

УДК 537.311.4

ТЕРМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПРИ КОНТАКТНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ СОПРОТИВЛЕНИИ ГРАФИТА

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

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия***E-mail: Kostanovskiy@gmail.com*

Поступило в редакцию 29.11.2021 г.

После доработки 14.08.2022 г.

Принято к публикации 13.10.2022 г.

Представлены результаты численного моделирования тепловой задачи, выполненного на основе распределения удельного контактного электрического сопротивления по длине цилиндрического образца графита, определенного экспериментально. Сначала найдено распределение температуры по длине образца в отсутствие контактной поверхности при температурах 400 и 700 К. Задача решена в одномерном по длине цилиндра приближении, с максимальным имитированием условий эксперимента. Учитывается свободная конвекция и радиационный теплообмен на внешней поверхности цилиндра. Далее оценено распределение температуры вдоль оси образца при наличии одной контактной поверхности. Результаты расчета показали, что повышение температуры в области, прилегающей к контактной поверхности, составляет около 1 К при температуре 400 и 10 К при 700 К.

DOI: 10.31857/S0040364422060126

ВВЕДЕНИЕ

Электрическое контактное сопротивление (КС) представляет собой сопротивление, которое возникает при пропускании тока в месте соединения двух элементов образца, составленных из одного или разных материалов. Интерес к изучению физики КС первоначально был стимулирован изучением процесса сварки металлов [1]. В настоящее время исследование процессов, которые имеют место в многослойных тонких покрытиях и пленках, активизировало внимание к физике контактных явлений [2, 3]. Экспериментально в [1] показано, что величина КС прямо пропорционально связана с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) монолитного материала, поэтому для исследования контактных явлений выбран графит – проводящий материал с высоким значением УЭС. Первые эксперименты [4, 5], выполненные для случая одной неподвижной контактной поверхности, показали, что влияние КС не ограничено плоскостью соприкосновения элементов образца, а распределено по длине на достаточно протяженное расстояние. Исследования проводились на сплошном цилиндре, изготовленном из графита марки МПГ-7. Образец устанавливался вертикально. Сила тока I , проходящего по образцу, измерялась с помощью 100-А-шунта и вольтметра. Падение напряжения U определялось с использованием несколько точечных поверхностных контактных зондов, расположенных на равном расстоянии от контактной поверхности $l_{\text{зонд}} = 2x_{\text{ксл}}$. Изотермичность распределения вдоль оси цилиндра

контролировалась с помощью двух термопар, которые были установлены внутри образца в отверстиях, просверленных на расстоянии $l_{\text{термо}} \approx 40$ мм друг от друга. Зонды размещались между термопарами, что позволило исключить влияние отверстий, просверленных для установки термопар, и повысить точность измерения электрических величин. Исследования проводились на воздухе в стационарном тепловом режиме. Диапазон изученных температур составил 350–750 К. Эксперимент позволил получить распределение контактного УЭС в зависимости от расстояния, которое отсчитывается от контактной поверхности. Однако измерить распределение температур в области, прилегающей к контактной поверхности, оказалось невозможным, так как отверстия, просверленные под термопары, оказали бы негативное влияние на точность измерения электрических величин. Цель данной работы заключается в получении распределения температуры в области, прилегающей к контактной поверхности, на основе экспериментально измеренного вдоль образца распределения удельного электрического КС.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ

Распределение температуры вдоль оси монолитного образца. Численно моделирование выполнялось для двух значений температуры – $T = 400, 700$ К, которые максимально приближены к нижней и верхней границам определяющей темпера-

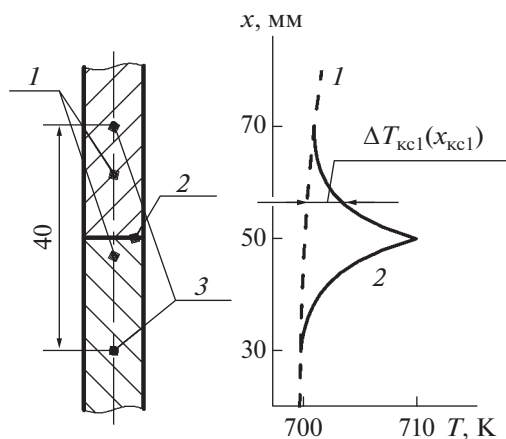


Рис. 1. Экспериментальный образец (а): 1 – два составных элемента образца, 2 – контактная поверхность, 3 – термопары; (б) – пример распределения температуры вдоль оси образца: 1 – температура монолитного образца; 2 – распределение температуры, обусловленное КС.

