

## ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ И ВЫСОКОХРОМИСТЫХ ШЛАКОВ

Е.Н. Акимов, Н.В. Мальков, В.Е. Рощин

Экспериментально исследована электрическая проводимость шлаков производства низкоуглеродистого феррохрома с переменным содержанием оксидов алюминия и хрома. Влияние оксида хрома на электропроводность шлака проявляется сильнее, чем влияние глинозема. Определена зависимость электропроводности от содержания  $Al_2O_3$  и  $Cr_2O_3$ .

Ключевые слова: электропроводность, шлак, низкоуглеродистый феррохром.

Шлак в процессе производства низкоуглеродистого феррохрома играет роль участка электрической цепи. От его электрической проводимости зависит количество тепла, выделяемого в шлаковой ванне, длина электрических дуг, удельный расход электрической энергии [1]. На рис. 1 приведен элемент схемы замещения рафинировочной печи. Её анализ показывает, что при увеличении сопротивления шлака увеличивается падение напряжения в шлаке, уменьшается падение на электрических дугах. Как следствие – дуги короткие, возможна потеря дугового режима, электроды погружаются в расплав, происходит науглероживание металла.

Цель данного исследования – определение электрической проводимости шлаков производства низкоуглеродистого феррохрома при использовании кремния и алюминия для восстановления хрома из шлака [2].

Обычный шлак силикотермического процесса содержит (мас. %):  $MgO$  – 12...15;  $Al_2O_3$  – 3...7;  $SiO_2$  – 20...29;  $CaO$  – 45...50;  $Cr_2O_3$  – 3...8;  $FeO$  – 0,5...1,5.

Химический состав шлаков силико-алюминотермического производства, мас. %:

$MgO$	$Al_2O_3$	$SiO_2$
13,71...14,98	11,7...19,35	15,28...19,08
$CaO$	$Cr_2O_3$	$FeO$
37,01...41,59	9,2...15,84	1,08...2,87

Особенность шлаков опытных плавов заключается в повышенном содержании  $Al_2O_3$  и  $Cr_2O_3$ . Высокое содержание глинозема в опытных шлаках обусловлено использованием алюминия в качестве восстановителя. Повышенное содержание  $Cr_2O_3$ , по-видимому, объясняется тем, что с увеличением содержания алюминия в расплаве образуются прочные соединения, например  $Cr_2O_3 \cdot Al_2O_3$ . Увеличение  $Al_2O_3$  и  $Cr_2O_3$  в шлаке может приводить к нарушению оптимального дугового режима.

Для определения электропроводности шлаковых расплавов применили метод, основанный на измерении электросопротивления жидкости между двумя электродами по схеме вольтметр – амперметр [3]. Готовили синтетические шлаки, основными компонентами которых были  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Cr_2O_3$ . После взвешивания и дозирования каждого компонента конечную смесь перемешивали в мешалке до получения однородного состава. Эксперименты проводили в печи Таммана с графитовым нагревателем, температуру расплава измеряли вольфрам-рениевой термопарой. Значение электропроводности определяли в интервале температур 1400...1900 °С через каждые 50 °С.

Экспериментальные данные фиксировали с помощью установки автоматического измерения электропроводности. Состав исследуемых шлаков приведен в табл. 1.

Основность опытных шлаков, определяемую как  $(CaO + MgO/SiO_2 + Al_2O_3)$  изменяли в преде-

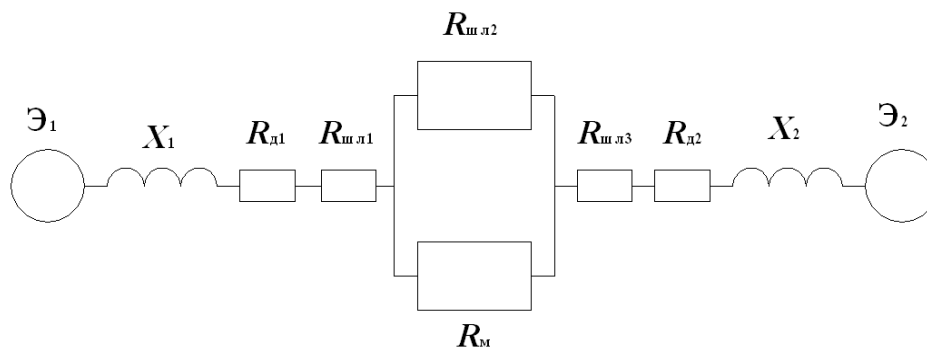


Рис. 1. Элемент схемы замещения рафинировочной печи:  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  – электрод 1 и 2;  $X_1$  и  $X_2$  – индуктивное сопротивление;  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$  – сопротивление на дуге;  $R_{шл1}$ ,  $R_{шл2}$ ,  $R_{шл3}$  – сопротивление шлака;  $R_m$  – сопротивление металла

