

## ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЕ В ЗОНЕ КОНТАКТА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Попов В.М., Ерин О.Л., Лушникова Е.Н.

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

Рассматривается процесс формирования термосопротивления в зоне контакта металлических поверхностей с вставками в виде проволочных сеток в зависимости от усилий прижима. Опытным путем установлено значительное повышение термосопротивления в зоне раздела при введении сетчатых вставок. Приведена модель качественного анализа по влиянию металлических сеток на эффективность теплоизоляции в составных теплонапряженных системах. Показано, что на контактное термосопротивление соединений с сетчатыми вставками оказывает влияние толщина проволоки и размер ячеек сетки. Сделан вывод об эффективности сетчатых экранов, как теплоизоляторов для теплонапряженных систем, функционирующих в условиях высоких тепловых нагрузок при малых усилиях прижима.

Ключевые слова: контактное термосопротивление, сетчатый экран, теплопроводность, давление, температура, тепловой поток.

## THERMAL CONTROL IN THE CONTACT ZONE OF METALLIC SURFACES

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

*FSBEI HPE «Voronezh State Academy of Forestry and Technologies», 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russia, e-mail: [etgvglta@mail.ru](mailto:etgvglta@mail.ru).*

The process of thermal resistance formation is examined in the contact zone of metal surfaces with inserts in the form of wire mesh; depending on the contact force Significant increase of thermal resistance in the zone of section with the introduction of mesh inserts is established experimentally. A model of qualitative analysis on the influence of metal meshes on the efficiency of heat-insulation in composite thermally stressed systems is given. It is shown that the contact thermal resistance of compounds with mesh inserts is influenced by the thickness of the wire and mesh size. Conclusion is made about the effectiveness of mesh screens as heat insulators for heat-stressed systems operating at high thermal loads at low down force.

Keywords: contact thermal resistance, mesh screen, thermal conductivity, pressure, temperature, heat flow.

Успешное функционирование целого ряда технических систем в значительной степени зависит от температурного режима их элементов и поверхностей. Поэтому при их проектировании и создании требуется, в частности, применение механически прочной теплоизоляции в зоне раздела составных элементов. Подобные требования предъявляются к проектировщикам узлов крепления резервуаров с низкотемпературными жидкостями, высокотемпературных батарей, в конструкциях авиационных и космических летательных аппаратов.

Как свидетельствуют ранее проведенные исследования [1] для высоконагруженных контактных соединений, эффективно показали себя сетчатые экраны из металлической проволоки. Вместе с тем проведенные исследования носят ограниченный характер и не дают ответа на целый ряд вопросов, которые могут возникнуть при проектировании и эксплуатации систем с сетчатыми теплоизоляторами.

Для более глубокого изучения данной проблемы проведен специальный цикл экспериментальных исследований по формированию контактных термосопротивлений (КТС). Ис-

следования проводились на установке по изучению процессов контактного теплообмена [4; 5]. Основным элементом установки, принципиальная схема которой приведена на рис. 1, является рабочий участок в виде двух металлических стержней, один из которых выполняет роль нагревателя, а второй – холодильника. Стержни изготовлены из сплава Д16Т, длиной 100 мм и диаметром 30 мм. Нагрев верхнего стержня осуществляется электрическим нагревателем, мощность которого регулируется автотрансформатором и реостатом. Охлаждение нижнего стержня производится проточной водой. Боковые поверхности стержней надежно теплоизолированы. На каждом стержне в специально подготовленные радиальные сверления глубиной до 15 мм заделаны по четыре хромель-копелевые термопары. Электродвижущая сила, развиваемая термопарами, измеряется компенсационным методом при помощи потенциометра. Нагрузка на контактные поверхности производится путем подбора заданного набора грузов в пределах от 0,2 до 0,85 МПа. Особое внимание уделялось подготовке поверхностей контакта стержней. Шероховатость поверхностей находилась на профилометре-профилографе «Калибр «ВЭИ». Для создания плоскошероховатых поверхностей в зоне контакта использовалось специальное приспособление, исключающее образование завалов при входе и выходе режущего инструмента.

