

УДК 537.311

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ КОНТАКТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГРАФИТА

© 2024 г. А. В. Костановский*, М. Г. Зеодинов**, М. Е. Костановская, А. А. Пронкин***

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

**E-mail: kostanovskiy@gmail.com*

***E-mail: mz.64@mail.ru*

****E-mail: pronking.a.a@gmail.com*

Поступило в редакцию 23.08.2023 г.

После доработки 11.10.2023 г.

Принято к публикации 04.12.2023 г.

Впервые бесконтактным методом оптической пирометрии определено распределение температуры вдоль образующей поверхности вертикального образца графита при пропускании постоянного электрического тока с двух сторон от контактной плоскости на равном удалении. Анализ зависимости распределения температуры от расстояния, которое отсчитывается от контактной плоскости, показал, что в диапазоне значений 750–1700 К выполняется симметрия поля температуры, которая в соответствии с экспериментом сохраняется при последовательном повышении давления (49, 77, 105 кПа) и при смене полярности постоянного электрического тока. Согласно закону Фурье симметрия поля температуры означает выполнение симметричного распределения плотности теплового потока относительно контактной плоскости. Симметрия поля температуры и плотности теплового потока влечет за собой выполнение граничных условий четвертого рода в плоскости контакта.

DOI: 10.31857/S0040364424010162

ВВЕДЕНИЕ

Электрическое контактное сопротивление, возникающее на границе соприкосновения одноименных или различных материалов при пропускании по образцу электрического тока, изучается с середины прошлого века [1]. Первоначально основное внимание исследователей было сосредоточено на характеристиках поверхности контакта, таких как шероховатость, прочность материала, вид деформации при различных внешних весовых нагрузках. По мере изучения физики многослойных сред большее внимание стало уделяться распределениям электрического сопротивления и температуры в области влияния плоскости контакта. Прямое измерение распределения температуры не применялось, так как тепловая задача являлась вторичной по отношению к электрической. Кроме того, внедрение термопар в образец влечет за собой изменение сопротивления образца и понижение точности определения электрических параметров. Распределение температуры, как правило, рассчитывается с использованием экспериментальных электрических данных. Расчет распределения

температуры проводится на основе локального тепловыделения, которое возникает при пропускании электрического тока – закон Джоуля–Ленца, и предположения, что передача выделяемой теплоты от контактной плоскости к концам образца происходит по закону теплопроводности [2, 3]. Сравнение расчетных и экспериментальных значений температуры не проводилось.

Цель данной работы состоит в экспериментальном определении распределения температуры в зависимости от расстояния, которое отсчитывается от плоскости контактного электрического сопротивления, и в проверке выполнения граничных условий (ГУ) четвертого рода непосредственно в плоскости контакта [4]. В качестве исследуемого материала выбран графит с известными излучательными характеристиками [5], что позволяет определять распределение действительной температуры. Актуальность работы обусловлена необходимостью проведения прямых экспериментальных исследований поля температуры в окрестности контактной плоскости с целью расширения существующих представлений о природе контактного электрического сопротивления.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для изучения контактного электрического сопротивления была создана установка, позволяющая исследовать контактные явления в вакууме и проводить эксперименты в области температур 750–1700 К. Описание установки приведено в [6]. Основными элементами установки являются: экспериментальный образец, система электрического питания, вакуумная и диагностирующая системы. В указанной работе приведены результаты первых тестовых экспериментов, демонстрирующие работоспособность установки.

Для решения задачи определения распределения температуры по длине образца в области, прилегающей к контактной плоскости, данная установка была усовершенствована. На рис. 1 приведено изображение установки с основными элементами. Измерительная система дополнена оптическим пирометром, использование которого позволило исключить термопары из эксперимента. Перед экспериментами с целью уменьшения отражения внутренняя поверхность камеры была экранирована графитовой тканью.

