Контактное электрическое сопротивление поверхности мельхиор–графит

А. В. Костановский, М. Г. Зеодинов, К. В. Хищенко, М. Е. Костановская и А. А. Пронкин

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, Москва, Россия

E-mail: kostanovskiy@gmail.com

Статья поступила в редакцию 7 декабря 2025 г.

Аннотация. Впервые представлены результаты экспериментального исследования контактного удельного электрического сопротивления поверхности, составленной из мельхиора (марка МН19-ВП, доля никеля от 18 до 20 вес. %) и графита (марка МПГ-7), в диапазонах изменения определяющей температуры от 300 до 600 К и силы тока от 0.5 до 60 А. Рассмотрен случай одной неподвижной контактной поверхности. Эксперимент реализован при пропускании постоянного электрического тока по образцу цилиндрической формы, который был установлен вертикально. Исследования проведены в вакууме при давлении 0.1 мПа. Показано, что контактное сопротивление уменьшается с ростом силы тока, температуры, давления на плоскость контакта (от 100 до 230 кПа) и не зависит от направления тока.

1. ВВЕДЕНИЕ

Контактное электрическое сопротивление, которое возникает на поверхности соприкосновения разноименных материалов, изучается достаточно интенсивно, поскольку встречается в широком круге прикладных задач [1, 2]. В электротехнике в качестве одного из двух материалов в контактной паре иногда используется мельхиор [2]. В качестве второго материала ранее применялся уголь, в настоящее время — графит (в электрографитных щетках), структура которого насыщена углеродом, что придает этому материалу высокую прочность и позволяет использовать при высоких токовых нагрузках.

Сочетание контактной пары мельхиора и графита является достаточно сложным для исследования, так как для мельхиора максимальная температура в плоскости контакта (температура размягчения) не должна превышать $T \approx 600$ К [2], графит же может использоваться при существенно более высоких температурах [3]. Кроме того никель, который входит в состав мельхиора, является ферромагнетиком и при $100 \leqslant T \leqslant 650$ К характеризуется нелинейной температурной зависимостью удельного электрического сопротивления (УЭС) ρ, в отличие от меди [4].

УЭС сплавов меди и никеля изучали в середине прошлого века для невысоких массовых долей никеля [5]. Исследования при $T = 300$ К показали, что при доле никеля 0.9 вес. % значение УЭС сплава составляет $\rho_{\text{alloy}} = 3\times10^{-8}$ Ом м, а при доле 5.3 вес. % — возрастает: $\rho_{\text{alloy}} = 8 \times 10^{-8}$ Ом м.

Температурная зависимость УЭС мельхиора (доля Ni 20 вес. %) исследовалась на воздухе при относительно невысоких температурах $T \leqslant 373$ К [4]. УЭС мельхиора при $T = 293$ К составляет $\rho_{\text{m}} \approx 2.7 \times 10^{-7}$ Ом м, УЭС графита — $\rho_{\text{gr}} \approx 1.4 \times 10^{-5}$ Ом м.

Различие на два порядка значений УЭС мельхиора и графита позволяет при исследовании контактного электрического сопротивления применить метод экстраполяции [6]. Эта методика, как правило, используется при изучении контактного сопротивления поверхности, составленной из металла и полупроводника. При этом предполагается, что “длина” плоскости контакта (ПК) вдоль продольной оси образца предполагается равной нулю, так как размер шероховатости этой поверхности (около 50 мкм) намного меньше расстояния, на котором размещены зонды друг от друга: $50 \times 10^{-6}/(4.5 \times 10^{-3}) \ll 1$. Метод экстраполяции в данной постановке может использоваться и для экспериментального изучения контактного сопротивления поверхности, составленной из мельхиора и графита.