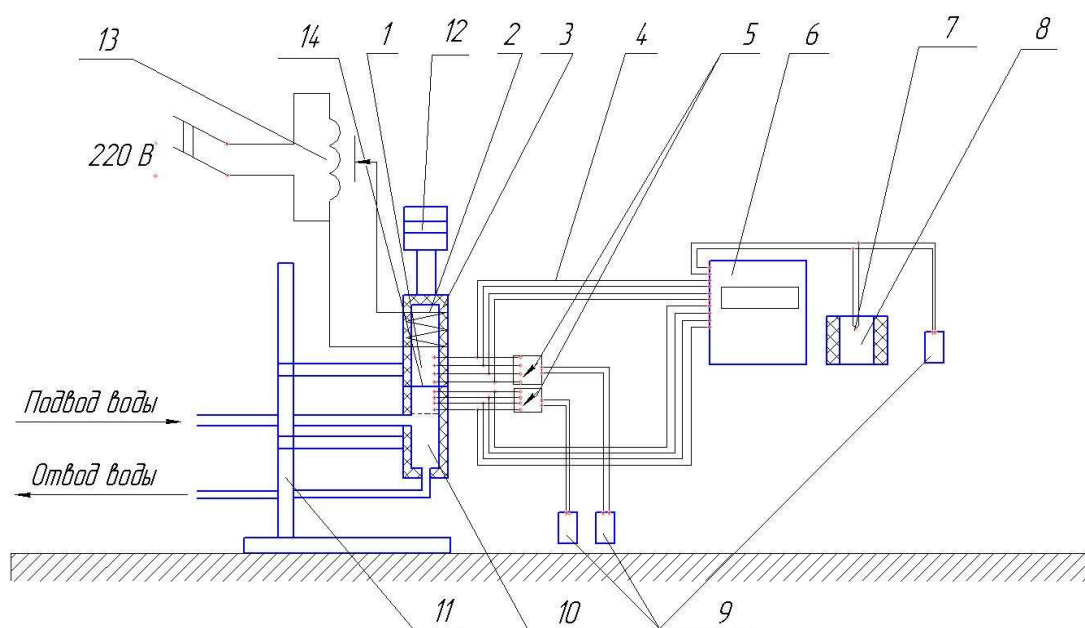


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для определения контактных термосопротивлений: 1 – нагреватель; 2 – нагревательный элемент; 3 – адиабатическая поверхность; 4 – горячий спай; 5 – переключатель позиций; 6 – осциллограф самопишущий; 7 – холодный спай; 8 – сосуд Дьюара; 9 – потенциометры; 10 – холодильник; 11 – штатив; 12 – набор грузов; 13 – реостат; 14 – межконтактный наполнитель.

Контактное термосопротивление в зоне раздела определялось для условий стационарного теплового режима, основанного на законе Фурье и дифференциальном уравнении теплопроводности для неограниченной пластины с изотермическими поверхностями, т.е.

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

Здесь температурный перепад  $\Delta T_k$  получали из графика изменения температур по длине стержней. Принимается условие, что при стационарном тепловом режиме распределение температур по длине стержней носит линейный характер. Для большинства металлов и сплавов коэффициент теплопроводности мало зависит от температуры, и при плотностях тепловых потоков не выше  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup> можно принимать коэффициент теплопроводности постоянным и считать линейное распределение температуры по длине стержней. Таким образом, по данным термодатчиков по длине контактирующих стержней, пользуясь методом линейной экстраполяции, можно найти температурный перепад в зоне контакта  $\Delta T_k$ . Величину среднего теплового потока  $q_{cp}$  вычисляем по градиенту температур в верхнем и нижнем стержнях и известной теплопроводности материала стержней по формулам

$$q_g = \frac{\lambda_g \cdot (T_n - T_{n+1})}{l_n - l_{n+1}}; \quad (2)$$

$$q_n = \frac{\lambda_n \cdot (T_m - T_{m+1})}{l_m - l_{m+1}}, \quad (3)$$

где  $\lambda_g$ ,  $\lambda_n$  – соответственно коэффициенты теплопроводности материалов верхнего и нижнего стержней;  $T_n$ ,  $T_{n+1}$ , и  $T_m$ ,  $T_{m+1}$  – температуры в смежных точках стержней, где установлены термопары;  $l_n - l_{n+1}$ , и  $l_m - l_{m+1}$  – расстояние между смежными точками.

В качестве объектов исследований использовались сетки из железа, нержавеющей стали и латуни из проволоки различной толщины  $\delta$  и разного размера ячеек, а также для сравнения прокладки из асбеста и стеклоткани. В зоне контакта поддерживалась температура порядка 403 K при нагрузке на поверхности контакта  $P$  от 0,2 до 0,85 МПа. Помимо опытов с вводимыми в зону контакта промежуточными материалами, были проведены исследования по формированию КТС при непосредственном контакте поверхностей стержней. Значения КТС в повторных экспериментах согласуются в пределах 6%. Согласно проведенным оценкам погрешность с непосредственным контактом металлических поверхностей изменяется от 6,8% при больших значениях  $R_k$  до 12,1% при низких  $R_k$ . Это связано в основном со снижением перепада температур между контактирующими поверхностями при уменьшении  $R_k$ .

Полученные в процессе исследований данные опытов представлены на графиках рис. 2 в виде кривых зависимостей  $R_k = f(P)$ .

Как видно из рис. 2, наиболее высокие значения термосопротивлений имеют соединения с сеткой из малотеплопроводной нержавеющей стали. При этом термосопротивление повышается с ростом толщины проволоки и увеличением размера ячеек (кривые 5 и 6). Подобный характер формирования  $R_k$  можно объяснить увеличением толщины воздушной прослойки в зоне раздела и уменьшением фактической площади касания с поверхностями контактной пары. Для железной сетки за счет более высокой теплопроводности термосопротивление ниже по сравнению с сеткой из нержавеющей стали (кривая 2). Железная сетка из окисленной проволоки создает более высокое сопротивление в зоне контакта. Сетки из высокотеплопроводной латунной проволоки значительно снижают контактное термосопротивление.

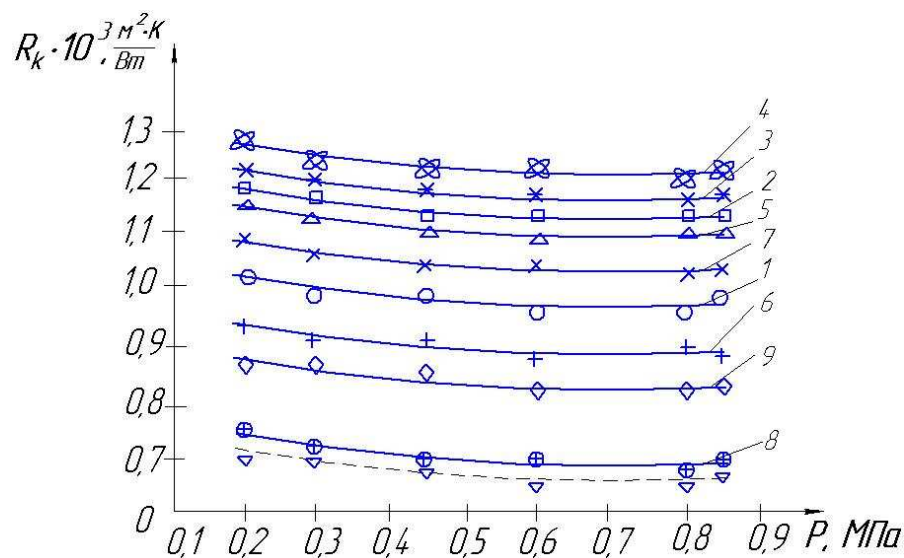


Рис. 2. Зависимость термосопротивления для контактной пары из сплава Д16Т от нагрузки для заполнителей в зоне контакта: 1 – асбест ( $\delta = 0,43$  мм); 2 – железная сетка, обработанная растворителем ( $\delta = 0,75$  мм, размер ячейки  $1 \times 1$  мм); 3 – та же железная сетка с оксидной пленкой; 4 – сетка из нержавеющей стали ( $\delta = 0,88$  мм,  $1 \times 1$  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); 9 – стеклоткань ( $\delta = 0,29$  мм); штриховая линия – непосредственный контакт. Температура в зоне контакта  $403$  К.