Экспериментальный образец диаметром $d = 2R = 7.85$ мм и рабочей длиной $l = 90$ мм ($l/d > 10$) был вырезан из графита марки МПГ-7 перпендикулярно плоскости приложения давления при прессовании. Цилиндр разрезался пополам перпендикулярно продольной оси, образованные плоскости (плоскость контакта) шлифовались бумагой. Образец, собранный из двух частей, устанавливался вертикально в кварцевом тонкостенном цилиндре (контроль за соосностью частей образца) с пазом

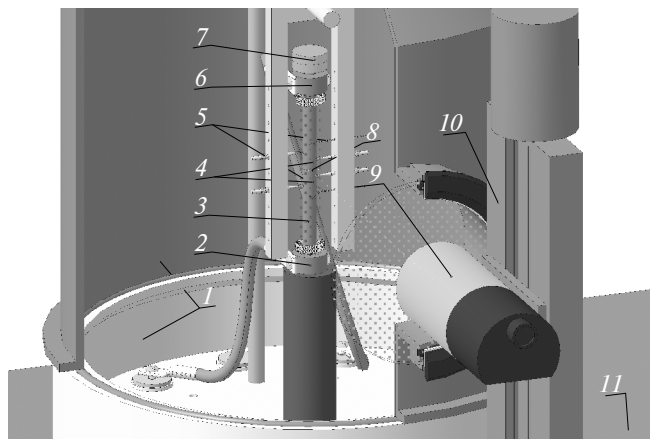


Рис. 1. Рабочий участок установки для измерения контактного электрического сопротивления: 1 – корпус вакуумной камеры, 2 – нижний токоподвод, 3 – кварцевая трубка, 4 – образцы, 5 – термопары, 6 – верхний токоподвод, 7 – грузики, 8 – контактная поверхность, 9 – ИК-пирометр, 10 – линейный модуль перемещения пирометра вдоль вертикальной оси образца, 11 – вакуумный пост ВУП-5.

для измерения температуры T . Использовалась весовая нагрузка, расположенная на верхнем торце цилиндра. По образцу пропускался постоянный электрический ток I . В ходе эксперимента последовательно увеличивалось давление на контактную плоскость $P = 49, 77, 105$ кПа. Измерения проводились в вакууме при давлении 10^{-4} Па.

Распределение яркостной температуры вдоль поверхности образца, фиксируемое на одной образующей параллельной оси цилиндра в диапазоне значений 750–1750 К, измерялось пирометром Raytek марки RAYMM1MHSF1L. Пирометр работал на длине волны 1.0 мкм и имел диаметр пятна визирования 1.0 мм. Погрешность измерения яркостной температуры составила ± 6 К при максимальной температуре. Пирометр был установлен на оптическом столике так, чтобы его можно было перемещать параллельно оси экспериментального образца с заданным шагом x_i . Головка винта оптического столика, с помощью которого перемещался пирометр, была прокалибрована и использовалась для определения величины смещения пятна визирования с погрешностью 100 мкм. Шаг по длине составлял $\Delta x \approx 2.0$ мм, минимальное число измерений с каждой стороны от контактной плоскости равнялось семи. Значения яркостной температуры $T_{\text{ярк}}$ пересчитывались на действительную температуру T с использованием литературных данных о нормальной спектральной излучательной способности графита [5]. Были введены поправки на поглощение в стекле окна камеры. Оценка равномерности поля температуры по радиусу, выполненная на основе критерия Старка (который является аналогом критерия Био для граничных условий третьего рода) $St = \sigma T^3 d / \lambda = 0.05$ (σ – константа Стефана–Больцмана, λ – теплопроводность графита), показала, что равномерность поля T по радиусу выполняется: $St < 0.1$. Данная оценка не учитывает наличия внутренних источников теплоты, возникающих в результате прохождения по образцу электрического тока, влияние которых приводит к повышению T по мере приближения к оси образца. В результате измеренные на поверхности образца локальные (по длине) значения температуры $T(R, x_i) < T(r, x_i)$ можно рассматривать как оценку “снизу” для среднего значения температуры в каждом сечении.

Распределение температуры в зависимости от расстояния x_i , которое отсчитывается от контактной плоскости $T(R, x_i)$, измерялось с шагом 150–200 К при последовательном повышении T от ~750 до ~1700 К и затем понижении температуры. Измерения проводились в стационарном тепловом режиме. Время предварительной выдержки для каждого режима составляло 15 мин при низких температурах и 20 мин при высоких.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 приведен пример массива экспериментальных данных $T(R, x_i)$, полученных при давлении $P = 105$ кПа, источник питания был подключен плюсовым контактом к нижнему торцу образца. Видно, что все режимы характеризуются максимальными значениями T в плоскости контакта. Для каждого значения силы тока I вторые производные температуры от расстояния положительны $\partial^2 T(R, x_i)/\partial x_i^2 > 0$, что коррелирует с данными удельного электрического контактного сопротивления $\partial^2(\rho_{кл}/\rho_{\perp})/\partial x^2 > 0$, измеренными в [7].

