

ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ СИСТЕМ С СОСТАВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В.М. Попов, О.Л. Ерин, А.П. Новиков

*ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия», г. Воронеж,
Россия*

В последние четыре десятилетия в отечественной и зарубежной технической литературе, посвященной вопросам теплопереноса, интенсивно развивалось отдельное направление, известное как контактный теплообмен. Это связано с необходимостью при тепловых расчетах теплонапряженных конструкций с составными элементами учитывать контактное термосопротивление (КТС), обусловленное дискретным характером контакта металлических поверхностей. По вопросам контактного теплообмена проведен большой объем экспериментальных и теоретических исследований [1–4]. Однако, до настоящего времени отсутствуют целенаправленные исследования по вопросам терморегулирования в соединениях с контактирующими между собой металлическими поверхностями. Проведенные ранее экспериментальные исследования по данной проблеме не носили системного характера, поскольку были вызваны необходимостью решения частных производственных задач [5, 6], когда требуется повысить КТС (теплоизоляция в резервуарах с низкотемпературными жидкостями) или понизить КТС (охлаждение радиоэлектронных устройств, аппаратов прямого преобразования энергии, элементов энергетических установок).

Для реализации задачи по исследованию процесса формирования КТС (R) при введении в зону раздела заполнителей различной природы использовалась установка стержневого типа [2]. Исследовалась зависимость КТС от нагрузки. При этом исследовалась малоизученная область при малых усилиях прижима P контактирующих поверхностей (до 1 МПа). Исследовались заполнители из мало- и высокотеплопроводных материалов. Исследовалось также влияние на КТС материала контактной пары. Температура в зоне контакта T_k выдерживалась на уровне 338 К и 403 К. Чистота обработки поверхностей контакта определялась по профилограммам, снятым на профилометре-профилографе.

Для характеристики сочетаний основного металла контактной пары и заполнителя, вводимого в зону контакта, предложен обобщающий параметр в виде безразмерного термосопротивления, представляющего собой отношение термосопротивления зоны раздела R_{np} с несжатой прослойкой заполнителя толщиной δ к термосопротивлению при непосредственном контакте R_k и эквивалентной толщины зазора Δ :

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

Входящие в комплекс K R_{np} находилось опытным путем, а R_k опытным путем и расчетом. Эквивалентную толщину межконтактной среды (воздуха) определяли по снятым с поверхностей профилограммам.

Для повышения КТС в зону контакта вводились прокладки из асбеста, слюды, фторопласта и стеклоткани. На рис. 1 и 2 представлены данные опытов в виде зависимости $R = f(P)$ для контактных пар из латуни Л80 и алюминиевого сплава Д16Т.

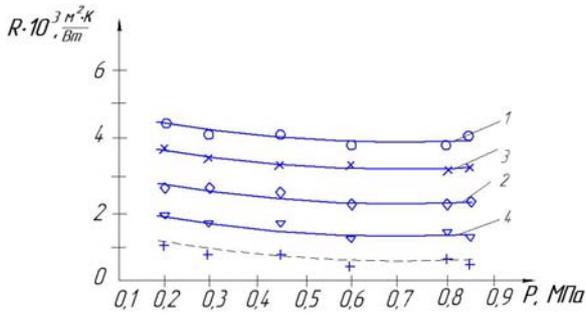


Рис. 1. Зависимость термосопротивления контактной пары из латуни с плоскошероховатыми поверхностями от нагрузки с листовыми прокладками в зоне контакта из: 1 – асбест, $\delta = 0,43$ мм; 2 – слюда, $\delta = 0,4$ мм; 3 – фторопласт, $\delta = 0,42$ мм; 4 – стеклоткань, $\delta = 0,29$ мм. Температура в зоне контакта $T_k = 338K$. Штриховая линия – непосредственный контакт

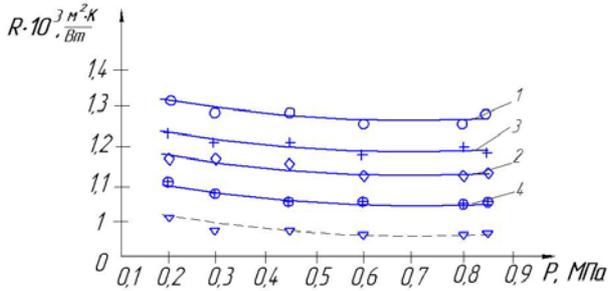


Рис. 2. Зависимость термосопротивления контактной пары из сплава Д16Т с плоскошероховатыми поверхностями от нагрузки с листовыми прокладками в зоне контакта из: аналогично данным рис. 1. Температура в зоне контакта $T_k = 338K$. Штриховая линия – непосредственный контакт

