

ЖАРАТЫЛЫСТАНУ ҒЫЛЫМДАР / ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ /  
NATURAL SCIENCES

DOI 10.54596/2309-6977-2022-4-7-12

УДК 548.736.398

МРНТИ 53.49.01

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ  
ИЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ

Зиновьев Л.А.<sup>1\*</sup>, Сельдюгаев О.Б.<sup>2</sup>, Гученко С.А.<sup>3</sup>

<sup>1\*,2,3</sup>Карагандинский университет им. Е.А. Букетова, Караганда, Республика Казахстан

\*E-mail: lzinovyev@yandex.ru

Аннотация

С целью использования четырехзондового метода для определения удельного сопротивления покрытия из высокоэнтропийных сплавов, проведены расчеты поправочных функций при определении удельного сопротивления на основе измерения разности потенциалов между зондами, размещенными на образце шестигранной формы из нержавеющей стали, покрытом проводящим покрытием. Учитывалось наличие границ с непроводящей средой (воздухом) и наличие проводящей подложки, на которую нанесено проводящее покрытие. Для расчета использовался метод зеркальных отображений. Получены поправочные функции для шестигранного образца с тонким покрытием.

**Ключевые слова:** удельное сопротивление; четырехзондовый метод; поправочная функция; метод зеркальных отображений; проводящая подложка; электродуговое напыление.

ЖОҒАРЫ ЭНТРОПИЯЛЫ ҚОРЫТПАЛАРДАН ЖАБЫНДАРДЫҢ МЕНШІКТІ  
КЕДЕРГІСІН АНЫҚТАУ

Зиновьев Л.А.<sup>1\*</sup>, Сельдюгаев О.Б.<sup>2</sup>, Гученко С.А.<sup>3</sup>

<sup>1\*,2,3</sup>Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды мемлекеттік университеті, Қарағанды,  
Қазақстан Республикасы

\*E-mail: lzinovyev@yandex.ru

Андатпа

Жоғары энтропиялы қорытпалар жабынының меншікті кедергісін анықтау үшін төрт зондты әдісті қолдану үшін, тот баспайтын болаттан жасалған алтыбұрышты үлгіге орналастырылған зондтар арасындағы потенциалдар айырмасын өлшеу негізінде меншікті кедергіні анықтау кезінде түзету функциялары есептелді. өткізгіш жабын. Өткізбейтін орта (ауа) бар шекаралардың болуы және өткізгіш жабыны бар өткізгіш субстраттың болуы ескерілді. Есептеу үшін айнадағы бейнелер әдісі қолданылды. Жұқа жабыны бар алтыбұрышты үлгі үшін түзету функциялары алынған.

**Негізгі сөздер:** кедергі; төрт зондты әдіс; түзету функциясы; айнадағы бейнелеу әдісі; өткізгіш субстрат; электр доғасымен бүрку.

# DETERMINATION OF THE SPECIFIC RESISTANCE OF COATINGS FROM HIGH-ENTROPY ALLOYS

Zinoviev L.A.<sup>1\*</sup>, Seldugaev O.B.<sup>2</sup>, Guchenko S.A.<sup>3</sup>

<sup>1\*,2,3</sup>Karaganda Buketov University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

\*E-mail: lzinovyev@yandex.ru

## Abstract

In order to use the four-probe method to determine the resistivity of a coating of high-entropy alloys, the correction functions were calculated when determining the resistivity based on measuring the potential difference between the probes placed on a hexagonal stainless steel sample coated with a conductive coating. The presence of boundaries with a non-conductive medium (air) and the presence of a conductive substrate with a conductive coating were taken into account. The method of mirror images was used for the calculation. Correction functions for a hexagonal sample with a thin coating are obtained.

**Key words:** resistivity; four-probe method; correction function; mirror image method; conductive substrate; electric arc spraying.

## Введение

Одним из основных методов измерения удельного сопротивления тонких покрытий является четырехзондовый метод, разработанный еще в середине пятидесятих годов прошлого века [1]. Сущность простейшей модификации метода заключается в расположении на поверхности тонкого проводящего слоя четырех зондов вдоль одной прямой линии. Зонды имеют точечный омический контакт с поверхностью. Обозначим эти зонды цифрами 1, 2, 3, 4. Измерения заключаются в пропускании через два крайних зонда электрического тока  $I_{14}$  и измерении разности потенциалов  $U_{23}$  между зондами 2 и 3. Для случая одинакового расстояния между зондами  $s$  и тонкого неограниченного проводящего слоя толщиной  $w$  ( $w \ll s$ ), нанесенного на непроводящую подложку, удельное сопротивление может быть рассчитано по формуле [2]

$$\rho = 2\pi s \frac{U_{23}}{I_{14}} \quad (1)$$

Здесь  $2\pi$  – поправочный коэффициент для данной конфигурации зондов и указанных условий.

Эта формула получена путем решения уравнения Лапласа в сферической системе координат для отдельного точечного зонда, через который протекает ток  $I$ . Поскольку задача имеет сферическую симметрию, то в уравнении остается лишь член, зависящий от расстояния от точки контакта зонда с поверхностью  $r$ , и оно принимает вид:

$$\nabla^2 U = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dU}{dr} \right) = 0 \quad (2)$$

Решение этого уравнения при граничном условии  $\lim_{r \rightarrow \infty} U(r) = 0$  дает выражение для потенциала в точке, удаленной на расстояние  $r$  от точки контакта зонда с поверхностью в виде:

$$U(r) = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (3)$$

Где  $I$  – ток через зонд,  $\rho$  – удельное сопротивление.

Дальнейшее нахождение разности потенциалов между зондами путем суперпозиции электрических полей и приводит к формуле (1). Она верна и для случая сферического контакта зонда с поверхностью.

Однако реальные условия измерений зачастую сильно отличаются от рассмотренного случая. Обычный способ учета реальных условий измерений заключается в расчете соответствующих поправочных коэффициентов к формуле (1), как, например, в работах [4, 5].

В нашем случае отличия заключаются в ограниченности размера образца (нельзя считать тонкий проводящий слой неограниченным) и нанесении проводящего тонкого слоя на проводящую подложку, проводимость которой одного порядка с проводимостью тонкого слоя.

В качестве параметра, влияющего на значение поправочного коэффициента, учитывающего ограниченность тонкого проводящего слоя, выступает отношение расстояния от зондов до границы слоя  $l$  к расстоянию между зондами  $s$  ( $l/s$ ).

Аналогичными параметрами для учета влияния проводящей подложки в случае нанесения тонкого проводящего слоя выступают отношение толщины слоя  $w$  к расстоянию между зондами  $s$  ( $w/s$ ) и параметр  $k$ , значение которого определяется соотношением удельных сопротивлений тонкого слоя  $\rho_1$  и удельного сопротивления подложки  $\rho_2$  [2, 3].

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (4)$$

Таким образом, с учетом изложенного, формула (1) должна выглядеть следующим образом:

$$\rho = 2\pi s f\left(\frac{l}{s}\right) g\left(\frac{w}{s}, k\right) \frac{U_{23}}{I_{14}} \quad (5)$$

где  $f(l/s)$  и  $g(w/s, k)$  – поправочные функции, учитывающие влияние границ образца и наличия проводящей подложки, соответственно.

Для учета влияния границ образца рассмотрим характеристики объекта, для которого рассчитываются поправочные функции.

В качестве объекта исследований выступает образец шестигранной формы, изготовленный из нержавеющей стали, на который методом электродугового напыления нанесено покрытие из высокоэнтропийного сплава.

Главным отличием расчета удельной электропроводности для образца шестиугольной формы, которое должно учитываться поправочной функцией  $f(l/s)$ , является наличие шести границ с непроводящей средой (воздухом).

Рассмотрим образец шестиугольной формы, в центре которого размещены четыре зонда на линии, перпендикулярной одной из граней. Расстояние между зондами будем считать одинаковым и равным  $s$ . Крайние зонды расположены на расстоянии  $l$  от соответствующих граней (рисунок 1)

Через зонды 1 и 4 протекает ток  $I$ . Будем считать ток через зонд 1 втекающим и положительным. Тогда через зонд 4 будет вытекать ток  $-I$ .

Для расчетов используем метод зеркальных отображений, широко используемый в электростатике.

