Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова т. LXII, вып. 1, 1972 г.

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ РАСПЛАВОВ МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Ю. В. Фишер, С. Е. Вайсбурд, В. Г. Лабазин

Исследование проводимости и ее температурной зависимости — эффективный метод изучения структурно чувствительных характеристик расплавов. Однако публикаций подобных мало, особенно о сульфидных расплавах тяжелых цветных металлов, имеющих важное значение в пирометаллургических процессах [1, 2, 3]. Большинство исследователей при измерении электропроводности расплавов используют либо контактный метод [1], либо бесконтактный, внедренный в практику высокотемпературных измерений А. Р. Регелем [4]. Вместе с тем для таких измерений использовать можно и метод вихревых токов [5].

Основные положения, лежащие в основе этого метода, сводятся к следующему. При помещении проводящего цилиндра в поле катушки электромагнитная волна распространяется в проводящей среде, причем амплитуды векторов $\dot{E}$ и $\dot{H}$ уменьшаются по показательному закону [6]. Чтобы охарактеризовать величину затухания волны, вводится понятие о глубине проникновения, т. е. расстоянии, на котором амплитуда векторов $\dot{H}$ (или $\dot{E}$) уменьшится в e раз. Эта глубина зависит от свойств проводящей среды

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu}}, \tag{1}$$

где ω — частота; μ — магнитная проницаемость среды; γ — удельная проводимость среды.

Если глубина проникновения мала по сравнению с радиусом проводящего цилиндра, то можно выделить кольцеобразный слой толщиной δ и высотой h, равной высоте проводящего цилиндра. Этот слой характеризуется индуктивностью L_2 и сопротивлением

$$R_2 = \frac{2\pi\rho a}{\delta h}, \tag{2}$$

где ρ, a и h — соответственно удельное сопротивление материала, средний радиус и высота кольцеобразного слоя.

Из теории цепей известно, что полное эквивалентное сопротивление индуктивно связанной цепи равно

$$Z_э = R_1 + \frac{\omega^2 M^2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} + j\left(X_1 - \frac{\omega^2 M^2 X_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}\right). \tag{3}$$

Следовательно, составляющие полного сопротивления $Z_э$ зависят от удельного сопротивления материала кольцеобразного слоя. Измерения этих составляющих с целью выявления такой зависимости неравноценны как по чувствительности, так и по техническим средствам.

Рассмотрим случай, когда для определения удельного сопротивления материала кольцеобразного слоя измеряется активная составляющая $Z_э$. Согласно выражению (3), она равна

$$R_э = R_1 + \frac{\omega^2 M^2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}, \tag{4}$$

т. е. активная составляющая $Z_э$ равна сумме активного сопротивления катушки R_1 и вносимого сопротивления $R_{вн}$, зависящего от параметров кольцеобразного слоя, частоты и коэффициента взаимной индуктивности M. Из выражения (4) следует, что для косвенного измерения величины ϱ существуют ограничения в выборе соотношения R_1 и $R_{вн}$ и частоты ω. Для выяснения частотных ограничений проанализируем более подробно выражение

$$R_{вн} = \frac{\omega^2 M^2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}. \tag{5}$$

Подставив выражение (1) в формулу (2), получим

$$R_2 = \frac{\pi a}{h}\sqrt{2\omega\varrho}. \tag{6}$$

Обозначив через D наружный диаметр кольцеобразного проводящего слоя, можно написать

$$a = \frac{D}{2} - \frac{\delta}{2}.$$

Из принятого условия $D \gg \delta$ следует, что $a \approx \frac{D}{2}$. Подставив выражение (6) в формулу (5), получим

$$R_{вн} = \frac{k_2 \sqrt{\varrho}\,\omega^{3/2}}{k_1 \varrho + \omega L_2^2}, \tag{7}$$

где коэффициенты

$$k_1 = \frac{\pi^2 D^2}{2h^2}, \quad k_2 = M^2\sqrt{k_1}.$$

После преобразований

$$R_{вн} = \frac{k_3 \sqrt{\varrho}\,\omega^{3/2}}{\omega + k_4 \varrho}, \tag{8}$$

