

УДК 537.311.4

КОНТАКТНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГРАФИТА МАРКИ МПГ-7 ПРИ ПОСТОЯННОМ И ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

© 2022 г. М. Г. Зеодинов*, А. В. Костановский**, М. Е. Костановская, А. А. Пронкин***

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия***E-mail: mz.64@mail.ru****E-mail: Kostanovskiy@gmail.com*****E-mail: Pronkin.A.A@gmail.com*

Поступило в редакцию 21.07.2021 г.

После доработки 08.09.2022 г.

Принято к публикации 14.09.2022 г.

В работе сравниваются величины контактного сопротивления, которое возникает при прохождении через одну неподвижную контактную поверхность переменного или постоянного электрического тока. Сравнение проводится на графите марки МПГ-7 в идентичных экспериментальных условиях. Диапазон изменения температуры составлял 350–750 К. Падение напряжения измерялось несколькими точечными поверхностными зондами, что позволяло одновременно определять контактное сопротивление на разных расстояниях от контактной поверхности. Показано, что удельное контактное электрическое сопротивление и контактное сопротивление оказываются выше при пропуске постоянного тока, чем при использовании переменного тока.

DOI: 10.31857/S0040364422050179

ВВЕДЕНИЕ

В электроэнергетике часто применяются контактирующие сочетания различных материалов достаточно протяженных размеров. Электрическое контактное сопротивление (КС) представляет собой сопротивление, которое возникает в результате соединения двух образцов одного или разных материалов. Повышенный интерес к исследованию КС вызван, в частности, изучением процесса сварки, поэтому основные измерения были выполнены при пропуске постоянного тока по образцу, составленному из одного и того же материала [1]. Экспериментально было показано, что величина КС прямо пропорционально связана с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) монолитного материала. Наиболее высокие значения КС зафиксированы у углеграфитовых материалов. В России КС экспериментально определено, по видимому, только для одной марки графита (ГМЗ), причем использовался переменный электрический ток [2]. Цель данной работы заключается в изучении влияния вида источника питания (постоянный или переменный ток) на величину КС, измеренного в идентичных экспериментальных условиях и на одной марке графита.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследования проводились на сплошном цилиндре радиусом $r = 3.905$ мм и длиной 124 мм, изготовленном из графита марки МПГ-7. Обра-

зец устанавливался в вертикальном положении, после чего по нему пропускался переменный или постоянный электрический ток (рис. 1). Сила тока I , проходящего по образцу, измерялась с помощью 100 А шунта и вольтметра марки GDM-8246. Несколько точечных поверхностных зондов устанавливались попарно на одинаковом расстоянии от контактной поверхности $l_{\text{проб}}(i)$, что позволяло одновременно определять падение напряжения на участках разной длины $U(i)$. Падение напряжения между каждой парой зондов, равноудаленных от контактной поверхности, измерялось вольтметрами GDM-8135. Предварительные эксперименты показали, что расстояние, на котором выполняется изотермическое приближение, находится в центральной части образца и составляет не менее 50 мм. В основном эксперименте температура измерялась в двух сечениях на расстоянии ~40 мм друг от друга хромель-копелевыми термопарами с диаметром королька 0.5 мм, размещенными внутри образца. Зонды устанавливались между термопарами. Термопары намеренно выводились из области проведения электрических измерений, так как отверстия, просверленные для установки термопар, могли вносить дополнительную погрешность в определяемые величины УЭС и КС. Диапазон исследуемых температур составлял 350–750 К, переход между режимами измерения выполнялся последовательным повышением или понижением температуры с шагом 50–100 К. Эксперименты реализованы в стационарном тепловом режи-

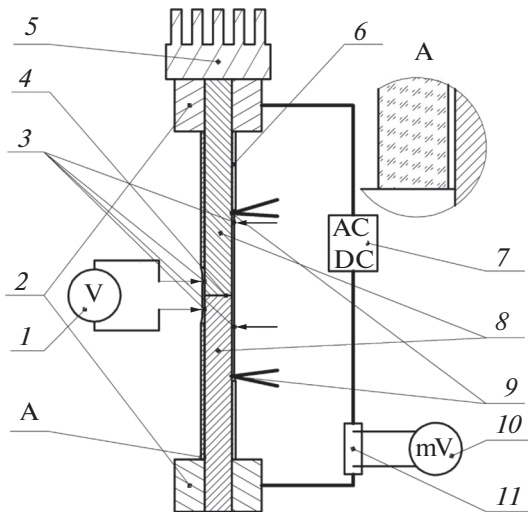


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального образца: 1 – вольтметр для измерения падения напряжения между зондами, 2 – токоподводы, 3 – поверхностные зонды, 4 – контактная поверхность, 5 – гиря, 6 – кварцевая трубка, 7 – источники питания постоянного и переменного тока, 8 – два элемента экспериментального образца, 9 – термопары, 10 – вольтметр, 11 – эталонное сопротивление.

ме, время предварительной выдержки составляло не менее 10 мин. Первые эксперименты проводились на сплошном цилиндре с целью определения УЭС монолитного образца. При наличии контактной поверхности центральная часть образца помещалась в кварцевую тонкостенную трубку, что позволяло сохранить соосность двух элементов образца. Специальные эксперименты показали, что кварцевый цилиндр не оказывает влияния на результаты определения КС. Исследования реализованы на воздухе. Для изучения влияния силы давления на величину КС на верхний торец образца помещали гири известной массы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изучение КС удобно проводить в сравнении с величиной УЭС монолитного образца, которая рассчитывается по известной формуле

$$\rho = \frac{U\pi r^2}{I_{\text{проб}}}$$

Ранее экспериментально было установлено [3], что для графита марки МПГ-7 величины УЭС, измеренные на образцах, которые были вырезаны параллельно направлению приложения давления при прессовании ρ^{\perp} , имели большой разброс, тогда как величины УЭС, измеренные в направлении, перпендикулярном направлению прессования ρ^{\perp} , характеризовались хорошей воспроизводимостью. В данной работе КС и УЭС монолитного материала определялись на образцах,

вырезанных перпендикулярно направлению приложения давления в процессе прессования.

Следует отметить, что для расчета контактного электрического сопротивления в цепи переменного тока необходимо оперировать понятиями активного и реактивного сопротивлений (импеданса). Однако в данном случае при реализации эксперимента на рабочем участке, выполненном как образец (активная нагрузка) – токоподвод – источник питания, электрическую цепь можно рассматривать в приближении одного витка. Оценки показывают [4], что различие между полным и активным электрическими сопротивлениями составляет 0.3%. Это свидетельствует о том, что в частном случае можно выводить расчетные соотношения, используя классический закон Ома для постоянного тока.

При определении удельного электрического КС для одной контактной поверхности $\rho_{\text{ксл}}$ (Ом м), образованной при соединении двух участков образца графита, используется формула [2]

$$\rho_{\text{ксл}}(T) = U\pi r^2 / (I_{\text{проб}}) - \rho^{\perp}(T). \quad (1)$$

В формуле (1) предполагается, что величина $l_{\text{проб}}$ равна длине двух участков, состоящих из монолитного материала, при этом протяженность контактной поверхности является бесконечно малой величиной. Первоначально полагается, что КС проявляется только в плоскости контакта и измеряемые значения $\rho_{\text{ксл}}$ не должны зависеть от расстояния до контактной поверхности [1]. По-видимому, по этой причине авторы [2] провели измерения $\rho_{\text{ксл}}$ графита марки ГМЗ на одном расстоянии от контактной поверхности при $l_{\text{проб}}/r \approx 7.4$ и получили, что по сравнению с УЭС монолитного материала $\rho_{\text{ксл}}$ выше на ~10%. Данные результаты позволили сделать ошибочный вывод, что влияние КС не является значительным. В результате измерений величины падения напряжения между зондами, размещенными на различном расстоянии от контактной поверхности, в данной работе обнаружено, что имеет место влияние расстояния $l_{\text{проб}}(i)$ на величину $\rho_{\text{ксл}}(i)$. Во-первых, это означает, что контактные явления не ограничены только плоскостью, по которой соприкасаются элементы образца. Во-вторых, для оценки максимального значения удельного КС необходимо находить предел:

$$\left(\frac{\rho_{\text{ксл}}(l_{\text{проб}}(i)/r)}{\rho^{\perp}} \right)_{\text{max}} = \lim_{l_{\text{проб}}(i)/r \rightarrow 0} \frac{\rho_{\text{ксл}}(l_{\text{проб}}(i)/r)}{\rho^{\perp}}$$

Зависимость $\rho_{\text{ксл}}(i)/\rho^{\perp} \sim f(l_{\text{проб}}(i)/r)$ задана экспоненциальной функцией и определено (достоверность аппроксимации $R^2 \geq 0.986$), что при постоянном токе, давлении $P = 32$ кПа (масса гири – 160 г) и $T = 400$ К $(\rho_{\text{ксл}}(i)/\rho^{\perp})_{\text{max}} \approx 26$. Вели-

чина отношения $(\rho_{ксл}(i)/\rho^\perp)_{\max}$ более чем на два порядка превышает значения, приведенные в [2]. На рис. 2 представлены результаты сравнения относительных значений удельного электрического КС $\rho_{ксл}(i)/\rho^\perp$ в зависимости от относительного расстояния между зондами $l_{проб}/r$, которые были измерены при пропускании постоянного и переменного тока при $P = 32$ кПа и $T = 400$ и 700 К. Аппроксимирующие кривые построены по уравнениям:

$$\frac{\rho_{ксл}}{\rho^\perp} = 25.96299e^{-0.28374 \frac{l_{проб}}{r}}, \quad (2)$$

$$\frac{\rho_{ксл}}{\rho^\perp} = 14.08986e^{-0.22955 \frac{l_{проб}}{r}}, \quad (3)$$

для постоянного и переменного тока соответственно.

При использовании постоянного тока величина $\rho_{ксл}(i)/\rho^\perp$ оказывается выше на ~35%, чем при пропускании по образцу переменного тока ($l_{проб}/r \approx 1.5$ и $T = 400$ К). При приближении к контактной поверхности данное различие будет возрастать.

Экспериментальные зависимости $\rho_{ксл}(i) \sim f(l_{проб}(i))$ могут быть использованы для численного моделирования с целью оценить дополнительное повышение температуры в области, прилегающей к контактной поверхности.

С увеличением температуры при прочих равных условиях отношение $\rho_{ксл}(i)/\rho^\perp$ уменьшается. Этот вывод качественно совпадает с результатами литературных источников [2, 5, 6].

Влияние силы давления на величину КС можно представить в форме, которая используется в работе [1]. Величина КС для одной контактной поверхности $R_{ксл}$ (Ом) определяется следующим образом [1]:

$$R_{ксл}(T) = U_{проб}/I - \rho^\perp(T)l_{проб}/(\pi r^2).$$

В данной формуле так же, как и в (1), используется гипотеза, что протяженность контактной поверхности много меньше длины $l_{проб}$.

Дополнительно предполагается, что реальная площадь контакта может быть много меньше площади, по которой соприкасаются элементы экспериментального образца, поэтому в [1] переход к $\rho_{ксл}$ не используется. На рис. 3 в форме, которая используется в [1], приведены результаты определения КС графита МПГ-7 $R_{ксл}$, измеренные при $T = 400$ К и на минимальном расстоянии $l_{проб} = 5.89$ мм между зондами в зависимости от силы веса $G = 160, 380$ и 520 г, приложенного к верхнему торцу образца. Выбранная для рис. 3 форма представления экс-

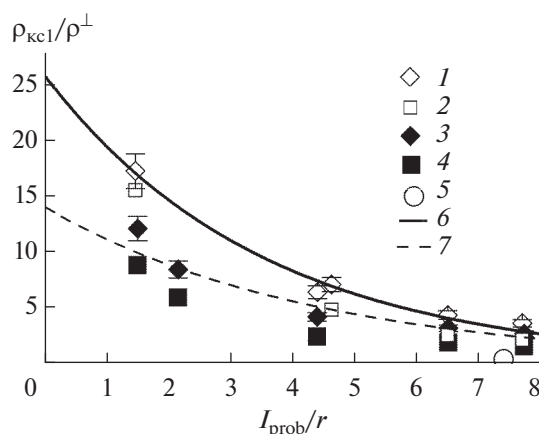


Рис. 2. Относительное удельное КС $\rho_{ксл}/\rho^\perp$ в зависимости от относительного расстояния между зондами $l_{проб}/r$ при $P = 32$ кПа: 1 – постоянный ток, $T = 400$ К; 2 – 700 ; 3 – переменный ток, $T = 400$ К; 4 – 700 ; 5 – графит марки ГМЗ, [2]; 6 – аппроксимирующая зависимость (2) для постоянного тока; 7 – (3) для переменного тока.

