

УДК 537.311.4

ТЕПЛООБМЕН В СОСТАВНЫХ СИСТЕМАХ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ
ПОВЕРХНОСТЯМИ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Попов В.М.¹, Дорняк О.Р.¹, Внуков А.Н.²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический
университет им. Г.Ф. Морозова»

²Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение
высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и
Ю.А. Гагарина»» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации
E-mail: ordornyak@mail.ru

Аннотация: Рассматривается процесс формирования контактных термических сопротивлений в составных системах теплонапряженных технических объектов. Экспериментально установлена зависимость термосопротивления в зоне взаимного контакта металлических элементов составных систем. Обоснована возможность терморегулирования путем введения в зону контакта металлических поверхностей составных систем заполнителей различной природы в виде прокладок, позволяющих, в частности, повышать контактное термосопротивление, и таким образом выполнять роль теплоизоляционного экрана. Установлена также зависимость термосопротивления перехода от теплопроводности заполнителя, его толщины и температуры в зоне контакта. Показана повышенная эффективность применения многослойной теплоизоляции.

Ключевые слова: теплоизоляция, контактное термосопротивление, давление, заполнители в зоне контакта, контактная пара.

HEAT EXCHANGE IN COMPOSITION SYSTEMS WITH METAL SURFACES
OF HEATED STRESSED OBJECTS

Popov V.M.¹, Dorniyak O.R.¹, Vnukov A.N.²

¹Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State
University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov»

²Federal State Treasury Military Educational Institution of Higher Education «Mili-
tary Training and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy named after
Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin»» (Voronezh) of the Ministry
of Defense of the Russian Federation

E-mail: ordornyak@mail.ru

Summary: The process of the formation of contact thermal resistances in composite systems of heat-stressed technical objects is considered. The dependence of thermal resistance in the zone of mutual contact of metal elements of composite systems is experimentally established. The possibility of thermal control by introducing into the contact zone of the metal surfaces of composite systems of fillers of various nature in the form of gaskets, allowing, in particular, to increase the contact thermal resistance, and thus act as a heat-insulating screen, is justified. The dependence of the thermal resistance of the transition on the thermal conductivity of the aggregate, its thickness and temperature in the contact zone is also established. The increased efficiency of the use of multilayer thermal insulation is shown.

Keywords: thermal insulation, contact thermal resistance, pressure, fillers in the contact zone, contact pair

В процессе проектирования и эксплуатации теплонапряженных технических систем в энергетике, авиации, космонавтике, электронике, объектах военного назначения часто возникает необходимость решать целый комплекс задач, требующих повышения их эффективности, надежности, а также снижения массовых и габаритных характеристик. Здесь особую актуальность приобретают вопросы создания условий, обеспечивающих оптимальные тепловые режимы в процессе их функционирования.

Особую сложность в реализации указанной задачи представляют составные системы с контактирующими между собой металлическими элементами, когда приходится учитывать влияние процессов контактного теплообмена [1-3].

Возникающее при прохождении теплового потока через контактные соединения контактное термосопротивление (КТС) в значительной степени усложняет процессы формирования температурных полей системы.

Отечественными и зарубежными исследованиями, проведенными в последние три десятилетия, установлено [4, 5], что за счет влияния на этот процесс большого числа факторов необходимо проводить натурное прогнозирование величины КТС в каждом конкретном случае.

Необходимость такого подхода к решению проблемы прогнозирования величины КТС диктуется тем, что на формирование КТС оказывают влияние давление на поверхности контактной пары, температура в зоне контакта, чистота обработки поверхностей контакта, природа материала контактной пары, время воздействия нагрузки, материал вводимого в зону раздела заполнителя. Учи-

тывать влияние указанных факторов необходимо при проведении операций по терморегулированию через контактные переходы. Необходимость проведения подобных операций требуется при условиях, когда ставится задача повышения или наоборот, снижения КТС. Ниже рассматривается технология повышения КТС, когда необходимо увеличить теплоизоляционные характеристики в составных системах.

Для реализации данной задачи спроектирована, изготовлена и введена в рабочий режим специальная экспериментальная установка, частично используемая для исследования контактного теплообмена [6]. Экспериментальное определение КТС осуществлялось с использованием метода стационарного теплового потока, в котором рассматривается тепловой поток, транспортируемый через контактирующие торцами цилиндрические образцы в аксиальном направлении. Контактная пара из двух контактирующих образцов, расположенная в вертикальном положении, имитирует теплопровод от верхнего «горячего» образца с электронагревательным устройством к нижнему образцу, выполняющему роль водяного холодильника. В каждом образце в специально высверленные отверстия установлены по четыре хромель-копелевые термопары по длине образцов. Боковые поверхности образцов покрыты слоем теплоизоляции, что позволяет считать их адиабатными.

При условии установления стационарного теплового режима, когда три последовательных замера показаний термопар с 10-минутным интервалом различаются не более, чем на $0,1^{\circ}\text{C}$, находится среднее для образцов значение плотности теплового потока q_{cp} , проходящего через зону контакта.

$$q_{cp} = \frac{q_1 + q_2}{2}, \quad (1)$$

где q_1 и q_2 – значения удельных тепловых потоков в «горячем» и «холодном» образцах, соответственно.

Для расчета контактного термосопротивления в зоне соприкосновения поверхностей образцов требуется также найти значение температурного перепада ΔT_k , применяя метод линейной экстраполяции.

Имея значения q_{cp} и ΔT_k , можно найти величину КТС для контактного перехода по формуле

$$R_k = \frac{\Delta T_k}{q_{cp}}. \quad (2)$$

Применение метода линейной экстраполяции для определения температурного скачка ΔT_k правомерно, поскольку известно [7], что изменение теплопроводности материалов металлических образцов в небольшом интервале температур незначительно, и можно считать, что температурная кривая близка к прямой линии.

На практике в качестве теплоизоляции наиболее часто используют тонкослойные прокладки из малотеплопроводных материалов. Поэтому объектом исследования было формирование КТС в зоне раздела контактных пар. В качестве заполнителей, вводимых в зону контакта, использовались прокладки различной толщины из фторопласта, стеклоткани, асбеста и слюды. Прокладки помещались между тепломерами из латуни Л80 с заданными характеристиками микрогеометрий контактирующих поверхностей. В зоне контакта поддерживались температуры порядка 415 и 375 К, давление на образцы варьировалось в пределах от 0,1 до 20 МПа. Полученные в процессе экспериментов данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость КТС для контактной пары из латуни, с различными заполнителями в виде листовых прокладок при их различной толщине от давления

Материал заполнителя	Толщина прокладки, мм	Температура в зоне контакта, T, K	Термосопротивление в зоне контак- та $R_{\theta} \cdot 10^3 \text{ м}^2 \cdot \text{к}/\text{Вт}$ при давлении P , МПа					
			0,1	0,3	0,45	0,8	1,2	2,0
Асбест	0,32	375	4,2	3,8	3,6	3,3	3,1	2,9
– // –	0,43	– // –	4,8	4,1	3,8	3,5	3,4	3,2
Слюда	0,3	– // –	3,2	2,9	2,7	2,5	2,3	2,1
– // –	0,4	– // –	3,5	3,4	3,1	3,0	2,8	2,6
Фторопласт	0,38	– // –	3,8	3,6	3,4	3,3	3,2	3,1
Стеклоткань	0,3	– // –	2,1	1,8	1,5	1,4	1,3	1,2
Непосредственный контакт	–	– // –	1,2	0,9	0,76	0,64	0,58	0,51
Асбест	0,43	415	4,2	3,5	3,1	2,8	2,6	2,4

Из анализа приведенных в таблице 1 опытных данных можно сделать следующие выводы. Наибольшими теплоизоляционными свойствами обладают прокладки из материала с большим наполнением воздуха, как это имеет место в прокладках из асбеста. Увеличение толщины прокладок приводит к росту КТС соединений. Контактное сопротивление в соединении с малотеплопроводным заполнителем больше, чем КТС при непосредственном контакте поверхностей составных систем. Повышение температуры в зоне контакта приводит к сниже-

нию КТС, что объясняется ростом коэффициента теплопроводности воздуха в прокладке.

Из практики создания надежной теплоизоляции [8-10] видно, что достаточно эффективной представляется многослойная система. Для изучения эффективности подобных заполнителей, вводимых в зону раздела контактных пар, проведены специальные исследования КТС для двух и трехслойных прокладок, помещенных между плоскошероховатыми поверхностями из сплава Д16Т. Исследовались прокладки из асбеста, слюды, стеклянной ваты, а также пластин из малотеплопроводной стали марки 1Х18Н9Т. В зоне контакта постоянно поддерживалась температура порядка 409 К. Результаты проведенных исследований представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Зависимость КТС для контактной пары из сплава Д16Т с двух и трехслойными прокладками от нагрузки

Материал заполнителя	Число слоев прокладок	Толщина прокладки, мм	Термосопротивление в зоне контакта $R\hat{e} \cdot 10^3 \text{ м}^2 \cdot \text{к}/\text{Вт}$ при давлении P , МПа					
			0,1	0,3	0,45	0,8	1,2	2,0
Асбест	2	0,7	1,63	1,58	1,46	1,44	1,41	1,4
–//–	3	1,2	1,73	1,69	1,66	1,64	1,61	1,5
Слюда	2	0,6	1,32	1,3	1,26	1,22	1,18	1,18
–//–	3	1,2	1,42	1,38	1,35	1,32	1,3	1,3
Стекловата	–	1,2	1,53	1,48	1,42	1,32	1,28	1,27
–//–	–	1,7	1,68	1,56	1,52	1,49	1,45	1,42
Сталь 1Х18Н9Т	1	0,82	0,78	0,76	0,73	0,72	0,65	0,62
–//–	2	0,6	1,25	1,21	1,14	1,1	1,05	0,96

Как следует из таблицы 2, применение многослойной теплоизоляции значительно повышает контактное термосопротивление через зону контакта. Поднять величину КТС можно также, применяя металлические пластины из малотеплопроводных металлов. В данном случае применялась сталь марки 1Х18Н9Т. Такого рода соединения находят широкое применение в составных системах, работающих при повышенных механических нагрузках.

Приведенные в данном сообщении результаты экспериментальных исследований позволяют в процессе проектирования технических систем с составными элементами создать условия, позволяющие в процессе их эксплуатации избежать аварийной ситуации, исключив перегрев отдельных деталей и узлов технических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Шлыков, Ю. П. Контактное термическое сопротивление: монография / Ю. П. Шлыков, Е. А. Ганин, С. Н. Царевский. – Москва, 1977. – 398 с.
- 2 Попов, В. М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений : монография / В. М. Попов. – Москва, 1971. – 216 с.
- 3 Madhusudana, C. V. Thermal Contact Conductance: монография / C. V. Madhusudana. – Sydney : Springer, 2014. – 260 p.
- 4 Review of Thermal Joint Resistance Models for Nonconforming Rough Surfaces / M. Bahrami, J. R. Culham, M. M. Yovanovich, G. E. Schneider // Applied Mechanics Reviews. – 2006. – V. 59. – P. 1-12.
- 5 Yovanovich, M. M. Four Decades of Research on Thermal Contact, Gap, and Joint Resistance in Microelectronics / M. M. Yovanovich // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. – 2005. – V. 28. – № 20. – P. 182-206. DOI : 10.1109/CAPT2005.848483.
- 6 Шлыков, Ю. П. Контактный теплообмен : монография / Ю. П. Шлыков, Е. А. Ганин. – Москва-Ленинград, 1963. – 144 с.
- 7 Карслоу, Г. С. Теплопроводность твердых тел: монография / Г. С. Карслоу, Д. К. Егер. – Москва, 1954. – 456 с.
- 8 Smuda, P. A. Thermal Isolation with Low Conductance Interstitial Materials Under Compressive Loads / P. A. Smuda, D. A. Gyroog. – AJAA Paper № 69-25, New York, 1969.
- 9 Гайорог, Д. А. Исследование теплоизоляционных материалов для контактирующих поверхностей / Д. А. Гайорог // Теплообмен и тепловой режим космических аппаратов : сборник научных статей. – Москва, 1976. – С. 234-258.
- 10 Теплообмен через тонкослойные прослойки в зоне контакта металлических поверхностей / В. М. Попов, О. Л. Ерин, А. П. Новиков, И. Ю. Кондратенко // Вестник ВГТУ. – Воронеж, 2011. – Т. 7. – № 6. – С. 37-39.