____ ЛАБОРАТОРНАЯ ____ ТЕХНИКА

УДК 53.083+621.317.3

БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

© 2019 г. А. В. Румянцев^{а,*}, М. А. Никишин^а, В. Г. Харюков^а

^а Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта Россия, 236041, Калининград, ул. А. Невского, 14 *e-mail: albert37@list.ru Поступила в редакцию 24.09.2018 г. После доработки 11.10.2018 г. Принята к публикации 01.11.2018 г.

Предложен отличающийся исключительной простотой бесконтактный метод измерения удельного электросопротивления металлов в области высоких температур. Суть метода — измерение электродвижущей силы, наведенной высокочастотным электромагнитным полем в двух круговых контурах разного диаметра, размещенных коаксиально посередине образца цилиндрической формы. Результаты измерения удельного электросопротивления молибдена в диапазоне 1170–2070 К контактным и бесконтактным методами совпадают в пределах ±1%, что позволяет рекомендовать предлагаемый метод как работоспособный и предпочтительный, особенно в области высоких температур. Приведена методика обработки результатов эксперимента и даны рекомендации по оптимальной геометрии контуров и образца для повышения точности измерений.

DOI: 10.1134/S0032816219030091

Основной недостаток контактного метода измерения удельного электросопротивления металлов, основанного на законе Ома, следует из его названия — контактный. Сложность осуществления контакта образца с токоподводящими и потенциальными выводами обусловлена несколькими причинами. Первая из них состоит в следуюшем. Если в случае металлов, поллаюшихся механической обработке, можно вставлять провода в заранее высверленные отверстия с последующей их зачеканкой, то для металлов типа Та, W, Re и др., механическая обработка которых затруднена, а также при исследовании жидкого металла, помещенного в тонкостенную ампулу, контакт можно осуществить только электроннолучевой или лазерной сваркой. Вторая причина материал образца и проводов как токоподводящих, так и потенциальных (диаметрами ≤1.0 мм и ≤0.1 мм соответственно) должен быть одним и тем же, что далеко не всегда осуществимо. Поэтому проблема развития бесконтактных методов измерения удельного электросопротивления металлов представляется достаточно актуальной, особенно в области высоких температур.

Бесконтактные методы основаны на использовании электромагнитного поля [1–3]. В работе [1] предложен метод дифференциального трансформатора, описанный в [2, 3] способ состоит в определении угла поворота твердого образца (или ампулы сферической формы с жидким металлом) под воздействием вращающегося магнитного поля. Эти методы, в отличие от контактного, обременены большим количеством измерительной аппаратуры (особенно в [2, 3]) и довольно сложной процедурой обработки экспериментальных результатов, не говоря уже о сложности создания вращающегося магнитного поля. Поэтому едва ли их можно рассматривать как предпочтительные по сравнению с контактным методом.

Использование электромагнитного поля, создаваемого высокочастотным индукционным генератором (частота $f \sim 0.5$ МГц), позволяет предложить очень простой бесконтактный метод измерения удельного электросопротивления металлов. Суть метода — измерение электродвижущей силы (э.д.с.), наводимой высокочастотным электромагнитным полем в двух круговых контурах диаметрами $d_{k1} > d_{k2} > d (d - диаметр образца), разме$ щенных коаксиально с цилиндрическим образцом в плоскостях, перпендикулярных к его оси ирасположенных посередине образца.

Измеренные значения э.д.с. позволяют рассчитать удельное электросопротивление р исследуемого материала в области температур от точки Кюри до максимальной, ограниченной температурой плавления образца. Измерительная аппа-



Рис. 1. Схема установки (индуктор и детали крепления не показаны). 1 - металлический образец цилиндрической формы (диаметр 10–12 мм, длина 80–100 мм); $<math>2 - круговой контур диаметром d_{k2}$, количество витков m_2 ; $3 - круговой контур диаметром d_{k1}$, количество витков $m_1 (d_{k1} > d_{k2}, m_2 > m_1)$; 4 - модель черноготела; <math>K - двухполюсный сдвоенный переключатель;<math>V – вольтметр; угол между выводами контуров 90°.

ратура состоит из одного вольтметра, к которому поочередно подключаются выводы контуров, что позволяет исключить возможное взаимное влияние друг на друга э.д.с., наводимых на контурах, так как при переключении один из контуров разомкнут, и оптического пирометра.

Схема установки представлена на рис. 1. Образец *I* в виде цилиндра с катушками *2* и *3*, расположенными на 5–6 мм ниже модели черного тела *4*, вставляется в находящийся в вакуумной камере индуктор (не показаны) высокочастотного генератора, и создается вакуум порядка $5 \cdot 10^{-5}$ Торр. По достижении вакуума включается генератор, и образец нагревается до температуры, величина которой определяется заданной мощностью генератора.

По достижении стационарной температуры (температура образца определяется по модели черного тела 4 с использованием пирометра (не показан)) с помощью ключа K поочередно вольтметром V замеряется э.д.с., наведенная на контурах 2 и 3.

Для применения данного метода необходимо найти связь между наводимыми в контурах э.д.с. Для этого воспользуемся очевидным с физической точки зрения положением — вводимая в образец на единицу его длины мощность зависит только от напряженности создаваемого индуктором магнитного поля и электрических свойств материала образца. Тогда, приравнивая выражения для мощности, содержащие э.д.с. e_1 и e_2 , наводимые на одном витке круговых контуров, а также геометрические параметры образца (диаметр *d*) и контуров (диаметры d_{k1} и d_{k2}), можно установить искомую связь между e_1 и e_2 . Задача нахождения формулы в ее общем виде – для двухслойного цилиндра – решена в нашей работе [4]. При решении задачи считались выполненными следующие предпосылки:

1) создаваемое индуктором высокочастотное электромагнитное поле однородно по длине образца и по радиусу вне образца — это условие эквивалентно предположению, что длины образца и индуктора много больше их диаметров;

2) зависимость компонент электромагнитного поля от времени является гармонической;

3) температурные градиенты отсутствуют – образец нагрет равномерно.

Граничные условия задачи — равенство напряженности полей на границах раздела.

В нашей работе [4] в качестве частного решения — для однослойного цилиндра — приводится формула для расчета мощности *W*, Вт/м, на единицу длины образца:

$$W = \frac{2e^2\eta^3}{\pi\rho} \frac{f_1(\eta)}{\left[N_k^2 - 1 + 2f_2(\eta)\right]^2 + 4\eta^2 f_1^2(\eta)},$$
 (1)

где $e = -d\Phi/dt$ связывает электродвижущую силу, наведенную на одном витке контура, с магнитным потоком $\Phi = BS$, пронизывающим площадь $S = \pi d^2 (N_k^2 - 1)/4$; $N_k = d_k/d$ – отношение диаметра контура d_k к диаметру d образца; e, B – электродвижущая сила, наведенная на одном витке кругового контура; ρ , Ом · м – удельное электрическое сопротивление; $\eta = \sigma/d$, где $\sigma = (\pi \mu_0 \mu f/\rho)^{-1/2}$, м – эффективная толщина скин-слоя в образце; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м – магнитная постоянная; $\mu = 1$ – магнитная проницаемость среды; f, Гц – линейная частота генератора; $f_1(\eta) = 1 - \eta - 0.25\eta^2$; $f_2(\eta) = \eta(1 + 0.25\eta^2 + 0.5\eta^3)$.

Если формулу (1) записать для двух контуров разных диаметров ($d_{k1} > d_{k2}$) и приравнять полученные выражения, то получим формулу, устанавливающую связь между э.д.с. e_2 и e_1 следующего вида:

$$\frac{e_2}{e_1} = \left(\frac{\left[N_{k2}^2 - 1 + 2f_2(\eta)\right]^2 + 4\eta^2 f_1^2(\eta)}{\left[N_{k1}^2 - 1 + 2f_2(\eta)\right]^2 + 4\eta^2 f_1^2(\eta)}\right)^{1/2}.$$
 (2)

В выражении (2) неизвестными являются безразмерная эффективная толщина скин-слоя η и отношение э.д.с. e_2/e_1 (как показали расчеты, зависимость $\eta(e_2/e_1)$ носит линейный характер и достаточно точно описывается линейной функцией).

Для работы с экспериментальными данными предварительно рассчитывается правая часть формулы (2), содержащая значения η из диапазона 0–0.1 с шагом 0.005 и задаваемые в эксперименте величины отношения $n_i = d_{k1}/d_{k2} = N_{k1}/N_{k2} = 1.22$ и 1.5. Пример такого расчета представлен в табл. 1.

