

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ С СЕТЧАТЫМИ ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ

**EXPERIMENTAL STUDY OF CONTACT THERMAL RESISTANCE IN DISSIMILAR
METALS JOINTS WITH MESH FILLERS**

Лушникова Е.Н., кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Lushnikova E.N., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Тиньков А.А., кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Tinkov A.A., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Внукова С.В., кандидат физико-математических наук, и.о. заведующего кафедрой электротехники, теплотехники и гидравлики, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Vnukova S.V., PhD in Physics and Mathematics, Acting Head of the Electrical Engineering, Thermal Engineering and Hydraulics Department, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования контактного термического сопротивления (КТС) в разъемных соединениях из разнородных металлов (сплав Д16Т-сталь 30) с заполнителями различной природы и геометрии. Эксперименты выполнены в диапазоне контактных давлений 0,1-2,5 МПа и температур 338-473 К. В качестве заполнителей использованы асбестовый лист, а также сетки из углеродистой стали, нержавеющей стали и латуни. Установлено, что применение мелкоячеистых сеток из нержавеющей стали позволяет повысить КТС в 10,4 раза по сравнению с непосредственным контактом. Выявлено влияние оксидных пленок и геометрических параметров сетки на термическое сопротивление. Предложен безразмерный комплекс для сравнительной оценки эффективности заполнителей. Полученные данные могут быть использованы при проектировании теплонагруженных узлов энергетического оборудования.

Ключевые слова: контактное термическое сопротивление, разнородные металлы, сетчатый заполнитель, теплопередача, теплоэнергетика, терморегулирование.

Abstract. The article presents the results of an experimental study of the contact thermal resistance (CTR) in detachable joints made of different metals (D16T alloy-steel 30) with fillers of

various nature and geometry. The experiments were performed in the range of contact pressures of 0.1-2.5 MPa and temperatures of 338-473 K. As fillers, asbestos sheet and carbon steel, stainless steel, and brass mesh were used. It has been established that the use of fine-mesh stainless steel grids increases the thermal resistance by a factor of 10.4 compared to direct contact. The influence of oxide films and the geometric parameters of the grid on the thermal resistance has been identified. A dimensionless complex has been proposed for the comparative evaluation of the effectiveness of fillers. The obtained data can be used in the design of heat-loaded components of energy equipment.

Keywords: contact thermal resistance, dissimilar metals, mesh filler, heat transfer, thermal power engineering, thermal control.

В современной теплоэнергетике, авиационном двигателестроении и космической технике важнейшей задачей является обеспечение эффективного теплового режима работы узлов и агрегатов. Разъемные соединения элементов из разнородных металлов широко распространены в конструкциях теплообменных аппаратов, корпусов энергетических установок, креплений тепловыделяющих элементов и систем термостатирования. При этом тепловые потоки через зоны контакта часто определяют надежность и ресурс работы изделия в целом.

Актуальность настоящего исследования обусловлена устойчивой тенденцией к повышению единичной мощности энергетических установок, что неизбежно ведет к росту плотности тепловых потоков через узлы соединений и требует точного прогнозирования и управления контактным термическим сопротивлением. В условиях санкционных ограничений и политики импортозамещения особую значимость приобретает создание собственной базы данных по теплофизическим характеристикам перспективных отечественных материалов и заполнителей для использования в инженерных расчетах. Кроме того, для ряда практических применений, таких как криогенная техника, теплозащита высокотемпературных агрегатов и термостатирование прецизионного оборудования, требуется не снижение, а целенаправленное повышение контактного термического сопротивления в зонах раздела. Наконец, переход к цифровому проектированию и созданию цифровых двойников энергетических объектов невозможен без верифицированных математических моделей контактного теплообмена для различных сочетаний конструкционных материалов.

Несмотря на значительный объем исследований, выполненных в области контактного теплообмена [1-3], большинство работ посвящено либо однородным материалам, либо условиям высоких контактных давлений, характерным для жестких неразъемных соединений. Соединения разнородных металлов, работающие в условиях малых усилий прижима (до 2,5 МПа) и переменных температур, исследованы недостаточно. Введение в зону контакта малотеплопроводных прокладок-заполнителей является технологичным способом управления тепловым потоком [4-8], однако требует экспериментального обоснования для конкретных сочетаний материалов, что и определяет направленность настоящей работы.

Цель работы – экспериментальное определение зависимостей контактного термического сопротивления от давления сжатия и температуры для разъемных соединений из разнородных металлов (Д16Т-сталь 30) с заполнителями различной природы и геометрии

для последующего использования при проектировании теплонагруженных узлов энергетического оборудования.

Исследования проводились на экспериментальном стенде, описанном в работе [6]. Образцы контактной пары изготавливались из алюминиевого сплава Д16Т ($\lambda = 164$ Вт/(м·К) при 293 К) и стали 30 ($\lambda = 48$ Вт/(м·К) при 293 К). Контактные поверхности шлифовались до шероховатости $R_z \approx 3,3$ мкм. Нагружение образцов осуществлялось в диапазоне давлений 0,1–2,5 МПа. Температура в зоне контакта поддерживалась на уровнях 338 К, 403 К и 473 К с точностью $\pm 1,5$ К. Тепловой поток создавался нагревателем и измерялся с помощью дифференциальных термопар.