Таблица 1

Состав исследуемых шлаков, мас. %

№ шлака	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO
1	14,51	4,58	26,50	45,4	7,60	1,45
2	13,19	13,25	24,05	41,3	6,91	1,32
3	12,09	20,48	22,05	37,8	6,33	1,21
4	15,9	14,7	18,9	50,5	–	–
5	17,7	14,9	17,4	47,0	3,0	–
6	17,18	14,47	16,89	45,63	5,83	–
7	16,54	13,93	16,26	43,93	9,35	–

лах 1,17...2,0, отношение MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> изменяли в пределах 0,59...3,17.

Удельную электропроводность вычисляли по формуле

$$\chi = K \cdot I / U_{я}, \quad (1)$$

где  $U_{я}$  – напряжения на измерительной ячейке, В;  $I$  – ток в измерительной ячейке, А;  $K$  – константа измерительной ячейки, см<sup>-1</sup>;  $\chi$  – удельная электропроводность, См/см.

Константу измерительной ячейки определяли по формуле

$$K = \chi_{ст} \cdot U_{я} / I, \quad (2)$$

где – электропроводность калибровочного расплава при заданной температуре, См/см.

В качестве стандартного расплава для калибровки измерительной ячейки использовали химический чистый CaF<sub>2</sub>. Зависимость  $K$  от температуры описывается уравнением

$$K = 0,0025 T - 0,66. \quad (3)$$

Значения электропроводности экспериментальных шлаков при разной температуре приведены в табл. 2.

Полученная в экспериментах зависимость удельной электропроводности от содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в шлаке при 1700 °С представлена на рис. 2.

Зависимость электропроводности от содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> описывается уравнением

$$\chi = -0,08 \cdot [\% \text{ Al}_2\text{O}_3] + 6,069,$$

а от содержания Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:

Таблица 2

Электропроводность исследуемых шлаков

Номер шлака	Значение удельной электропроводности (См/см) при температуре, °С										
	1900	1850	1800	1750	1700	1650	1600	1550	1500	1450	1400
1	6,54	6,25	5,99	5,78	5,66	5,20	4,94	4,51	4,04	3,35	2,50
2	6,04	5,77	5,55	5,28	5,09	4,65	4,28	3,82	3,29	2,74	2,01
3	5,56	5,23	5,01	4,76	4,37	3,96	3,50	3,07	2,48	2,06	1,57
4	5,65	5,54	5,37	5,19	4,97	4,56	4,28	3,93	3,57	3,13	2,64
5	5,05	4,97	4,81	4,65	4,57	4,20	3,99	3,7	3,44	3,07	2,67
6	4,29	4,20	4,03	3,86	3,70	3,49	3,34	3,17	3,00	2,74	2,38
7	3,85	3,71	3,57	3,43	3,31	3,10	2,99	2,92	2,69	2,50	2,11

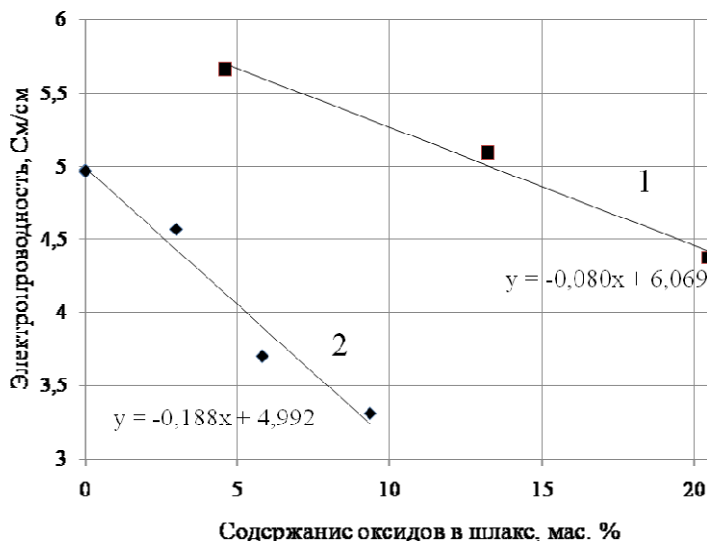


Рис. 2. Зависимость электропроводности от содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (прямая 1) и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (прямая 2) в шлаке при 1700 °С

