

УДК 536.241

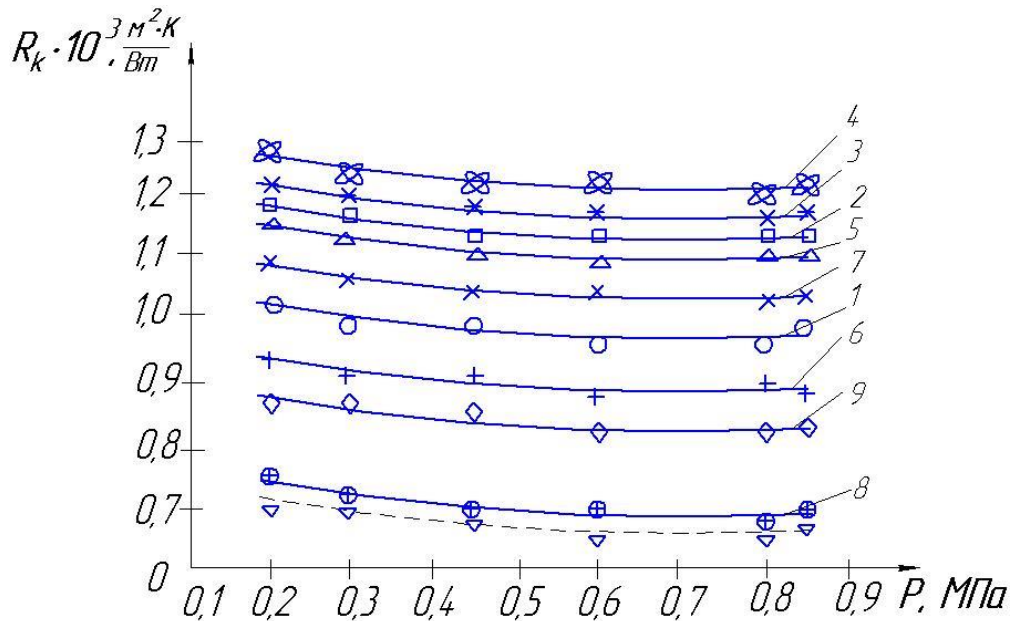
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ
В ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ СИСТЕМАХ С СОСТАВНЫМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ

В.М. Попов, О.Л. Ерин, А.А. Клюквин
(ФГБОУ ВПО ВГЛТА)

В целом ряде разделов современной техники требуется создание механически прочной теплоизоляции. Такие требования предъявляются к проектировщикам узлов крепления резервуаров для низкотемпературных жидкостей, высокотемпературных батарей, в конструкциях авиационных и космических летательных аппаратов. Требования по теплоизоляции высоконагруженных составных элементов таких объектов выходят за рамки возможностей известных на сегодняшний день технологий.

Можно полагать, как отмечается также в исследованиях по вопросам терморегулирования в космических аппаратах [1], что введение в зоны контакта поверхностей сеток из металлической проволоки значительно повышает контактное термосопротивление R_k . Это объясняется тем, что введение сетчатых экранов в зоны раздела значительно уменьшает площадь фактического контакта поверхностей и увеличивает толщину малотеплопроводной воздушной прослойки. Применение сетчатых экранов одновременно решает проблему жесткости соединений.

Для подтверждения выдвинутого положения на установке для изучения контактного теплообмена [2, 3] проведены исследования для контактной пары из сплава Д16Т. В зону контакта вводились сетки из железа, нержавеющей стали и латуни из проволоки различной толщины δ и разного размера ячеек, а также для сравнения прокладки из асбеста и стеклоткани. В зоне контакта поддерживалась температура в 403 K при нагрузке на поверхности контакта P от $0,2$ до $0,85$ МПа. Полученные в процессе исследований кривые $R_k = f(P)$ приведены на графиках рис. 1.



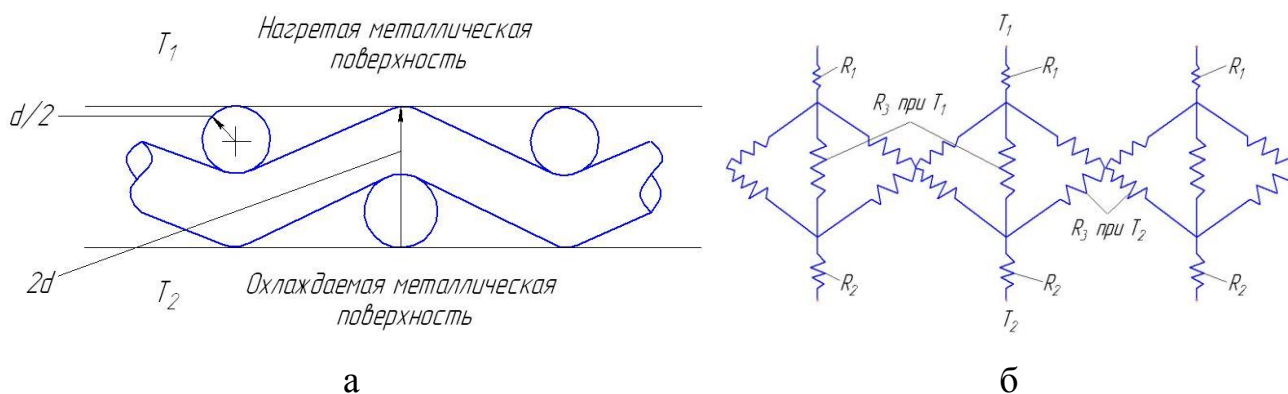
1 – асбест ($\delta = 0,43$ мм); 2 – железная сетка, обработанная растворителем ($\delta = 0,75$ мм, размер ячейки $1 \text{ мм} \times 1 \text{ мм}$); 3 – та же железная сетка с оксидной пленкой; 4 – сетка из нержавеющей стали ($\delta = 0,88$ мм, $1 \text{ мм} \times 1 \text{ мм}$); 5 – сетка из нержавеющей стали ($\delta = 0,39$ мм, $0,5 \text{ мм} \times 0,5 \text{ мм}$); 6 – сетка из нержавеющей стали ($\delta = 0,13$ мм, $0,05 \text{ мм} \times 0,05 \text{ мм}$); 7 – сетка латунная ($\delta = 0,6$ мм, $0,5 \text{ мм} \times 0,5 \text{ мм}$); 8 – сетка латунная ($\delta = 0,19$ мм, $0,05 \text{ мм} \times 0,05 \text{ мм}$); 9 – стеклоткань ($\delta = 0,29$ мм); штриховая линия – непосредственный контакт, температура в зоне контакта $T_k = 403\text{K}$

Рисунок 1 – Зависимость термосопротивления для контактной пары из сплава Д16Т от нагрузки для заполнителей в зоне контакта

Из анализа данных рис. 1 видно, что наиболее высокие значения R_k имеют место для соединений с заполнителями в виде проволочной сетки из малотеплопроводной нержавеющей стали. При этом термосопротивление повышается с увеличением толщины проволоки и размера ячеек (кривые 5 и 6). Такой характер формирования R_k можно объяснить увеличением толщины воздушной прослойки в зоне контакта и уменьшением фактического контакта сетки с поверхностями контактной пары. Железная сетка (кривая 2) создает R_k меньшей величины по сравнению с сеткой из нержавеющей стали за счет более высокой теплопроводности. Наличие малотеплопроводной оксидной пленки на поверхности железной сетки, как и следовало ожидать, повышает R_k . Из сравнения данных по R_k для заполнителей в виде металлических сеток и листовых прокладок (асбест, стеклоткань) видно, что первые создают более эффективные теплоизоляционные переходы.

Нет необходимости доказывать, что рассчитать контактное термосопротивление для контактных переходов с сетчатыми заполнителями проблематично из-за сложной геометрии проволоки, составляющей сетчатые экраны. В тоже время геометрическое подобие сеток из проволок различного диаметра дает возможность провести графическую корреляцию опытных данных при различных нагрузках, размерах ячеек и диаметрах проволоки, а также теплофизических свойствах материалов проволоки и контактной пары.

На рис. 2 приведена упрощенная модель рабочей ячейки контактной пары и сетки.



а) модель контакта; б) набор термосопротивлений.

Рисунок 2 – Схема контакта поверхностей контактной пары с проволочной сеткой

Будем считать, что контакт осуществляется в узлах сетки, т.е. на единицу площади приходится N^2 точек контакта (N – число ячеек сетки на 1 см).

Очевидно, что

$$R_k = (R_1 + R_2 + R_3) \cdot N^2, \quad (1)$$

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

Поскольку контактные термосопротивления R_1 и R_2 являются макроскопическими величинами, то для их приближенного выражения выберем функциональное соотношение из работы [4]. В функциональной форме степень сжатия контактирующих поверхностей X_L принимается пропорциональной квадрат-

ному корню из соотношения поверхности одиночного контакта S_k к площади поперечного сечения поверхности, приходящейся на единичный контакт, т.е.

$$X_L = N(S_k)^{1/2} \quad (2)$$

Используя принятое положение для выражения сопротивлений R_1 и R_2 , можно расчетное соотношение представить в форме

$$R/N = \left(\frac{1}{\bar{\lambda}_m \cdot N} \right) \cdot \psi \cdot (1/X_L) \quad (3)$$