В качестве заполнителей использовались: асбестовый лист ($\delta = 0,43$ мм) – в качестве эталонного теплоизолятора; сетка из углеродистой стали ($\delta = 0,75$ мм, ячейка 1,0×1,0 мм, диаметр проволоки 0,3 мм) с естественной оксидной пленкой и после обработки органическим растворителем; сетка из нержавеющей стали 12Х18Н10Т ($\delta = 0,13; 0,39; 0,88$ мм, ячейка от 0,05×0,05 мм до 1,0×1,0 мм); сетка латунная Л80 ($\delta = 0,19; 0,60$ мм, ячейка от 0,05×0,05 мм до 0,5×0,5 мм).

КТС рассчитывалось как отношение перепада температур в зоне контакта к плотности теплового потока. Погрешность измерения КТС не превышала 8 %.

В таблице 1 представлены значения КТС для фиксированного давления $P = 1,0$ МПа при различных температурах. Для количественной оценки эффективности заполнителя введен

коэффициент $\eta = \frac{R_{\text{пр}}}{R_0}$, где $R_{\text{пр}}$ – КТС с заполнителем; R_0 – КТС при непосредственном контакте.

Таблица 1 – Контактное термическое сопротивление ($R \cdot 10^4$, м²·К/Вт) для пары Д16Т–сталь 30 при $P = 1,0$ МПа

№	Тип заполнителя	δ , мм	Размер ячейки, мм	T , К			η (338 К)
				338	403	473	
-	Непосредственный контакт	-	-	1,20	1,02	0,86	1,00
1	Асбестовый лист	0,43	-	5,81	5,23	4,52	4,84
2	Сетка стальная (оксидированная)	0,75	1,0×1,0	7,53	6,82	6,03	6,28
3	Сетка стальная (очищенная)	0,75	1,0×1,0	6,24	5,71	5,12	5,20
4	Сетка нержавеющая	0,88	1,0×1,0	8,14	7,43	6,54	6,78
5	Сетка нержавеющая	0,39	0,5×0,5	10,23	9,34	8,23	8,53
6	Сетка нержавеющая	0,13	0,05×0,05	12,52	11,43	10,14	10,43
7	Сетка латунная	0,60	0,5×0,5	8,52	7,82	6,94	7,10
8	Сетка латунная	0,19	0,05×0,05	9,84	9,03	8,12	8,20

Из таблицы 1 видно, что все исследованные сетчатые заполнители обеспечивают более высокие значения КТС по сравнению с листовым асбестом. Максимальная эффективность ($\eta = 10,43$) достигнута при использовании мелкоячеистой сетки из нержавеющей стали толщиной 0,13 мм с размером ячейки 0,05×0,05 мм.

Уменьшение размера ячейки с 1×1 мм до 0,05×0,05 мм при сохранении материала заполнителя увеличивает КТС в 1,5-1,6 раза. Данный эффект объясняется ростом числа последовательных тепловых сопротивлений в системе «металл-воздушный зазор-металл» при многоконтактной структуре сетки, а также увеличением эффективной длины пути теплового потока.

Наличие оксидной пленки на поверхности проволоки стальной сетки повышает КТС на 17-21 % (сравнение позиций 2 и 3 таблицы 1), что связано с низкой теплопроводностью оксидов железа ($\lambda_{\text{оксида}} \approx 0,1-0,2$ Вт/(м·К) против $\lambda_{\text{стали}} \approx 45-50$ Вт/(м·К)).

Сетки из нержавеющей стали демонстрируют более высокие значения КТС по сравнению с латунными при аналогичных геометрических параметрах, что коррелирует с более низкой теплопроводностью нержавеющей стали ($\lambda_{12Х18Н10Т} \approx 15$ Вт/(м·К) против $\lambda_{\text{Л80}} \approx 110$ Вт/(м·К)).

Для всех типов заполнителей зафиксировано снижение КТС при повышении температуры контакта от 338 К до 473 К. Относительное уменьшение сопротивления составляет 14-19 %. Данный эффект обусловлен увеличением коэффициента теплопроводности воздуха в микрозазорах и ростом теплопроводности материала сеток с температурой.

Для обобщения экспериментальных данных и возможности их использования в инженерных расчетах применен безразмерный комплекс [2]:

$$K = \frac{R_{\text{np}} / \delta}{R_0 / \Delta}, \quad (1)$$

где δ – толщина заполнителя; Δ – эквивалентная толщина межконтактного зазора при непосредственном контакте, определяемая по профилограммам поверхностей (для данной пары $\Delta = 12,5$ мкм).

Расчетные значения K для исследованных заполнителей при $T = 473$ К и $P = 1,0$ МПа приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения безразмерного комплекса K

Заполнитель	Асбест	Сетка н/ж №4	Сетка н/ж №5	Сетка н/ж №6
K	2,84	3,98	5,12	6,35

Возрастание K с уменьшением размера ячейки свидетельствует о росте удельного термического сопротивления единицы толщины заполнителя. Физически это означает увеличение эффективной длины пути теплового потока в сложной топологии контакта. Для мелкоячеистой сетки (№6) значение $K = 6,35$ показывает, что один миллиметр такой сетки эквивалентен по термическому сопротивлению 6,35 мм воздушного зазора при непосредственном контакте.

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования позволяют сформулировать следующие основные выводы.

Экспериментально подтверждена возможность повышения контактного термического сопротивления в разъемных соединениях из разнородных металлов (Д16Т-сталь 30) до 10,4 раза путем введения в зону контакта мелкоячеистых сетчатых заполнителей из нержавеющей стали.

Установлены количественные зависимости КТС от геометрических параметров сетки (толщина, размер ячейки), материала заполнителя, состояния поверхности, температуры и контактного давления в диапазоне, характерном для слабонагруженных узлов энергетического оборудования.

Определен оптимальный тип заполнителя для задач теплоизоляции – сетка из нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 0,13 мм с размером ячейки 0,05×0,05 мм, обеспечивающая максимальные значения КТС во всем исследованном диапазоне температур (338-473 К) и нагрузок (0,1-2,5 МПа).

Предложенный безразмерный комплекс K позволяет проводить сравнительную оценку эффективности заполнителей и может быть использован при проектировании узлов с заданными теплофизическими характеристиками.

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при проектировании теплонагруженных узлов энергетических установок, криогенных систем, теплозащитных экранов и креплений высокотемпературных агрегатов, где требуется повышенное термическое сопротивление в зонах разъемных соединений разнородных материалов. Сформированная база данных позволяет обоснованно выбирать тип и геометрию заполнителя для достижения требуемых теплоизоляционных свойств в зависимости от рабочих температур и контактных давлений. Результаты могут быть использованы для верификации математических моделей контактного теплообмена и создания библиотек материалов для САЕ-систем, применяемых при проектировании современного энергетического оборудования. Выявленные закономерности могут быть экстраполированы на перспективные изделия, создаваемые методами аддитивных технологий с решетчатой внутренней структурой, топологически аналогичной исследованным сетчатым заполнителям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демкин, Н. Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей / Н. Б. Демкин. – Москва : Издательство АН СССР, 1962. – 112 с.
2. Mesnyankin, S. Y. Solid-solid thermal contact problems: Current understanding / S. Y. Mesnyankin, A. G. Vikulov, D. G. Vikulov // Physics-Uspekhi. – 2009. – Vol. 52, No. 9. – P. 891-914.
3. Шлыков, Ю. П. Контактное термическое сопротивление / Ю. П. Шлыков, Е. А. Ганин, С. Н. Царевский. – Москва : Энергия, 1977. – 328 с.
4. Теплообмен и тепловой режим космических аппаратов : [Сборник статей] : Пер. с англ. / Под ред. Д. Лукаса ; Под ред. [и с предисл.] д-ра техн. наук Н. А. Анфимова. – Москва : Мир, 1974. – 543 с.

5. 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.

6. 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. – С. 185.

8. Контактный теплообмен в соединениях с малотеплопроводными заполнителями / В. М. Попов, О. Л. Ерин, А. А. Тиньков, А. Н. Швырев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9, № 2. – С. 95-97.

REFERENCES

1. Demkin, N. B. Actual area of contact of solid surfaces / N. B. Demkin. – Moscow : Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1962. – 112 p.

2. Mesnyankin, S. Y. Solid-solid thermal contact problems: Current understanding / S. Y. Mesnyankin, A. G. Vikulov, D. G. Vikulov // Physics-Uspekhi. – 2009. – Vol. 52, No. 9. – P. 891-914.

3. Shlykov, Yu. P. Contact Thermal Resistance / Yu. P. Shlykov, E. A. Ganin, S. N. Tsarevsky. – Moscow : Energiya, 1977. – 328 p.

4. Heat Transfer and Thermal Regime of Spacecraft : [Collection of Articles] : Translated from English / Edited by D. Lucas ; Edited by N. A. Anfimov, Dr. [and with an introduction by] N. A. Anfimov. – Moscow : Mir, 1974. – 543 p.

5. Fletcher, L. S. Contact thermal resistance coefficient of some low thermal conductivity materials used as intercontact gap fillers / L. S. Fletcher, P. A. Smuda, D. A. Gayorog // Rocket engineering and cosmonautics. – 1969. – Vol. 7, No. 7. – P. 107-110.

6. Heat exchange through thin-layers in a contact zone of metall surfaces / V. M. Popov, O. L. Yerin, A. P. Novikov, I. Yu. Kondratenko // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2011. – Vol. 7, No. 6. – P. 37-39.

7. Popov, V. M. Thermistor of a contact layer with fillers between metal surfaces / V. M. Popov, A. P. Novikov, O. L. Yerin, // Modern Problems of Science and Education. – 2012. – No. 1. – P. 185.

8. Contact heat exchange in the joints with low heat-conducting fillers / V. M. Popov, O. L. Yerin, A. A. Tinkov, A. N. Shvyrev / Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2013. – Vol. 9, No. 2. – P. 95-97.