где коэффициенты

$$k_3 = \frac{k^2}{L_2^2}, \quad k_4 = \frac{k_1}{L_2^2}.$$

Рассматривая в уравнении (8) величину ϱ как функцию $R_{вн}$, можно построить график (рис. 1). Функция $\varrho = f(R_{вн})$ определена при

$$R_{вн} \leqslant R_{вн_0} = \frac{k_3}{2\sqrt{k_4}}\,\omega$$

и является двузначной. В связи с этим для практических измерений целесообразно использовать ветвь функции, для которой

$$\rho \leqslant \rho_0 = \frac{\omega}{k_4}. \tag{9}$$

Это условие можно обеспечить выбором такой рабочей частоты $\omega_{раб}$, при которой максимальная измеряемая величина ρ_{max} будет меньше ρ_0

$$\omega_{раб} \geqslant k_4 \rho_{max}. \tag{10}$$

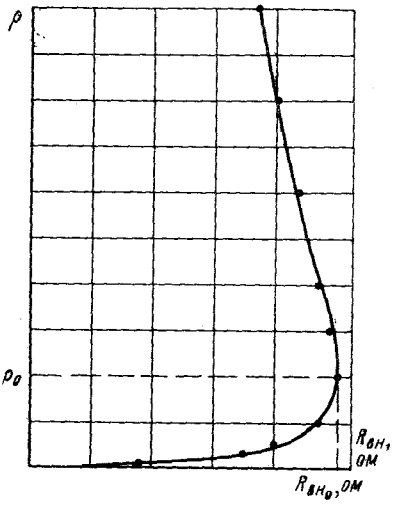


Рис. 1. График функции $\rho = f(R_{вн})$

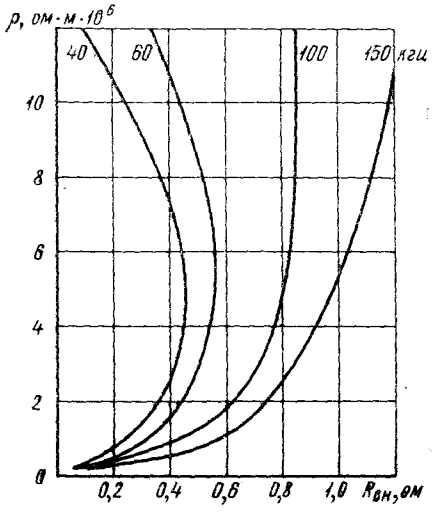


Рис. 2. Экспериментальный график функции $\rho = f(R_{вн})$ при высоте образца 40 *мм* и ∅25 *мм*

Так как теоретическое определение коэффициента k_4 затруднительно, целесообразнее оценить величину $\omega_{раб}$ по экспериментальному графику. Пример такого графика приведен на рис. 2. Характер семейства кривых свидетельствует о том, что для принятых измерительного датчика и пределов измерения ρ минимальной рабочей частотой является примерно 100 *кгц*.

Как отмечено выше, косвенное измерение электропроводности кольцеобразного слоя можно свести к измерению активной составляющей эквивалентного сопротивления $Z_э$. Наиболее распространенным методом измерения составляющих комплексного сопротивления является мостовой метод. Оптимальные условия измерений по мостовой схеме обеспечиваются, когда плечо сравнения моста соответствует эквивалентной схеме измеряемого объекта. Нами использован мост, состоящий из измеряемого объекта Z_1, переменного сопротивления R_2 (10·1 *ом;* 10·0,1 *ом;* 10·0,01 *ом*) переменной индуктивности L_2 (5—20 *мкгн*), вспомогательных плеч R_3, R_4 (10 *ом*), индикатора баланса *ИБ* (вольтметр В3-13), источника питания моста *Г* (генератор ГЗ-35).

Как следует из выражения (4), вносимое сопротивление равно разности активной составляющей эквивалентного сопротивления и активного сопротивления катушки. Обычно при высокотемпературных измерениях определяют политерму активной составляющей эквивалентного сопротивления, а затем измеряют активное сопротивление катушки в этом же

интервале температур. Разностный график позволяет получить зависимость $R_{эн}$ от температуры. Такой способ получения значений $R_{эн}$ связан со значительными погрешностями, так как $R_э$ и R_1 измеряют при несколько различных условиях (например, разной температуре). С целью уменьшения погрешностей методика изменена так, чтобы $R_э$ измерялась на двух частотах, причем первое измерение производилось на частоте, равной рабочей, а второе — на частоте, близкой к нулю (например, 50 *гц*). Тогда результат второго измерения практически равен R_1, так как при $\omega \to 0$ соответственно $R_э \to R_1$. А разность первого и второго измерений будет практически равна $R_{эн}$. При такой методике погрешности за счет разновременности измерений удается полностью исключить.

По этой методике измеряли электропроводность сульфидов тяжелых цветных металлов. В целом установка состояла из моста переменного тока, лабораторной электрической печи и потенциометра для измерения температуры. Рабочая катушка имела 26 витков молибденовой проволоки диаметром 0,5 *мм*, уложенной на керамический каркас. В каркасе помещался алундовый тигель с исследуемым образцом. Измерения производились в атмосфере аргона при температурах до 1300°С. Нагрев образца обеспечивался графитовым нагревателем. Установку градуировали по металлическим расплавам Pb и Bi. Суммарная погрешность в определении электропроводности расплавов оценивается в 5—7%. Полученные по рассмотренной методике политермы (рис. 3) в литературе не

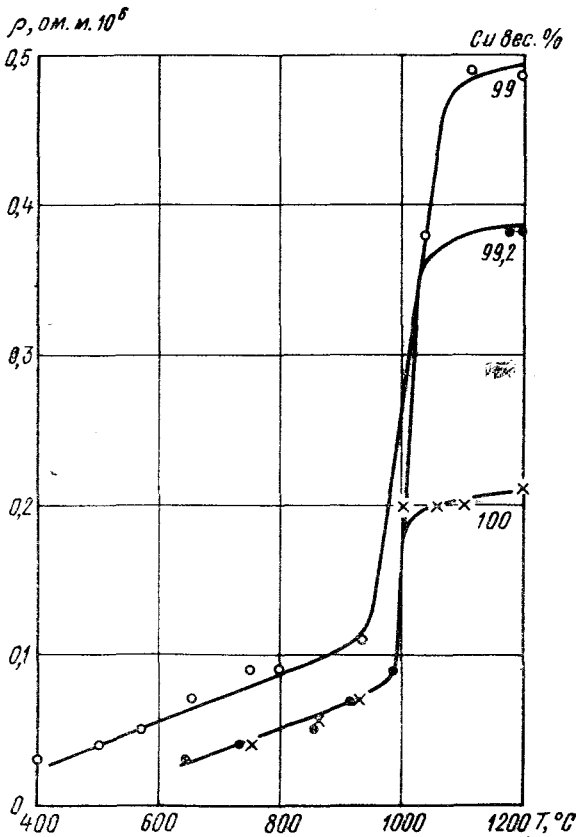


Рис. 3. Политермы удельного сопротивления сплавов Cu—S

обсуждались, что исключает возможность сравнительных оценок. Отдельные точки политермы электропроводности чистой меди удовлетворительно совпадают с опубликованными данными. Известное, например [7], удельное сопротивление меди при 980°С равно $0{,}084 \cdot 10^{-6}$ *ом·м*, а по нашим данным $0{,}088 \cdot 10^{-6}$ *ом·м*.

Опыт эксплуатации установки и результаты измерений показывают, что, наряду с другими бесконтактными методами контроля электропроводности расплавов, может успешно применяться и метод вихревых токов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Великанов А. А. Полупроводниковые свойства расплавленных сульфидов. Тр. Ин-та металлургии УФ АН СССР. 1969. вып. 18.
2. Яблонский Ю. А., Смирнов В. И. Электропроводность сульфидов меди железа и никеля при высоких температурах. Изв. вузов. Цветная металлургия, 1958, № 2.
3. Добровинский И. Е. Плотность, вязкость и электропроводность сульфидных расплавов железа, никеля, кобальта и меди. Автореф. канд. дисс. УФ АН СССР, Ин-т электрохимии, 1968.
4. Регель А. Р. Измерение электропроводности металлов и сплавов во вращающемся магнитном поле. ЖТФ, 1948, т. XVIII, вып. 12.
5. Шумиловский Н. Н., Ярмольчук Г. Г., Грабовецкий В. П. Метод вихревых токов. Энергия, 1966.
6. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Высшая школа, 1964.
7. Физико-химические свойства элементов. «Наукова Думка», 1965.