

УДК 537.311.4

ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТНОГО СЛОЯ С ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ МЕЖДУ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Попов В.М., Новиков А.П., Ерин О.Л.

ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия», Воронеж, Россия (394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8) e-mail: etgyglta@mail.ru

В процессе проектирования и эксплуатации теплонапряженных технических систем с составными элементами возникает необходимость терморегулирования путем изменения термосопротивления в зонах контакта. Предлагается путем введения между поверхностями отдельных элементов систем заполнителей различной природы изменять контактное термосопротивление. Экспериментально показана эффективность использования сетчатых экранов из нержавеющей стали для создания надежных теплоизоляционных переходов. Для характеристики различных сочетаний основного металла контактирующих поверхностей и материала заполнителя вводится безразмерный комплекс. Безразмерное термосопротивление может быть использовано для прогнозирования процесса теплопереноса через контактные соединения с различными заполнителями при разных усилиях прижима и характеристиках поверхностей контакта.

Ключевые слова: контактное термосопротивление, заполнитель, поверхность, теплообмен, давление.

THERMISTOR OF A CONTACT LAYER WITH FILLERS BETWEEN METAL SURFACES

Popov V. M., Novikov A. P., Erin O. L.

Voronezh State Forestry Academy, Voronezh, Russia (394 087 Voronezh, Timiryazev str., 8), e-mail: etgyglta@mail.ru

During the process of design and operation of heat-engineering systems with component element, the necessity of thermoregulation by changing the thermal resistance of the contact zones occurs. It is proposed to change the contact thermal resistance by introducing of fillers systems of different nature between the surfaces of the individual elements. Effectiveness of stainless steel wire screens usage for making reliable heat-insulated transitions is shown experimentally. In order to characterize different combinations of contact surfaces basic metal and filler material a dimensionless complex is introduced. Dimensionless thermal resistance can be used to predict the heat mass transfer process through contact joints with different fillers under different downforces and characteristics of contact surfaces.

Key words: contact thermistor, filler, surface, heat exchange, pressure.

Введение

Для современной техники характерна тенденция по резкому повышению теплонапряженности элементов конструкций. В этих условиях вопросы контактного теплообмена приобретают существенное значение. Об этом свидетельствуют многочисленные отечественные и зарубежные исследования последних десятилетий [2, 3, 6, 9]. Как экспериментальные, так и теоретические исследования показали, что вследствие большого числа факторов, оказывающих влияние на теплообмен в зоне контакта твердых тел, решение этой проблемы далеко от завершения. Остается без ответа целый ряд вопросов по формированию контактного термосопротивления (КТС) для условий, близких к

реальным. В частности, к разряду малоизученных следует отнести вопросы направленного терморегулирования в составных теплонапряженных системах путем введения в зону контакта различных заполнителей [7, 8]. Во-первых, проведенные экспериментальные исследования ограничены малым набором заполнителей, вводимых в контактную зону, и, во-вторых, практически отсутствует теоретическая проработка возможности применения заполнителей для конкретных условий функционирования теплового контакта. По сути дела эта проблема решалась по мере возникновения необходимости повышать или снижать тепловую проводимость через зону контакта составных деталей и узлов.

Цель исследования. Результаты исследования

В данном сообщении ставится задача на основе обширного экспериментального материала для заполнителей различной природы, при разных условиях контакта сделать обобщающие выводы и рекомендации для проведения операций по терморегулированию технических систем с контактными переходами. Экспериментальная программа исследований реализовывалась на специальной установке для изучения контактного теплообмена. Основу установки составляет рабочая ячейка из двух тепломеров в виде контактирующих торцами вертикально расположенных латунных стержней длиной 100 мм и диаметром 30 мм каждый. Верхний стержень выполняет функции электронагревателя, нижний – водяного холодильника. Каждый стержень имеет по пять радиальных сверлений диаметром 1,5 мм на расстоянии 10 мм друг от друга на глубину 15 мм, в которые монтируются хромель-копелевые термопары. Электродвижущая сила, развиваемая термопарами, измеряется компенсационным методом при помощи потенциометра. Боковые поверхности стержней теплоизолированы. Осевое нагружение в зоне контакта осуществляется путем установки набора грузов. Для определения термосопротивления в зоне контакта металлических поверхностей R_k применяется метод, в основу которого положен закон Фурье и дифференциальное уравнение теплопроводности для неограниченной пластины с изотермическими поверхностями при стационарных условиях теплового режима. КТС рассчитывалось по формуле

$$R_k = \frac{\Delta T_k}{q_{cp}}, \quad (1)$$

где температурный перепад в зоне контакта ΔT_k определялся из графика изменения температуры по длине стержней; q_{cp} – средняя величина теплового потока, которая находилась по градиентам температур в верхнем и нижнем стержнях по формулам:

$$\text{для верхнего стержня } q_6 = \frac{\lambda_6 \cdot \Delta T_{1-2}}{l_{1-2}} ; \text{ для нижнего стержня } q_n = \frac{\lambda_n \cdot \Delta T_{6-7}}{l_{6-7}} \quad (2)$$