Затем строится график зависимости $\eta = f(e_2/e_1)$. Заметим, что с физической точки зрения отношение э.д.с. зависит от η , т.е. $e_2/e_1 = f(\eta)$. Однако с математической точки зрения это не имеет значения, и удобнее в графическом виде строить именно зависимость $\eta(e_2/e_1)$, так как это нагляднее, к тому же эта зависимость описывается линейной функцией, как это для примера показано на рис. 2а и 2б (аппроксимирующая функция находится с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 1$). На рис. 2 представлены в графическом виде результаты описанной процедуры и приведены уравнения трендовых линий.

Эти уравнения используются при обработке результатов эксперимента: достаточно в них вместо x подставить экспериментально найденное отношение э.д.с. $(e_2/e_1)_{3 \text{ксп}}$ и вычислить, согласно приведенным уравнениям, величину η .

Диаметры контуров задаются исходя из следующего. Наличие образца в магнитном поле индуктора приводит к радиальной неоднородности магнитного поля вблизи образца [5]. Минимальное расстояние R от образца, на котором влиянием неоднородности поля можно пренебречь, составляет, согласно [5], $\geq 1.3R_{oбp}$. Влияние отдельных витков индуктора начинает сказываться, согласно [5], на расстоянии $R < R_{индук} - 5l_i$, где l_i зазор между витками индуктора. Таким образом, для минимального и максимального радиусов витков круговых контуров имеем выражение:

$$1.3R_{\rm obp} < R_k < R_{\rm индук} - 5l_i. \tag{3}$$

Отметим, что формула (2) ограничена сверху значением $\eta = \sigma/d = 0.1$, т.е. толщина скин-слоя σ должна быть малой по сравнению с диаметром образца ($\sigma \sim 0.4-0.7$ мм). При индукционном способе нагрева этого можно добиться изменени-ем диаметра образца. Поэтому представленный

Таблица 1. Зависимость отношения э.д.с. e_2/e_1 от η при разных значениях n_i

n _i	<i>е</i> ₂ / <i>е</i> ₁ при η								
	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10			
1.22	0.58333	0.58769	0.59205	0.59641	0.60075	0.60505			
1.5	0.32773	0.33342	0.33918	0.34496	0.35079	0.35652			

метод не имеет ограничений как на диапазон температур сверху, так и на величину удельного электросопротивления материала образца.

Для увеличения э.д.с. на керамический каркас катушки наматывается несколько витков проволоки. Числа витков катушек составляют m_1 и m_2 , при этом желательно иметь отношение $m_2/m_1 \sim 2$, что обеспечит примерно одинаковые показания вольтметра: $U_2(d_{k2}, m_2) \approx U_1(d_{k1}, m_1)$. Отношение э.д.с., наведенных на одном витке, находится по формуле:

$$e_2/e_1 = (m_1/m_2)(U_2/U_1).$$
 (4)

Для используемых в эксперименте значений n_i эти функции имеют вид, показанный на рис. 2 $(x = e_2/e_1)$:

$$n_1 = 1.22, \quad \eta(n_1, x) = 4.599x - 2.682, \quad R^2 = 1;$$

 $n_2 = 1.5, \quad \eta(n_2, x) = 3.466x - 1.135, \quad R^2 = 1.$
(5)

Экспериментально найденное отношение $e(T)_2/e(T)_1$ подставляется вместо *x* в соответствующую значению *n* формулу (5), что позволяет найти функцию $\eta(T)$ и тем самым температурную зависимость удельного электрического сопротивления материала исследуемого образца:

$$\rho(T) \cdot 10^8 [O_{\rm M} \cdot {\rm M}] = 4\pi^2 d^2 f(T) \eta^2(T).$$
 (6)



Рис. 2. Зависимость переменной η от отношения э.д.с. e_2/e_1 .