$$\chi = -0,188 \cdot [\% \text{Cr}_2\text{O}_3] + 4,992.$$

Как следует из представленных на рис. 2 данных, с увеличением содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  удельная электропроводность шлаков снижается. Влияние оксида хрома на электропроводность шлака проявляется сильнее, чем влияние глинозема. Это объясняется, по-видимому, тем, что в сложной многокомпонентной системе образуются крупные малоподвижные ионы. При увеличении содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в шлаке силикотермической плавки от 4,58 до 20,48 % при использовании комплексного восстановителя электропроводность при 1700 °С уменьшается на 1,29 См/см или на 22,8 %. Электропроводность шлака при 1700 °С с увеличением содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  от 0 до 9,83 % уменьшается на 1,66 См/см или на 33,4 %.

Таким образом, экспериментально исследована электрическая проводимость шлаков производства низкоуглеродистого феррохрома с переменным содержанием оксидов алюминия и хрома. Влияние оксида хрома на электропроводность шлака проявляется сильнее, чем влияние глинозема. Зависимость электропроводности от содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  описывается уравнением

$$\chi = -0,08 \cdot [\% \text{Al}_2\text{O}_3] + 6,069,$$

а от содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , соответственно,

$$\chi = -0,188 \cdot [\% \text{Cr}_2\text{O}_3] + 4,992.$$

Оптимальное содержание – 3...7 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и 15...20 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в шлаке алюмо-силикотермического производства низкоуглеродистого феррохрома. Данные могут быть использованы для корректировки технологического режима выплавки низкоуглеродистого феррохрома.

#### *Литература*

1. *Технология низкоуглеродистого феррохрома* / В.Н. Карноухов, В.П. Зайко, Ю.И. Воронов, В.И. Жучков. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 470 с.

2. *Воронов, Ю.И. Особенности выплавки низкоуглеродистого феррохрома с низким содержанием фосфора* / В.Н. Карноухов, Е.Н. Акимов // *Электрометаллургия*. – 2011. – № 1. – С. 4–6.

3. *Линчевский, Б.В. Техника металлургического эксперимента* / Б.В. Линчевский. – М.: Металлургия, 1992. – 240 с.

**Акимов Евгений Николаевич**, аспирант кафедры металлургии и литейного производства, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. Тел.: (351)2679292. E-mail: lord2003@mail.ru.

**Мальков Николай Васильевич**, кандидат технических наук, профессор кафедры металлургии и литейного производства, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. Тел.: (351)2679161. E-mail: steelmet@susu.ac.ru.

**Рощин Василий Ефимович**, доктор технических наук, профессор кафедры металлургии и литейного производства, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. Тел.: (351)2679161. E-mail: vero@met.susu.ac.ru.

*Bulletin of the South Ural State University  
Series "Metallurgy"  
2013, vol. 13, no. 1, pp. 186–188*

## **ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF HIGH-ALUMINOUS AND HIGH-CHROMIUM SLAGS**

***E.N. Akimov, N.V. Mal'kov, V.E. Roshchin***

Experiments have been conducted to investigate electrical conductivity of slags of low-carbon ferrochrome production with variable content of aluminum and chrome oxides. Influence of chrome oxide on electric conductivity of a slag is stronger than influence of alumina. Dependence of electric conductivity on the content of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  has been also defined.

*Keywords: electric conductivity, slag, low-carbon ferrochrome.*

**Akimov Evgeniy Nikolaevich**, post-graduate student of the Metallurgy and Foundry Department, South Ural State University. 76 Lenin avenue, Chelyabinsk, Russia 454080. Tel.: 7(351)2679292. E-mail: lord2003@mail.ru.

**Mal'kov Nikolay Vasil'evich**, candidate of engineering science, professor of the Metallurgy and Foundry Department, South Ural State University. 76 Lenin avenue, Chelyabinsk, Russia 454080. Tel.: 7(351)2679161. E-mail: steelmet@susu.ac.ru.

**Roshchin Vasily Efimovich**, doctor of engineering science, professor of the Metallurgy and Foundry Department, South Ural State University. 76 Lenin avenue, Chelyabinsk, Russia 454080. Tel.: 7(351)2679161. E-mail: vero@met.susu.ac.ru.

*Поступила в редакцию 13 ноября 2012 г.*