Здесь λ_6, λ_n – соответственно коэффициенты теплопроводности материалов верхнего и нижнего стержней; $\Delta T_{1-2}, \Delta T_{6-7}$ – температурные перепады между смежными точками, где установлены термодатчики; l_{1-2}, l_{6-7} – расстояние между смежными точками.

При известных q_6 и q_n находится средний тепловой поток через зону контакта

$$q_{cp} = \frac{q_6 + q_n}{2} \quad (3)$$

В качестве заполнителей межконтактного пространства использовались асбестовый лист, железная сетка с оксидной пленкой и обработанная растворителем, сетки из нержавеющей стали из различной по толщине проволоки и разного размера ячеек.

Для исследуемых заполнителей проведены две серии опытов при средних значениях температуры в зоне контакта $t_k = 65^\circ\text{C}$ и $t_k = 130^\circ\text{C}$. Изменялось усилие прижима P от 0,2 до 0,85 МПа. Применяемое усилие прижима в зоне контакта относится к категории малых нагрузок [7]. Полученные в процессе проведенных исследований зависимости $R_k = f(P)$ представлены на рис. 2 и 3.

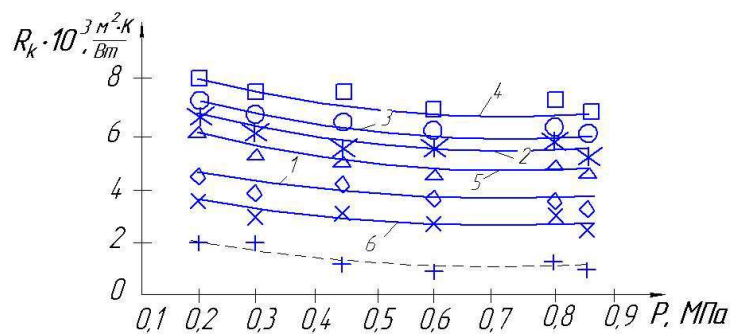


Рисунок 1. Зависимость термосопротивления от нагрузки при $t_k = 65^\circ\text{C}$ для заполнителей в зоне контакта: 1 – асбест ($\delta = 0,43$ мм); 2 – железная сетка, обработанная растворителем ($\delta = 0,75$ мм, размер ячейки 1 мм \times 1 мм); 3 – та же железная сетка с оксидной пленкой; 4 – сетка из нержавеющей стали ($\delta = 0,88$ мм, 1 мм \times 1 мм); 5 – сетка из нержавеющей стали ($\delta = 0,39$ мм, 0,5 мм \times 0,5 мм); 6 – сетка из нержавеющей стали ($\delta = 0,13$ мм, 0,05 мм \times 0,05 мм); штриховая линия – непосредственный контакт без прослойки.

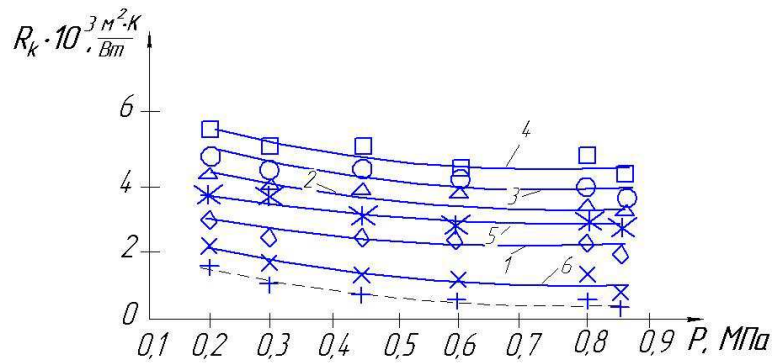


Рисунок 2. Зависимость термосопротивления от нагрузки при $t_k = 130 \text{ }^\circ\text{C}$ для заполнителей в зоне контакта: аналогично данным рис. 2.

