

К ВОПРОСУ О ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИИ В РАЗЪЕМНЫХ МАЛОНАГРУЖЕННЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Попов В.М., Ерин О.Л., Лушникова Е.Н.

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

Во многих областях современной техники при проектировании машин и аппаратов возникает необходимость иметь информацию о процессах теплообмена через составные системы и инструментарию по терморегулированию. В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований по формированию контактного термосопротивления через соединения из разнородных металлов с мало-теплопроводными заполнителями, функционирующими в режиме малых усилий прижима. Установлено, что наиболее эффективными как теплоизоляторы представляются заполнители из металлических сеток. Использование в качестве заполнителей металлических сеток можно повысить контактное термосопротивление в зоне раздела на порядок по сравнению с контактной парой при непосредственном касании поверхностей. Экспериментально показано влияние температуры и усилий прижима на термосопротивление в зоне раздела. Переход к безразмерному термосопротивлению позволяет получать данные по оптимальному сочетанию основного металла контактной пары и материала заполнителя.

Ключевые слова: контактное термосопротивление, теплообмен, поверхности контакта, заполнитель, усилие прижима, теплоизолятор.

TO THE QUESTION OF THERMAL CONTROL IN RELEASABLE LOW-LOADED JOINTS MADE OF DISSIMILAR METALS

Popov V.M., Yerin O.L., Lishnikova E.N.

FSBEI HPE "Voronezh State Academy of Forestry and Technologies", 394087, Voronezh, 8, Timiryazeva str., e-mail: etgvglta@mail.ru.

In many areas of modern technology in the design of machines and devices there is a need to have information about the processes of heat transfer through composite systems and instruments for temperature control. This article presents the results of experimental studies on the formation of the contact thermal resistance through the connection of dissimilar metals with low thermal conductive fillers operating in the regime of small contact force. It was found that the most effective heat insulators are as fillers of metal grids. Using as fillers of metal grids can increase the contact thermal resistance in section area on the order in comparison with the contact pair in direct touch of surfaces. Effect of temperature and contact force on thermal resistance in the area of the section is experimentally demonstrated. The transition to the dimensionless thermal resistance can provide data on the optimal combination of base metal of contact pair and filler material.

Keywords: contact thermal resistance, heat transfer, surfaces of contact, filler, pressing force, thermal insulator.

В последние три десятилетия интенсивно развивалось отдельное направление по тепло-массообмену, так называемый контактный теплообмен. Отечественными и зарубежными учеными проведены обширные экспериментальные и теоретические исследования по контактному теплообмену. Результаты исследований опубликованы в виде монографий, обзоров и научных статей [2–5; 9].

Большой объем исследований по контактному теплообмену объясняется тем, что на формирование контактного термического сопротивления (КТС) в зоне раздела между металлическими поверхностями оказывают влияние многочисленные факторы. Экспериментально установлено, что КТС зависит от чистоты обработки поверхностей контакта усилий прижима, температурных условий, природы контактирующих металлов и межконтактной среды,

времени воздействия нагрузки, наличия оксидных пленок на контактных поверхностях, направления теплового потока.

В процессе проектирования и эксплуатации технических систем с составными элементами часто возникает необходимость направленного изменения величины КТС. Так, при креплении резервуаров для низкотемпературных жидкостей, в теплоизоляционных покрытиях различных узлов авиационных и космических летательных аппаратов, в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания, в теплоизоляции высокотемпературных батарей необходимо повышать КТС. Наибольшее распространение получил технологический прием повышения КТС путем введения в зону раздела малотеплопроводных прокладок. Простая, на первый взгляд, задача при детальном исследовании оказалась многофакторной. Экспериментами было установлено, что теплопередача через зону контакта с заполнителями зависит от его природы, толщины, сочетаний основного металла и материала заполнителя [1; 8].

Ранее проведенными экспериментальными исследованиями на однородных контактных парах из латуни Л80 и сплава Д16Т с заполнителями в виде прокладок из малотеплопроводных материалов, а также металлических сеток установлено [6; 7], что КТС для соединений с такими заполнителями значительно выше, чем КТС при непосредственном контакте металлических поверхностей соединений. Также выявлено, что даже незначительное повышение механической нагрузки сопровождается снижением КТС, как и следовало ожидать, применение заполнителя более низкой теплопроводности сопровождается ростом КТС. Наконец, установлено влияние сочетаний основного металла контактной пары и материала заполнителя на процесс формирования КТС.

В реальных теплонапряженных технических системах соединения часто формируются из различных по природе металлов или сплавов. Поэтому представляет интерес получение информации о формировании КТС в соединениях из разных металлов с заполнителями в зоне раздела.