Целью настоящей работы является измерение контактного УЭС пары мельхиор–графит $\rho_{\text{m}-\text{gr}}$ в вакууме методом экстраполяции в области изменения температуры от 300 до 600 К, силы тока от 0.5 до 60 А и давления внешней нагрузки на ПК от 100 до 230 кПа.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Метод экстраполяции реализуется следующим образом (рисунок 1). На металле около ПК устанавливается один зонд с номером $i = 0$, на полупроводнике размещаются несколько зондов с номерами i от 1 до n на различных расстояниях r_i от ПК. При фиксированном значении силы тока I измеряется разность потенциалов U_i между зондами 0–1, 0–2, ..., 0–n и строится график зависимости сопротивления от расстояния до ПК, $R_i = U_i/I = f(r_i)$, полученную функциональную зависимость экстраполируют на ПК ($r_i = 0$). В данном методе предполагается, что величиной разности потенциалов между нулевым зондом и ПК можно пренебречь, поскольку УЭС металла много меньше УЭС полупроводника (графита). Следовательно, измеряемые значения U_i равны разности потенциалов между ПК и соответствующим зондом, который установлен на полупроводнике (графите).

Описание экспериментальной установки приведено в работе [7].

Измерения проводили в вакууме, при прохождении постоянного тока по составному образцу. Нижняя часть экспериментального образца представляла собой цилиндрический стержень диаметром $d = 7.81$ мм и рабочей длиной 26 мм (общая длина 50 мм), изготовленный из мельхиора марки МН19-ВП (доля никеля 18–20 вес. %, по ГОСТ 492-2006 суммарная массовая доля примесей не выше 1.5 вес. %). Верхняя часть образца так же представляла собой цилиндрический стержень диаметром $d = 7.81$ мм и рабочей длиной 58 мм, который был выточен перпендикулярно направлению прессования из заготовки графита марки МПГ-7.

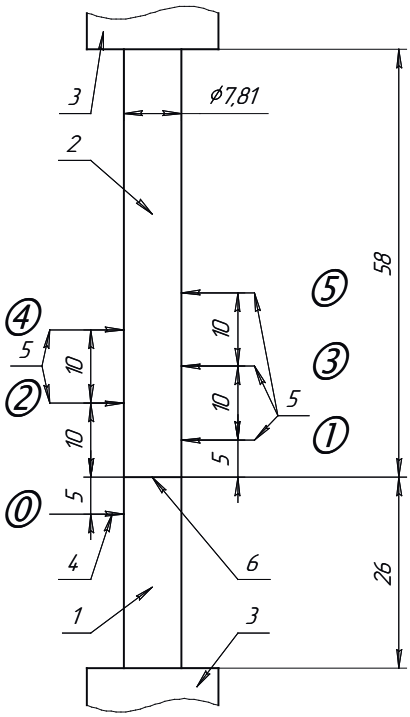

Рисунок 1. Принципиальная схема экспериментального образца с зондами: 1 — мельхиор; 2 — графит; 3 — токоподводы; 4 — нулевой зонд; 5 — зонды 1–5; 6 — плоскость контакта. Расстояния между зондами указаны для примера.

Шероховатость поверхности мельхиора в ПК приблизительно равняется 50 мкм, шероховатость поверхности графита так же приблизительно равна 50 мкм.

Составной экспериментальный образец общей длиной 84 мм был установлен вертикально. Для совпадения продольных осей двух частей экспериментального образца, по его периметру располагали вертикально три цилиндрических кварцевых стержня (диаметр 3 мм) таким образом, что угол между ними в сечении, перпендикулярном продольной оси образца, равнялся 120°. На верхнем торце экспериментального образца размещали весовую нагрузку известной массы.

Питание к образцу подводили цилиндрическими охватывающими токоподводами, внутренний диаметр которых равнялся внешнему диаметру экспериментального образца (скользящая посадка). Силу тока I измеряли вне камеры, используя шунт марки 75 ШСММ3-200-0.5 и вольтметр APPA 303. Для измерения падения напряжения между зондами U_i применяли точечные поверхностные потенциальные зонды, выполненные из прутка молибдена диаметром 2 мм, заточенные на конце до диаметра 0.05 мм. Эти зонды положительно зарекомендовали себя при измерении контактного УЭС графита [8] и карбида кремния [9]. Нулевой зонд ($i = 0$) был установлен на мельхиоре на расстоянии 5.00 и 4.50 мм от ПК (в сериях 1 и 2 соответственно); зонды на графите располагались на расстояниях, указанных в таблице 1.

