

## Автоматизированная система расчета параметров шлаков ЭШП

Разработана автоматизированная система расчета параметров шлаков электрошлакового переплава, позволяющая рассчитывать плотность, удельную теплоемкость, теплопроводность, удельное электрическое сопротивление, температуру плавления, вязкость и поверхностное натяжение жидкого шлака в зависимости от его состава и температуры, а также подобрать состав и температуру шлака для обеспечения заданных параметров.

**Ключевые слова:** электрошлаковая плавка, параметры шлаков, математическое моделирование, автоматизированная система.

**В**ведение. Электрошлаковый переплав используется для очистки металлов и сплавов от вредных примесей и является одним из основных способов получения металлов и сплавов высокого качества.

Наиболее значимым элементом всех электрошлаковых процессов является шлаковая ванна. Именно в ней происходят процессы выделения тепла, которое идет на нагрев и плавление металла, а также процессы рафинирования. Поэтому, от параметров шлаковой ванны зависит и прохождение самого электрошлакового процесса в целом, и качество получаемого металла.

К наиболее важным параметрам шлаков ЭШП относятся теплопроводность, электропроводность, теплоемкость, плотность, температура плавления, вязкость и поверхностное натяжение. Химическая активность шлака должна обеспечивать необходимую степень очистки металла.

Вопрос быстрого и адекватного расчета параметров шлаковой ванны в любой момент времени приобретает все большую значимость, поскольку именно параметры шлаковой ванны, особенно ее электрическое сопротивление, влияют на все другие параметры процесса. Поэтому, задача создания соответствующей программы расчета параметров шлаков ЭШП является актуальной.

**Постановка задачи.** Для удовлетворения потребностей современного рынка с каждым днем повышаются требования к материалам, в том числе к составу и характеристикам стали. На фоне этого разрабатываются новые составы шлаков ЭШП для получения заданных параметров металлов. Но, чтобы внедрить новый состав, нужно провести соответствующие плавки и оценить полученные результаты, а это ведет к дополнительным затратам.

Активная работа по повышению эффективности процессов ЭШП путем автоматизации расчета параметров шлаков проводится за рубежом [1], но разработанные системы расчета громоздки и неудобны и поэтому требуют доработок. Кроме этого, отечественные составы шлаков отличаются от зарубежных, что также приводит к увеличению ошибок расчета.

Поэтому, авторами была поставлена задача создания компьютерной программы «Автоматизированная система расчета параметров шлаков ЭШП», основные задачи которой заключались бы в быстром и точном расчете параметров шлака ЭШП по содержанию в нем компонентов, а также в подборе состава шлака для обеспечения заданных параметров плавки.

**Описание программы.** В основу разработанной компьютерной программы положены формулы и соотношения, приведенные в [2, 3], а также математические модели [4], созданные авторами на основе данных [5, 6].

Программа скомпилирована в один бинарный exe-файл и может быть запущена на любом персональном компьютере, работающим под управлением одной из операционных систем семейства Windows.

Программа состоит из трех модулей, которые запускаются последовательно при нажатии соответствующих кнопок. Ниже перечислены все модули программы, а также дано их краткое описание.

1) Заставка программы, которая содержит информацию о названии программы, а также информацию об организации-разработчике (рис. 1).



Рис. 1. Заставка компьютерной программы

## 2) Форма расчета параметров шлака (рис. 2).

Данная форма используется для определения основных параметров шлака ЭШП – плотности, удельной теплоемкости, теплопроводности, удельного электрического сопротивления, температуры плавления, вязкости и поверхностного натяжения в зависимости от количества в шлаке фторида кальция, оксида кальция, оксида кремния, оксида алюминия, оксида магния и температуры.

В качестве примера, на рисунке приведен расчет параметров шлаковой смеси, содержащей, %: 45 –  $\text{CaF}_2$ , 20 –  $\text{CaO}$ , 10 –  $\text{SiO}_2$ , 20 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 5 –  $\text{MgO}$  при температуре 1560 °С. При этом содержание фторида кальция рассчитывается автоматически в зависимости от содержания в шлаке других компонентов.

Форма имеет 4 кнопки управления: «Назад» – вернуться к главной форме-заставке, «Рассчитать» – запустить процедуру расчета, «Очистить» – очистить поля формы от предыдущих расчетов, «Выйти» – закрыть программу.

## 3) Форма расчета состава шлака (рис. 3).

Данная форма используется для подбора состава шлаковой смеси в зависимости от требуемых параметров жидкого шлака – плотности, удельной теплоемкости, теплопроводности, удельного электрического сопротивления, температуры плавления, вязкости, поверхностного натяжения и рабочей температуры.

Программа позволяет осуществлять подбор состава шлаковой смеси как по всем заданным параметрам, так и в любой их комбинации. Для выбора параметров, по которым будет проводиться подбор, используются квадратные кнопки, которые при переключении могут окрашиваться в один из двух цветов: зеленый – параметр учитывается, красный – параметр не учитывается.

После запуска программы, по умолчанию, все кнопки будут иметь зеленый цвет. Пользователь имеет возможность самостоятельно отмечать параметры подбора и вводить требуемые значения, но минимум один параметр должен быть отмечен зеленым цветом.

Параметр «Допуск отклонений» устанавливает пределы отклонений каждого из исходных параметров в процентах и влияет на точность расчетов. Пользователь имеет возможность установить данный параметр в диапазоне от 1 до 50%. По умолчанию, этот параметр равен 10%.