Из анализа приведенных на рис. 1 и 2 опытных данных можно сделать следующие выводы. Наиболее высокие КТС создают соединения с заполнителями в виде сетки из нержавеющей стали с проволокой большей толщины (кривая 4). Для сетки из проволоки меньшей толщины и меньшего размера ячеек термосопротивление в зоне контакта значительно меньше (кривые 5 и 6). Подобный характер формирования КТС можно объяснить уменьшением толщины воздушной прослойки и ростом непосредственного контакта сетки с поверхностями нагревателя и холодильника. Сетка из железа (кривая 2) снижает термическое сопротивление по сравнению с сеткой из малотеплопроводной нержавеющей стали. Сетка из железной проволоки, покрытой оксидной пленкой, как и следовало ожидать, снижает тепловую проводимость контакта (кривая 3 по сравнению с кривой 2). Использование металлических сеток, особенно из нержавеющей стали, дает возможность создавать достаточно эффективную теплоизоляцию по сравнению, например, с листовым асбестом (кривая 1). При этом следует учитывать, что металлические соединения с заполнителями из сеток могут функционировать в режиме значительных механических нагрузок.

На величину КТС оказывает влияние температура в зоне контакта. Как видно из данных рис. 1 и 2, повышение температуры в зоне контакта заметно снижает КТС, что можно объяснить, в первую очередь, повышением коэффициента теплопроводности воздуха в зоне перехода с увеличением температуры. Для оценки различных сочетаний основного металла контактирующих поверхностей и материала вводимого в зону контакта заполнителя вводится безразмерный комплекс в виде отношения термосопротивления контактной зоны R_{np} с несжатой прослойкой из материала заполнителя толщиной δ к термосопротивлению при непосредственном контакте R_k и эквивалентной толщины зазора Δ , т.е.

$$K = (R_{np} / \delta) / (R_k / \Delta) \quad (4)$$

По данным рис. 2 с помощью формулы (4) построены кривые зависимости $K = f(P)$ на рис. 3.

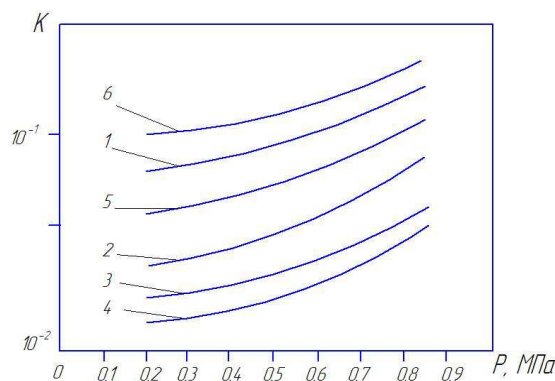


Рисунок 3. Зависимость безразмерного термосопротивления от нагрузки для различных заполнителей при $t_k = 130^\circ\text{C}$: аналогично данным рис. 2

Безразмерное термосопротивление имитирует контактное соединение с заполнителем, обладающим в последнем варианте бесконечным термосопротивлением на пути теплового потока. В реальных условиях высокие значения K характерны для заполнителей из хороших теплоизоляционных материалов. Если же безразмерное термосопротивление стремится к нулю, то система имеет контактное соединение с заполнителями из высокотеплопроводных материалов.

Как видно из графиков рис. 3, повышение давления в зоне контакта нивелирует различия в безразмерном термосопротивлении для различных заполнителей контактной зоны. Таким образом, при достаточно высоком значении давления можно считать, что различия в эффективности различных заполнителей станут незначительными.

Практическое использование выражения (4) для конкретных контактных соединений сопряжено с определенными трудностями. Термосопротивление прослойки из материала заполнителя R_{np} в первом приближении может быть рассчитано при известной теплопроводности материала λ_m и замеренной толщине прослойки δ или найдено экспериментальным путем. Сложнее решается задача нахождения значения КТС при непосредственном касании поверхностей R_k . Здесь также возможны два варианта решения вопроса, т.е. можно найти R_k экспериментальным путем или использовать ранее полученные расчетные формулы. Для контактных соединений, работающих в режиме средних и высоких механических нагрузок ($P \geq 10$ МПа) [3], получены расчетные формулы, позволяющие находить R_k для конкретной контактной пары [2, 6, 9]. В то же время в практике наиболее часто встречаются теплонпряженные соединения, функционирующие в режиме малых механических нагрузок. Получение расчетных зависимостей для определения КТС в этом случае усложняется неопределенностью распределения фактических площадок контакта по

номинальной поверхности соприкосновения поверхностей. Более корректными представляются формулы, полученные ранее [4] для контактных пар с плоскошероховатыми металлическими поверхностями.

Для контактов плоскошероховатых поверхностей из высокопластичных металлов термосопротивление при наличии воздушной прослойки рассчитывается по формуле

$$\frac{1}{R_k} = 3,2 \cdot 10^6 \cdot \overline{\lambda}_m \cdot \left(\frac{P}{E} \cdot \beta \cdot T_k \cdot \chi \right)^{0,73} + \frac{\lambda_c \cdot Y}{h_{\text{макс}1} + h_{\text{макс}2}} \quad (5)$$

и для контактов из высокоупругих металлов

$$\frac{1}{R_k} = 1,05 \cdot 10^6 \cdot \overline{\lambda}_m \cdot \left(\frac{P}{E} \cdot \beta \cdot T_k \cdot \chi \right)^{0,73} + \frac{\lambda_c \cdot Y}{h_{\text{макс}1} + h_{\text{макс}2}} \quad (6)$$

Здесь $\overline{\lambda}_m, \lambda_c$ – соответственно коэффициенты теплопроводности металлов и межконтактной газовой среды; E – модуль упругости металла контактной пары; T_k – средняя температура в зоне контакта; $h_{\text{макс}}$ – максимальная высота микронеровностей поверхности контакта; β – коэффициент объемного расширения; χ – коэффициент, зависящий от суммы $h_{\text{макс}1} + h_{\text{макс}2}$, который аналитически может быть интерпретирован в форме

$$\chi = \frac{12}{h_{\text{макс}1} + h_{\text{макс}2}} \quad \text{при } 5 \geq h_{\text{макс}1} + h_{\text{макс}2} \geq 1 \text{ мкм};$$

$$\chi = \left(\frac{20}{h_{\text{макс}1} + h_{\text{макс}2}} \right)^{0,63} \quad \text{при } 10 \geq h_{\text{макс}1} + h_{\text{макс}2} \geq 5 \text{ мкм};$$

$$\chi = \left(\frac{30}{h_{\text{макс}1} + h_{\text{макс}2}} \right)^{0,4} \quad \text{при } 30 \geq h_{\text{макс}1} + h_{\text{макс}2} \geq 10 \text{ мкм}.$$

Относительную величину зазора Y можно найти, используя кривые опорных поверхностей по снятым с поверхностей контакта профилограммам [1]. Таким же способом находится эквивалентная толщина межконтактной среды Δ .

Во многих случаях контактные поверхности имеют волнистость, которая оказывает существенное влияние на величину контактного сопротивления. Для расчета R_k можно использовать ранее полученные расчетные зависимости [5].

При контакте двух волнистых поверхностей

$$\frac{1}{R_k} = \frac{3 \cdot \overline{\lambda}_m \cdot \left(\frac{P}{E}\right)^{0,52} \cdot \left(\frac{L/2}{H_{вср1} + H_{вср2}}\right)^{0,52}}{L/2} + \frac{\lambda_c \cdot Y}{(H_{макс1} + H_{макс2}) + (h_{макс1} + h_{макс2})} \quad (7)$$

и при контакте волнистой и плоскошероховатой поверхностей

$$\frac{1}{R_k} = \frac{2,1 \cdot \overline{\lambda}_m \cdot \left(\frac{P}{E}\right)^{0,43} \cdot \left(\frac{L/2}{H_{вср}}\right)^{0,43}}{L/2} + \frac{\lambda_c \cdot Y}{H_{макс} + (h_{макс1} + h_{макс2})}, \quad (8)$$

где H_B – высота волны; L – шаг волны.

В заключение следует отметить, что приведенные выше результаты исследований позволяют прогнозировать и направленно регулировать процесс теплообмена в теплонапряженных технических системах с контактными соединениями.

Список литературы

1. Демкин Н.Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 322 с.
2. Мадхусудана К.В., Флетчер Л.С. Контактная теплопередача. Исследования последнего десятилетия // Аэрокосмическая техника. 1987. № 3. С. 103–120.
3. Меснянкин С.Ю., Викулов А.Г., Викулов Д.Г. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел // Успехи физических наук. 2009. Т. 179. № 9. С. 945–970.
4. Попов В.М. К вопросу исследования термического контактного сопротивления // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1976. № 3. С. 170–174.
5. Попов В.М. К определению термического сопротивления контакта обработанных металлических волнистых поверхностей // Инженерно-физический журнал. 1977. Т. 32. № 5. С. 779–785.

6. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М.: Энергия, 1971. 214 с.

7. Попов В.М. Теплообмен через соединения на клеях. М.: Энергия, 1974. 304 с.

8. Флетчер Л.С., Смуда П.А., Гайорог Д.А. Коэффициент термического контактного сопротивления некоторых материалов с низкой теплопроводностью, применяемых в качестве заполнителей межконтактного промежутка // Ракетная техника и космонавтика. 1969. Т. 7. № 7. С. 107–117.

9. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1977. 328 с.

Рецензенты:

Бараков А.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж.

Мозговой Н.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж.