

УДК 536.212

ТЕПЛООБМЕН ЧЕРЕЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ С ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ В ЗОНЕ КОНТАКТА

В. М. Попов, О. Л. Ерин, И. Ю. Кондратенко

ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия»

etgvglta@mail.ru

Развитие новых отраслей техники сопровождается повышением теплонапряженности элементов конструкций. В целом ряде случаев на пути тепловых потоков через разъемные соединения конструкций возникают термосопротивления в зоне контакта металлических поверхностей за счет дискретного характера соприкосновения [1]. Наличие такого термосопротивления приводит к температурному скачку в зоне контакта и соответственно к увеличению общего температурного перепада в составных деталях и узлах. Условия эксплуатации таких технических систем зачастую требуют направленного регулирования термосопротивления в сторону его снижения или увеличения [2].

Вопросам терморегулирования посвящены специальные экспериментальные работы [3], в которых в зоне контакта помещались различные малотеплопроводные заполнители. Исследовалась зависимость контактной тепловой проводимости от механической нагрузки на контакты. При этом создавались достаточно высокие усилия прижима, достигающие почти 3 МПа.

В данной работе поставлена задача экспериментального исследования процесса формирования контактного термосопротивления при введении в зону контакта различных заполнителей при малых усилиях прижима. Исследования проводились

на установке, общий вид которой представлен на рис. 1.

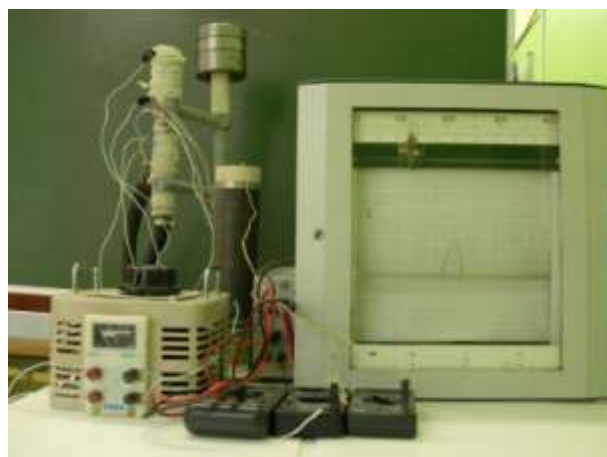


Рис. 1. Общий вид установки для исследования контактного термосопротивления

Экспериментальная установка состоит из двух контактирующих торцами вертикально расположенных латунных стержней длиной 100 мм и диаметром 30 мм. Верхний стержень выполняет функции электронагревателя, нижний стержень — холодильника, охлаждаемого проточной водой. Каждый стержень имеет по пять радиальных сверлений диаметром 1,5 мм на глубину 15 мм, в которых установлены хромель-копелевые термопары. Электродвижущая сила, развиваемая термопарой, измеряется компенсационным методом при помощи потенциометра. Боковые поверхности стержней теплоизолированы. Осевое нагружение в зоне контакта осуще-

ствлялось путем установки набора.

Для нахождения контактного термосопротивления R_k применялся метод, в основу которого положен закон Фурье и дифференциальное уравнение теплопроводности для неограниченной пластины с изотермическими поверхностями при стационарных условиях теплового режима.

Контактное термосопротивление находилось по формуле

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

где ΔT_k – температурный перепад в зоне контакта, определяется из графика изменения температуры по длине стержней;

q_{cp} – средняя величина теплового потока, которая находится по градиентам температур в верхнем и нижнем стержнях по формулам:

для верхнего стержня

$$q_g = \frac{\lambda_g \cdot \Delta T_{1-2}}{l_{1-2}}, \quad (2)$$

для нижнего стержня

$$q_n = \frac{\lambda_n \cdot \Delta T_{6-7}}{l_{6-7}}. \quad (3)$$

Здесь λ_g, 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 термодпары;

l_{1-2}, l_{6-7} – расстояние между смежными точками.

При известных q_g и q_n находится средний тепловой поток

$$q_{cp} = \frac{q_g + q_n}{2}. \quad (4)$$

В качестве заполнителей межконтактного пространства использовались асбестовая прокладка, две железные сетки, одна с оксидной пленкой, другая обработанная растворителем, сетки из нержавеющей стали с проволокой различной толщины и разного размера ячеек. Проведены две серии опытов при 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.

Полученные в процессе исследования зависимости $R_k = f P$ приведены на рис. 2 и 3.

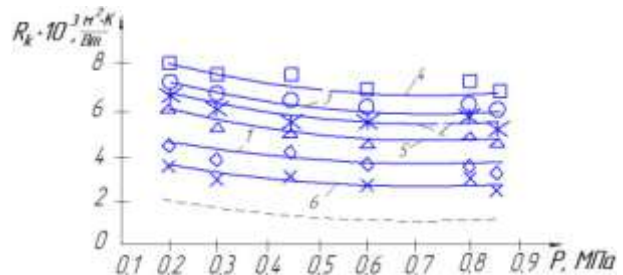


Рис. 2. Зависимость термосопротивления от нагрузки при $t_k=65^\circ\text{C}$ для заполнителей в зоне контакта:

- 1 – асбест ($\delta=0,43$ мм);
 - 2 – железная сетка, обработанная растворителем ($\delta=0,75$ мм, размер ячейки 1×1 мм);
 - 3 – та же железная сетка с оксидной пленкой;
 - 4 – сетка из нержавеющей стали ($\delta=0,88$ мм, размер ячейки 1×1 мм);
 - 5 – сетка из нержавеющей стали ($\delta=0,39$ мм, размер ячейки $0,5 \times 0,5$ мм);
 - 6 – сетка из нержавеющей стали ($\delta=0,13$ мм, размер ячейки $0,05 \times 0,05$ мм);
- штриховая линия – непосредственный контакт стержней

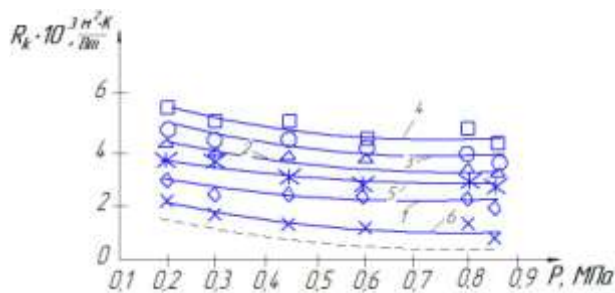


Рис. 3. Зависимость термосопротивления от нагрузки при $t_k=130\text{ }^\circ\text{C}$ для заполнителей в зоне контакта: аналогично данным рис. 2

Анализируя приведенные на рис. 2 и 3 данные опытов, можно сделать следующие выводы. Наибольшим термическим сопротивлением обладают контактные соединения с заполнителем в виде сетки из нержавеющей стали с проволокой наибольшей толщины (кривая 4); уменьшение толщины проволоки и размера ячеек приводит к заметному снижению термосопротивления (кривые 5 и 6). Такой характер формирования контактного термосопротивления объясняется размерами воздушной прослойки в зоне контакта и величиной непосредственного контакта сетки с поверхностями нагревателя и холодильника.

Из приведенных опытных данных также следует, что сетка из более теплопроводного металла (железо, кривая 2) создает термосопротивление, значительно меньшее, чем для контакта с сеткой из нержавеющей стали. Сетка с оксидной пленкой на поверхности, как и следовало ожидать, снижает тепловую проводимость контакта (кривая 3 в сравнении с 2). Применение сеток, особенно из нержавеющей стали, позволяет создавать более эффективную теплоизоляцию по сравнению,

скажем, с листовым асбестом (кривая 1). Сравнивая данные на рис. 2 и 3, можно констатировать, что повышение температуры в зоне контакта значительно снижает термосопротивление в зоне перехода, что можно объяснить заметным ростом коэффициента теплопроводности воздуха в контактной зоне с увеличением температуры.

Для получения обобщенной характеристики тепловой проводимости в зоне контакта при наличии различных по природе заполнителей вводится безразмерный комплекс в виде отношения термосопротивления контактной зоны с несжатой прослойкой из выбранного материала к термосопротивлению при непосредственном контакте и эквивалентной среды, т.е.:

$$K = R_{np} / \delta / R_k / \Delta , \quad (5)$$

где R_k, R_{np} – соответственно термосопротивления при непосредственном контакте поверхностей стержней и при наличии прослойки из заполнителя; δ, Δ – соответственно толщина прослойки из заполнителя и эквивалентная толщина межконтактной среды.

Входящие в (5) термосопротивления R_k и R_{np} определялись опытным путем.

Эквивалентную толщину межконтактной среды Δ находили из профилограмм с контактирующих поверхностей согласно методике [4, 5]. На рис. 4 приведены кривые зависимости безразмерного комплекса K для различных заполнителей от усилий прижима.

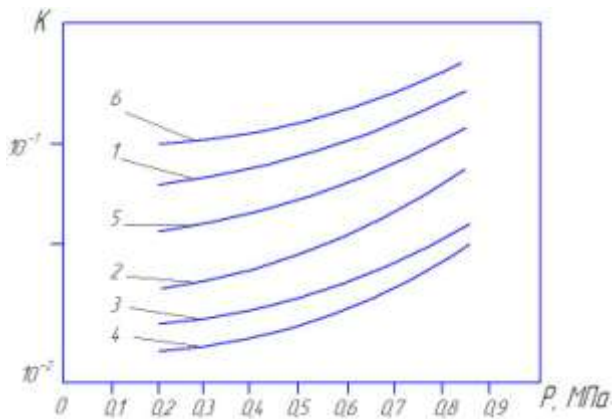


Рис. 4. Зависимость безразмерного термосопротивления от нагрузки для различных заполнителей при $t_k=130$ °С: аналогично данным рис. 3.

Из рис. 4 следует, что если безразмерное термосопротивление растет, то это свидетельствует о повышении теплоизоляционных характеристик заполнителей. И, наоборот, при снижении K растет теплопроводность прослойки из заполнителя. Дальнейшие исследования для различных по природе заполнителей позволят провести их классификацию. Таким образом, введение комплекса K открывает возможность вести сравнения эффективности материалов заполнителей проводить тепло.

В заключение следует отметить, что приведенные выше результаты исследований, которые следует считать начальной стадией программы по терморегулированию систем с контактными соединениями,

указывают на необходимость дальнейшего изучения процессов теплообмена контактов с заполнителями различной природы и геометрии, при разных условиях теплообмена.

Библиографический список

1. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А. Контактное термическое сопротивление / М.: Энергия, 1977. 328 с.
2. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений / М.: Энергия, 1971. 216 с.
3. 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. 107–116.
4. Демкин Н.Б. Контактное сопротивление шероховатых поверхностей / М.: Наука, 1970. 226 с.
5. Попов В.М., Ерин О.Л., Кондратенко И.Ю. Теплообмен через металлические соединения с заполнителями в зоне контакта // Вестник ВГТУ, 2011. Т. 7, № 6. С. 37–39.