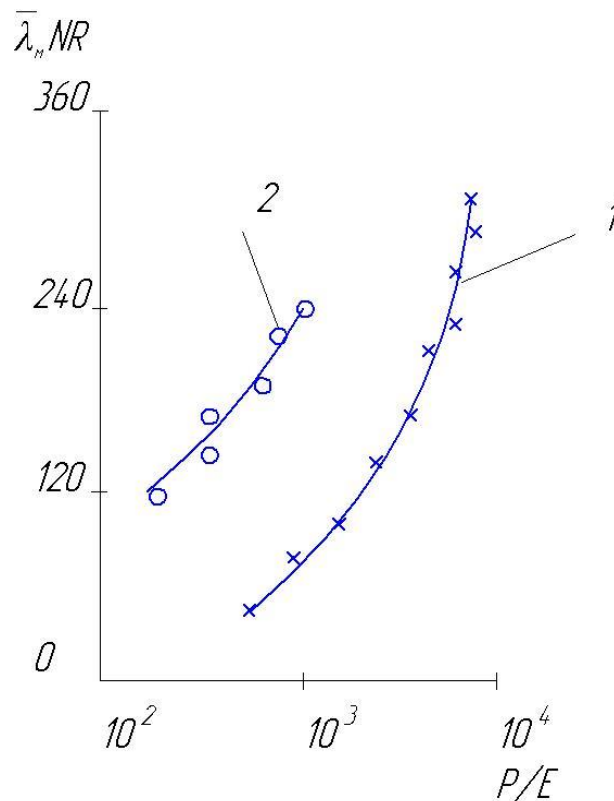
Здесь $\bar{\lambda}_m$ является приведенным коэффициентом теплопроводности материалов проволоки и контактной пары.

Из соотношения (3) видно, что параметр $\bar{\lambda}_m \cdot N \cdot R$ должен зависеть от $N^2 \cdot S_k$. Используя модель контакта, изображенную на рис. 2 и применяя известные соотношения из работы [5] для упругих контактов металлических поверхностей, получим формулу

$$N^2 \cdot S_k = \left(\frac{0,5^{1/2\nu} \cdot b^{1/2\nu} \cdot r^{1/2} \cdot P}{h_{\text{макс}}^{1/2} \cdot K_1 \cdot B} \right)^{\frac{2\nu}{2\nu+1}}, \quad (4)$$

где P – контактное давление; b и ν – параметры кривой опорной поверхности; K_1 – коэффициент, зависящий от значения параметра ν ; $B = \frac{\bar{E}}{2,35 \cdot (1 - \mu^2)}$ – коэффициент, характеризующий свойства металла контактной пары; $1 - \mu^2 \approx 0,9$; \bar{E} – приведенный модуль упругости металлов контактной пары; μ – коэффициент Пуассона; r – радиус микровыступов; $h_{\text{макс}}$ – максимальная высота микровыступов.

Следует особо отметить, что хотя формула (4) не является точной для плоской поверхности контактной пары с поверхностью сетки, но она показывает характер зависимости $\bar{\lambda}_m \cdot N \cdot R$ от P/E .



1 – сетка из нержавеющей стали с $\delta = 0,88$ мм, размером ячейки $1 \text{ мм} \times 1 \text{ мм}$ и с $\delta = 0,13$ мм, $0,05 \text{ мм} \times 0,05 \text{ мм}$; 2 – железная сетка, обработанная растворителем с $\delta = 0,75$ мм, $1 \text{ мм} \times 1 \text{ мм}$

Рисунок 3 – Зависимость безразмерного термосопротивления контакта с сетками в зоне раздела от отношения P/E

На рис. 3 приведены обобщающие результаты измерения термосопротивления в проведенных экспериментах с сетчатыми экранами. Графики зависимости $\bar{\lambda}_m \cdot N \cdot R = f(P/E)$ на рис. 3 для сеток из нержавеющей стали и железа свидетельствуют о хорошей корреляции данных для контактной пары из сплава Д16Т.

Подводя итоги проведенных исследований, можно утверждать, что сетчатые экраны могут найти широкое применение в качестве теплоизоляторов в теплонапряженных системах с составными элементами.

Библиографический список

- 1 Попов, В. М. Теплообмен через металлические соединения с заполнениями в зоне контакта / В. М. Попов, Ерин О.Л., Кондратенко И. Ю. // Лесотех-

нический журнал / ВГЛТА. 2011. № 4 С. 43-48.

2 Гайорог, Д. А. Исследование теплоизоляционных материалов для контактирующих поверхностей / Д. А. Гайорог // В кн. Теплообмен и тепловой режим космических аппаратов. – М. : Мир, 1974. – С. 234-258.

3 Попов, В. М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М. : Энергия, 1971. – 216 с.

4 Попов, В. М. Теплообмен в зоне контакта металлических поверхностей // В. М. Попов, А. В. Латынин, О. Л. Ерин / В мире научных открытий. 2010. № 4 (10). Ч. 4. С. 100-102.

5 Клаузинг, А. Термическое сопротивление контакта в вакууме // А. Клаузинг, Б. Чао / Теплопередача. 1965. № 2. С. 98-116.

6 Демкин, Н. Б. Контактное состояние шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин. М. : Наука, 1970. – 226 с.