

УДК 536.24

РАСЧЕТ КОНТАКТНОГО ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ С АНИЗОТРОПНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ

Попов В.М., Лушникова Е.Н., Ерин О.Л.

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

Email: lat-07@mail.ru

**Аннотация:** Во многих современных технических системах имеют место конструкции с неподвижными стыковыми соединениями, функционирующими в режиме тепломеханического воздействия. За счет наличия в целом ряде случаев на поверхностях контактов анизотропной шероховатости, а также в условиях воздействия пониженных механических нагрузок проблематично осуществлять известными методами прогноз по формированию контактного термосопротивления. Предлагается модель процесса формирования контактного термосопротивления, учитывающая влияние неравномерного распределения площадок непосредственного контакта микронеровностей сопрягаемых поверхностей. Экспериментальная апробация предлагаемой модели дает хорошую сходимость с данными расчетов.

**Ключевые слова:** контактное термосопротивление, коэффициент смещения, площадь контакта, тепловой поток, анизотропия.

CALCULATION OF CONTACT THERMAL RESISTANCE FOR  
SURFACES WITH ANISOTROPIC ROUGHNESS

Popov V.M., Lushnikova E.N., Erin O.L.

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

Email: lat-07@mail.ru

**Summary:** In many modern technical systems there are constructions with fixed butt joints operating in the mode of thermal mechanical action. Due to the presence of anisotropic roughness on the contact surfaces in a number of cases, as well as under conditions of exposure to reduced mechanical loads, it is difficult to implement the forecast for the formation of contact thermal resistance by known methods. A model of the process of the formation of contact thermal resistance is proposed, tak-

ing into account the influence of the uneven distribution of areas of direct contact between asperities of the mating surfaces. Experimental testing of the proposed model provides good convergence with the calculated data.

**Keywords:** contact thermal resistance, displacement coefficient, contact area, heat flux, anisotropy.

Во многих областях техники встречаются конструкции с составными элементами, в которых через зону контакта плоских металлических поверхностей транспортируются тепловые потоки. Поскольку даже тщательно обработанные поверхности имеют шероховатость [1], то взаимный контакт двух поверхностей, как правило, носит дискретный характер [2].

При рассмотрении процесса передачи тепла через подобные соединения принято считать в первом приближении равномерное распределение площадок микроконтактов в виде кругов с радиусом  $\dot{a}$  по номинальной поверхности касания [3, 4]. Такое допущение позволяет в оперативном режиме описать процесс формирования термосопротивления в зоне контакта. Это сопротивление возникает за счет стягивания линий теплового потока к площадкам фактического контакта. Оно особенно заметно в среде вакуума, когда отсутствует теплоперенос через межконтактные полости.

При принятых допущениях термосопротивление стягивания теплового потока аналитически представляется в виде [5].

$$R_i = \frac{\pi r_0^2}{4 \bar{\lambda}_i \cdot \dot{a}} \varphi . \quad (1)$$

Здесь  $r_0$  – радиус гипотетического контакта элемента;  $\bar{\lambda}_i = \frac{2\lambda_{i1}\lambda_{i2}}{\lambda_{i1} + \lambda_{i2}}$  – приведенный коэффициент теплопроводности материалов контактной пары;  $\varphi$  – коэффициент стягивания, учитывающий взаимное влияние проводимости пятен контакта друг на друга.

В реальных соединениях, и особенно при воздействии малых механических нагрузок [6] за счет анизотропии шероховатости принимаемое условие равномерного распределения площадок микроконтактов по номинальной поверхности касания нельзя признать корректной [7]. Отсюда следует сделать вывод, что вследствие неупорядоченности в расположении площадок микроконтактов нарушается условие соосности гипотетического теплового канала и

площадки единичного микроконтакта, что накладывает ограничение на получение точных расчетных данных для контактного термосопротивления (КТС).

По существу следует рассматривать единичный контактный элемент со смещенной контактной площадкой, как это представлено на рисунке 1.