На ранее описанной установке для исследования контактного теплообмена [6] проводились исследования по зависимости КТС (R) от прилагаемой на контактную пару механической нагрузки (P). В качестве контактных пар использовались алюминиевый сплав Д16Т и сталь 30. Контактные поверхности обрабатывались шлифованием до $R_z \approx 3,3 \text{ мкм}$. Нагружение осуществлялось набором грузов от 0,1 МПа до 2,5 МПа. Для исследования зависимости КТС от температуры в зоне контакта последняя поддерживалась на уровне $T_k = 338 \text{ К}$, 403 К, 443 К, 473 К. В зону раздела вводились асбестовый лист толщиной $\delta \approx 0,43 \text{ мм}$ и сетки из различных металлов, различной толщины проволоки и с разными по размерам ячейками.

Полученные в процессе испытаний данные в виде кривых зависимости $R = f(P)$ представлены на графиках рис. 1 - 4.

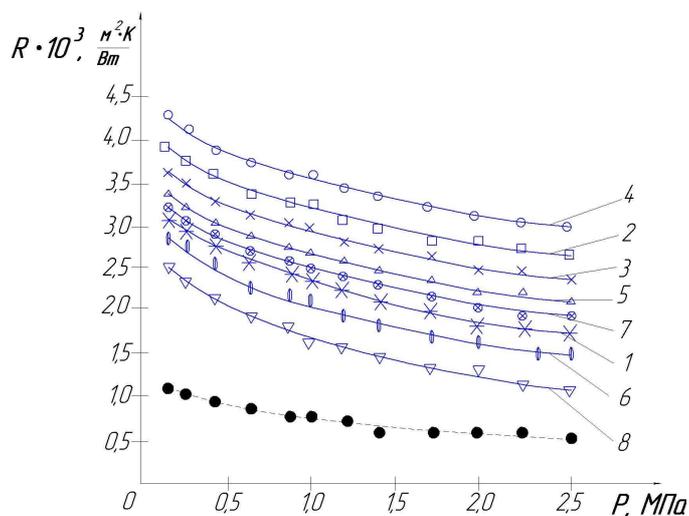


Рис. 1 – Зависимость термосопротивления контактной пары из алюминиевого сплава Д16Т – стали 30 с плоскошероховатыми поверхностями от нагрузки с прокладками в зоне контакта из следующих материалов: 1 – асбест ($\delta = 0,43$ мм); 2 – железная сетка с оксидной пленкой ($\delta = 0,75$ мм, размер ячейки 1×1 мм); 3 – та же железная сетка, обработанная растворителем; 4 – сетка из нержавеющей стали ($\delta = 0,88$ мм, 1×1 мм); 5 – сетка из нержавеющей стали ($\delta = 0,39$ мм, $0,5 \times 0,5$ мм); 6 – сетка из нержавеющей стали ($\delta = 0,13$ мм, $0,05 \times 0,05$ мм); 7 – сетка латунная ($\delta = 0,6$ мм, $0,5 \times 0,5$ мм); 8 – сетка латунная ($\delta = 0,19$ мм, $0,05 \times 0,05$ мм); штриховая линия – непосредственный контакт. Температура в зоне контакта $T_k = 338$ К.

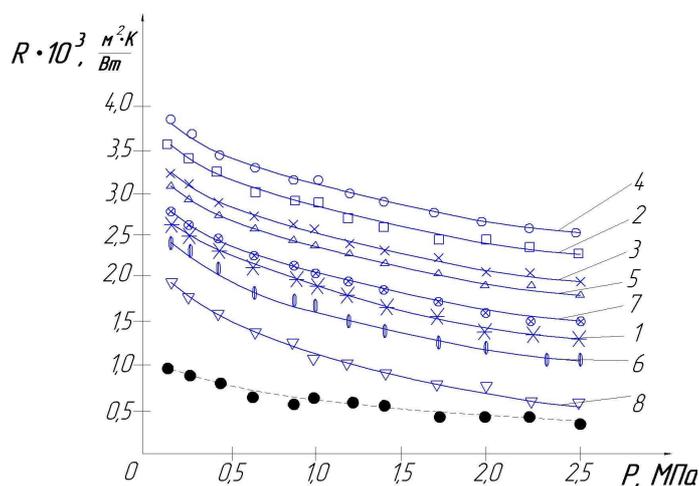


Рис. 2 – Зависимость термосопротивления контактной пары из алюминиевого сплава Д16Т – стали 30 с плоскошероховатыми поверхностями от нагрузки с прокладками в зоне контакта из: аналогично данным рис. 1. Температура в зоне контакта $T_k = 403$ К.

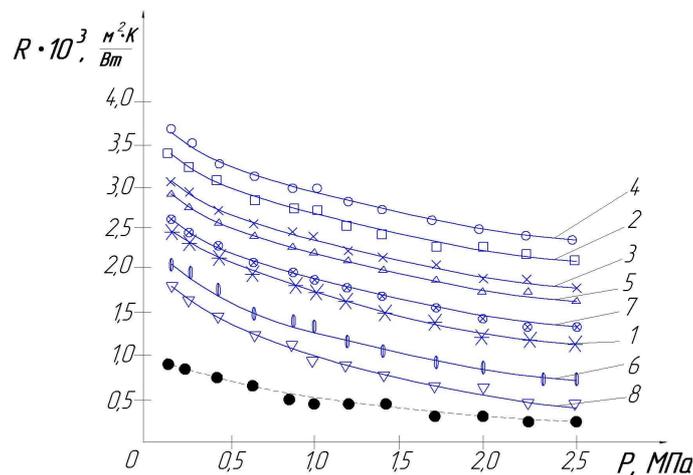


Рис. 3 – Зависимость термосопротивления контактной пары из алюминиевого сплава Д16Т – стали 30 с плоскошероховатыми поверхностями от нагрузки с прокладками в зоне контакта из: аналогично данным рис. 1. Температура в зоне контакта $T_k = 443$ К.

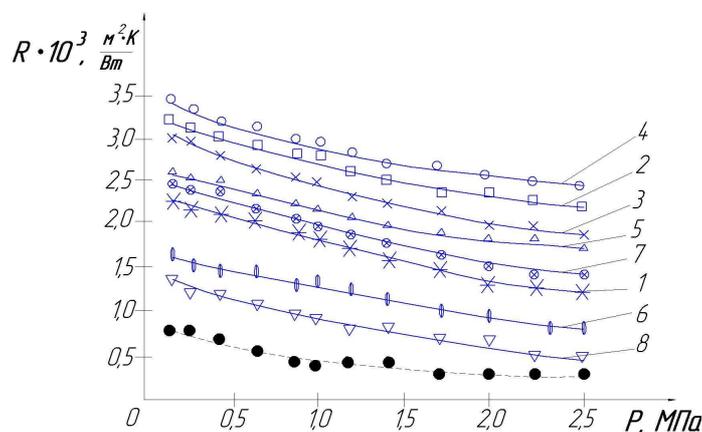


Рис. 4 – Зависимость термосопротивления контактной пары из алюминиевого сплава Д16Т – стали 30 с плоскошероховатыми поверхностями от нагрузки с прокладками в зоне контакта из: аналогично данным рис. 1. Температура в зоне контакта $T_k = 473$ К.

Из анализа данных рис. 1-4 можно сделать следующие выводы. КТС с ростом давления сжатия снижается, что можно объяснить уменьшением толщины воздушной прослойки и увеличением фактической площади контакта, в частности для сетчатых заполнителей.

Основываясь на данных опытов, можно утверждать, что во многих случаях сетчатые экраны более эффективны как теплоизоляторы, даже по сравнению с листовым асбестом.

Независимо от материала сетки уменьшение толщины сетки и размера ячеек ведет к заметному снижению КТС. Использование в качестве заполнителя железной сетки с оксидной пленкой на поверхности проволоки повышает КТС по сравнению с сеткой, обработанной растворителем.

Повышение температуры в зоне контакта приводит к снижению КТС для всех разновидностей заполнителей. Это можно объяснить увеличением коэффициента теплопроводности.

сти воздушной прослойки в зоне раздела и коэффициентов теплопроводности металлов, из которых изготовлены сетки.

Об эффективности вводимых в зону раздела заполнителей как теплоизоляторов можно судить по сравнению кривых на рис. 1-4 для контактных пар с заполнителями и при непосредственном контакте. Видно, что в ряде случаев КТС можно повысить почти на порядок.

Особый практический интерес представляет вопрос о том, как найти оптимальное сочетание металлов контактной пары с материалом заполнителей. Для этого введен безразмерный комплекс в виде соотношения термосопротивления зоны контакта R_{np} с не подвергнутой сжатию прослойкой из заполнителя толщиной δ к термосопротивлению при непосредственном контакте R_k и эквивалентной толщины межконтактной среды Δ . Тогда имеем

$$K = (R_{np}/\delta)/(R_k/\Delta) \quad (1)$$

Составляющие зависимость (1) термосопротивления R_{np} и R_k находятся экспериментальным путем. Термосопротивление при непосредственном контактировании металлических поверхностей может быть также получено согласно рекомендациям из работ [2; 4; 9]. Эквивалентную толщину межконтактной среды Δ можно находить по снятым с поверхностей контакта продольным и поперечным профилограммам согласно рекомендациям автора монографии [2].

Предложенный безразмерный комплекс K физически выражает термосопротивление соединения с заполнителем, который обладает в конечном варианте бесконечным термосопротивлением на пути теплового потока.

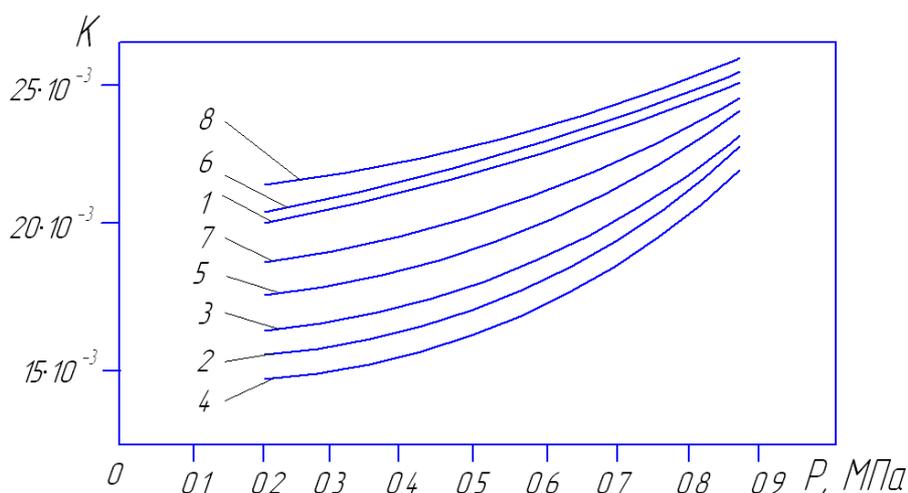


Рис. 5 – Зависимость безразмерного термосопротивления контактной пары из алюминиевого сплава Д16Т – стали 30 с плоскошероховатыми поверхностями от нагрузки с прокладками в зоне контакта из: аналогично данным рис. 4. Температура в зоне контакта $T_k = 473$ К.

На рис. 5 приведены кривые зависимости безразмерного комплекса от нагрузки для контактной пары согласно данным рис. 4. Из рис. 5 видно, что повышение усилий прижима между поверхностями контакта сопровождается уменьшением различия в безразмерном термосопротивлении для разных по природе заполнителей, т.е. при высоких нагрузках различия в эффективности заполнителей различной природы снижаются.

В заключение следует отметить, что результаты проведенных экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности направленного терморегулирования в зоне раздела составных элементов теплонапряженных технических систем. Одновременно открывается перспектива создания соединений с заполнителями, для которых могут быть рекомендованы марки металлов контактных пар и материалы заполнителей, создающие соединения с оптимальными теплоизоляционными свойствами.

Список литературы

1. Гайорог Д.А. Исследование теплоизоляционных материалов для контактирующих поверхностей // Теплообмен и тепловой режим космических аппаратов. – М. : Мир, 1974. – С. 234 – 258.
2. Демкин Н.Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. - М. : Изд-во АН СССР, 1962. – 322 с.
3. Мадхусудана К.В. Контактная теплопередача. Исследования последнего десятилетия / К.В. Мадхусудана, Л.С. Флетчер // Аэрокосмическая техника. - 1987. – № 3. – С. 103 – 120.
4. Меснянкин С.Ю. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел / С.Ю. Меснянкин, А.Г. Викулов, Д.Г. Викулов // Успехи физических наук. - 2009. – Т. 179. – № 9. – С. 945–970.
5. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. - М. : Энергия, 1971. – 216 с.
6. Попов В.М. Теплообмен через тонкослойные прослойки в зоне контакта металлических поверхностей / В.М. Попов, О.Л. Ерин, А.П. Новиков, И.Ю. Кондратенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2011. - Т. 7, № 6. - С. 37–39.
7. Попов В.М. Термосопротивление контактного слоя с заполнителями между металлическими поверхностями / В.М. Попов, А.П. Новиков, О.Л. Ерин // Современные проблемы науки и образования.- 2012. - № 1. – Режим доступа: www.Science-education.ru / 101 – 5559.
8. Флетчер Л.С. Коэффициент контактного термического сопротивления некоторых материалов с низкой теплопроводностью, применяемых в качестве заполнителей межконтактного

промежутка / Л.С. Флетчер, П.А. Смуда, Д.А. Гайорог // Ракетная техника и космонавтика. – 1969. – Т. 7. – № 7. – С. 107 – 110.

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

Рецензенты:

Афоничев Д.Н., д.т.н., профессор, зав. кафедрой электротехники и автоматики ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет имени Императора Петра I», г. Воронеж.

Мозговой Н.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой промышленной безопасности ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж.