

УДК 536.241

ТЕПЛООБМЕН ЧЕРЕЗ ЗОНУ КОНТАКТА МАЛОНАГРУЖЕННЫХ
СОЕДИНЕНИЙ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПЛОСКОШЕРОХОВАТЫМИ
ПОВЕРХНОСТЯМИ

Попов В.М., Швырёв А.Н., Желтов Д.А.

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

Email: Shvyriov74@mail.ru

Аннотация: Во многих современных машинах и аппаратах встречаются конструкции с составными элементами, в которых имеет место контактный теплообмен. Для проведения расчётных операций по определению термосопротивления в зоне контакта металлических поверхностей рассматривается модель процесса теплообмена через зону контакта плоскошероховатых поверхностей при условии воздействия малых усилий сжатия, когда исключается условие равномерного распределения площадок фактического контакта по номинальной поверхности касания. Правомерность принятого условия апробировалась постановкой экспериментов, результаты которых дают хорошую сходимость с расчётными данными.

Ключевые слова: контактное термосопротивление, тепловой поток, поверхность, контактная пара, давление.

HEAT TRANSFER THROUGH THE CONTACT AREA LIGHTLY LOADED
COMPOUNDS WITH METAL ROUGHNESS-PLANAR SURFACES

Popov V.M., Shvyrev A.N., Zheltov D.A.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Voronezh State Forestry University. G.F. Morozova»

Email: Shvyriov74@mail.ru

Summary: In many modern machines and devices there are designs with composite elements in which there is a contact heat exchange. To carry out the calculation operations to determine the thermal resistance in the contact zone of metal surfaces, a model of the heat transfer process through the contact zone of planar surfaces is considered under the condition of small compression forces, when the condition of uniform distribution of the actual contact areas on the nominal contact surface is excluded.

ed. The validity of the accepted condition was tested by setting experiments, the results of which give a good convergence with the calculated data.

Keywords: contact thermal resistance, heat flow, surface, contact steam, pressure.

Введение

Развитие многих областей техники сопровождается увеличением тепловых нагрузок на конструкции технических систем. В большинстве случаев повышение теплонапряжённости конструкции приводит к росту рабочих температур и давлений. Это особенно остро ставит вопрос прогнозирования процесса теплообмена в режиме эксплуатации подобных систем. Проблема значительно усложняется для конструкций с составными элементами, когда в полной мере проявляется, так называемый, контактный теплообмен [1, 2].

Цель исследования

Целью исследования является разработка методики расчета термосопротивлений в зоне контакта соединений с малонагруженными поверхностями.

Материал и методы исследования

Исследование выполнено на основе изучения научных трудов отечественных и зарубежных учёных и специалистов, занимающихся исследованием контактного теплообмена.

Результаты исследования и их обсуждение

Фактическая сущность процесса теплообмена заключается в следующем. Если две поверхности, которые с достаточной для инженерной практики считаются параллельными, взаимно прижаты и по поверхности раздела направлен тепловой поток, то зона контакта будет оказывать сопротивление тепловому потоку. Подобное сопротивление, обычно называется контактным термическим сопротивлением (КТС), которое возникает из-за неполного контакта смежных поверхностей. Неидеальный контакт объясняется тем, что реальные, даже хорошо обработанные поверхности, имеют шероховатость, а в ряде случаев и волнистость или отклонения формы [3]. Поэтому контакт между двумя такими поверхностями имеет дискретный характер только в небольших и относительно изолированных площадках. Обычно полости между площадками непосредственного контакта заполнены малотеплопроводимыми газовыми (воздушными) включениями, другими заполнителями или даже вакуумом.

Принято считать, что в образовавшихся полостях между контактирующими поверхностями вклад в перенос тепла конвекцией и тепловым излучением

ем очень мал, поэтому основная часть теплового потока передаётся через области непосредственного контакта. При этом с приближением к поверхности прилегания линии теплового потока собираются к областям фактического контакта, отчего плотность теплового потока возрастает. Контактное термосопротивление, которое с первого взгляда кажется поверхностным явлением, в действительности связано с перераспределением линий теплового контакта на внутренней стороне каждого из соприкасающихся материалов, т.е. с переходом от равномерно распределённых линий теплового потока вдали от зоны контакта и сходящимся пучком.

Согласно отечественным и зарубежным обзорам [4, 5] при выводе зависимостей принимаются условия о равномерном распределении фактических площадок микроконтактов по номинальным поверхностям соприкосновения. Принимая во внимание данное условие, термосопротивление от сужения потока тепла к площадкам контакта описывается выражением

$$R_{\varnothing} = \frac{\pi r_0^2}{4\lambda_m \cdot a} \varphi, \quad (1)$$

где r_0 – радиус контактного элемента; φ – коэффициент стягивания, предусматривающий влияние взаимной проводимости через микроконтактные площадки друг на друга; a – радиус площадки микроконтакта; λ_m – коэффициент теплопроводимости материала контактной пары.

Формулу (1) можно трансформировать через относительную площадь фактического контакта η_3 к виду

$$R_{\varnothing} = \frac{\pi a}{2\lambda_m} \cdot \frac{\varphi}{\eta_3}. \quad (2)$$

Входящий в (2) коэффициент стягивания аппроксимируется зависимостью

$$\varphi = 1 - 1,75\eta_3^{\frac{1}{2}} + 0,7\eta_3^{\frac{3}{2}}. \quad (3)$$

Очевидно, что предлагаемая формула (2) справедлива для условия равномерного распределения площадей фактического контакта по номинальной поверхности контакта. В тоже время из основ теории механического контактирования твёрдых тел [6, 7] следует, что реализация этого условия на практике проблематична, особенно для малонагруженных соединений.

Учитывая, что для такого ряда соединений характерна пластическая де-

формация микровыступов [8], можно использовать рекомендуемые в работе [6] эмпирические зависимости, описывающие относительную площадь фактического касания плоскошероховатых поверхностей в форме

$$\eta_3 = \frac{P_{max}^{1/v} \cdot P^{\frac{1-v}{v}}}{c \cdot \sigma_b}, \quad (4)$$

для пластичных металлов и

$$\eta_3 = \left(\frac{2,12 \cdot 0,5^{1/2v} \cdot b^{1/2v} p}{h_{max}^{1/2} \cdot K \cdot E} \right)^{\frac{2v}{2v+1}}, \quad (5)$$

для упругих металлов

Здесь $C = 5$ для металлов с $\sigma_b < 20 \cdot 10^7$ Па и $C = 3$ для $\sigma_b > 30 \cdot 10^7$ Па.

P_{max} – максимальное давление при первоначальном нагружении; h_{max} – максимальная высота микронеровностей; b, v – параметры опорной кривой поверхности [8]; K – коэффициент зависящий от v ; E – модуль Юнга; p – нагрузка; σ_b – предел прочности.

Полное КТС для контактных пар, функционирующих при наличии теплопроводной среды в межконтактных полостях, как известно [1], определяется по правилу сложения параллельных сопротивлений, т.е.

$$\frac{1}{R_k} = \frac{1}{R_\phi} + \frac{1}{R_c}, \quad (6)$$

где R_c – термосопротивление среды в межконтактных полостях.

Сопротивление R_c представляет собой сопротивление прослойки, теплоперенос через которую осуществляется в основном теплопроводностью и рассчитывается по формуле

$$R_c = \frac{(h_{max1} + h_{max2})(1 - \varepsilon)}{\lambda_c}, \quad (7)$$

где λ_c – коэффициент теплопроводности среды; ε – относительное сближение под нагрузкой.

При расчётах R_c можно использовать упрощённые формулы, полученные путём специальной обработки данных экспериментов с металлическими поверхностями по зависимостям, предложенным в монографии [8].

$$\varepsilon = \left(\frac{0,1P}{C\sigma_b}\right)^{0,28} \quad (\text{строгание, фрезерование}), \quad (8)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{0,125P}{C\sigma_b}\right)^{0,185} \quad (\text{шлифование}). \quad (9)$$

При пластической деформации поверхностей и

$$\varepsilon = 1,15 \left(\frac{P}{h_{max}^{1/2} \cdot E}\right)^{0,28} \quad (\text{строгание}), \quad (10)$$

$$\varepsilon = 0,7 \left(\frac{P}{h_{max}^{1/2} \cdot E}\right)^{0,28} \quad (\text{фрезерование}), \quad (11)$$

$$\varepsilon = 0,7 \left(\frac{P}{h_{max}^{1/2} \cdot E}\right)^{0,22} \quad (\text{шлифование}), \quad (12)$$

при упругой деформации поверхностей.

Для апробации предложенных выше расчётных зависимостей на установке, используемой для исследования процессов контактного теплообмена были проведены серии экспериментов над контактными парами из стали марки 12X18H10T и сплава Д16Т. Исследовалось контактное термическое сопротивление в зависимости от нагрузок для контактных пар с плоскими неровными поверхностями, полученных фрезерованием, строганием и шлифованием. Нагрузка на поверхности изменялась в пределах от 0,2 МПа до 3 МПа.

Применяемая установка (для исследования зависимости контактного термического сопротивления от прилагаемого на образцы усилия), состоит из двух цилиндрических вертикально расположенных стержня, соприкасающихся торцами. Нижний стержень выполняет функции холодильника, охлаждаемого проточной водой, верхний электронагревателя, запитанного от электросети. Исследуемая контактная пара располагается между стержнями. Образцы контактной пары, в которые устанавливаются хромель-копелевые термопары, имеют каждый по четыре сверления расположенных радиально, глубиной 15 мм и диаметром 1 мм. Электродвижущая сила, развиваемая термопарами фиксируется компенсационным методом при помощи потенциометра. Торцевые поверхности контактных пар с холодильником и нагревателем теплоизолированы. Осевое нагружение на образцы осуществляется при помощи рычажного устройства.

Так как ставилась задача проводить замеры температур в условиях стац-

онарного режима, период каждого нагрева составлял 4-5 ч. При смене механической нагрузки, это время составляло 1-15 ч.

КТС находилось по соответствующей стандарту методике [9,10].

Термосопротивление находилось из формулы

$$R_K = \frac{\Delta T_K}{q_{cp}} \quad (13)$$

Входящий в формулу (13) перепад температуры в зоне раздела определялся из графика температурного распределения по длине образцов. Тепловой поток q_{cp} определялся из прямых распределения температур по длине образцов. Это условие правомерно, т.к. при стационарном тепловом режиме подобное распределение, как правило, носит линейный характер [11].

Из одномерного уравнения Фурье по известной теплопроводности материалов контактной пары и градиентам температур определялась плотность теплового потока.

Для верхнего образца

$$q_B = \frac{\lambda_B(T_n - T_{n+1})}{l_n - l_{n-1}} \quad (14)$$

и для нижнего образца

$$q_H = \frac{\lambda_H(T_m - T_{m+1})}{l_m - l_{m-1}}, \quad (15)$$

где $T_n, T_{n+1}, T_m, T_{m+1}$ – температуры в местах установки термопар;

$l_n - l_{n-1}, l_m - l_{m-1}$ – расстояние между местами установки термопар; λ_B, λ_H – коэффициенты теплопроводности образцов контактной пары. Средний тепловой поток находился согласно выражения

$$q_{cp} = \frac{q_B + q_H}{\alpha} \quad (16)$$

Испытания проводились на образцах без предварительного нагружения в воздушной среде. Полученные опытные данные и результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость контактного термосопротивления от нагрузки для контактных пар из стали марки 12Х18Н10Т и Д16Т при разной обработке поверхностей

Материал контактной пары	Вид обработки поверхностей	$h_{ср}$, мкм	Контактное термосопротивление R_k , $10^4 \frac{m^2 K}{W}$ от нагрузки P, МПа					
			0,2	0,75	1,5	2,0	2,5	3
Сталь 12Х18Н10Т	Фрезерование	8,3	6,1	5,4	4,6	4,2	4,1	4,06
			5,6	5,1	4,3	3,9	3,8	3,7
То же	То же	10,8	6,9	5,8	5,2	4,8	4,7	4,7
			6,0	5,4	5,0	4,5	4,3	4,2
То же	Шлифование	3,9	5,4	4,5	3,9	3,7	3,6	3,5
			4,9	4,2	3,7	3,5	3,4	3,5
Д16Т	Строгание	9,5	2,5	1,8	1,6	1,2	1,1	1,1
			2,4	1,6	1,4	1,1	1,06	1,02
То же	Фрезерование	7,3	1,7	1,2	0,8	0,65	0,6	0,5
			1,4	1,03	0,7	0,58	0,6	0,55
То же	Шлифование	4,3	1,5	0,9	0,45	0,35	0,3	0,3
			4,0	1,3	0,75	0,4	0,35	0,3

* В знаменателе расчетные данные.

Вывод

Предложенная методика расчета термосопротивлений в зоне контакта соединений с малонагруженными поверхностями позволяет проводить в оперативном режиме, без постановки длительных экспериментов, прогноз на формирование температурных полей в теплонапряженных системах с составными элементами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Шлыков, Ю. П. Контактное термическое сопротивление [Текст] : учеб. пособие / Ю. П. Шлыков, Е. А. Ганин, С. Н. Царевский. М. : Энергия, 1977. – 328 с.
- 2 Попов, В. М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений [Текст] : учеб. пособие / В. М. Попов. М. : Энергия, 1971. – 214 с.
- 3 Измайлов, В. В. Контакт твёрдых тел и их проводимость [Текст] : учеб. пособие / В. В. Измайлов, М. В. Новоселова – Тверь, ТГТУ, 2010. – 112 с.
- 4 Меснянкин, С. Ю. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твёрдых тел [Текст] / С. Ю. Меснянкин, А. Г. Викулов, Д. Г. Викулов // Успехи физических наук. – 2009. – № 9 – С. 945-970.
- 5 Madhusudana, S. V. Thermal Contact Conductance [Текст] : учеб. пособие

/ С. V. Madhusudana. – Sydney, 2014. – 260 с.

6 Демкин, Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин [Текст] : учеб. пособие / Н. Б. Демкин, Э. В Рыжов. М. : Машиностроение, 1981. – 244 с.

7 Bhushan, V. Induction to Tribology. [Текст] : учеб. пособие / V. Bhushan – Ohio, 2013. – 711 с.

8 Демкин, Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей [Текст] : учеб. пособие / Н. Б. Демкин. М. : Наука, 1970. – 226 с.

9 Шлыков, Ю. П. Экспериментальное исследование контактного теплообмена [Текст] / Ю. П. Шлыков, Е. А. Ганин. // Теплоэнергетика. – 1961. – № 7 – С. 73-76.

10 Cetinval, T. N. Thermal Conductance of Metals Surfaces in Contact [Текст] / T. N. Cetinval, M. Fischenden. // Proceeding of the General Discussion on the Transfer.. – 1955. – С. 231-276.

11 Кошкин В. К. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике [Текст] : учеб. пособие / В. К. Кошкин. М. : Машиностроение, 1975. – 328 с.