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА № 3 2019

Подставляя в (1) найденные значения $\rho_i(T)$, измеренные $e_i(T)$ (i = 1, 2) при заданных d_{ki} и рассчитанные по (5) величины $\eta_i(T)$, можно найти вводимую в образец мощность $W_i(T)$ на единицу длины, а затем, используя закон Стефана—Больцмана, вычислить $\varepsilon_T(T)$ — полусферическую интегральную степень черноты. Если с помощью пирометра определять и яркостную температуру T_s поверхности образца, то по известному соотношению можно найти и $\varepsilon_{\lambda T}(T)$ — монохроматическую степень черноты. Таким образом, предлагаемый метод является комплексным.

Экспериментальная проверка метода осуществлялась на установке, в которой использовался высокочастотный генератор ВГТ7-15/440 (мощность 15 кВт, частота 440 кГц; на самом деле, частота генератора зависит от задаваемой мощности генератора, уменьшаясь при увеличении мощности, т.е. с ростом температуры образца).

Образец представлял собой цилиндр длиной 75 мм и диаметром 10 мм, материал образца – технический молибден (99.9% Мо). Абсолютная температура определялась по модели черного тела в виде отверстия диаметром 1.0 мм и глубиной ~6 мм, выполненного посередине образца. Согласно [6], эффективная излучательная способность такой модели черного тела близка к 0.99, что дает максимальное отличие измеряемой температуры от истинной 0.1% (при $T_{max} = 2500$ K).

Выбор величины $n = N_{k1}/N_{k2}$ при диаметре образца d = 10 мм осуществлялся на основании соотношения (3). Для диаметра индуктора $D_{индук} = 40$ мм (длина индуктора 160 мм) найдем максимальное и минимальное значения диаметров контуров: $d_{k \max} = 27$ мм и $d_{k \min} = 13$ мм. Эксперимент проводился с контурами диаметрами: $d_{k1} = 22$ мм и $d_{k2} = 18$ мм – первый вариант и $d_{k1} = 24$ мм и $d_{k2} = 16$ мм – второй вариант. Это позволило исследовать метод при $n_1 = 1.22$ и $n_2 = 1.5$, т.е. наихудший и оптимальный его варианты.

Керамическая (высокотемпературная керамика HPBN) фигурная катушка, выполненная как одно изделие в виде двух полых дисков указанных диаметров, вставлялась в опорное кольцо, в котором закреплялась кварцевыми стержнями. На поверхности катушек выполнена резьба с шагом 0.3 мм и глубиной 0.2 мм. В первом эксперименте на катушки наматывалось соответственно $m_1 = 3$ и $m_2 = 5$ витков молибденовой проволоки диаметром 0.1 мм, во втором – число витков составляло $m_1 = 2$ и $m_2 = 4$. По образующей цилиндра приваривались потенциальные выводы из молибденовой проволоки того же диаметра (расстояние между выводами L = 45 мм). В работе [7] экспериментально показано, что отступление от торцов образца на расстояние l = 1.5d гарантирует изотермичность температурного поля на длине L; наличие катушек, коаксиально расположенных с образцом, не нарушает продольную изотермичность температурного поля. При нагревании образца внешним сходящимся потоком, близким к поверхностному, в случае отсутствия стоков на оси цилиндра гарантируется отсутствие радиального градиента температуры. Образец с катушками вставлялся в индуктор генератора, расположенный в вакуумной камере установки.

Эксперимент проводился следующим образом. По достижении вакуума образец прокаливался при температуре ~2000 К в течение двух часов, затем классическим контактным методом с использованием низкоомного потенциометра постоянного тока Р-306 измерялось удельное электрическое сопротивление образца в диапазоне $T \approx 1170-2070$ К.

Далее измерения проводились бесконтактным методом, для чего фиксировались показания частоты генератора (на его дисплее), вольтметра, пирометра. По достижении максимальной температуры эксперимент проводился в обратном порядке — температура уменьшалась. Зависимость $\eta(n, e_1/e_2)$ рассчитывалась по формуле (5) при $n_1 = 1.22$ (1-й эксперимент) и $n_2 = 1.5$ (2-й эксперимент).

Результаты экспериментов представлены в табл. 2 и 3 соответственно. Близость значений U_i в третьей и четвертой строках таблиц свидетельствует о правильном подборе числа витков в катушках: 3 и 5 при $n_1 = 1.22$; 2 и 4 при $n_2 = 1.5$, что позволило измерять падение напряжений на катушках одним и тем же вольтметром и при переключениях не изменять предел измерения. Погрешность измерения напряжения U_i вольтметром ВЗ-38 в диапазоне частот от 0.1 до 1 МГц для предела измерений 100 В составила не более 1.3%.

В последних строках табл. 2 и 3 приведены изменения измеренных и рассчитанных величин в процентах. Видно, что при сильных – до 300% – изменениях измеренных напряжений их отношение изменяется слабо – 0.7% и 1.5%, однако этого достаточно для определения изменения искомой величины $\eta(e_1/e_2)$ на 45% и 42% соответственно. Удельное электросопротивление изменяется при этом практически в два раза, что свидетельствует о приемлемой работоспособности предлагаемого бесконтактного метода.

Для сопоставления значений $\rho(T)$, найденных разными методами — контактным и бесконтактным, необходимо привести их к одной температурной шкале. Для этого строились графики данных и находились аппроксимирующие их уравнения с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 1$. Затем создавалась температурная шкала с шагом 100 K, и ее значения подставлялись в уравнения. Результаты представлены в табл. 4. Видно, что отличие данных, полученных двумя вариантами бесконтактного метода и контактным методом, лежит в пределах $\pm 1.0\%$, как это показано в двух последних столбцах. Для наглядности приведенные в табл. 4 данные представлены в графическом виде на рис. 3. Видно, что независимо от метода результаты близки и не выходят за пределы диапазона $\pm 1.0\%$. Здесь же приведена и трендовая линия для контактного метода.

Экспериментальные значения удельного электрического сопротивления технического молибдена независимо от метода их определения лежат в среднем на ~10% выше данных для монокристаллического молибдена [7].

Использование формулы (1) позволяет провести внутренний контроль полученных данных. Результаты расчета мощностей $W_i(e_i, n_i, T_i)$ при $n_1 = 1.22$ и $n_2 = 1.5$ представлены в табл. 5. Видно, что независимо от варианта $(n_1$ или $n_2)$ и соответствующих величин э.д.с. $(e_1$ или $e_2)$ значения мощности мало отличаются друг от друга: в 1-м варианте различия лежат в диапазоне 0.6–0.3%, а во 2-м – в диапазоне 1.0–0.8%. Бо́лышие отличия значений мощности во втором варианте свидетельствуют о наличии влияния радиальной неравномерности магнитного поля при диаметре второго контура $d_{k2} = 16$ мм. Поэтому следует его несколько увеличить, так чтобы $n_2 = 1.4$. Тогда, например, при $d_{k1} = 24$ мм получим $d_{k2} = 17$ мм.

Сопоставление по строкам таблицы показывает близость значений мощности, рассчитанной по э.д.с., наведенным на одном витке контуров. Их отличие не превосходит $\pm 1.0\%$. Для наглядности данные табл. 5 для (e_1 , n_1) и (e_1 , n_2) представлены графически на рис. 4, на котором приведены и трендовые линии.

Для вычисленной вводимой в образец мощности и температуры в последнем столбце табл. 5 представлены значения полусферической интегральной степени черноты поверхности образца ε_T , рассчитанные на основании закона Стефана— Больцмана. Они близки к значениям степени черноты монокристаллического молибдена [7], но несколько превышают их, так как механическая обработка поверхности образца технического молибдена соответствовала ~4-му классу, а поверхность монокристаллического молибдена была полирована. Отметим, что это свойство существенно зависит от класса механической обработки поверхности и глубины вакуума, особенно в области высоких температур.

Таким образом, экспериментально показано, что в одном эксперименте можно определить удельное электросопротивление и полусферическую интегральную степень черноты, т.е. предлагаемый метод действительно является комплексным.

Следует отметить, что использование индукционного нагрева, осуществляемого с помощью

Таблица 2. Экспериментальные усредненные данные при $n_1 = 1.22$

<i>Т</i> , К	<i>f</i> , кГц	<i>U</i> ₁ , B	<i>U</i> ₂ , B	e_2/e_1	$\eta(e_2/e_1)$	ρ·10 ⁸ , Ом·м
1171	436.6	18.06	17.85	0.59256	0.04230	30.81
1285	428.4	22.38	22.10	0.59325	0.04545	34.90
1353	425.6	25.26	25.00	0.59362	0.04717	37.34
1411	423.0	27.90	27.65	0.59394	0.04861	39.42
1443	421.8	29.43	29.15	0.59411	0.04939	40.57
1500	420.6	32.31	32.00	0.59439	0.05069	42.62
1561	419.4	35.55	35.25	0.59469	0.05205	44.81
1621	418.3	38.94	38.60	0.59497	0.05335	46.96
1702	417.8	43.80	43.45	0.59533	0.05501	49.87
1778	417.0	48.69	48.30	0.59567	0.05655	52.60
1853	416.3	53.76	53.40	0.59599	0.05803	55.29
1912	415.6	57.99	57.60	0.59624	0.05921	57.41
1975	414.8	62.67	62.30	0.59650	0.06039	59.67
2025	414.0	66.54	66.15	0.59671	0.06136	61.47
δ	, %	370	370	0.7	45	199

Таблица 3. Экспериментальные усредненные данные при $n_2 = 1.5$

<i>T</i> , K	<i>f</i> , кГц	<i>U</i> ₁ , B	<i>U</i> ₂ , B	e_2/e_1	$\eta(e_2/e_1)$	ρ · 10 ⁸ , Ом · м
1170	436.60	13.40	78.94	0.33989	0.04249	31.39
1269	428.40	16.61	11.31	0.34067	0.04517	34.82
1343	424.60	18.75	12.78	0.34120	0.04701	37.38
1376	423.00	20.71	14.13	0.34143	0.04782	38.53
1405	421.80	21.84	14.91	0.34163	0.04851	39.53
1488	419.80	23.98	16.40	0.34216	0.05036	42.61
1546	419.00	26.39	18.06	0.34252	0.05159	45.11
1610	418.37	28.90	19.80	0.34290	0.05290	47.56
1652	417.94	32.51	22.29	0.34330	0.05430	49.05
1723	417.21	36.14	24.81	0.34364	0.05546	51.42
1805	416.48	39.90	27.43	0.34415	0.05725	54.45
1883	415.75	43.04	29.62	0.34443	0.05820	57.20
1958	415.02	46.52	32.05	0.34483	0.05958	59.85
2007	414.59	49.39	34.05	0.34509	0.06047	61.59
δ, %		269	274	1.5	42%	192

высокочастотного генератора достаточно большой мощности, дает возможность исследовать теплофизические свойства металлов на образцах больших размеров: длиной 70–90 мм, диаметром 10–12 мм. В этом случае при исследованиях в области высоких температур процесс распыления практически не сказывается на получаемых результатах, чего нельзя сказать в случае проволочных образцов. Одновременно исчезают сложности с определением абсолютной температуры,

РУМЯНЦЕВ и др.

<i>Т</i> , К	$ \rho_{\rm K} \cdot 10^8, {\rm Om} \cdot {\rm m} $	ρ ₁ · 10 ⁸ , Ом · м	ρ ₂ · 10 ⁸ , Ом · м	(р ₁₊₂) _{ср} · 10 ⁸ , Ом · м	$(\rho_2/\rho_1), \%$	$(\rho_{\kappa}/\rho_{cp}), \%$
1170	31.00	30.77	30.98	30.88	0.67	0.40
1270	34.89	34.36	34.53	34.64	0.64	0.71
1370	38.09	37.95	38.05	38.00	0.26	0.23
1470	41.44	41.54	41.64	41.59	0.24	-0.36
1570	45.63	45.13	45.41	45.27	0.62	0.80
1670	48.92	48.72	48.82	48.77	0.20	0.31
1770	52.21	52.31	52.27	52.29	-0.08	-0.15
1870	55.50	55.70	55.90	55.80	0.36	-0.53
1970	59.60	59.49	59.68	59.59	0.32	0.02
2070	63.51	63.08	63.35	63.22	0.43	0.46

Таблица 4. Сопоставление удельного электросопротивления молибдена, полученного разными методами

Примечание. Индекс "к" соответствует измерениям контактным методом; индексы 1 и 2 – измерениям бесконтактным методом соответственно при $n_1 = 1.22$ и $n_2 = 1.5$.

поскольку ее можно измерять по модели черного тела, а не по измеряемой яркостной температуре поверхности проволочного образца. Последнее требует знания спектральной степени черноты материала образца, которая неизвестна заранее и определяется, как правило, с большой погрешностью, что отразится на значениях рассчитываемой по ее величине истинной температуры образца. Дополнив эксперимент измерением яркостной температуры поверхности образца, можно определить и спектральную монохроматическую степень черноты.

Приведенный материал позволяет сформулировать следующее заключение. Эксперименталь-



Рис. 3. Удельное электросопротивление молибдена как функция температуры, измеренное: контактным методом (*1*); бесконтактным при $n_1 = 1.22$ (*2*); бесконтактным при $n_2 = 1.5$ (*3*).

но подтверждено, что результаты, полученные представленным бесконтактным методом для удельного электрического сопротивления технического молибдена, практически не отличаются от результатов при использовании стандартного контактного метода. Учитывая, что экспериментальное осуществление описанного бесконтактного метода отличается исключительной простотой, он может быть рекомендован в качестве предпочтительного перед всеми остальными, особенно в области высоких температур.

С целью повышения точности метода рекомендуется: использовать в экспериментах отношение диаметров контуров $n = d_{k1}/d_{k2} \sim 1.4$; применять двухсекционную катушку с тремя выводами и измерять напряжения U_1 , U_2 на каждой



Рис. 4. Расчетные значения мощности на единицу длины образца (показаны трендовые линии).

БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

<i>T</i> ₁ , K	$W(e_1, n_1, T_1)$	$W(e_2, n_1, T_1)$	<i>T</i> ₂ , K	$W(e_1, n_2, T_2)$	$W(e_2, n_2, T_2)$	ϵ_T
1171	3.546	3.528	1170	3.532	3.497	0.106
1285	5.904	5.870	1269	5.847	5.789	0.121
1353	7.828	7.808	1343	7.794	7.717	0.131
1411	9.873	9.863	1376	9.693	9.598	0.139
1443	11.174	11.144	1405	10.957	10.850	0.143
1500	13.811	13.772	1488	13.662	13.528	0.152
1561	17.168	17.142	1546	16.755	16.593	0.160
1621	21.113	21.048	1610	20.507	20.310	0.169
1702	27.475	27.398	1652	27.129	26.864	0.183
1778	34.862	34.720	1723	33.997	33.668	0.194
1853	43.551	43.442	1805	42.828	42.411	0.206
1912	51.698	51.522	1883	49.840	49.364	0.213
1975	61.497	61.336	1958	59.540	58.969	0.223
2025	70.426	70.198	2007	68.073	67.421	0.231

Таблица 5. Результаты расчета мощности $W(e_i, n_i, T_i)$, Вт/см, и степени черноты ε_T (i = 1, 2)

секции катушки и напряжение U_3 на последовательно соединенных секциях с последующим усреднением э.д.с. на один виток: $e_{cp} = [U_1/m_1 + U_2/m_2 + U_3/(m_1 + m_2)]/3$; заменить двухполюсный сдвоенный переключатель на многопозиционный переключатель с шестью позициями.

Метод является комплексным, так как позволяет одновременно находить полусферические интегральную и монохроматическую спектральную степени черноты исследуемого образца. Отметим, что метод может быть использован для измерения удельного электрического сопротивления не только твердых, но и, возможно, жидких металлов (формула для расчета вводимой в двухслойный металлический образец с разными значениями ρ_i мощности приведена в [4]). Метод не имеет отечественных и зарубежных аналогов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Бутыгин Ю.В., Гнатов А.В., Барбашова М.В., Гаврилова Т.В., Степанов А.А. // Електротехніка і електромеханіка. 2012. № 1. С. 69.
- 2. Поводатор А.М., Вьюхин В.В., Цепелев В.С. Патент № 2531056 РФ // Бюл. № 29. Опубл. 20.10.2014.
- 3. Кононенко В.И., Ражабов А.А., Рябина А.В. // Расплавы. 2009. № 1. С. 36.
- Румянцев А.В. // В сборнике "Вопросы сушки и полимеризации (источники нагрева)". Калининград: Изд-во КГУ, 1975. С. 38.
- 5. Бабат Т.М. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. М., Л.: Изд-во Энергия, 1965.
- 6. Листовничий В.Е. // ИФЖ. 1964. Т. 7. № 11. С. 157.
- Макаренко И.Н. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М.: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 1970.

149