периментальных результатов позволяет сравнить их с данными для углеграфитовых материалов иностранного производства и использовать теоретические зависимости для $R_{ксл} = f(G)$ [1]. Зависимость $R_{ксл} = f(G)$ является убывающей при увеличении приложенной внешней нагрузки для графитов иностранного производства и для графита МПГ-7. Как в случае удельного КС $\rho_{ксл}$, величины $R_{ксл}$ оказываются несколько выше при использовании постоянного тока по сравнению с результатами, измеренными при переменном токе. Привлечение теоретической методики позволило показать, что $R_{ксл}$ подчиняется обратной степенной

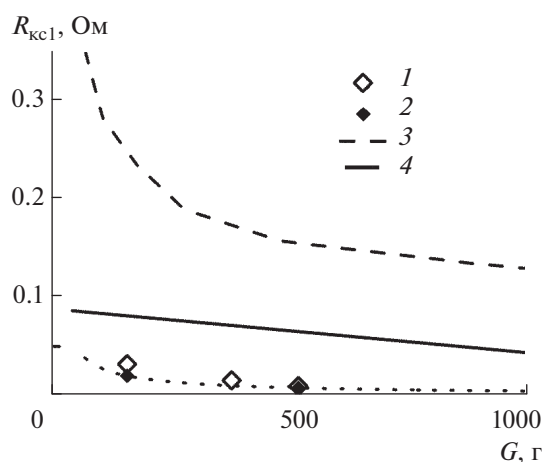


Рис. 3. Зависимости КС $R_{ксл}$ от приложенной силы веса G для графита: 1 – МПГ-7, постоянный ток; 2 – МПГ-7, переменный ток; 3 – стержень из электрографита; 4 – угольная щетка/угольное кольцо [1].

зависимости $R_{ксл} \sim G^{-1/k}$ от приложенного внешнего усилия [1]. Для графита марки МПГ-7 при пропускании переменного тока имеет место зависимость $R_{ксл} \sim G^{-1/1.3}$, при использовании постоянного тока $R_{ксл} \sim G^{-1/1.035}$. Следовательно, при пропускании постоянного тока зависимость КС от внешней нагрузки проявляется сильнее по сравнению со случаем использования переменного тока.

Относительные суммарные расширенные неопределенности величин $U(\rho_{ксл})$ и $U(R_{ксл})$ оцениваются в ~ 7 и $\sim 6\%$ при $T = 700$ К соответственно. Данные величины $U(\rho_{ксл})$ и $U(R_{ксл})$ возрастают при понижении температуры и превышают неопределенность значений $U(\rho)$ для УЭС, которые были определены для графитов других марок [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные впервые экспериментальные результаты определения КС графита марки МПГ-7 позволяют сделать вывод, что величины $\rho_{ксл}$ и $R_{ксл}$, измеренные при пропускании постоянного тока, оказываются выше по сравнению со случаем использования переменного тока. Следовательно, при наличии контактных поверхностей графита электрические потери в электрических

цепях постоянного тока будут выше по сравнению с электрическими потерями при использовании переменного тока.

Работа проводится по программе Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-15-2020-785 от 23 сентября 2020 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 464 с.
2. Лутков А.И. Тепловые и электрические свойства углеродных материалов. М.: Metallurgy, 1990. 176 с.
3. Зеодинов М.Г., Костановский А.В., Костановская М.Е., Пронкин А.А. Контактное электрическое сопротивление графита // ТВТ. 2022. Т. 60. № 4. С.
4. Калашников С.Г. Электричество. 6-е изд., стереотип. М.: Физматлит, 2003.
5. Berger H.H. Contact Resistance and Contact Resistivity // J. Electrochem. Soc. 1972. V. 119. № 4. P. 514.
6. Liyadi M., Pardo F., Bardou N., Pelouard J.-L. An Improved Method of Ohmic Contact Resistance Measurement // Solid-State Electronics. 2005. V. 49. P. 1655.
7. Костановский А.В., Костановская М.Е., Зеодинов М.Г., Пронкин А.А. Влияние температуры на электрическое сопротивление пиролитического графита // ТВТ. 2020. Т. 58. № 4. С. 732.