В программе также имеется возможность задать границы поиска содержания каждого из компонентов шлака –  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO}$  в диапазоне от 0 до 100%, а также рабочий температурный интервал, в котором шлаковая смесь должна иметь указанные параметры. По умолчанию, диапазон поиска составляющих шлаков не ограничен, а рабочая температура лежит в диапазоне от 1200 до 2500 °С.

В случае невозможности подбора содержания составляющих шлаковой смеси, необходимо увеличить пределы допуска или расширить границы поиска содержания компонентов шлака.

В качестве примера, на рисунке приведена процедура подбора компонентов шлака по двум параметрам – плотности, которая должна составлять 2500  $\text{кг/м}^3$ , и температуре плавления, которая долж-



Рис. 2. Форма расчета параметров шлака



Рис. 3. Форма расчета состава шлака

на составлять 1300 °С. При этом содержание фторида кальция должно лежать в диапазоне от 50 до 80%, содержание оксида кальция должно быть не менее 5%, содержание оксида кремния не должно превышать 5%, содержание оксида алюминия должно лежать в диапазоне от 20 до 30%, а содержание оксида магния должно равняться 0%. Температура, при которой должны обеспечиваться заданные значения параметров, должна лежать в пределах от 1600 до 1700 °С.

По результатам расчетов, удовлетворять заданным значениям параметров при температуре 1641 °С будет смесь, которая состоит из, %: 60 –  $\text{CaF}_2$ , 12 –  $\text{CaO}$ , 4 –  $\text{SiO}_2$ , 24 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 0 –  $\text{MgO}$ .

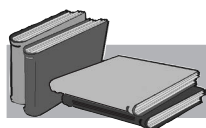
Данная форма, как и предыдущая, имеет 4 кнопки управления: «Назад» – возвращение к главной форме-заставке, «Рассчитать» – запустить процедуру расчета, «Очистить» – очистить поля формы от предыдущих расчетов, «Выйти» – закрыть программу.

## Выводы

Разработанная компьютерная программа показала свою высокую эффективность и может быть использована как в учебном процессе, при подготовке

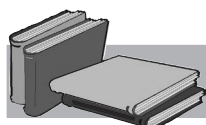
студентов и специалистов металлургического профиля, так и в самой металлургической отрасли для проведения быстрых и точных расчетов параметров шлаковых ванн в процессах электрошлакового пере-

плава, что является необходимым условием для эффективного управления процессами ЭШП с целью получения качественной продукции при минимальных затратах сырья и электроэнергии.



## ЛИТЕРАТУРА

1. 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. – Volume 111. – P. 649-658.
2. Егоров А. В. Расчет мощности и параметров электропечей черной металлургии: Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1990. – 280 с.
3. Казачков Е. А. Чепурной А. Д. Электрошлаковый переплав. Часть 1. – Мариуполь: ПГТУ, 1995. – 83 с.
4. Иванова О. С., Рыбак В. Н., Куцык И. Г. Математическое моделирование поверхностного натяжения шлаков ЭШП. – «Металл и литье Украины». – 2015. – № 12. – С. 33-35.
5. Атлас шлаков: справ. изд.; пер. с нем. – М.: Металлургия, 1985. – 208 с.
6. Подгаецкий В. В., Кузьменко В. Г. Сварочные шлаки: Справочное пособие. – К.: Наукова думка, 1987. – 252 с.



## REFERENCES

1. Mills K. C., Yuan L., Jones R. T. (2011). [Estimating the physical properties of slags]. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 111, pp. 649-658. [in English].
2. Egorov A. V. (1990). Raschet moshchnosti i parametrov elektropechei chernoi metallurgii: Uchebnoe posobie dlia vuzov. [Calculation of parameters of electric power and steel industry: Textbook for Universities]. Moscow: Metallurgiiia, 280 p. [in Russian].
3. Kazachkov E. A., Chepurnoi A. D. (1995). Elektroshlakovyi pereplav. Chast' 1. [Electroslag remelting. Part 1.]. Mariupol: PGU, 83 p. [in Russian].
4. Ivanova O. S., Rubak V. N., Kutsyk I. G. (2015). Matematicheskoe modelirovanie poverkhnosnogo natiazheniia shlakov ESHP. [Mathematical modeling of surface tension of the slag ESR]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 12, pp. 33-35. [in Russian].
5. Atlas shlakov: sprav. izd. (1985). [Atlas of slag. Reference book]. Moscow: Metallurgiiia, 208 p. [in Russian].
6. Podgaetskii V. V., Kuz'menko V. G. (1987). Svarochnye shlaki: Spravochnoe posobie. [Welding slags. Resource Manual]. Kyiv: Naukova dumka, 252 p. [in Russian].

### Анотація

Иванова О. С., Рыбак В. М.

Автоматизована система розрахунку параметрів шлаків ЕШП

Розроблено автоматизовану систему розрахунку параметрів шлаків електрошлакового переплаву, яка дозволяє розраховувати густину, питому теплоємність, теплопровідність, питомий електричний опір, температуру плавлення, в'язкість та поверхневий натяг рідкого шлаку в залежності від його складу і температури, а також підібрати склад і температуру шлаку для забезпечення необхідних параметрів.

### Ключові слова

Електрошлакова плавка, параметри шлаків, математичне моделювання, автоматизована система.

### Summary

Ivanova O., Rybak V.

Automated system for calculating parameters of ESR slags

An automated system for calculating the parameters of the ESR slags was developed. It allows you to calculate the density, specific heat, thermal conductivity, electrical resistance, melting point, viscosity and surface tension of the liquid slag, depending on its composition and temperature, as well as to determine the composition and the slag temperature for the specified parameters.

### Keywords

Electroslag remelting, parameters of slags, mathematical simulation, automated system.

Поступила 15.02.17