Сравнивая данные опытов для соединений с заполнителями в виде металлических сеток и листовых прокладок, можно видеть, что первые более эффективны как теплоизоляторы.

Очевидно, что получить аналитическое выражение для расчета контактного термосопротивления в зоне раздела металлических поверхностей с сетчатыми заполнителями достаточно проблематично из-за сложной геометрии проволоки, составляющей сетчатые экраны. Вместе с тем геометрическое подобие сеток из проволоки различного диаметра дает возможность провести графическую корреляцию опытных данных при различных усилиях прижима, размерах ячеек и диаметрах проволоки, а также теплофизических свойствах материалов проволоки и контактной пары.

На рис. 3 приведена приближенная модель рабочей ячейки контактной пары и сетки. Примем условие, что контакт осуществляется в узлах сетки, т.е. на единицу площади приходится  $n^2$  точек контакта ( $n$  – число ячеек сетки на 1 см).

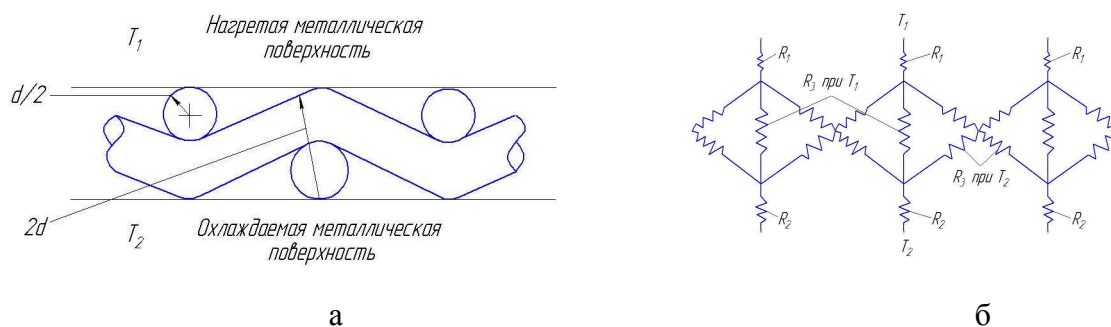


Рис. 3. Схема контакта поверхностей контактной пары с проволочной сеткой: а) модель контакта; б) набор термосопротивлений.

Согласно рис. 3 можно считать, что полное сопротивление выразится в виде

$$R_k = (R_1 + R_2 + R_3) \cdot n^2, \quad (4)$$

где  $R_1$ ,  $R_2$  – соответственно термосопротивления в точках контакта с плоскими поверхностями контактной пары ( $R_1$  при температуре  $T_1$  и  $R_2$  при  $T_2$ );  $R_3$  – термосопротивление, связанное с наличием внутренних контактов между проволоками сетки.

Так как контактные термосопротивления  $R_1$  и  $R_2$  являются макроскопическими величинами, то для их приближенного выражения выберем функциональное соотношение, приведенное в работе [3] при рассмотрении тепловой контактной задачи при соприкосновении поверхностей с макронеровностями.

В функциональной форме коэффициент стягивания линий теплового тока к макроконтрактам соприкасающихся поверхностей можно принять пропорциональным квадратному корню из соотношения поверхности одиночного контакта  $S_k$  к площади поперечного сечения поверхности, приходящейся на одиночный контакт, т.е.

$$\psi = n \cdot (S_k)^{1/2}. \quad (5)$$

Используя принятые выше положения для выражения сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ , можно расчетное соотношение представить в форме

$$R_k/n = \left( \frac{1}{\bar{\lambda}_m \cdot n} \right) \cdot \varphi \cdot (1/\psi). \quad (6)$$

Здесь  $\bar{\lambda}_m$  является приведенным коэффициентом теплопроводности материалов проволоки и контактной пары.

$$\bar{\lambda}_m = \frac{2 \cdot \lambda_{m_1} \cdot \lambda_{m_2}}{\lambda_{m_1} + \lambda_{m_2}}. \quad (7)$$

Из соотношения (6) видно, что параметр  $\bar{\lambda}_m \cdot n \cdot R_k$  должен зависеть от  $n^2 \cdot S_k$ .