туры в эксперименте. Объектом моделирования являлся цилиндр диаметром $d = 7.85$ мм и длиной 100 мм, в центральной части которого ($x = 50$ мм) расположена контактная поверхность. Цилиндр расположен вертикально (рис. 1). По образцу пропускается постоянный электрический ток, сила которого равна $I = 16$ А при $T = 400$ К и 49 А при 700 К (определено экспериментально). Известна зависимость УЭС (Ом м) графита от температуры

$$\rho^{\perp} = 1.231 \times 10^{-11} T^2 - 1.9537 \times 10^{-8} T + 1.75549 \times 10^{-5}.$$

Задача решена в одномерной постановке, так как значение числа Био $Bi = \alpha_{эфф} d / \lambda_{МПГ-7} < 0.1$: $Bi \approx 0.0015$ при $T = 400$ К, 0.004 при 700 К. Здесь $\alpha_{эфф}$ – эффективный (конвекция и излучение) коэффициент теплоотдачи, $\lambda_{МПГ-7}$ – теплопроводность графита, 100 Вт/(м К) при $T = 400$ К, 76 при 700 К. Рассматриваемая постановка соответствует “внешней задаче” [6] и означает правомерность приближения равномерного распределения температуры по радиусу цилиндра. В стационарном тепловом режиме на изотермическом участке для поверхности цилиндра выполняется баланс плотностей тепловых потоков:

$$\frac{I^2 \rho^{\perp} l}{(\pi d^2 / 4)(\pi d l)} = 5.67 \times 10^{-8} \epsilon (T_w^4 - T_{о.с}^4) + \alpha_{с.к} (T_w - T_{о.с}). \quad (1)$$

Здесь l – длина изотермического участка; $\epsilon = 0.95$ – интегральная полусферическая излучательная способность графита [7]; T_w – температура поверхности цилиндра, в К; $T_{о.с} = 25 + 273$ К –

температура окружающей среды; $\alpha_{с.к}$ – локальный коэффициент теплоотдачи. Левая часть уравнения (1) соответствует выделяемой мощности, первое слагаемое справа – потери теплоты излучением, второе слагаемое – потери теплоты в результате свободной конвекции воздуха. В ламинарном режиме свободной конвекции на вертикальном цилиндре (по длине $x = 0-100$ мм) $\alpha_{с.к}$ определяется с использованием следующей системы уравнений, в которой локальное значение числа Нуссельта определяется [8] как

$$Nu_x = \frac{\alpha_{с.к} x}{\lambda_{о.с}} = 0.563 (Ra_x \Phi(Pr))^{0.25}, \quad \Phi(Pr) \approx 0.363, \quad (2)$$

$$Ra_x = \frac{g (t_w - t_{о.с}) x^3 Pr}{(t_{опр} + 273) \nu^2} = 10^4 - 10^9.$$

Здесь $\lambda_{о.с}$ – теплопроводность воздуха; Ra_x – число Рэлея при ламинарном режиме течения воздуха; $\Phi(Pr)$ – эмпирическая функция, зависящая от числа Прандтля Pr ; $g = 9.8$ м/с² – ускорение свободного падения; $t_w, t_{о.с}$ – температуры стенки и окружающей среды в градусах Цельсия, $t_{опр} = (t_w + t_{о.с})/2$ – определяющая для всех свойств температура; ν – кинематическая вязкость воздуха. Система уравнений (1), (2) решалась методом последовательного приближения. В качестве первого приближения предполагалось, что по всей длине вертикального цилиндра имеет место равномерное распределение температуры $T_w = 400$ К = const или $T_w = 700$ К = const. С использованием заданного значения температуры внешней поверхности цилиндра и $t_{о.с}$ рассчитывается $t_{опр}$, по которой находят свойства $\lambda_{о.с}, \nu, Pr$. Далее по уравнениям (2) определялись $Ra_x, Nu_x, \alpha_{с.к}$ для каждого сечения x от 0 до 100. Для выбранного значения x (отсчитывается от нижней поверхности экспериментального образца для вертикального цилиндра) методом подбора параметра решалось нелинейное уравнение (1) и находилось распределение температуры поверхности по высоте цилиндра $T_w(x)$ – второе приближение. В третьем приближении повторялась процедура расчета с использованием $T_w(x)$ второго приближения в качестве начального распределения. Оказалось, что найденное $T_w(x)$ третьего приближения практически не отличается от $T_w(x)$ второго приближения, поэтому на рис. 2 приведены результаты $T_w(x)$ второго приближения для вертикально расположенного монолитного образца.

На практике используются не только вертикально, но и горизонтально расположенные проводники тока. Для условий, использованных при $T = 400$ К, выполнен расчет для ламинарного режима свободной конвекции и горизонтального цилиндра $Ra_d = 10^2 - 10^4$. В данном случае величи-

на среднего коэффициента теплоотдачи, который совпадает с локальным $\alpha_{с.к}$, может быть рассчитана [8] как

$$Nu_d = \frac{\alpha_{с.к} d}{\lambda_{о.с}} = 0.85 Ra_d^{0.19}, \quad (3)$$

где нижний индекс d означает, что в качестве определяющего размера используется внешний диаметр цилиндра. На рис. 2 приведены результаты решения системы уравнений (1), (3), найденного методом последовательных приближений (как и в случае вертикального цилиндра), которые показывают, что изменение положения образца на горизонтальное приводит к снижению температуры с $T_w = 400$ К (вертикальное положение) до $T_w = 373$ К. При этом для горизонтально расположенного образца выполняется равномерное распределение температуры вдоль оси. Для вертикально расположенного цилиндра имеет место незначительное повышение температуры от нижней торцевой поверхности к верхней ($\sim 2\%$ на расстоянии 40 мм от нижнего торца).

Распределение температуры вдоль оси образца при наличии одной контактной поверхности. В области, прилегающей к контактной поверхности, дополнительно действует удельное электрическое КС, которое рассчитывается по формуле

$$\rho_{ксл}(x) = \frac{U_{зонд} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}{l_{зонд}} - \rho^\perp,$$

где $\rho_{ксл}$ — удельное контактное электрическое сопротивление одной поверхности; $U_{зонд}$ — падение напряжения на зондах, расположенных на расстоянии $l_{зонд}$ друг от друга ($x_{ксл}$ отсчитывается от контактной поверхности); ρ^\perp — УЭС монолитного графита, измеренное на образце, ось которого перпендикулярна направлению прессования [5]. В [5] значения $\rho_{ксл}(x_{ксл})$, найденные на различных расстояниях $l_{зонд}$, аппроксимированы экспоненциальными функциями

$$\rho_{ксл}(x_{ксл})/\rho^\perp = 25.96299 \exp(-0.28374(l_{зонд}/d))$$

при $T = 400$ К,

$$\rho_{ксл}(x_{ксл})/\rho^\perp = 23.765 \exp(-0.3263(l_{зонд}/d))$$

при $T = 700$ К

(внешнее давление на образец составляло 32 кПа). Для нахождения распределения температуры вдоль оси образца при наличии контактной поверхности предполагалось, что вся выделяемая дополнительная энергия, обусловленная $\rho_{ксл}(x_{ксл})$, отводится теплопроводностью через поперечное сечение цилиндра:

$$\frac{l^2 \rho_{ксл} \Delta l}{(\pi d^2/4)^2} = -\lambda_{МПГ-7} \frac{\Delta T_{ксл}(x_{ксл})}{\Delta l},$$

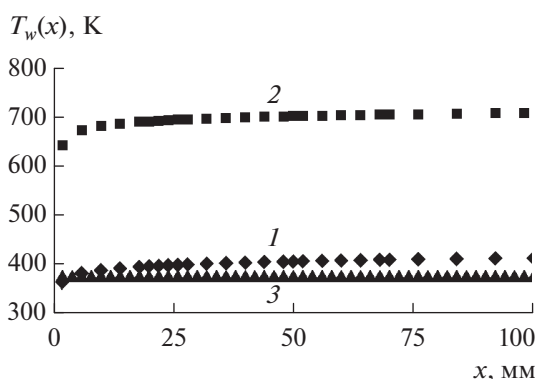


Рис. 2. Зависимость температуры поверхности вдоль оси монолитного образца при вертикальном расположении (отсчитывается от нижнего торца): 1 — $T_w = 400$ К; 2 — 700; 3 — при горизонтальном расположении, $T_w = 400$ К.

где $\Delta l = 1$ мм — длина элементарного участка. Аналогичный подход использовался в работах [1, 9] для оценки теплового эффекта, вызванного наличием контактной поверхности в металлических образцах.

На рис. 3 приведены рассчитанные изменения температуры вдоль оси цилиндра $\Delta T_{ксл}(x_{ксл})$ при $T_w = 400, 700$ К. При указанном подходе отсутствует влияние положения образца в пространстве на $\Delta T_{ксл}(x_{ксл})$. Отметим, что отношение максимальных значений $\Delta T_{ксл}$ в плоскости контакта ($x = 50$ мм) составляет $10.14 \text{ К}/0.8 \text{ К} \approx 13$ при температурах монолитной части 700 и 400 К (рис. 3) ($700/400 \approx 2$). Рост температуры в области влияния контактной поверхности может быть связан и с увеличением тепловыделения в контактной плоскости практически на порядок, и с уменьшением теплопроводности графита при возрастании температуры. Непропорционально сильное повышение температуры, вызванное КС, установлено и при анализе влияния контактного напряжения ($1065^\circ\text{C}/16^\circ\text{C} \approx 66.6$ при $0.43 \text{ В}/0.03 \text{ В} \approx 14.3$) в металлах [1].