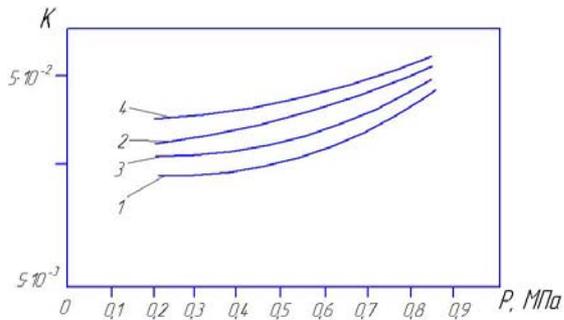


Рис. 3. Зависимость безразмерного термосопротивления от нагрузки при $T_k = 338K$ для контактной пары из латуни с листовыми прокладками: аналогично данным рис. 3

Из рис. 1 и 2 следует, что введение в зону контакта малотеплопроводных прокладок повышает КТС по сравнению с сопротивлением при непосредственном контакте поверхностей. Как видно из сравнения данных опытов для различных металлов контактной пары, этот параметр оказывает существенное влияние на формирование КТС. Для более высокотеплопроводного сплава из Д16Т КТС значительно ниже, чем для пары из латуни для одинаковых заполнителей.

Приведенные на рис. 3 данные по зависимости безразмерного термосопротивления показывают, что если K растет, то это свидетельствует о повышении теплоизоляционных свойств контактного соединения. При этом видно, что повышение давления в зоне контакта нивелирует различия в безразмерных термосопротивлениях для различных заполнителей. Очевидно следует ожидать, что при высоких механических нагрузках различие в эффективности заполнителей различной природы будут уменьшаться.

Достаточно эффективным теплоизолятором показал заполнитель в виде порошков из оксидов магния, меди, алюминия.

Как видно из графиков рис. 4 и 5, вводимые в зону контакта порошки оксидов металлов повышает КТС по сравнению с R_k еще более интенсивно по сравнению с приведенными выше данными для прокладок.

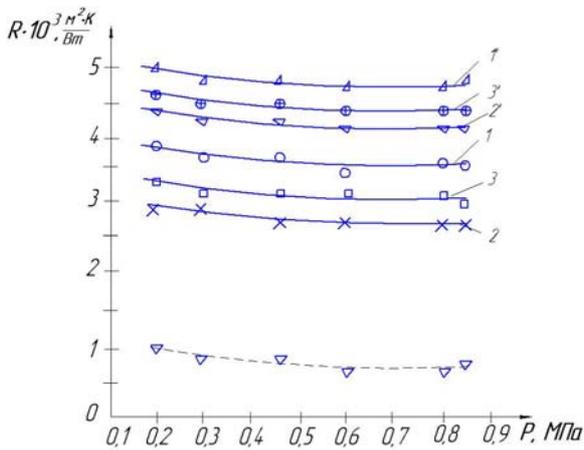


Рис. 4. Зависимость термосопротивления для контактной пары из латуни от нагрузки с порошками в зоне контакта с приведенным диаметром частиц $\bar{d} \approx 0,15$ мм (1–3) и числом 1050 частиц на 1 см^2 : 1 – оксид меди; 2 – оксид алюминия; 3 – оксид магния. Температура в зоне контакта $T_k = 338 \text{ K}$. 1', 2', 3' – диаметр частиц $\bar{d} \approx 0,25$ мм. Штриховая линия – непосредственный контакт

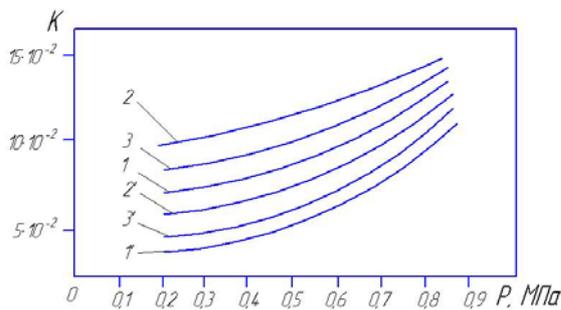


Рис. 5. Зависимость безразмерного термосопротивления от нагрузки при $T_k = 338 \text{ K}$ для контактной пары из латуни с порошками с $\bar{d} \approx 0,15$ мм (1–3) и с $\bar{d} \approx 0,25$ мм (1'–3') в зоне контакта: аналогично данным рис. 4

Увеличение КТС можно объяснить большим размером эквивалентной воздушной прослойки, чем для прокладок. Уменьшение числа частиц на единицу площади приводит к дальнейшему повышению КТС, как это видно из рис. 6, за счет роста эквивалентной толщины воздушной прослойки и уменьшения площади фактического контакта.

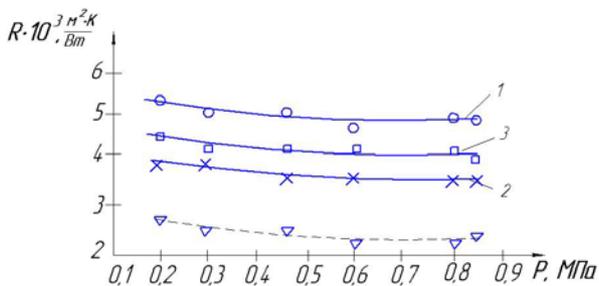


Рис. 6. Зависимость термосопротивления для контактной пары из латуни с порошками в зоне контакта с приведенным диаметром частиц 0,15 мм (1–3) и числом 300 частиц на 1 см^2 : 1 – оксид меди; 2 – оксид алюминия; 3 – оксид магния. Температура в зоне контакта $T_k = 338 \text{ K}$. Штриховая линия – непосредственный контакт

Для создания соединений, менее чувствительных к изменениям нагрузок и более устойчивых при эксплуатации, применялись проволочные экраны. В зону контакта вводились сетки из железа, латуни и нержавеющей стали с различной по толщине проволокой и ячейками. Как видно из графиков рис. 7, 8, наиболее высокие значения КТС имеют место для соединений с заполнителями из малотеплопроводной нержавеющей стали, из проволоки наибольшей толщины (кривая 4), что объясняется увеличением эквивалентной толщины воздушной прослойки и уменьшением площади фактического контакта. Железная сетка с оксидной пленкой имеет КТС выше, чем неокисленная сетка (кривая 3 в сравнении с 2). Отсюда видно, что сетчатые экраны более эффективны, чем даже листовой асбест. Из этих же рисунков также следует, что величина полного КТС в значительной степени зависит от материала контактной пары.

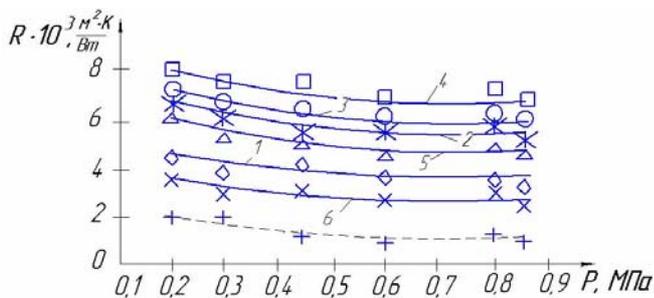


Рис. 7. Зависимость термосопротивления для контактной пары из лагуны от нагрузки при $T_k = 338K$ для заполнителей в зоне контакта: 1 – асбест ($\delta = 0,43$ мм); 2 – железная сетка, обработанная растворителем ($\delta = 0,75$ мм, размер ячейки $1 \text{ мм} \times 1 \text{ мм}$); 3 – та же железная сетка с оксидной пленкой; 4 – сетка из нержавеющей стали ($\delta = 0,88$ мм, $1 \text{ мм} \times 1 \text{ мм}$); 5 – сетка из нержавеющей стали ($\delta = 0,39$ мм, $0,5 \text{ мм} \times 0,5 \text{ мм}$); 6 – сетка из нержавеющей стали ($\delta = 0,13$ мм, $0,05 \text{ мм} \times 0,05 \text{ мм}$); штриховая линия – непосредственный контакт

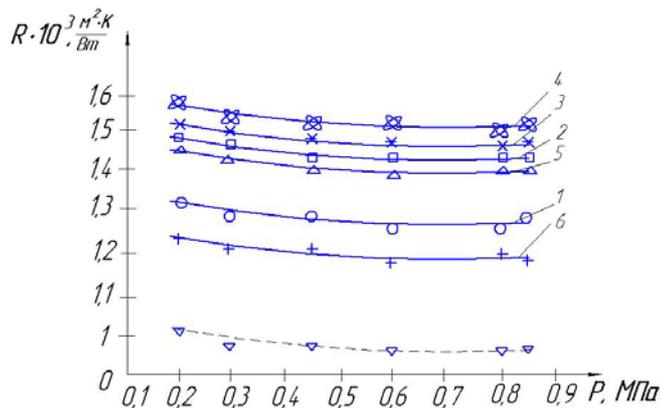


Рис. 8. Зависимость термосопротивления для контактной пары из сплава Д16Т от нагрузки при $T_k = 338K$ для заполнителей в зоне контакта: аналогично данным рис. 7

В целях снижения КТС рассматривались два варианта – это гальваническое нанесение на контактные поверхности теплопроводных пластичных металлов (медь, кадмий, свинец) и введение в зону контакта прокладок из кадмиевой и алюминиевой фольги.

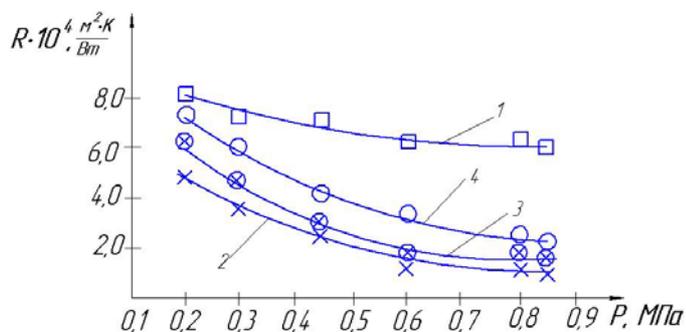


Рис. 9. Зависимость КТС от нагрузки для контактной пары из стали 12X18N10T с шлифованными поверхностями контакта (1). Одна поверхность покрыта медью (2), кадмием (3) и свинцом (4) толщиной 50 мкм. Температура в зоне контакта $T_k = 375K$

Из рис. 9 видно, что гальванические покрытия одной из поверхности контакта снижают КТС по сравнению с непосредственно контактирующими поверхностями.

О характеристике сочетаний основного металла контактной пары и металла покрытия можно судить по графику рис. 10.

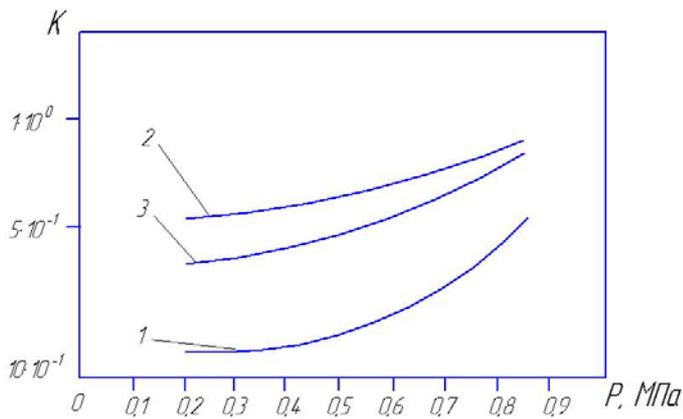


Рис. 10. Зависимость безразмерного термосопротивления от нагрузки для контактной пары из стали 12X18H10T с гальваническими покрытиями из меди (1), кадмия (2) и свинца (3) (данные рис. 9)

Для контактных пар с волнистыми поверхностями и имеющими макроотклонения эффективного снижения КТС можно добиться введением в зону раздела фольги из высокопластичного и теплопроводного металла, как это видно из рис. 11.

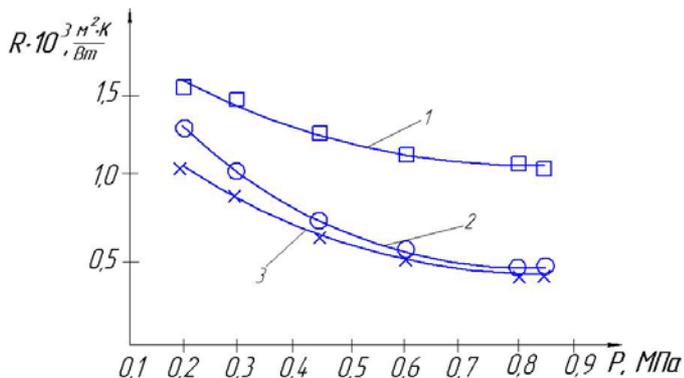


Рис. 11. Зависимость КТС от нагрузки для контактной пары из стали 12X18H10T с шлифованными поверхностями, одна из которых имеет регулярную волнистость (1). В зоне раздела фольга из алюминия толщиной $\delta = 0,1$ мм (2) и кадмия толщиной 0,08 мм (3)

В заключение следует отметить, что предлагаемая методика направленного регулирования термосопротивлением в зоне контакта металлических поверхностей позволяет осуществлять, используя параметр в виде безразмерного термосопротивления, подборку материалов контактной пары и вводимого в зону раздела заполнителя. Терморегулирующие материалы, для которых безразмерное термосопротивление составляет 0,005...0,015 обладают хорошими теплоизоляционными свойствами (листовые прокладки, металлические сетки, порошки оксидов металлов). Материалы, для которых безразмерное термосопротивление находится в пределах от 0,05 до 1, позволяют создавать соединения с хорошей тепловой проводимостью.

Литература

1. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. 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. Мадхусудана К.В., Флетчер Л.С. Контактная теплопередача. Исследования последнего десятилетия // Аэрокосмическая техника. 1987. № 3. С. 103–120.
4. 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.
5. Миллер В.С. Контактный теплообмен в элементах высокотемпературных машин. Киев: «Наукова думка», 1966. 142 с.

6. 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.