Применяя модель контакта, изображенную на рис. 3, и используя известные соотношения из работы [2] для упругих контактов металлических поверхностей, получим формулу

$$n^2 \cdot S_k = \left( \frac{0,5^{1/2\nu} \cdot b^{1/2\nu} \cdot r^{1/2} \cdot P}{h_{\max}^{1/2} \cdot K_1 \cdot B} \right)^{\frac{2\nu}{2\nu+1}}. \quad (8)$$

Здесь  $P$  – контактное давление;  $b$  и  $\nu$  – параметры кривой опорной поверхности (по снятым с поверхностей контакта профилограммам);  $K_1$  – коэффициент, зависящий от значения

параметра  $\nu$ ;  $B = \frac{\bar{E}}{2,35 \cdot (1 - \mu^2)}$  – коэффициент, характеризующий свойства металла контактной пары;  $1 - \mu^2 \approx 0,9$ ;  $\bar{E}$  – приведенный модуль упругости металлов контактной пары;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $r$  – радиус микровыступов;  $h_{\max}$  – максимальная высота микровыступов. Приведенный модуль упругости находится

$$\bar{E} = \frac{2 \cdot E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2}. \quad (9)$$

Здесь необходимо особо отметить, что хотя формула (8) не является точной для контакта плоской поверхности контактной пары с поверхностью сетки, но она показывает характер зависимости  $\bar{\lambda}_m \cdot n \cdot R$  от  $P/E$ .

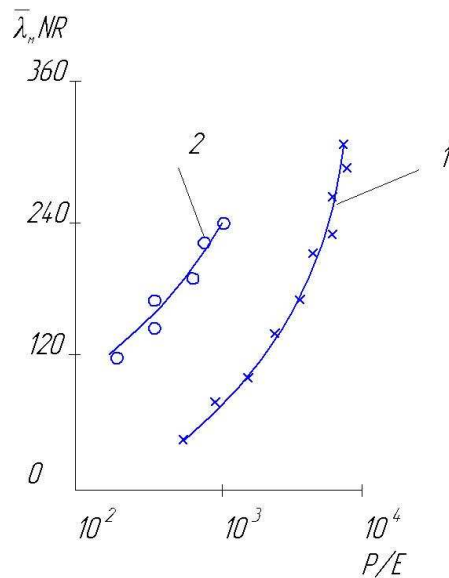


Рис. 4. Зависимость безразмерного термосопротивления контакта с сетками в зоне раздела от отношения  $P/E$ : 1 – сетка из нержавеющей стали с  $\delta = 0,88$  мм, размер ячейки  $1 \times 1$  мм и с  $\delta = 0,13$  мм,  $0,05 \times 0,05$  мм; 2 – железная сетка, обработанная растворителем с  $\delta = 0,75$  мм,  $1 \times 1$  мм.

На рис. 4 представлены обобщающие результаты измерения термосопротивления в проведенных экспериментах с сетчатыми экранами. График зависимости  $\bar{\lambda}_m \cdot n \cdot R_k = f(P/E)$  на рис. 4 для сеток из нержавеющей стали и железа свидетельствует о хорошей корреляции данных для контактной пары из сплава Д16Т.

В заключение можно утверждать, что сетчатые экраны представляют собой достаточно эффективные теплоизоляционные системы из составных элементов, работающие в условиях высоких тепловых и малых усилиях прижима.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта № 13-08-00339).*

### 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. Контактная шероховатость поверхности. – М. : Наука, 1970. - 226 с.
3. Клаузинг А. Термическое сопротивление контакта в вакууме / А. Клаузинг, Б. Чао // Теплопередача. - 1965. - № 2. - С. 98–116.
4. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. - М. : Энергия, 1971. – 216 с.

5. 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 экологии и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж.