
Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Список использованных источников

1. Clayton T., Schwarzkopf J.D., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase flows with droplets and particles // Boca Raton: CRC Press, 2011. 509 p.
2. Jafari P.H., Misiulia D., Heellstrom G., Gebart B.R. Modeling of particle-laden cold flow in a cyclone gasifier // J. Fluids Eng. Vol. 141(2). 2019. P. 1–13.
3. Chishty M.A., Umeki K., Risberg M., Wingren A., Gebart R. Numerical simulation of a biomass cyclone gasifier: Effects of operating conditions on gasifier performance // Fuel Processing Technology. Vol. 218. 2021. P. 1–11.

УДК 543:546.21

**Р. К. Джумаев¹, С. И. Холод^{1,2}, К. В. Самсонов¹, Ю. Н. Чесноков²,
В. В. Рогачев², Р. П. Ижевский³**

¹ НЧОУ ВО «Технический университет УГМК», г. Верхняя Пышма, Россия;

² ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия;

³ Артемовский машиностроительный завод «Вентпром», г. Артемовский, Россия

ЭКСПРЕСС МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА В РАСПЛАВЕ МЕДИ С ЭЛЕМЕНТАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. *Экономические реалии современности требуют постоянного поиска рационального способа использования ресурсов, для повышения эффективности производства, которое в основном достигается уменьшением расхода сырья, внедрением новых технологий и совершенствованием действующих, оптимизацией материальных потоков.*

В данной работе представлено описание экспресс метода оперативной оценки текущей концентрации кислорода в расплаве черновой меди с элементами математического моделирования. В настоящее время одним из важнейших показателей огневого рафинирования меди является концентрация кислорода в ее расплаве. Концентрация кислорода в расплаве выступает в двух ипостасях. С одной стороны, оказывая положительное влияние на рафинирование расплава меди от примесей, а с другой стороны оказывая отрицательное влияние на расплав, перенасыщая его. Предлагаемый экспресс метод основан на изменении сопротивления расплава за счет уменьшения концентрации примесей в процессе окислительной стадии рафинирования. Экспресс метод позволит оперативно регулировать расход воздуха на окисление расплава, что приведет к снижению расхода материальных ресурсов.

© Джумаев Р. К., Холод С. И., Самсонов К. В., Чесноков Ю. Н., Рогачев В. В., Ижевский Р. П., 2024

Ключевые слова: *огневое рафинирование, медь, сопротивление, примеси, кислород, концентрация, математическая модель.*

Abstract. *The economic realities of our time require a constant search for a rational way to use resources to increase production efficiency, which is mainly achieved by reducing the consumption of raw materials, introducing new technologies and improving existing ones, optimizing material flows.*

This paper describes an express method for the rapid assessment of the current oxygen concentration in a rough copper melt with elements of mathematical modeling. Currently, one of the most important indicators of fire refining of copper is the concentration of oxygen in its melt. The oxygen concentration in the melt appears in two guises. On the one hand, it has a positive effect on refining the copper melt from impurities, and on the other hand, it has a negative effect on the melt, oversaturating it. The proposed express method is based on a change in melt resistance due to a decrease in the concentration of impurities during the oxidative stage of refining. The express method will allow you to quickly regulate the air consumption for the oxidation of the melt, which will lead to a decrease in the consumption of material resources.

Key words: *fire refining, copper, resistance, impurities, oxygen, concentration, mathematical model.*

Современные экономические условия требуют постоянного поиска эффективного и рационального использования природных запасов. В первую очередь это связано с изменением модели всей рыночной экономики, базирующейся на снижении материальных затрат при ограниченных ресурсах рудной базы. Нахождение эффективного баланса соотношения цена-качество предусматривает ряд направлений, одним из традиционных и широко известных является снижение расходов, которое в основном достигается уменьшением расхода сырья, внедрением новых технологий и совершенствованием действующих, оптимизацией материальных потоков.

При совокупном влиянии многих факторов физико-химического и производственного характера, организация непрерывного контроля и корректировки насыщения ванны кислородом непосредственно в расплаве анодной печи, по ходу его продувки газами, представляется актуальной задачей. Известные методы определения концентрации кислорода в меди характеризуются низкими эксплуатационными свойствами первичных приборов измерения, работающих в расплаве и недостаточно высокой оперативностью [1; 2]. Это ограничивает их применение в промышленных условиях.

В связи с этим появилась задача поиска метода, удовлетворяющего требованию оперативной оценки текущей концентрации кислорода в расплаве меди, соответствующей режимной карте окислительной и восстановительных операций технологии огневого рафинирования черновой меди.

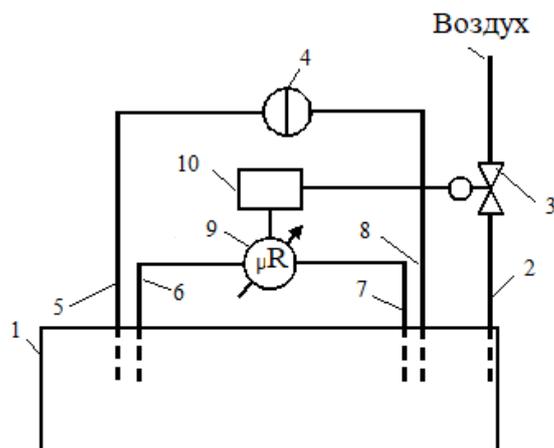
Известно, что удельное электрическое сопротивление металла ρ зависит от суммы идеального и остаточного сопротивлений и имеет линейную зависимость при невысокой остаточной концентрации (правило Матиссена–Флеминга):

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho, \quad (1)$$

где ρ_0 – удельное электрическое сопротивление чистого металла, зависящее от температуры, Ом·мм²/м; $\Delta\rho$ – остаточное электрическое удельное сопротивление, не зависящее от температуры, обусловленное наличием примесных атомов и пропорциональное концентрации примеси $C_{пр}$, Ом·мм²/м.

Указанная формула была положена в основу экспресс метода определения концентрации кислорода в расплаве меди без отбора проб, непосредственно в процессе плавки.

Экспресс метод реализован при помощи пилотной установки квазинепрерывного измерения сопротивления расплава меди, состоящей из блока токово-потенциальных электродов и измерительного блока прямого либо косвенного измерения (рис. 1).



1 – емкость с расплавом черновой меди;
 2 – труба подачи воздуха в емкость с расплавом черновой меди;
 3 – отсекающий вентиль; 4 – источник стабилизированного тока;
 5 – 8 – электроды; 9 – микроамметр; 10 – расчетный блок
 Рис. 1. Структурная схема рафинирования измерения сопротивления расплава меди

Источник тока подключен к двум электродам 5 и 8, между ними расположены электроды 6 и 7, подключенные к микроамметру 9, выход которого связан с расчетным блоком 10, который управляет вентилем 3, расположенным на трубе 2, подводящей воздух для продувки расплава емкости 1.

Устройство работает следующим образом. В емкость с расплавом черновой меди известного химического состава подается воздух. За счет кислорода в составе воздуха происходит окисление примесей черновой меди, в результате уменьшается удельное сопротивление расплава черновой меди [3]. В емкость с расплавом меди квазинепрерывно погружаются две пары электродов. С помощью токовых электродов от источника стабилизированного тока через расплав черновой меди проходит постоянный ток. При прохождении тока возникает падение напряжения, которое фиксируется микроамметром с подключенными к нему потенциальными электродами. Уменьшение удельного сопротивления расплава черновой меди приводит к уменьшению падения напряжения между электродами [4].

Процесс окисления характеризуется остаточным содержанием примесей, наличие которых определяется физико-химическими ограничениями [5]. Чем ближе термодинамическое равновесие, тем медленнее изменяется удельное сопротивление расплава черновой меди.

Одновременно с измерением удельного сопротивления расплава отбирали пробы меди, с последующим их анализом на кислород и основные примесные элементы.

Расчетный блок методом экстраполяции установил эмпирическую зависимость $[O]Cu$ % от сопротивления расплава R мкОм:

$$R_{тек} = f(O) = A \cdot [O]^{-b}. \quad (2)$$

Решая уравнение 2 относительно остаточной концентрации кислорода получили:

$$[O] = e^{\frac{\ln R_{изм} - \ln A}{-b}}, \quad (3)$$

где $R_{изм}$ – текущее измеренное значение сопротивления расплава пропорциональное массе примесей в расплаве, мкОм; $[O]Cu$ – остаточная концентрация кислорода в расплаве, %; A и b эмпирические коэффициенты.

С целью верификации формулы 3 обработали выборку фактических данных в количестве 183 образцов черновой меди. Результат обработки показал:

– нахождение значений суммарной концентрации примесей черновой меди для каждой плавки в определенном интервале, т:

$$\Sigma Me_i = \{x \in R \mid 1,44 \leq x \leq 3,72\};$$

– механизм «выжигания» примесей определяется взаимодействием растворенных в меди примесных элементов с кислородом, влияющих на его активность, и оксидом меди (I);

– интерполяцию промежуточных значений кислорода по имеющемуся дискретному набору известных значений суммарной концентрации примесей, опосредованной удельным сопротивлением;

– нахождение эмпирических коэффициентов A и b в определенном интервале:

$$A = \{x \in R \mid 258 \leq x \leq 406\},$$

$$b = \{x \in R \mid 0,35 \leq x \leq 1,9\}.$$

С целью валидации формулы 3 случайным способом выбрали четыре плавки (167, 278, 282, 285). Эмпирические коэффициенты A и b получили путем анализа аппроксимирующих зависимостей $R_{изм} = f([O])$, выборки фактических данных. Практические измерения и расчетные данные свели в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты измерений сопротивления расплава и теоретические значения остаточной концентрации кислорода

Плавка № 167			Плавка № 278			Плавка № 282			Плавка № 285		
R, мкОм	O ₂ , %										
	Прак	Расч									
994,7	0,5	0,49	649,9	0,3	0,29	590,4	0,4	0,4	639,6	0,5	0,49
741,6	0,55	0,58	543,6	0,43	0,46	491,4	0,52	0,52	528,3	0,62	0,63
557,4	0,65	0,68	511,4	0,57	0,54	447,5	0,57	0,59	469,7	0,73	0,73
519,6	0,7	0,7	487,7	0,61	0,61	413,3	0,64	0,67	420,6	0,79	0,83
503,3	0,73	0,72	466,2	0,69	0,69	405,4	0,71	0,68	408,4	0,89	0,86

Результаты таблицы 1 разместили на одной координатной плоскости (рис. 2).

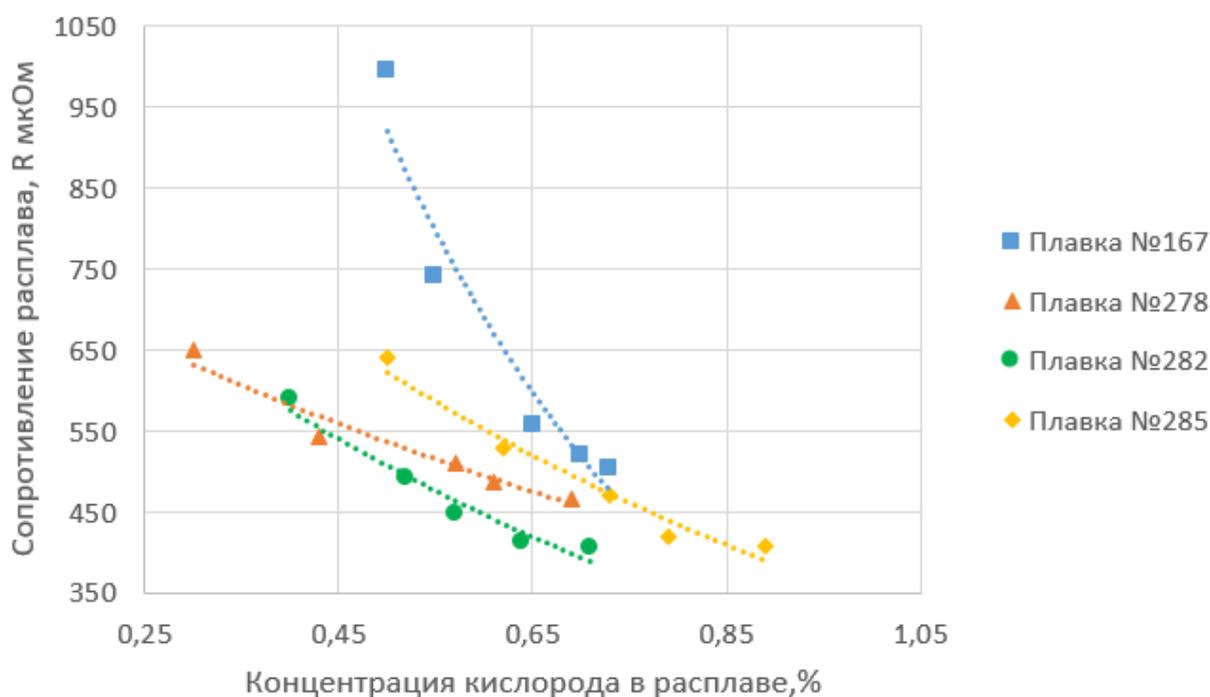


Рис. 2. Эмпирическая зависимость сопротивления расплава от текущей концентрации кислорода в расплаве

Оценку качества модели 3 провели с помощью средней ошибки аппроксимации, показывающей среднее процентное отклонение расчетных значений от фактических значений:

$$\bar{A} = \frac{\sum |y_i - y_x|}{n} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где y_i – измеренные значения; y_x – расчетные значения, n – количество измерений.

Средняя ошибка аппроксимации составила 3,1 %, что свидетельствует о хорошем подборе вида математической модели к измеренным значениям, выбранным в качестве исходных данных.

Очевидно, что эмпирические коэффициенты A и b являются случайными величинами так как они вычислены по результатам обработки выборки из массива данных, которые также являются случайными величинами. На точность эмпирических коэффициентов A и b влияет ряд факторов, например, вариация от плавки к плавке процентного содержания примесей и кислорода в расплаве перед окислением, точность измерений, калибровка приборов, температура в печи и других показателей процесса на результаты измерений и вычислений.

От точности эмпирических коэффициентов A и b зависит точность определения остаточной концентрации кислорода в расплаве меди [O]Cu.

Заканчивая эти рассуждения, уместно поставить вопрос: являются ли представленные подходы окончательными и в полной мере описывающими модель расчета остаточной концентрации кислорода на этапе окисления.

Очевидно, что представленные подходы являются эмпирическими и требуют дальнейшего совершенствования и использования более совершенной методики расчета.

Например, для некоторого химического состава черновой меди аппроксимирующая зависимость может быть линейной. Поэтому окончательный ее вид формируется методом экстраполяции в расчетном блоке и выбирается по результатам оценки коэффициента детерминации аналитической зависимости.

Несмотря на это предложенный экспресс метод и математическую модель целесообразно использовать для оперативного определения остаточной концентрации кислорода непосредственно в процессе анодной плавки, что позволит использовать результат расчета для корректировки потребного количества кислорода в составе воздуха на окисление примесей тем самым обеспечив оптимальное использование материальных ресурсов.

Заключение. Таким образом экспресс метод определения концентрации кислорода в расплаве меди обладает относительной простотой реализации, приемлемой воспроизводимостью результатов измерений и расчетов, и согласуются с общей теорией и практикой рафинирования меди. Экспресс метод определения концентрации кислорода в расплаве меди представляет безусловный интерес для использования в качестве цифрового советчика оператора, позволяющего принимать объективное решение по определению продолжительности окисления, что создаст предпосылки для сокращения расхода материальных ресурсов и снижения ошибки при визуальной, субъективной оценке ложечной пробы по ее рисунку, а также для прогнозирования производительности процесса.

Список использованных источников

1. ГОСТ 13938.13-93. Медь. Методы определения кислорода. – Российская Федерация, 1995. – 24 с.
2. Вольхин А.И. Определение концентрации кислорода в медном расплаве / А.И. Вольхин, Е.И. Елисеев, Г.Н. Колесов, Е.Н. Огнивова // Вестник ЮУрГУ. 2008. № 9. С. 56–58.
3. Окадзаки К. Пособие по электротехническим материалам / Киеси Окадзаки; ред. Л.Р. Зайонца; пер. с яп. М.М. Богачихина, И.Б. Реута – М.: Энергия, 1979. – 432 с.
4. Патент №2779418. Устройство для производства анодной меди: № 2 2021136353. Заявл. 09.12.2021. Опубл. 06.09.2022 / В.Г. Лисиенко, Ю.Н. Чесноков, С.И. Холод, В.В. Рогачев, В.В. Киселев; заявитель, патентобладатель ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». – 7 с.
5. Пирометаллургия меди: учебное пособие. В 2 книгах. Кн. 2 / В.П. Жуков, Г.В. Скопов, С.И. Холод, К.В. Булатов; под общей ред. В.П. Жукова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2023. – 324 с.