Падение напряжения на зондах измеряли вольтметром марки APPA 303. Таким образом, для измерения электрических характеристик применялась двухзондовая схема [10], в которой падение напряжения измеряется на образце, сила тока — вне образца.

Таблица 1. Расстояния от ПК до зондов на графите.

Зонд i	r_i, мм Серия 1	Серия 2
1	4.50	4.75
2	10.25	10.25
3	14.75	15.00
4	20.25	20.25
5	25.50	25.75

Для измерения температуры использовали два термометра сопротивления марки Pt1000 class A, модель M 213 с поперечными размерами измерительной ячейки 1.7 и 1.25 мм (эквивалентный диаметр — 1.65 мм). Первый термометр сопротивления был установлен на боковой цилиндрической поверхности образца мельхиора на расстоянии 2.5 мм от ПК (серии 1 и 2), второй — на поверхности графита на расстоянии 29.5 мм от ПК (серии 1 и 2). Первый термометр сопротивления использовался для контроля значения T с целью не превысить допустимую температуру размягчения мельхиора в ПК [2]. Второй термометр сопротивления применяли для измерения температуры графита в области, где влияние контактного сопротивления минимально, и измеряемые значения T можно рассматривать в качестве определяющей температуры для образца, в котором отсутствует ПК. Сигналы с термометров сопротивления преобразовывали в температуру, используя микропроцессорный двухканальный измеритель марки 2ТРМ0 (ООО “ОВЕН”). Подключение термометров сопротивления к измерителю выполнено по трехпроводной схеме, что позволяет компенсировать сопротивление подводящих проводов.

Исследования контактного УЭС проводили в вакууме при давлении $P = 0.1$ мПа, в стационарном тепловом режиме со временем выдержки не менее 20 минут при нагреве и около 40 минут при охлаждении. Весовую нагрузку на ПК последовательно увеличивали после проведения цикла исследований влияния силы тока и температуры на контактное электрическое сопротивление. С целью проверки воспроизводимости результатов определения контактного УЭС были проведены две серии исследований, в которых использовали новые образцы мельхиора и графита идентичного размера. Указанная постановка эксперимента позволила изучить случай одной неподвижной контактной поверхности мельхиор–графит.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Предварительно в экспериментах была определена зависимость УЭС графита $\rho_{\rm gr}$ от определяющей температуры T в диапазоне от 300 до 600 К (ПК отсутствует, изотермический участок), которая с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0.99$ соответствует линейной функции:

$$\rho_{\rm gr} = \frac{\pi d^2}{4I}\frac{U}{L} = A + BT, \qquad (1)$$

где L — расстояние между зондами; $A = 8.2066$ мкОм м, $B = 1.3921$ мкОм м кК$^{-1}$.

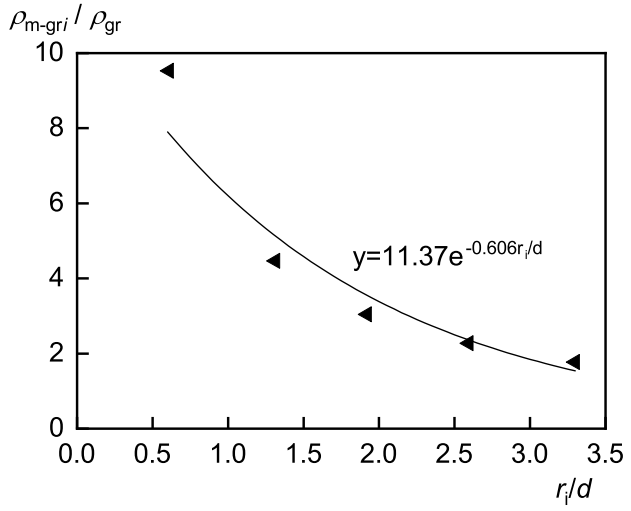

Рисунок 2. Зависимость $\rho_{\mathrm{m-gr}i}/\rho_{\mathrm{gr}}$ от относительного расстояния r_i/d.

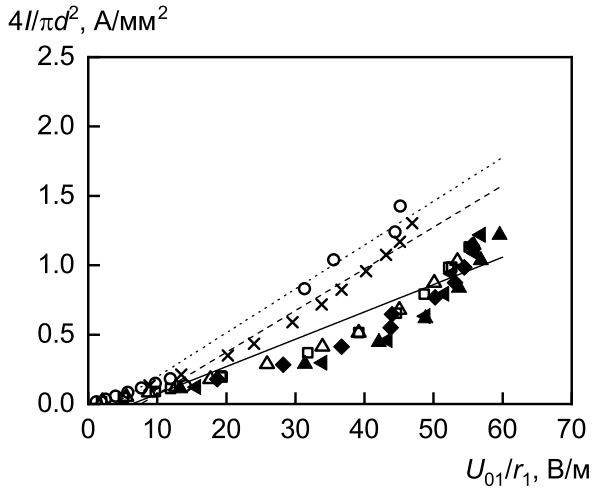

Рисунок 3. Плотность тока $4I/(\pi d^2)$ как функция падения напряжения на единицу длины U_{01}/r_1 для поверхности мельхиор–графит при $P = 100$ (⧫, □, ▲, △, ◄), 170 (×) и 230 кПа (○) в условиях нагрева (⧫, ▲, ◄) и охлаждения (□, △, ×, ○) в сериях 1 (⧫, ×, ○) и 2 (□, ▲, △, ◄) при подключении анода к верхнему (⧫, □, ▲, △, ×, ○) или нижнему торцу образца (◄): линии — кривые тренда для ▲ (сплошная), × (штриховая) и ○ (пунктирная).

Согласно методу экстраполяции падение напряжения между зондами 0 и $i = 1 - 5$ предполагается равным падению напряжения между ПК и точкой $r_{\mathrm{gr}i}$, так как УЭС мельхиора на два порядка меньше УЭС графита. Измерение контактного УЭС проводится на участке образца с более высоким УЭС, то есть графита. При заданном значении силы тока I значение контактного УЭС $\rho_{\mathrm{m-gr}i}$ на расстоянии r_i от ПК рассчитывается по следующей формуле:

$$\rho_{\mathrm{m-gr}i} = \rho_{\mathrm{ex}i} - \rho_{\mathrm{gr}}, \tag{2}$$

где $\rho_{\mathrm{ex}i}$ — экспериментальное значение удельного сопротивления, которое представляет собой сумму УЭС графита, соответствующего условию, когда ПК отсутствует (ρ_{gr}), и искомого контактного УЭС — $\rho_{\mathrm{m-gr}i}$.

Значение $\rho_{\mathrm{ex}i}$ рассчитывается по формуле

$$\rho_{\mathrm{ex}i} = \frac{\pi d^2}{4I}\frac{U_{0i}}{r_i}, \tag{3}$$

где U_{0i} — падение напряжения между зондами 0 и i.

Решение системы уравнений (1)–(3) позволяло рассчитать пять значений $\rho_{\mathrm{m-gr}i}$. Зависимость $\rho_{\mathrm{m-gr}i}/\rho_{\mathrm{gr}}$ от расстояния между ПК и зондом i, отнесенного к диаметру образца d, r_i/d, аппроксимировали экспоненциальной функцией, которую, в свою очередь, экстраполировали на значение абсциссы $r_i/d = 0$ (которое соответствует ПК), определяя максимальную величину контактного УЭС — $\rho_{\mathrm{m-gr0}}$. Пример указанной обработки экспериментальных данных приведен на рисунке 2.

В результате становится возможным оценить превышение максимального значения $\rho_{\mathrm{m-gr0}}$ над УЭС графита ρ_{gr}, которое имеет место в отсутствии ПК при одинаковых значениях силы тока и температуры ($I = \mathrm{idem}$, $T = \mathrm{idem}$).

При обработке была выявлена следующая закономерность. Более высокие значения контактного УЭС $\rho_{\mathrm{m-gr0}}/\rho_{\mathrm{gr}}$ оказывают влияние на распределение падения напряжения вдоль продольной оси образца на большем расстоянии от ПК. При $\rho_{\mathrm{m-gr0}}/\rho_{\mathrm{gr}} \approx 10$ протяженность зоны, где влияние было заметно, составило около $3d$; при $\rho_{\mathrm{m-gr0}}/\rho_{\mathrm{gr}} \approx 6$ — около $2d$ с тем же давлением ($P = \mathrm{idem}$).

На участке мельхиора вблизи ПК наблюдается небольшое повышение температуры (около 1 К), которое на порядок меньше измеренных величин на участке графита (около 46 К). Следовательно, ПК является точкой разрыва для поля температуры и поля падения напряжения.

Первоначально были проанализированы исходные экспериментальные электрические величины. На рисунке 3 приведены вольт-амперные зависимости для падения напряжения между нулевым и первым зондами U_{01}, расположенными ближе других к ПК. Область между этими зондами является зоной наибольшего влияния контактного сопротивления. Предварительно был проведен специальный эксперимент, в котором измеряли падение напряжения между зондами 0 и 1 при отключенном электрическом токе $U_{\text{ЭДС}01}$ и созданном перепаде температуры между ПК и первым зондом (46 К), аналогичном возникающему при условии прохождения электрического тока $I = 55.7$ А, а $U_{01} = 0.22$ В. Таким образом, была проведена оценка возможного влияния термо-ЭДС мельхиор–молибден (зонд) и графит–молибден на величину U_{01}. Этот эксперимент показал, что $U_{01} \gg U_{\text{ЭДС}01}$.

Вольт-амперные кривые на рисунке 3 построены в виде зависимости плотности тока $4I/(\pi d^2)$ от падения напряжения, рассчитанного на единицу длины, U_{01}/r_1. Нижняя группа кривых отвечает внешнему давлению 100 кПа. Анализ этих кривых показывает, что отсутствует выраженное влияние направления процесса нагрева или охлаждения, имеет место воспроизводимость данных от серии к серии, и изменение направления тока (полярность) не оказывает воздействия на вольт-амперную зависимость. Тот факт, что изменение направления тока не оказывает влияния на измеряемые

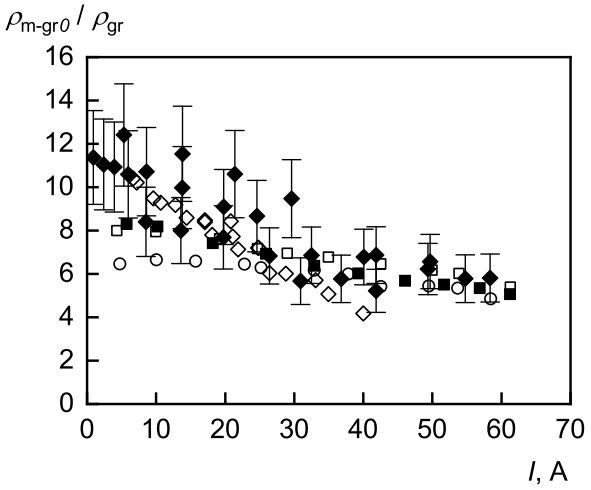

Рисунок 4. Зависимость $\rho_{\mathrm{m-gr0}}/\rho_{\mathrm{gr}}$ от силы тока I для поверхностей мельхиор–графит (♦, □, ■, ∘) и медь–графит (◊) при $P = 100$ (♦), 170 (□, ■) и 230 кПа (∘, ◊) в условиях нагрева (□, ■, ∘) и охлаждения (◊) обобщенно в двух сериях (♦) и отдельно в серии 2 (□, ■, ∘) при подключении анода к верхнему (□) или нижнему торцу образца (■, ∘).

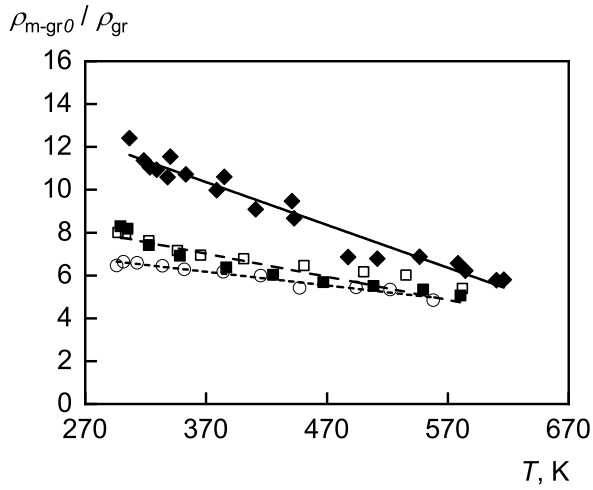

Рисунок 5. Зависимость $\rho_{\mathrm{m-gr0}}/\rho_{\mathrm{gr}}$ от температуры для поверхности мельхиор–графит (♦, □, ■, ∘) при $P = 100$ (♦), 170 (□, ■) и 230 кПа (∘) в условиях нагрева (□, ■, ∘) обобщенно в двух сериях (♦) и отдельно в серии 2 (□, ■, ∘) при подключении анода к верхнему (□) или нижнему торцу образца (■, ∘).

электрические величины, подтверждается данными эксперимента при оценке $U_{\text{ЭДС01}}$.

Также из рисунка 3 следует, что повышение внешнего давления приводит к понижению общего сопротивления, что является характерным для контактного сопротивления [1]. Можно сделать вывод, что при плотности тока $4I/(\pi d^2) < 0.2$ А/мм^2 влияние всех рассмотренных факторов нивелируется и, наоборот, при плотности тока $4I/(\pi d^2) > 0.2$ А/мм^2 влияние условий проведения эксперимента начинает заметно проявляться. В частности, вольт-амперные кривые не являются строго линейными функциями. Ранее [11] были изучены аналогичные вольт-амперные кривые для ПК между медью и графитом. Было показано, что вольт-амперные кривые для пары медь–графит подчиняются линейной зависимости [11] с достоверностью аппроксимации $R^2 \approx 0.93$ около ПК. Для случая пары мельхиор–графит достоверность аппроксимации вольт-амперных кривых линейной функцией изменяется в диапазоне значений $0.94 < R^2 < 0.97$, то есть эти кривые характеризуются аналогичным поведением. В обоих экспериментах (медь–графит и мельхиор–графит) при удалении от ПК наблюдалось восстановление линейной зависимости для вольт-амперных кривых.

Рисунки 4 и 5 иллюстрируют влияние силы тока и температуры на величину отношения $\rho_{\mathrm{m-gr0}}/\rho_{\mathrm{gr}}$. Из этих рисунков следует, что контактные явления проявляются более сильно при низких значениях силы тока и температуры. Это означает, что электрические цепи, которые работают при низких токовых нагрузках, оказываются подвержены большему воздействию контактных явлений, чем цепи, которые работают при высоких токах I. Функции $\rho_{\mathrm{m-gr0}}/\rho_{\mathrm{gr}}$, как от температуры, так и от силы тока, характеризуются линейной зависимостью с достоверностью аппроксимации $R^2 \approx 0.95$.

Влияние внешнего давления, действующего на ПК, можно понять из результатов, показанных на рисунке 6. Из этих результатов следует, что ПК, которые находят-

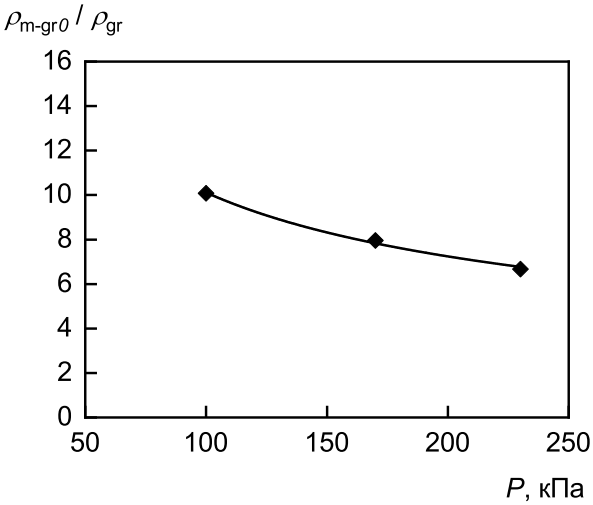

Рисунок 6. Зависимость $\rho_{\mathrm{m-gr0}}/\rho_{\mathrm{gr}}$ от внешнего давления P при силе тока $I = 10$ А.

ся под более высоким внешним давлением P, характеризуется меньшим значением контактного УЭС. Зависимость $\rho_{\mathrm{m-gr0}}/\rho_{\mathrm{gr}}$ от внешнего давления P (кПа) при силе тока 10 А подчиняется показательной функции:

$$\frac{\rho_{\mathrm{m-gr0}}}{\rho_{\mathrm{gr}}} = CP^{-\delta} \tag{4}$$

($C = 96.38$ кПа, $\delta = 0.49$), что коррелирует с данными для других сочетаний контактирующих материалов [1].

Суммарная относительная погрешность определения величины $\rho_{\mathrm{m-gr0}}/\rho_{\mathrm{gr}}$ получается около 19% и определяется в основном процедурой экстраполяции $\approx 10\%$.

Если проводить сравнение контактного сопротивления пар материалов мельхиор–графит и медь–графит, то можно заметить следующее. Функции $\rho_{\mathrm{m-gr0}}/\rho_{\mathrm{gr}}$ от силы тока и температуры для второй пары имеют

так же убывающий характер [11], но имеют меньшие значения, чем для первой пары, при прочих равных условиях (что можно видеть на рисунке 4). Это связано, по-видимому, с тем, что УЭС меди меньше, чем УЭС мельхиора. Подобная взаимосвязь между контактным сопротивлением и УЭС исследуемого материала ранее была экспериментально определена в работе [1].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые приведены результаты экспериментального исследования контактного УЭС одной неподвижной контактной поверхности между мельхиором (марка МН19-ВП) и графитом (марка МПГ-7). Впервые показано, что сопротивление контакта мельхиор–графит, измеренное в вакууме, уменьшается с ростом силы тока (от 0.5 до 60 А), температуры (от 300 до 600 К) и давления на ПК (от 100 до 230 кПа), и при этом практически не зависит от направления тока. Сравнение с данными, полученными для ПК медь–графит и мельхиор–графит, показало, что контактное УЭС уменьшается с ростом силы тока в обоих случаях, но характеризуются при $I = \mathrm{idem}$ для ПК мельхиор–графит более высокими значениями.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00269-25-00 от 26 декабря 2024 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Holm R 1961 *Elektrische Kontakte* (Berlin: Springer)
2. Чунихин А А 1988 *Электрические аппараты. Общий курс* (Москва: Энергоатомиздат)
3. Зеодинов М Г, Костановский А В, Костановская М Е и Пронкин А А 2022 *ТВТ* **60** 789–792
4. Корицкий Ю В, Пасынков В В и Тареев Б М (ред.) 1988 *Справочник по электротехническим материалам* т. 3 (Ленинград: Энергоатомиздат)
5. Touloukian Y S (ed) 1967 *Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials. Volume 2. Nonferrous Alloys. Part 1. Nonferrous Binary Alloys* (New York, NY, USA: Macmillan)
6. Berger H H 1972 *J. Electrochem. Soc.* **119** 507–514
7. Костановский А В, Зеодинов М Г, Пронкин А А и Костановская М Е 2023 *Приборы и техника эксперимента* **6** 181–188
8. Костановский А В, Зеодинов М Г, Пронкин А А и Костановская М Е 2024 *ТВТ* **62** 363–367
9. Костановский А В, Зеодинов М Г, Хищенко К В, Костановская М Е и Пронкин А А 2025 *ТВТ* **63** 474–481
10. Racette J H 1957 *Phys. Rev.* **107** 1542–1544
11. Костановский А В, Зеодинов М Г, Костановская М Е и Пронкин А А 2026 *ТВТ* **64** Принята к печати