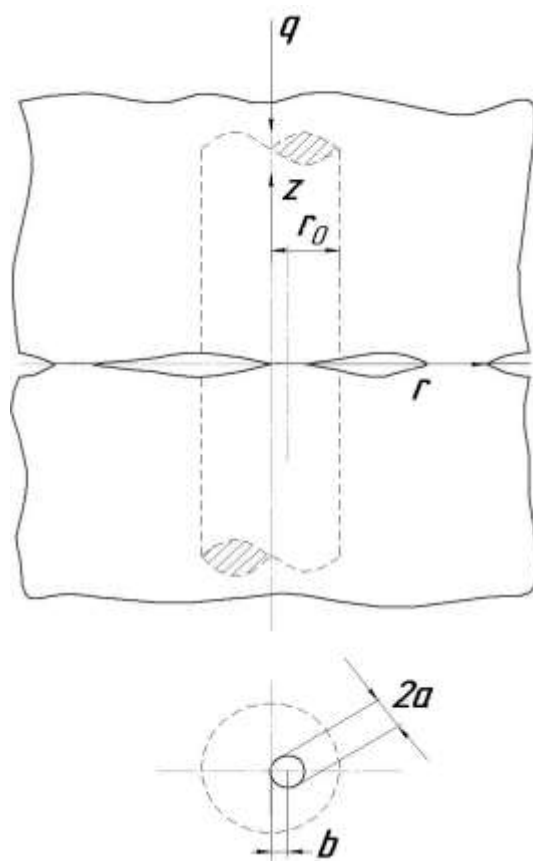


Рисунок 1 – Схема контакта плоской поверхности с эксцентрическим контактным элементом

Как следствие неупорядоченности в расположении площадок микроконтактов имеет место нарушение соосности гипотетического теплового канала и площадки единичного контактного элемента. Для установления влияния смещения площадок микроконтактов на термосопротивление  $R_1$  проводились исследования на установке ЭГДА.

Осуществлялась имитация течения теплового потока по пластине из электропроводящей бумаги шириной  $2r_0$ , имеющей эксцентрично расположенное сужение шириной  $2\hat{a}$ , соответствующее диаметру площадки единичного микроконтакта. В процессе испытаний на установке ЭГДА изменялись соотношения  $\hat{a}/r_0$  и  $\hat{b}/r_0$ . Полученные результаты измерений обрабатывались в безразмерных величинах по формуле (1), преобразованной к виду

$$\frac{\bar{\lambda}_i}{(1/R_1)r_0} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{r_0}{\hat{a}} \cdot \varphi . \quad (2)$$

Преобразуем (2), обозначив  $L = \frac{\bar{\lambda}_i}{1/R_1}$ ,

$$\frac{L}{r_0} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{r_0}{\hat{a}} \cdot \varphi . \quad (3)$$

Для установления влияния смещения площадок контакта на термосопротивление исследовались ситуации для четырех различных значений параметров  $\hat{a}/r_0$  (0,48; 0,37; 0,24; 0,075) и четырех значений  $\hat{a}/r_0$  (0; 0,09; 0,135; 0,31). После обработки опытных данных получено выражение, описывающее влияние смещения контактных площадок на КТС.

$$\frac{L}{r_0} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{r_0}{\hat{a}} \cdot \varphi + 3,4 \left( \frac{\hat{a}}{r_0} \right)^{2,7} . \quad (4)$$

В более наглядной форме эффект от смещения контактной площадки выражается через коэффициент смещения  $\rho = \frac{R_{in}}{R_1}$ , указывающий на повышение термосопротивления для смещенного контакта  $R_{in}$  относительно термосопротивления симметричного контакта  $R_1$ .

Приведенная на рисунке 2 зависимость  $\rho = f(\hat{a}/r_0)$  указывает, что в пределах рабочего режима значений  $\hat{a}/r_0$  и  $\hat{a}/r_0$  коэффициент  $\rho$  изменяется от 1 до 1,4.

При наличии в межконтактной прослойке теплопроводной среды (воздух) тепловой поток при подходе к зоне контакта раздваивается и тогда часть теплоты проходит через площадки фактического контакта и часть через межконтактные полости. Тогда общая тепловая проводимость  $\alpha_\varepsilon$  складывается из проводимости мест фактического контакта  $\alpha_i$  и проводимости межконтактной среды  $\alpha_{\bar{n}}$ , т.е.

$$\alpha_\varepsilon = \alpha_i + \alpha_{\bar{n}} . \quad (5)$$

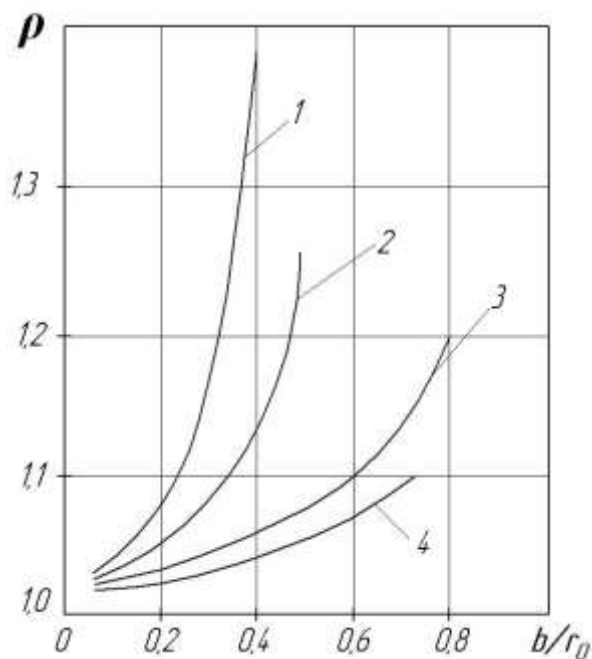


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента смещения от отношения величины смещения площадки единичного контакта к радиусу контактного элемента при  $\delta/r_0 = 0,48(1); 0,37(2); 0,24(3); 0,075(4)$

Выразив проводимости через термосопротивления, получаем [8]

$$\frac{1}{R_{\xi}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_c} \quad (6)$$

Как отмечалось ранее, сопротивление  $R_1$  возникает за счет стягивания линий теплового потока к площадкам фактического контакта, а сопротивление  $R_c$  формируется за счет сопротивления межконтактной среды. Это сопротивление представляется сопротивлением постоянной толщины  $\bar{\delta}$ , т.е.

$$R_c = \frac{\bar{\delta}}{\lambda_c} \quad (7)$$

где  $\lambda_c$  – коэффициент теплопроводности межконтактной среды.

Термосопротивление фактического контакта можно выразить из уравнения (3) в форме

$$R_1 = \frac{\pi \dot{a}}{2 \lambda_1} \cdot \frac{\varphi}{\eta_3} \quad (8)$$

где  $\eta_3$  – относительная площадь фактического контакта. Радиус площадки фактического контакта принято считать равным  $\alpha = 30$  мкм [9]. Входящий в (8) коэффициент стягивания теплового потока к площадкам микроконтактов с учетом двучленного приближения по данным [10] можно выразить через относительную площадь фактического контакта в виде

$$\varphi = 1 - 1,75\eta_3^{1/2} + 0,7\eta_3^{3/2} . \quad (9)$$

Термическое сопротивление среды в зоне контакта согласно [9] можно выразить в виде

$$R_c = \frac{(R_{z1} + R_{z2}) \cdot (1 - \varepsilon)}{\lambda_c} . \quad (10)$$

Здесь  $R_z$  – гостированная средняя высота микронеровностей;  $\varepsilon$  – относительное сближение поверхностей под нагрузкой.

Входящие в формулы (8) – (10) относительная фактическая площадь касания поверхностей  $\eta_3$  и относительное сближение  $\varepsilon$  находятся по формулам, приведенным в монографии [11].

После подстановки в (6) значения сопротивления фактического контакта из (8) и (9) и сопротивления межконтактной среды из (10) с учетом коэффициента смещения, получаем

$$\frac{1}{R_\varepsilon} = 0,63 \frac{\bar{\lambda}_1 \eta_3}{\rho \alpha (1 - 1,75\eta_3^{1/2} + 0,7\eta_3^{3/2})} + \frac{\lambda_n}{(R_{z1} + R_{z2}) \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (11)$$

Для установления особенностей тепломеханического контактирования плоскошероховатых поверхностей с анизотропной шероховатостью или мало-нагруженных соединений проведены экспериментальные исследования. Постановка физических экспериментов осуществлялась на установке стержневого типа, функционирующей в режиме стационарности и ранее применяемой для исследования контактного теплообмена [8]. Исследовалось формирование КТС для контактных пар из стали марки 1Х18Н10Т и сплава Д16Т в воздушной среде при давлении до 3 МПа. Контактные поверхности подвергались механической обработке фрезерованием, строганием и шлифованием. Полученные в процессе испытаний результаты приведены на рисунках 3 и 4.

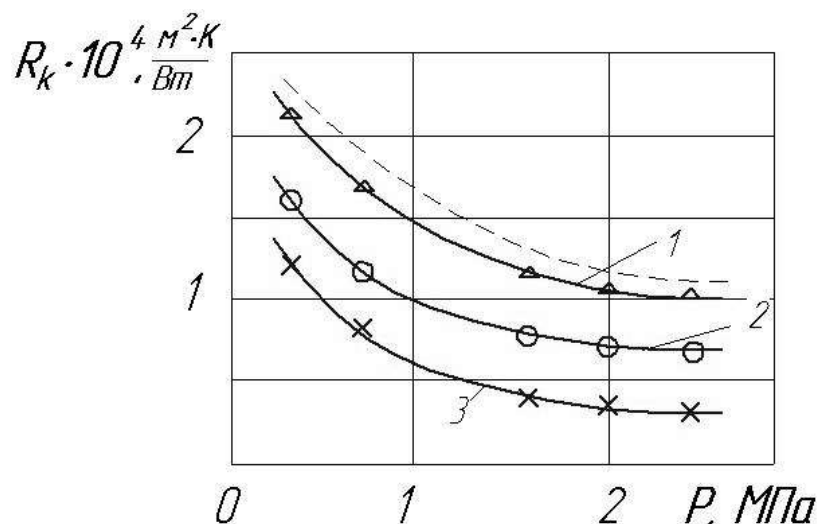


Рисунок 3 – Зависимость КТС от нагрузки для пары из Д16Т: 1 – поверхности контакта обработаны строганием ( $R_z \approx 9,8$  мкм); 2 – фрезерование ( $R_z \approx 7,6$  мкм); 3 – шлифование ( $R_z \approx 4,1$  мкм). Штриховая линия – расчет по формуле (11)

