

можно рассчитать ток и внутреннее сопротивление эквивалентного источника при любом количестве параллельно соединенных источников ЭДС. Исследование внутреннего сопротивления источника термоЭДС очень важно для последующего согласования измерительной цепи с термоэлектрическим датчиком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hu J. and Nagy P.B. On the role of interface imperfections in thermoelectric nondestructive materials characterization // Appl. Phys. Lett. – 1998.– vol. 73.–no.4– Pp. 467–469.
2. Stuart C. M. Thermoelectric differences used for metal sorting // Journal of Testing and Evaluation. – 1987. – vol. 15. – no. 4. – Pp. 224–230.
3. Cho M., Park S., Kwon E., Jeong S., Park K. A waste metal sorting system using LIBS classification // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – 2019. – vol. 2019. – Pp. 451–454.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА СИСТЕМЫ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТНОЙ ПАРЫ

Ю.Р. Колосова, А.А. Дементьев, А.И. Солдатов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, 634050
E-mail: julya.kolosova94@yandex.ru

NUMERICAL STUDY OF HEAT TRANSFER OF SYSTEM IN THE PRESENCE A CONTACT THERMAL RESISTANCE OF THE CONTACT PAIR

Yu.R. Kolosova, A.A. Dementiev, A.I. Soldatov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Tomsk, Lenin str., 40, 634050
E-mail: julya.kolosova94@yandex.ru

***Annotation.** A mathematical model of heat transfer distribution in the case of non-ideal contact of two surfaces (electrode-sample system), which allows one to obtain the temperature distribution in coupled bodies at any time – from the initial contact time to the establishment of the stationary mode is developed.*

В настоящее время все материалы и сплавы, используемые при разработке промышленной техники, подвергаются тщательному входному контролю, однако используемые подходы устарели и требуют много времени и финансовых затрат. В связи с этим представляет интерес развитие новых способов анализа материалов и их свойств, среди которых перспективен метод, основанный на измерении термоЭДС. На данном методе осуществлена работа приборов контроля термоЭДС [1], которые при всех достоинствах имеют серьезный недостаток – высокую погрешность измерения при неидеальном контакте двух поверхностей вследствие неоднородностей в металлах и сплавах, неровностей поверхностей и т.д. Для исследования причин возникновения погрешности в приборах термоэлектрического контроля разработана одномерная математическая модель распространения тепла в случае неидеального контакта двух поверхностей, которая позволяет определить распределение температуры в связанных телах в динамике. Для модели выбраны электрод высотой l_1 и исследуемый образец высотой l_2 , соединенные между собой. В зоне контакта имеется зазор d вследствие неровностей материалов. Электрод нагревает исследуемый образец, а вся система находится в нормальных атмосферных условиях и охлаждается естественной конвекцией.

Математическая модель с начальными и граничными условиями в безразмерной постановке записывается в следующем виде [2]:

$$\frac{\partial \theta_{эл}}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta_{эл}}{\partial \xi^2} - BiH \left(1 - \frac{T_{возд}}{T_{эл}} \right), \quad \frac{\partial \theta_{обр}}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta_{обр}}{\partial \xi^2},$$

$$\theta(\xi, 0) = 1, 0 \leq \xi < \frac{l_1}{l}, \quad \theta(\xi, 0) = \frac{T_0}{T_{эл}}, \frac{l_1}{l} \leq \xi < \frac{l_2}{l},$$

$$\theta_{эл}(0, \tau) = 1, \quad \frac{\partial \theta_{обр}}{\partial \xi}(1, \tau) = 0,$$

$$\frac{\lambda_{эл}}{\lambda_{к}} \frac{\partial \theta_{эл} \left(\frac{l_1^-}{l}, \tau \right)}{\partial \xi} = \frac{\partial \theta_{к} \left(\frac{l_1^+}{l}, \tau \right)}{\partial \xi}, \quad \frac{\lambda_{к}}{\lambda_{обр}} \frac{\partial \theta_{к} \left(\left(\frac{l_1+d}{l} \right)^-, \tau \right)}{\partial \xi} = \frac{\partial \theta_{обр} \left(\left(\frac{l_1+d}{l} \right)^+, \tau \right)}{\partial \xi},$$

где θ – безразмерная температура, τ – шаг сетки по времени, Bi – критерий Био, описывает отношение теплового сопротивления вещества к конвекции внешней среды, H – удвоенное отношение длины к радиусу, ξ – безразмерная координата, $T_{возд}$, $T_{обр}$, $T_{эл}$ – температура воздуха, образца, электрода, N – количество узлов сетки по пространству, $\lambda_{эл}$, $\lambda_{к}$, $\lambda_{обр}$ – коэффициент теплопроводности электрода, зоны контакта и образца.

В таблице 1 представлен результат расчета контактного термического сопротивления R_c в зависимости от давления P , степени шероховатости R_z , неровности W_z и исследуемых материалов Ст20 по расчетным зависимостям, предложенным авторами [2].

Таблица 1 – Контактное термическое сопротивление R_c в зависимости от давления и неровности поверхностей

P, КПа	$R_c \cdot 10^4, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$		
	при $R_z=1$ мкм и $W_z=5$ мкм	при $R_z=1,5$ мкм и $W_z=10$ мкм	при $R_z=2$ мкм и $W_z=15$ мкм
1	2,45	4,30	5,97
2	2,19	3,76	5,14
3	2,02	3,43	4,64
4	1,90	3,18	4,29
5	1,80	3,00	4,02
6	1,73	2,85	3,80

Из таблицы 1 видно, что при увеличении нагрузки на исследуемый образец полное контактное термическое сопротивление уменьшается и чем больше высота микронеровностей, тем больше значение контактного термического сопротивления. На основе предложенной модели проведено исследование нестационарного распределения тепла в случае неидеального прижатия электрода к исследуемому образцу. Значения теплофизических характеристик стали Ст20 взяты из справочных данных. Теплопередача на границе между электродом и испытываемым образцом описывается граничными условиями четвертого рода. На левой границе расчетной области принимается граничное условие первого рода. На правой границе принимается граничное условие третьего рода (характеризует закон теплообмена между поверхностью и окружающей средой за счет конвекции). Результат численного моделирования нестационарного распределения тепла в случае неидеального прижатия

электрода к исследуемому образцу, представлен на рисунке 1. В начальный момент времени $t=0$ график температуры представляет собой ступеньку, соответствующую начальным условиям. Далее вследствие теплопроводности возникает теплообмен между горячим электродом и образцом через зону несовершенного контакта. С течением времени разность температур уменьшается, поле устанавливается, стационарное распределение принимает вид прямой линии. Моделирование показало, что при исходных данных температура системы уменьшается со 150 до 148 °С, что приводит к соответствующему уменьшению термоЭДС, который прямо пропорционален температуре. Верификация разработанной математической модели проведена с помощью коммерческого программного пакета с использованием метода конечных элементов.

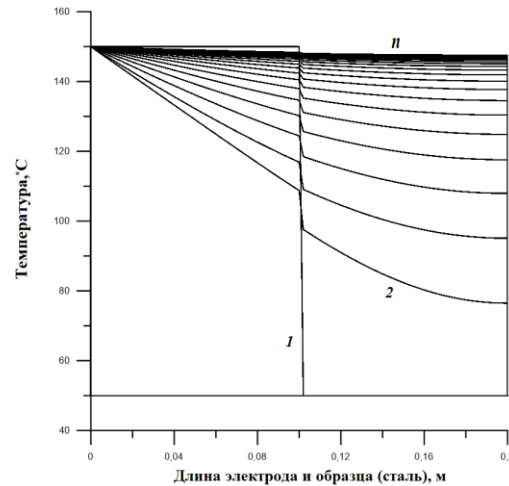


Рис. 1. Распределение температурного поля в случае неидеального прижатия электрода к испытываемому образцу ($R_c=2,45 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$, $R_z=1,5 \text{ мкм}$ и $W_z=10 \text{ мкм}$), при шаге по времени $\Delta t=10 \text{ сек}$ в различные моменты времени: 1- $t=t_0$; 2- $t=t_0+\Delta t$,..., n- $t=t_0+n\Delta t$

Данная методика применима для оценки температурных условий материалов для проведения исследования контактного термического сопротивления контактных пар.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солдатов А. А. Неразрушающий контроль качества поверхностного слоя металла // СТТ: сб. трудов XVIII Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т. – Томск, 2012. – Т. 1. – С. 257– 258.
2. Коротких А. Г. Теплопроводность материалов –учебн. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2011. – 97 с.
3. Внуков А. Н., Попов В. М., Дорняк О. Р., Мозговой Н. В. Теплообмен в составных системах современных летательных аппаратов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2018. – № 8. – С. 50–56.