Для анализа выполнения симметрии поля $T(R, x_i)$ относительно плоскости контакта использованы методы математической статистики. Весь массив данных (рис. 2) приведен к безразмерному виду делением температуры $T(R, x_i)$ на $T_{\max}(I)$ для каждого значения силы тока I . Таким образом, получена безразмерная выборка с числом переменных 150. Оценка асимметрии проводилась по методике, используемой для нормального распределения, которое является симметричным, и основанной на расчете величины асимметрии $a_3 = m_3/(\sqrt{D})^3$, где m_3 — центральный эмпирический момент третьего порядка, D — дисперсия [8]. Расчет величины асимметрии всего массива данных (рис. 2) дал $a_3 = -0.091$, $a_3 = -0.056$ для выборки объемом 112, в которую вошли данные, отстоящие от плоскости контакта на ± 6 мм. Следовательно, экспериментальные данные характеризуются наличием невысокой асимметрии, которая уменьшается при приближении к плоскости контакта. Можно предположить, что и температуры, и градиенты температуры,

рассчитываемые на расстояниях, равноудаленных от плоскости контакта, равны. Это означает симметричность распределения и для локальных значений плотности теплового потока $q(x_i) = -\lambda(T(x_i))(\partial T(x_i)/\partial x)$ в силу равенства локальных значений теплопроводности $\lambda(T(x_i))$. Экстраполяция распределения температуры и распределения плотности теплового потока на плоскость контакта (равенство пределов “снизу” и “сверху”) показывает, что выполняются ГУ четвертого рода, когда теплообмен между соприкасающимися телами происходит по закону теплопроводности (тепловая задача) [4]. Отметим, что при изучении теплового контактного сопротивления (электрический ток отсутствует) рассматривается возможность выполнения граничных условий четвертого рода, однако для задачи контактного электрического сопротивления данный вывод сделан впервые. Тот факт, что экспериментальные данные позволяют сделать вывод о выполнении ГУ четвертого рода, связан не только с тем, что контактная плоскость образована одинаковыми материалами, но и со свойствами графита, когда вкладом других механизмов, например радиационным теплообменом между шероховатостями на плоскости контакта, можно пренебречь. Анализ всего массива экспериментальных данных показал, что ГУ четвертого рода выполняются при последовательном повышении давления на контактную поверхность графита 49, 77, 105 кПа и при смене полярности электрического тока. Последнее косвенно подтверждает, что может выполняться и симметрия распределения удельного контактного электрического сопротивления в окрестности плоскости контакта [7]. Данный вывод имеет ограничение — контактное электрическое сопротивление, образованное соединением различных материалов, может приводить к нарушению условия симметрии распределения температуры (нарушение симметрии наблюдается и в тепловом контактном сопротивлении) и удельного контактного электрического сопротивления. Указанные задачи требуют специального рассмотрения.

Вывод, сделанный о симметрии поля температуры, имеет, в частности, прикладное значение. Так как измерения контактного электрического сопротивления проводились двумя точечными поверхностными зондами, установленными на равном расстоянии от контактной плоскости [7], влияние температуры на электрические измерения отсутствует.

На рис. 3 приведены зависимости от силы тока I изменений локальной температуры, измеренной в плоскости контакта $T_{\max}$, и температуры, фиксируемой в центре изотермического участка образца, когда контактная плоскость отсутствует. Эксперименты проведены в максимальном соответствии таких параметров, как размеры образцов, направление электрического тока. Видно, что при

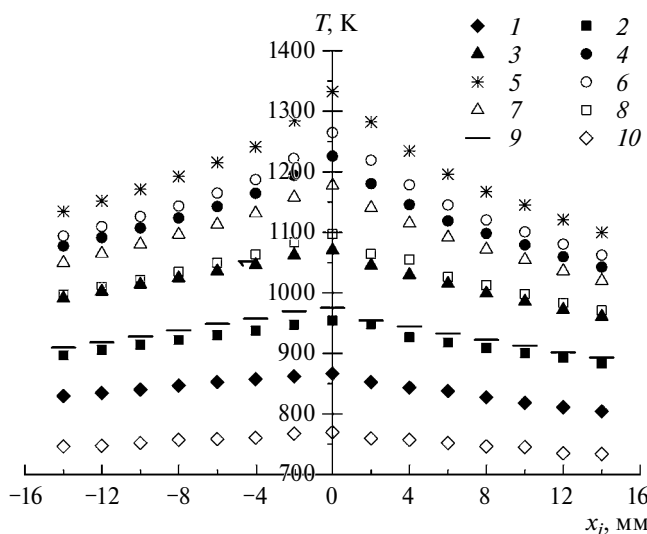


Рис. 2. Зависимости температуры от расстояния до контактной поверхности, измеренные при $P = 105$ кПа (положительный электрод внизу) и последовательном повышении тока: 1 – 52 А, 2 – 61, 3 – 73, 4 – 89, 5 – 100; при последовательном понижении тока: 6 – 93 А, 7 – 79, 8 – 71, 9 – 59, 10 – 42.

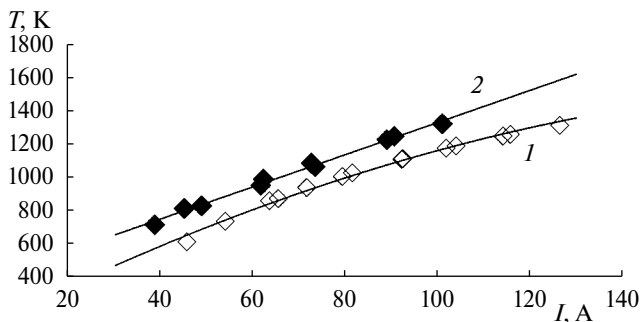


Рис. 3. Зависимости температуры T от силы тока I : 1 – измеренная в центре изотермического участка образца, в котором отсутствует контактная плоскость; 2 – температура $T_{\text{макс}}$, измеренная в плоскости контакта ($P = 105$ кПа, положительный электрод внизу).

увеличении силы тока в образце, когда контактная плоскость отсутствует, темп роста температуры уменьшается. Это связано с увеличением потерь в результате теплообмена с окружающей средой, так как плотность радиационного теплового потока $q_{\text{рад}} \sim (T^4 - T_{\text{окр.ср}}^4)$ (где $T_{\text{окр.ср}}$ – температура окружающей среды) возрастает при увеличении T . В эксперименте, когда в образце присутствует плоскость контакта, зависимость $T_{\text{макс}} \sim f(I)$ характеризуется возрастающей линейной функцией (рис. 3). Это означает, что тепловыделение в плоскости контакта настолько велико, что компенсирует и превышает потери теплоты излучением в окружающую среду. Указанные температуры показывают, что отличие значений T в непосредственной близости к контактной плоскости и на достаточном удалении от нее может составлять сотни градусов. Приведенное сравнение зависимостей температуры от силы тока, по-видимому, получено впервые.

Проведены эксперименты, в которых изучено влияние внешней нагрузки P на распределение T . Зависимость максимальной температуры, измеренной в плоскости контакта, от внешней нагрузки $T_{\text{макс}} = f(P)$ при фиксированном значении силы тока $I = 100$ А в образце показала, что имеет место незначительное уменьшение $T_{\text{макс}}$ с ростом P . Это коррелирует с влиянием P на величину удельного контактного электрического сопротивления [1, 7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые проведено бесконтактное измерение распределения температуры поверхности образца графита на разных расстояниях от плоскости контактного электрического сопротивления. Методами математической статистики показано выполнение симметрии поля температуры относительно плоскости контакта. Следствием симметрии поля температуры является выполнение граничного условия четвертого рода непосредственно в сечении, где находится плоскость контакта. Граничные условия четвертого рода выполняются при последовательном повышении давления на контактную поверхность 49, 77, 105 кПа и при смене полярности постоянного электрического тока. Экспериментально показано, что температура в плоскости контакта может на сотни градусов превышать значения T , которые имеют место при аналогичных условиях в образце без контактной плоскости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 464 с.
2. Чунихин А.А. Электрические аппараты. Общий курс. М.: Энергоатомиздат, 1988. 720 с.
3. Костановский А.В., Костановская М.Е., Зеодинов М.Г., Пронкин А.А. Термический эффект при контактном электрическом сопротивлении графита // ТВТ. 2022. Т. 60. № 6. С. 946.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
5. Излучательные свойства твердых материалов. Спр. / Под ред. Шейндлина А.Е. М.: Энергия, 1974. 470 с.
6. Костановский А.В., Зеодинов М.Г., Пронкин А.А., Костановская М.Е. Установка для определения контактного электрического сопротивления высокотемпературных материалов // ПТЭ. 2023. № 6. С. 181.
7. Зеодинов М.Г., Костановский А.В., Костановская М.Е., Пронкин А.А. Контактное электрическое сопротивление графита марки МПГ-7 при постоянном и переменном токе // ТВТ. 2022. Т. 60. № 5. С. 789.
8. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2001. 478 с.