Для этого симметрично изолирующей границе, в качестве которой для примера рассмотрим границу АВ, разместим два мнимых источника тока 5 и 6 таким образом, чтобы удовлетворить условию для изолирующей границы, которое требует, чтобы нормальная составляющая тока на границе, а, следовательно, и нормальная составляющая электрического поля, были равны нулю. Для выполнения этого граничного условия необходимо, чтобы знаки зеркальных источников тока совпадали со знаками реальных токов, протекающих через зонды 1 и 4. Далее рассчитаем значения потенциалов в точках 2 и 3 от каждого источника тока (токов через зонды 1 и 4 и мнимых токов в точках 5 и 6) и найдем разность потенциалов в точках 2 и 3 от каждого тока. Для этого используем выражение (3). В результате получим следующие выражения для разности потенциалов  $U_{23}$ , возникающей от соответствующего тока:

$$U_{23}^{(1)} = \frac{I\rho}{4\pi s}$$

$$U_{23}^{(4)} = \frac{I\rho}{4\pi s}$$

$$U_{23}^{(5)} = \frac{I\rho}{\pi} [(19s^2 + 32ls + 16l^2)^{-\frac{1}{2}} - (37s^2 + 40ls + 16l^2)^{-\frac{1}{2}}]$$

$$U_{23}^{(6)} = \frac{-I\rho}{\pi} [(61s^2 + 56ls + 16l^2)^{-\frac{1}{2}} - (67s^2 + 64ls + 16l^2)^{-\frac{1}{2}}]$$

В этих выражениях  $U_{23}^{(n)}$  – разность потенциалов между точками 2 и 3, создаваемой током, протекающим через точку  $n$ .

Для других изолирующих границ проведем аналогичные расчеты. Для этого введем мнимые токи 7 и 8 для границы ВС, 9 и 10 для границы CD, 11 и 12 для границы DE, 13 и 14 для границы EF, и 15, 16 для границы FA.

Полученные выражения для разности потенциалов между точками 2 и 3, созданной соответствующими токами приведены ниже:

$$U_{23}^{(7)} = \frac{I\rho}{\pi} [(67s^2 + 64ls + 16l^2)^{-\frac{1}{2}} - (61s^2 + 56ls + 16l^2)^{-\frac{1}{2}}]$$

$$U_{23}^{(8)} = \frac{-I\rho}{\pi} [(37s^2 + 40ls + 16l^2)^{-\frac{1}{2}} - (19s^2 + 32ls + 16l^2)^{-\frac{1}{2}}]$$

$$U_{23}^{(9)} = \frac{I\rho}{\pi} \left( \frac{s}{4s^2 + 12ls + 8l^2} \right)$$

$$U_{23}^{(10)} = \frac{-I\rho}{\pi} \left( \frac{s}{40s^2 + 36ls + 8l^2} \right)$$

$$U_{23}^{(11)} = \frac{-I\rho}{\pi} [(37s^2 + 40ls + 16l^2)^{-\frac{1}{2}} - (19s^2 + 32ls + 16l^2)^{-\frac{1}{2}}]$$

$$U_{23}^{(12)} = \frac{I\rho}{\pi} [(67s^2 + 64ls + 16l^2)^{-\frac{1}{2}} - (61s^2 + 56ls + 16l^2)^{-\frac{1}{2}}]$$

$$U_{23}^{(13)} = \frac{-I\rho}{\pi} [(61s^2 + 56ls + 16l^2)^{-\frac{1}{2}} - (67s^2 + 64ls + 16l^2)^{-\frac{1}{2}}]$$

$$U_{23}^{(14)} = \frac{I\rho}{\pi} [(19s^2 + 32ls + 16l^2)^{-\frac{1}{2}} - (37s^2 + 40ls + 16l^2)^{-\frac{1}{2}}]$$

$$U_{23}^{(15)} = \frac{I\rho}{\pi} \left( \frac{s}{4s^2 + 12ls + 8l^2} \right)$$

$$U_{23}^{(16)} = \frac{-I\rho}{\pi} \left( \frac{s}{40s^2 + 36ls + 8l^2} \right)$$

Суммируя полученные выражения, получим формулу для определения разности потенциалов  $U_{23}$ :

$$\begin{aligned} U_{23} = \frac{4I\rho}{\pi s} & \left( \left( 19 + 32\frac{l}{s} + 16\left(\frac{l}{s}\right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} - \left( 37 + 40\frac{l}{s} + 16\left(\frac{l}{s}\right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \right. \\ & - \left( 61 + 56\frac{l}{s} + 16\left(\frac{l}{s}\right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} + \left( 61 + 64\frac{l}{s} + 16\left(\frac{l}{s}\right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \\ & \left. + \left( 8 + 24\frac{l}{s} + 16\left(\frac{l}{s}\right)^2 \right)^{-1} - \left( 80 + 72\frac{l}{s} + 16\left(\frac{l}{s}\right)^2 \right)^{-1} + 0,125 \right) \end{aligned}$$

Находя отсюда  $\rho$  и сопоставляя с формулой (5) получим выражение для поправочной функции  $f(l/s)$ :

$$\begin{aligned} f\left(\frac{l}{s}\right) = & \left( 8 \left( \left( 19 + 32\frac{l}{s} + 16\left(\frac{l}{s}\right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} - \left( 37 + 40\frac{l}{s} + 16\left(\frac{l}{s}\right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \right. \right. \\ & - \left( 61 + 56\frac{l}{s} + 16\left(\frac{l}{s}\right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} + \left( 61 + 64\frac{l}{s} + 16\left(\frac{l}{s}\right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \\ & \left. \left. + \left( 8 + 24\frac{l}{s} + 16\left(\frac{l}{s}\right)^2 \right)^{-1} - \left( 80 + 72\frac{l}{s} + 16\left(\frac{l}{s}\right)^2 \right)^{-1} + 0,125 \right) \right)^{-1} \end{aligned}$$

Для учета влияния проводящей подложки и расчета поправочной функции необходимо в первую очередь знать распределение электрического потенциала в двухслойной структуре. В случае, когда толщина тонкого слоя значительно меньше

толщины подложки, проводящую подложку можно рассматривать как полубесконечную и в приближении сферической симметрии [2].

$$U(r, k) = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} k^n (r^2 + 4w^2 n^2)^{-\frac{1}{2}} \right]$$

где  $w$  – толщина тонкого слоя, параметр  $k$  определяется выражением (4), а  $\rho_1$  и  $\rho_2$  удельные сопротивления тонкого слоя и подложки соответственно. Расчеты разности потенциалов между зондами 2 и 3 (рис.1), и сравнение с формулой для удельного сопротивления, аналогичной (5) дают, как показано в [2] выражение для корректирующей функции  $g(w/s, k)$

$$g\left(\frac{w}{s}, k\right) = \left( 1 + 4 \sum_{k=1}^n \left( \frac{k^n}{\left(1 + \left(2\pi \frac{w}{s}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}} - \frac{k^n}{\left(4 + \left(2\pi \frac{w}{s}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}} \right) \right)^{-1}$$

#### Литература:

1. Valdes L.B. Resistivity Measurements on Germanium for Transistors // Proc. IRE. Feb. 1954. Vol. 42. P. 420–427.
2. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. - М.: Высшая школа, 1987. - 239 с.
3. Поклонский Н.А., Белявский С.С., Вyrко С.А., Лапчук Т.М. Четырехзондовый метод измерения электрического сопротивления полупроводниковых материалов. – Минск: изд. БелГУ, 1998, - 48 с.
4. Bowler N. Four-point potential drop measurements for materials characterization. Topical Review // Measurement Science and Technology. 2011. 22, 012001. P. 1–11.
5. Бурлаков Р.Б., Ковивчак В.С. К вопросу об измерении удельного сопротивления проводящих слоев четырехзондовым методом // Вестн. Омского. ун-та. 2014. № 2. С. 59–68.

#### References:

1. Valdes L.B. Resistivity Measurements on Germanium for Transistors // Proc. IRE. Feb. 1954. Vol. 42. P. 420–427.
2. Pavlov L.P. Metody izmereniya parametrov poluprovodnikovyyh materialov. - M.: Vysshaya shkola, 1987. - 239 s.
3. Poklonskiy N.A., Belyavskiy S.S., Vyrko S.A., Lapchuk T.M. Chetyrekhzondovyy metod izmereniya elektricheskogo soprotivleniya poluprovodnikovyyh materialov. – Minsk: izd. BelGU, 1998, - 48 s.
4. Bowler N. Four-point potential drop measurements for materials characterization. Topical Review // Measurement Science and Technology. 2011. 22, 012001. P. 1–11.
5. Burlakov R.B., Kovivchak V.S. K voprosu ob izmerenii udel'nogo soprotivleniya provodyashchih sloev chetyrekhzondovym metodom // Vestn. Omskogo. un-ta. 2014. № 2. S. 59–68.