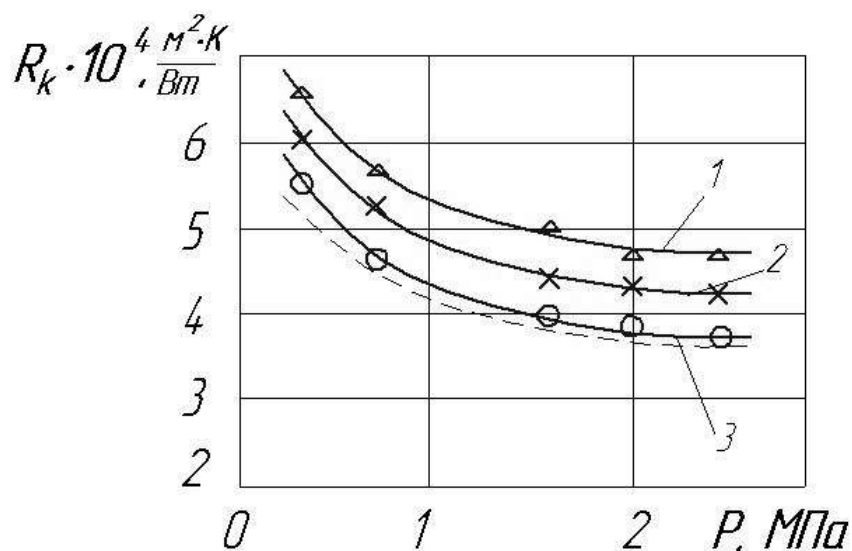


Рисунок 4 – Зависимость КТС от нагрузки для пары из 12X18N10Т: 1 – поверхности контакта обработаны строганием ( $R_z \approx 11,2$  мкм); 2 – фрезерование ( $R_z \approx 8,5$  мкм); 3 – шлифование ( $R_z \approx 4,2$  мкм). Штриховая линия – расчет по формуле (11)

Приведенные на рисунках 3 и 4 опытные данные подтверждают вывод о росте КТС для соединений с неравномерно расположенными по номинальной поверхности контакта плоскошероховатых поверхностей площадками микроконтактов. Это особенно характерно для контактных пар, испытывающих низкие механические нагрузки. Сравнение теоретических и экспериментальных данных свидетельствует о допустимой сходимости и правомерности использования на практике расчетной зависимости для определения КТС в такого рода соединениях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Демкин Н. Б., Рыжов Э. В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М. : Машиностроение, 1981. – 244 с.
- 2 Демкин Н. Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. М. : Изд-во АН СССР, 1962. – 111с
- 3 Fenech Y. Rohsenov W. M. Prediction of Thermal Conductance of Metallic Surfaces in Contact. ASME Journal of Heat Transfer. Vol. 85. Feb. 1963. – pp. 15-24.
- 4 Шлыков Ю. П., Ганин Е. А., Царевский С. Н. Контактное термическое сопротивление. М. : Энергия, 1977. – 328 с.
- 5 Cooper M. G., Mikic B. B., Yovanovich V. V. Thermal Contact Conductance // International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 12. 1969. – pp. 279-300.
- 6 Данилов Ю. И., Михайлова Т. В., Михеев Ю. С. Особенности контактного теплообмена для различных типов соединений // В кн. «Тепло- и массообмен между потоками и поверхностями. МАИ. 1980. – С. 76-81.
7. Novikov V. S. The Thermal Contact Resistance as a Function of Compression of Rough Surfaces // Heat Transfer – Soviet Research. Vol. 2. Nov. 1970. – pp. 160-165.
- 8 Попов В. М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М. : Энергия, 1971. – 216 с.
- 9 Voeschoten F., Von der Held E. The Thermal Conductance of contacts between aluminium and other metals. – Physica, 1957. Vol. 23. № 1. – pp. 37-44.
- 10 Ильченко О. Т., Капинос В. М. Тепловая проводимость слоя, образованного выступами шероховатости // Изд-во Вузов. Энергетика. 1958. № 9. – С. 77-89.
- 11 Демкин Н. Б. Контактное сопротивление шероховатых поверхностей. М. : Наука, 1970. – 226 с.