

УДК 536.241

ТЕПЛООБМЕН В СОСТАВНЫХ СИСТЕМАХ, ИСПЫТЫВАЮЩИХ  
ПОВЫШЕННЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ

Лушникова Е.Н., Попов В.М., Дорняк О.Р., Квитко К.С.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»

Email: [lat-07@mail.ru](mailto:lat-07@mail.ru)

**Аннотация:** В статье приводятся данные о возможности направленного изменения степени воздействия тепловых потоков в составных системах при использовании сетчатых экранов.

**Ключевые слова:** тепловой поток, температура, наполнитель, сетчатый экран, контактная пара, контактное термосопротивление.

HEAT EXCHANGE IN COMPOUND SYSTEMS,  
EXPERIENCING IMPROVED MECHANICAL LOADS

Lushnikova E.N., Popov V.M., Dorniyak O.R., Kvitko K.S.

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State  
University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov"

**Summary:** The article provides data on the possibility of directional changes in the degree of exposure to heat fluxes in composite systems when using mesh screens.

**Keywords:** heat flow, temperature, aggregate, mesh screen, contact pair, contact thermal resistance.

При проектировании и эксплуатации теплонапряженных технических систем с составными элементами появляется необходимость учета возникающих за счет дискретности касания металлических поверхностей контактных термических сопротивлений [1-4]. В зависимости от условий эксплуатации таких систем часто ставится задача терморегулирования процессов теплопередачи через зону контакта поверхностей. Так, в местах крепления резервуаров с низкотемпературными жидкостями, в ряде узлов авиационных и космических летательных аппаратов, в высокотемпературных батареях, испытывающих повышенные механические нагрузки, необходимы технические решения по повышению контактных термосопротивлений в зонах раздела, приводящих к увеличению теплоизоляционных характеристик для этих систем.

В такого рода системах помимо хорошей теплоизоляции зачастую требуются заполнители контактной зоны, обладающие повышенной жесткостью. Среди теплоизоляционных заполнителей различной природы наиболее подходящими для таких целей можно считать сетки из металлической проволоки [5, 6].

Для обоснования эффективности применения в качестве теплоизолирующих экранов сеток из металлической проволоки проведены экспериментальные исследования на контактных парах из сплава Д16Т и латуни. Опыты проводились на установке стержневого типа [3], используемой для исследования контактного теплообмена с учетом положений по формированию стационарного теплового потока.

В состав экспериментальной установки входит рабочая ячейка в виде электронагревателя и водяного холодильника, между которыми устанавливается контактная пара в виде цилиндрических образцов с четырьмя хромель-копелевыми термопарами в каждом образце. Замеры термо ЭДС с термопар осуществлялось после 3-4 ч с момента включения электронагревателя с холодильником. Полученные по длине образцов восемь значений температур позволяют, пользуясь методом линейной экстраполяции, находить температурный перепад в зоне контакта  $\Delta t$ .

В качестве исследуемых объектов были задействованы проволочные сетки из железа, латуни и нержавеющей стали (табл. 1). Изменялись геометрические параметры сеток (толщина проволоки и размер ячейки). Для железной сетки исследовались образцы, обработанные растворителем и покрытые оксидной пленкой. Для сравнения эффективности заполнителя исследовались также контактные пары с листовыми теплоизоляторами в виде асбеста, стеклоткани и слюды. Кроме этого определялись значения контактных термосопротивлений на образцах при непосредственном контакте поверхностей. Исследовались также данные опытов для контактных пар из сплава Д16Т и латуни.

Полученные в процессе исследований данные опытов представлены в таблицах 2 и 3.

Из анализа полученных результатов можно сделать следующие имеющие практический интерес выводы.

Во-первых, введение в зоны контакта металлических поверхностей заполнителей различной природы и геометрии повышает контактное термосопротивление по сравнению с контактной парой при непосредственном касании поверхностей.

Таблица 1 – Характеристики межконтактных заполнителей [8, 9]

Материал заполнителя	Геометрические характеристики	Коэффициент теплопроводности $\lambda_m$ , Вт/(м·К)	Внешний вид после испытаний
Сетка железная, обработанная растворителем	Толщина проволоки $\delta = 0,75$ мм, размер ячейки 1 мм×1 мм	43	Без изменений
Сетка железная по- крытая оксидной пленкой	Толщина проволоки $\delta = 0,75$ мм, размер ячейки 1 мм×1 мм	43	В ряде случаев плен- ка отслоилась
Сетка латунная	$\delta = 0,05$ мм, размер ячейки 0,05 мм×0,05 мм	110	Без изменений
Сетка латунная	$\delta = 0,13$ мм, размер ячейки 0,05 мм ×0,05 мм	110	Без изменений
Сетка из нержавеющей стали	$\delta = 0,39$ мм, размер ячейки 0,05 мм ×0,05 мм	14,2	Без изменений
Сетка из нержавеющей стали	$\delta = 0,88$ мм, размер ячейки 1 мм ×1 мм	14,2	Без изменений
Листовой асбест	$\delta = 0,43$ мм	0,12	Слегка сжатый
Стеклоткань	$\delta = 0,05$ мм	0,35	Без изменений
Слюда (лист)	$\delta = 0,04$ мм	0,36	Слегка сжатая

Во-вторых, практически для всех исследованных заполнителей контактное термосопротивление снижается с увеличением механической нагрузки на контактное соединение.

В-третьих, для большинства сетчатых заполнителей наблюдаются более высокие показатели теплоизоляционных свойств в сравнении с традиционными листовыми теплоизоляторами.

Помимо отмеченного выше установлено, что на термосопротивление в зоне контакта оказывает влияние теплопроводность материала заполнителя. Так, сетки из малотеплопроводной нержавеющей стали создают контактное термосопротивление значительно более высокое, чем например, сетки из высокотеплопроводной латуни. Повышает термосопротивление и наличие оксидной пленки, как это видно для контактной пары с сеткой из железной проволоки, покрытой оксидом.

Таблица 2 – Экспериментальные значения контактного термосопротивления для контактной пары из сплава Д16Т в зависимости от давления для различных заполнителей контактной пары

Материал за- полнителя	Геометриче- ские характе- ристики запол- нителя	Температура в зоне кон- такта $T_K$ , К	Контактное термосопротивление $R_K \cdot 10^3, \frac{m^2 \cdot K}{W}$ при различных значениях нагрузки P, МПа						
			0,2	0,3	0,45	0,6	0,7	0,8	0,9
Асбест листовой	$\delta = 0,43$ мм	336	1,43	1,41	1,39	1,36	1,36	1,35	1,35
Слюда листовая	$\delta = 0,05$ мм	336	1,27	1,26	1,26	1,23	1,24	1,21	1,2
Железная сетка обработанная растворителем	$\delta = 0,75$ мм размер ячейки 1 мм × 1 мм	336	1,61	1,58	1,55	1,54	1,53	1,53	1,52
Железная сетка с оксидной пленкой	$\delta = 0,75$ мм размер ячейки 1 мм × 1 мм	336	1,65	1,63	1,59	1,58	1,57	1,5	1,56
Сетка латунная	$\delta = 0,06$ мм размер ячейки 0,5 мм × 0,5 мм	336	1,5	1,47	1,46	1,44	1,44	1,43	1,43
Сетка латунная	$\delta = 0,19$ мм размер ячейки 0,05 мм × 0,05 мм	336	1,44	1,22	1,0	0,88	0,82	0,8	0,8
Сетка из нержа- вующей стали	$\delta = 0,88$ мм размер ячейки 1 мм × 1 мм	336	1,7	1,67	1,63	1,61	1,59	1,59	1,58
Сетка из нержа- вующей стали	$\delta = 0,39$ мм размер ячейки 0,5 мм × 0,5 мм	336	1,58	1,54	1,51	1,5	1,44	1,48	1,48
Непосредствен- ный контакт по- верхностей кон- тактной пары		336	1,1	0,95	0,75	0,6	0,6	0,55	0,5

Таблица 3 – Экспериментальные значения контактного термосопротивления для контактной пары из латуни в зависимости от давления для различных заполнителей контактной зоны

Материал заполнителя	Геометрические характеристики заполнителя	Температура в зоне контакта $T_K$ , К	Контактное термосопротивление $R_K \cdot 10^3, \frac{M^2 \cdot K}{Bt}$ при различных значениях нагрузки P, МПа						
			0,2	0,3	0,45	0,6	0,7	0,8	0,9
Асбест листовой	$\delta = 0,43$ мм	338	4,4	3,6	3,8	3,4	3,3	3,1	2,9
Железная сетка обработанная растворителем	$\delta = 0,75$ мм размер ячейки 1 мм × 1 мм	338	6,7	5,9	5,2	5,0	5,0	4,9	4,9
Железная сетка с оксидной пленкой	$\delta = 0,75$ мм размер ячейки 1 мм × 1 мм	338	7,0	6,2	6,1	5,8	5,6	5,6	5,6
Сетка из нержавеющей стали	$\delta = 0,88$ мм размер ячейки 1 мм × 1 мм	338	8,1	7,4	6,9	6,5	6,2	6,2	6,1
Сетка из нержавеющей стали	$\delta = 0,39$ мм размер ячейки 0,5 мм × 0,5 мм	338	5,7	5,1	4,7	4,5	4,3	4,3	4,1
Непосредственный контакт поверхностей контактной пары		338	2,1	1,8	1,1	0,9	0,9	0,8	0,8

Существенную роль в формировании контактного термосопротивления играет материал контактных пар. Так, для контактной пары из латуни термосопротивление в зоне раздела с заполнителем выше, чем для пары из более высокотеплопроводного сплава Д16Т.

В заключение можно сделать вывод, что приведенные в данном сообщении результаты исследований позволят проектировщикам теплонапряженных систем учитывать степень воздействия тепловых потоков в составных системах на тепловом режиме в целом проектируемых объектов и направленно использовать сетчатые экраны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Шлыков Ю. П., Ганин Е. А., Царевский С. Н. Контактное термическое сопротивление. М. : Энергия, 1977. – 328 с.
- 2 Мадхусудана К. В., Флэтчер Л. С. Контактная теплопередача. Исследования последнего десятилетия // Аэрокосмическая техника. 1987. – № 3. – С. 103-120.
- 3 Попов В. М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М. : Энергия, 1971. – 216 с.
- 4 Авдучевский В. С. Основы теплопередачи в авиационной и ракетнокосмической технике. М. : Машиностроение. 1992. – 416 с.
- 5 Fletcher L. S. A. Review of Thermal Control Materials for Metallic Junctions // Journal of Spacecraft and Rocket. 1972. – Vol. 9. – Pp. 849-850.
- 6 Гайорог Д. А. Исследование теплоизоляционных материалов для контактирующих поверхностей. В кн. «Теплообмен и тепловой режим космических аппаратов». М. : Мир, 1974. – С. 234-258.
- 7 Шнейдер П. Инженерные проблемы теплопроводности. М. : Изд-во иностр. лит., 1960. – 478 с.
- 8 Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций // Инженерно-физический журнал, 1963. – № 4. – С. 71-74.
- 9 Чиркин В. С. Теплопроводность промышленных материалов. М. : Машгиз, 1962. – 247 с.