простых и адекватных математических моделей, способных определять удельное электрическое сопротивление шлаковых систем ЭШП в зависимости от их состава и температуры, актуальна.

Постановка задачи

Целью данной работы является повышение эффективности процессов ЭШП путем создания математических моделей зависимости удельного электрического сопротивления шлаков ЭШП от их состава и температуры, а также реализация полученных математических моделей в компьютерных программах «Автоматизированная система расчета параметров шлаков ЭШП» [5] и «Имитационная модель электрошлаковой тигельной плавки» [6].

Для реализации поставленной цели применяли основные положения теории металлургических процессов, практики электрошлакового производства, теории математического моделирования. Для построения и расчета математических моделей использовали литературные данные и данные, полученные в результате проведения электрошлаковых тигельных плавков. Это позволило получить математические модели с высокой степенью достоверности аппроксимации. Расчет моделей и проверку их адекватности осуществляли в пакете MS Excel 2014.

Результаты исследований

Система $\text{CaF}_2\text{-CaO}$

Шлаки на базе фтористого кальция с добавками прочных оксидов получили наибольшее распространение при ЭШП. Использование шлака из рафинированного CaF_2 приводит к снижению скорости переплава при большом расходе электроэнергии вследствие высокой электрической проводимости этого шлака. По мере снижения содержания CaF_2 удельная электропроводность шлаков падает. Добавление в шлак CaO снижает 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 $\text{CaF}_2\text{-CaO}$ (например, АНФ-7, содержащий 70% CaF_2 и 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.

Найденная математическая модель удельного электрического сопротивления шлаков данной системы:

$$\rho = 8,604 \cdot 10^{-2} + 2,72 \cdot 10^{-5} \cdot \% \text{CaO} - 1,28 \cdot 10^{-4} t + 6,39 \cdot 10^{-8} t^2 - 1,04 \cdot 10^{-11} t^3,$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление шлака, Ом·м; %CaO – содержание в шлаке CaO , %; t – температура шлака, °С.

Степень достоверности аппроксимации математической модели составляет 0,99 при уровне надежности 95%.

Для обеспечения заданной степени достоверности аппроксимации содержание компонентов и температура должны находиться в следующих диапазонах: содержание CaF_2 – от 50 до 100%; содержание CaO – от 0 до 50%; температура – от 1200 до 2000 °С.

Система $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$

Широкое распространение получили шлаки на основе системы $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (например, АНФ-6, содержащий 70% CaF_2 и 30% Al_2O_3). Замена части фтористого кальция глиноземом значительно повышает удельное электрическое сопротивление шлака, что обеспечивает высокую скорость переплава и низкий удельный расход электроэнергии. Добавки глинозема Al_2O_3 понижают электрическую проводимость флюорита, обеспечивая более высокие технико-экономические показатели и рафинирующую способность процесса.

Найденная математическая модель удельного электрического сопротивления шлаков данной системы:

$$\rho = 4,401 \cdot 10^{-2} + 1,59 \cdot 10^{-4} \cdot \% \text{Al}_2\text{O}_3 - 5,52 \cdot 10^{-5} t + 2,51 \cdot 10^{-8} t^2 - 4,56 \cdot 10^{-12} t^3,$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление шлака, Ом·м; % Al_2O_3 – содержание в шлаке Al_2O_3 , %; t – температура шлака, °С.

Степень достоверности аппроксимации математической модели составляет 0,97 при уровне надежности 95%.

Для обеспечения заданной степени достоверности аппроксимации содержание компонентов и температура должны находиться в следующих диапазонах: содержание CaF_2 – от 0 до 100%; содержание Al_2O_3 – от 0 до 100%; температура – от 1300 до 2500 °С.

Система $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$

Средними значениями электропроводности обладают шлаковые расплавы на основе фтористого кальция с добавками CaO и Al_2O_3 .

Шлаки системы $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ могут быть распределены по трем группам: кислые без свободной извести с соотношением $\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3 = 1:1$; кислые без свободной извести с соотношением $\text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO}$; основные, содержащие свободную известь и мало глинозема (или без глинозема).

Найденная математическая модель удельного электрического сопротивления шлаков данной системы:

$$\rho = 5,885 \cdot 10^{-2} - 2,52 \cdot 10^{-4} \cdot \% \text{CaF}_2 - 2,39 \cdot 10^{-4} \cdot \% \text{CaO} - \\ - 6,68 \cdot 10^{-5} \cdot \% \text{Al}_2\text{O}_3 - 3,07 \cdot 10^{-5} t + 8,17 \cdot 10^{-9} t^2 - 1,22 \cdot 10^{-12} t^3,$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление шлака, Ом·м; $\% \text{CaF}_2$ – содержание в шлаке CaF_2 , %; $\% \text{CaO}$ – 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 0,96 при уровне надежности 95%.

Для обеспечения заданной степени достоверности аппроксимации содержание компонентов и температура должны находиться в следующих диапазонах: содержание CaF_2 – от 0 до 100%; содержание CaO – от 0 до 50; содержание Al_2O_3 – от 0 до 100%; температура – от 1200 до 2500 °С.

Система $\text{CaF}_2\text{-CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$

В ЭШТП очень часто используются шлаки, содержащие четыре и более компонентов.

Так, добавка MgO незначительно влияет на удельную электропроводность шлака в области температур 1100–1400 °С, однако с дальнейшим увеличением температуры электропроводность шлака значительно возрастает с увеличением добавки MgO . Добавки глинозема Al_2O_3 и в большей степени кремнезема SiO_2 приводят к снижению электропроводности шлаков независимо от температурного диапазона.

Найденная математическая модель удельного электрического сопротивления шлаков данной системы:

$$\rho = 2,272 \cdot 10^{-1} - 2,35 \cdot 10^{-4} \cdot \% \text{CaF}_2 - 1,85 \cdot 10^{-4} \cdot \% \text{CaO} - \\ - 5,09 \cdot 10^{-5} \cdot \% \text{SiO}_2 - 6,90 \cdot 10^{-5} \cdot \% \text{Al}_2\text{O}_3 - 3,05 \cdot 10^{-4} \cdot \% \text{MgO} - 2,6 \cdot 10^{-4} t + 8,36 \cdot 10^{-8} t^2,$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление шлака, Ом·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 , %; $\% \text{MgO}$ – содержание в шлаке MgO , %; t – температура шлака, °С.

Степень достоверности аппроксимации математической модели составляет 0,91 при уровне надежности 95%.

Для обеспечения заданной степени достоверности аппроксимации содержание компонентов и температура должны находиться в следующих диапазонах: содержание CaF_2 – от 0 до 100%; содержание CaO – от 0 до 50; содержание SiO_2 – от 0 до 30; содержание Al_2O_3 – от 0 до 60; содержание MgO – от 0 до 20%; температура – от 1300 до 1800 °С.

Система $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$

Замена фтористого кальция глиноземом значительно повышает электрическое сопротивление шлака. Замена 10% плавикового шпата глиноземом повышает электрическое сопротивление в большей степени, чем замена 40% плавикового шпата известью. Также эти шлаки хорошо сохраняют тепло, обеспечивают высокие скорости переплава и низкий удельный расход энергии на единицу массы переплавленного металла.

Найденная математическая модель удельного электрического сопротивления шлаков данной системы:

$$\rho = 2,839 \cdot 10^{-1} + 3,58 \cdot 10^{-4} \cdot \% \text{Al}_2\text{O}_3 - 3,44 \cdot 10^{-4} t + 1,28 \cdot 10^{-7} t^2 - 1,62 \cdot 10^{-11} t^3,$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление шлака, Ом·м; $\% \text{Al}_2\text{O}_3$ – содержание в шлаке Al_2O_3 , %; t – температура шлака, °С.

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

Для обеспечения заданной степени достоверности аппроксимации содержание компонентов и температура должны находиться в следующих диапазонах: содержание Al_2O_3 – от 50 до 100%; содержание CaO – от 0 до 50%; температура – от 1400 до 2500 °С.

Система $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$

В последнее время часто используют безфтористые шлаки. Так, были разработаны шлаки, состоящие из извести и глинозема с небольшими добавками оксида магния. Однако при достаточно высокой рафинирующей способности они не обеспечивают качественную поверхность слитков. В ряде случаев применяют шлаки с высоким содержанием SiO_2 или FeO для получения металла с низким содержанием углерода, фосфора и других примесей.

Найденная математическая модель удельного электрического сопротивления шлаков данной системы:

$$\rho = 3,912 + 2,44 \cdot 10^{-4} \cdot \% \text{Al}_2\text{O}_3 + 1,26 \cdot 10^{-4} \cdot \% \text{CaO} - 6,73 \cdot 10^{-3} t + 3,86 \cdot 10^{-6} t^2 - 7,39 \cdot 10^{-10} t^3,$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление шлака, Ом·м; $\% \text{Al}_2\text{O}_3$ – содержание в шлаке Al_2O_3 , %; $\% \text{CaO}$ – содержание в шлаке CaO , %; t – температура шлака, °С.

Степень достоверности аппроксимации математической модели составляет 0,98 при уровне надежности 95%.

Для обеспечения заданной степени достоверности аппроксимации содержание компонентов и температура должны находиться в следующих диапазонах: содержание Al_2O_3 – от 30 до 60%; содержание CaO – от 30 до 50; содержание MgO – от 0 до 20%; температура – от 1400 до 1900 °С.

Система $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$

В настоящее время, особенно за рубежом, в процессах ЭШП все чаще применяют безфтористые шлаки. Так, разработаны шлаки, состоящие из извести и глинозема с небольшими добавками оксида кремния, что позволяет получить сплав с низким содержанием углерода. Также используются кислые шлаки различных составов, с добавлением оксидов редкоземельных элементов и хлоридов, но, как показали исследования, шлаки такого состава обладают меньшей проводимостью, чем шлаки с фторсодержащими компонентами.

Найденная математическая модель удельного электрического сопротивления шлаков данной системы:

$$\rho = 13,03 + 2,27 \cdot 10^{-2} \cdot \% \text{SiO}_2 + 2,60 \cdot 10^{-2} \cdot \% \text{Al}_2\text{O}_3 - 1,82 \cdot 10^{-2} t + 5,68 \cdot 10^{-6} t^2,$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление шлака, Ом·м; $\% \text{SiO}_2$ – 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 0,93 при уровне надежности 95%.

Для обеспечения заданной степени достоверности аппроксимации содержание компонентов и температура должны находиться в следующих диапазонах: содержание CaO – от 20 до 60%; содержание SiO_2 – от 30 до 70; содержание Al_2O_3 – от 0 до 25%; температура – от 1300 до 1700 °С.

Система $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$

Шлаки данной системы обладают удовлетворительным комплексом физических и физико-химических свойств. Электропроводность шлаков возрастает с увеличением добавки MgO . Высокое содержание оксида кремния при низком содержании оксида кальция, оксида магния обеспечивает низкую водородопроницаемость шлаков.

Безфтористый шлак такого состава имеет свойство быстрого наведения шлаковой ванны из-за большого электрического сопротивления. Используется для переплава инструментальных и коррозионно-стойких сталей.

Найденная математическая модель удельного электрического сопротивления шлаков данной системы:

$$\rho = 1,463 - 3,55 \cdot 10^{-3} \cdot \% \text{CaO} + 1,90 \cdot 10^{-2} \cdot \% \text{SiO}_2 + 1,73 \cdot 10^{-2} \cdot \% \text{Al}_2\text{O}_3 - 1,66 \cdot 10^{-3} t,$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление шлака, Ом·м; $\% \text{SiO}_2$ – 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 0,88 при уровне надежности 95%.

Для обеспечения заданной степени достоверности аппроксимации содержание компонентов и температура должны находиться в следующих диапазонах: содержание CaO – от 0 до 50%; содержание SiO_2 – от 30 до 70; содержание Al_2O_3 – от 0 до 30; содержание MgO – от 0 до 25%; температура – от 1400 до 1700 °С.

Выводы

Полученные математические модели зависимости удельного электрического сопротивления шлаков ЭШП от их состава и температуры показали свою высокую эффективность (степень достоверности аппроксимации для математических моделей различных шлаковых систем составляет от 0,88 до 0,99). Это позволяет применять их при проведении разнообразных инженерных расчетов, построении автоматических систем управления технологическим процессом ЭШП, в компьютерных программах расчета параметров шлаков ЭШП по их составу и температуре или подбора состава шлака для обеспечения заданных параметров процесса, имитационных моделях ЭШП и т. д.

Литература

1. Атлас шлаков. Справ. изд. / Пер. с нем. М.: Metallurgija, 1985. 208 с.
2. Дакуорт У. Э. Электрошлаковый переплав / У. Э. Дакуорт, Д. Хойл. М.: Metallurgija, 1973. 192 с.
3. Казачков Е. А. Электрошлаковый переплав. Ч. 1. / Е. А. Казачков, А. Д. Чепурной. Мариуполь: ПГТУ, 1995. 83 с.
4. Mills K. C. Estimating the physical properties of slags / K. C. Mills, L. Yuan, R. T. Jones // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. October, 2011. Vol. 111. P. 649–658.
5. Літвяков О. С. Автоматизована система розрахунку параметрів шлаків електрошлакового переплаву / О. С. Літвяков, О. С. Іванова, В. М. Рибак, Р. О. Лисюк, І. Г. Куцик // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра: матеріали XIII Всеукр. наук.-практ. конф., Київ, 21 квітня 2015 р. Режим доступу: <http://www.fhotm.kpi.ua/labours/labours-2015.pdf>
6. Іванова О. С. Імітаційна модель електрошлакової тигельної плавки на рідкому старті / О. С. Іванова, В. М. Рибак, Р. О. Лисюк // Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 5: Матеріали V Міжн. наук. конф. Київ, 03–05 грудня 2015 р. С. 296–299.

References

1. Atlas shlahkov. Sprav. izd. [Atlas slag. Reference book]. Moscow, Metallurgija Pub., 1985, 208 p.
2. Duckworth W. E., Hoyle G. Electro-slag Refining Chapman and Hall LTD new fetter lane London, 1969. 180 p. (Russ. ed.: Dakuort U. Je., Dj. Hojl. *Elektroshlahkovyj pereplav*. Moscow, Metallurgija Publ, 1973, 192 p.)
3. Kazachkov E. A., Chepurnoj D. *Elektroshlahkovyj pereplav*. Part 1. [Electro-slag Refining]. Mariupol', PGTU Publ., 1995, 83 p.
4. Mills K. C., Yuan L., Jones R. T. Estimating the physical properties of slags. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. October, 2011, vol. 111, pp. 649–658.
5. Litvjakov O. S., Ivanova O. S., Ribak V. M., Lisjuk R. O., Kucik I. G. *Avtomatizovana sistema rozrahunku parametriv shlahiv elektroshlahkovogo pereplavu* [Automated system for calculating the parameters of slag ESR] Special'na metalurgija: vchora, s'ogodni, zavtra: materialy XIII Vseukr. nauk.-prakt. konf., Kiiv, 21 kvitnya 2015 [Special Metallurgy: Yesterday, Today and Tomorrow: materials XIII National scientific and practical Conference, Kyiv, 21 april 2015. Kiev: NTUU «KPI», 2015, pp. 533–538. Available at: <http://www.fhotm.kpi.ua/labours/labours-2015.pdf>
6. Ivanova O. S., Rybak V. M., Lysuk R. O. *Imitacijna model' elektroshlahkovoї tigel'noї plavki na ridkomu starti* [Simulation model of electroslag crucible melting on liquid start]. *Materiali dlja roboti v ekstremal'nih umovah – 5: materialy V Mizhn. nauk. konf.* Kiiv, 03–05 grudnja 2015 r. [Materials for work under extreme conditions – 5 materials V Nat. Science. Conf., Kyiv]. Kiev: NTUU «KPI», 2015, pp. 296–299.