Результирующие значения температуры в каждом сечении можно оценить, суммируя соответствующие величины, приведенные на рис. 2, 3.

Важно отметить, что ограничение протяженности области электрического воздействия КС в графите экспериментально определено и составляет $\sim 2.3d \approx 20$ мм (от плоскости контакта) [4, 5]. Протяженность области термического эффекта можно оценить как не на много превосходящую длину области электрического воздействия КС. Это означает, что тепловую задачу необходимо решать в двухмерной постановке [6], а приведенные на рис. 3 значения следует рассматривать как оценку сверху. Соотношение потоков теплоты при $T_w = 400$ К для сечения, прилегающего к контактной поверхно-

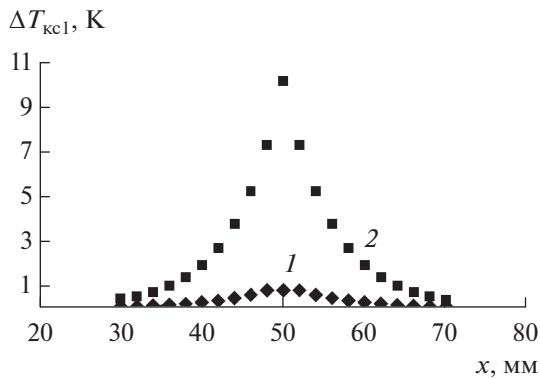


Рис. 3. Дополнительное повышение температуры в окрестности контактной поверхности $\Delta T_{kc1}(x_{kc1})$ при температуре монолитной части вертикального образца: 1 – $T_w(x) = 400$ К, 2 – 700 (рис. 2).

сти, составляет приблизительно 2 : 1, где первое значение соответствует потоку, который отводится теплопроводностью вдоль оси образца, второе отвечает потоку, отводимому излучением и свободной конвекцией с боковой поверхности. По мере удаления от контактной поверхности данное соотношение меняется, так как поток, который отводится теплопроводностью, убывает в соответствии с найденным законом распределения $\rho_{kc1}(x_{kc1})$. Следовательно, максимальные значения температуры, приведенные на рис. 3, можно оценочно уменьшить на 30% для учета оттока теплоты с боковой поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка термического эффекта, возникающего в графите марки МПГ-7 в области, прилегающей к контактной поверхности, показала, что температура в плоскости контакта возрастает примерно на 10 К (на 7 К с учетом двухмерности) по отношению к температуре монолитного участка $T_w = 700$ К. Впервые для графита рассчитаны значения повы-

шения температуры в области КС и протяженность области термического эффекта, вызванного КС.

При этом максимальная величина ΔT_{kc1} в плоскости контакта ($x = 50$) возрастает примерно в $10.14/0.8 \approx 13$ раз по сравнению с отношением исходных температур T_w монолитной части образца $700/400 \approx 2$. Протяженность областей электрического и термического эффектов, вызванных КС, примерно совпадают.

Работа выполнена 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. Masser R., Braeuer J., Gessner Th. Modeling the Reaction Behavior in Reactive Multilayer Systems on Substrates Used for Water Bonding // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. 244311.
3. Chen J., Zhang G., Baowen L. Thermal Contact Resistance Across Nanoscale Silicon Dioxide and Silicon Interface // J. Appl. Phys. 2012. V. 112. 064319.
4. Зеодинов М.Г., Костановский А.В., Костановская М.Е., Пронкин А.А. Контактное сопротивление графита // ТВТ. 2022. Т. 60. № 4. С. 519.
5. Зеодинов М.Г., Костановский А.В., Костановская М.Е., Пронкин А.А. Влияние вида источника питания на контактное электрическое сопротивление графита // ТВТ. 2022. Т. 60. № 5. С. 789.
6. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 471 с.
7. Латыев Г.Г., Петров В.А., Чеховской В.Я., Шестаков Е.Н. Излучательные свойства твердых тел. Спр. / Под ред. Шейндлина А.Е. М.: Энергия, 1974. 472 с.
8. Цветков Ф.Ф., Керимов Р.В., Величко В.И. Задачник по тепломассообмену. 2-е изд., испр. и доп. М.: ИД МЭИ, 2008. 196 с.
9. Чунихин А.А. Электрические аппараты. Общий курс. М.: Энергоатомиздат, 1988. 720 с.