

## ТЕПЛОБМЕН В ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ СИСТЕМАХ С ПЕРИОДИЧЕСКИ КОНТАКТИРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

**Попов В.М., Карпов А.А., Тиньков А.А.**

*ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия», Воронеж, Россия (394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8), e-mail: [etgvglta@mail.ru](mailto:etgvglta@mail.ru)*

Приведены результаты опытных исследований процесса формирования контактного термосопротивления в зоне раздела периодически соприкасающихся металлических поверхностей. Установлено, что при отсутствии контактного термосопротивления для периодически соприкасающихся поверхностей соотношение между общим термосопротивлением на пути теплового потока, частотой и длительностью контакта описывается в безразмерной форме единой кривой. При наличии контактного термосопротивления повышение частоты обработки поверхностей контакта сопровождается снижением общего термосопротивления, которое зависит от контактного термосопротивления тем заметнее, чем больше отношение длительности контакта к длительности периода. Предложенная модель процесса теплопереноса через зону раздела периодически контактирующих металлических поверхностей учитывает такие существенные факторы, оказывающие влияние на формирование термосопротивления, как геометрия поверхностей, температурное условие, природа материала контактирующих тел и усилия прижима поверхностей.

Ключевые слова: контактное термосопротивление, поверхность, теплообмен, периодически контактирующие элементы.

## HEAT EXCHANGE IN HEAT-STRESSED SYSTEMS WITH OCCASIONALLY CONTACTING ELEMENTS

**Popov V.M., Karpov A.A., Tinkov A.A.**

*Voronezh State Forestry Academy, Voronezh, Russia (394 087 Voronezh, Timiryazev str., 8), e-mail: [etgvglta@mail.ru](mailto:etgvglta@mail.ru)*

The results of experimental studies of the formation of contact thermal resistance in the zone of section of periodically contacting metal surfaces are given. It was established that in the absence of contact thermal resistance for periodically contacting surfaces, ratio between the total thermal resistance to heat flow path, frequency and duration of exposure is described in dimensionless form of unified curve. In the presence of contact thermal resistance increase in the frequency treatment of contact surfaces is accompanied by a decrease in the total thermal resistance, which depends on the contact thermal resistance, it is the more noticeable the larger the ratio of duration of exposure to the duration of the period. The proposed model of heat transfer through the zone of section of periodically contacting metal surfaces takes into account such important factors influencing the formation of thermal resistance, as geometry of surfaces, thermal condition, the nature of the material of contacting bodies and the efforts of the surfaces clamp.

Key words: contact thermal resistance, surface, heat exchange, periodically contacting elements.

### **Введение**

Во многих отраслях современной техники в процессе эксплуатации технические системы работают в режиме повышенных тепловых нагрузок. На тепловой режим таких систем оказывают влияние процессы теплообмена, протекающие в зонах раздела из составных элементов. В этих случаях имеет место так называемый контактный теплообмен. За последние несколько десятилетий этой проблеме посвящено большое число исследований отечественных [2-4] и зарубежных [1] ученых-теплофизиков. При этом подавляющее

большинство исследований посвящено вопросам контактного теплообмена для соединений со статическими контактами. В то же время в таких энергетических установках, как паровые и газовые турбины, двигатели внутреннего сгорания, в металлообрабатывающих комплексах и других подобных системах имеются соединения с периодически контактирующими металлическими поверхностями, через которые проходят тепловые потоки высокой плотности. К таким соединениям можно отнести контактные пары в виде заготовки и пуансон в кузнечно-прессовом оборудовании; седло клапана – гнездо в головке блока двигателей внутреннего сгорания, паяльник – заготовка. При проектировании и эксплуатации подобных систем необходима информация по формированию температурных полей в зоне контакта отдельных элементов конструкций. Учитывая достаточно сложный характер протекания процесса контактного теплообмена в статических соединениях [4] и зависимости контактного термосопротивления (КТС) от большого числа факторов, можно утверждать, что изучение теплопереноса в подвижных тепловых контактах сопряжено с не меньшими трудностями. Отсюда наиболее реальным в изучении формирования КТС остается физический эксперимент.

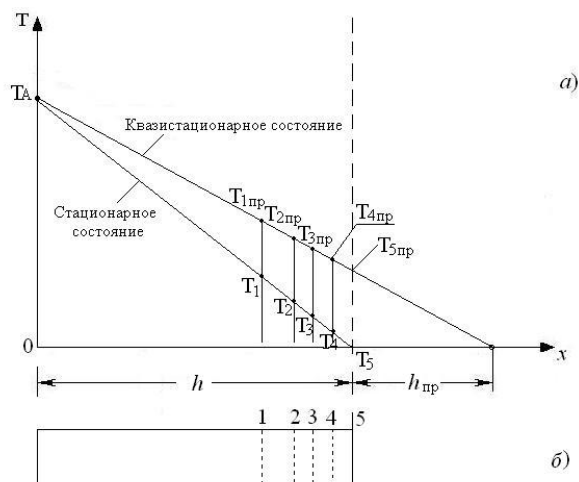
#### **Цель исследования. Результаты исследования**

Для определения КТС в периодически контактирующих торцевых поверхностях металлических стержней создана экспериментальная установка, в состав которой входит камера, в которой смонтированы два стержня длиной по 120 мм и диаметром 24 мм с теплоизолированными боковыми поверхностями. В верхнем стержне смонтирован электронагреватель, мощность которого регулируется реостатом. Стержень совершает возвратно-поступательное движение с помощью электродвигателя через вал с кулачком. Время и частота контакта стержней регулируется специальным таймерным устройством. Заданное давление на поверхности в зоне контакта поддерживается сменными пружинами. Нижний стержень, выполняющий функции холодильника, подпитывается проточной водой. Конструкция крепления стержней предусматривает возможность их замены.

Замер температур по длине стержней и в зоне контакта производится с помощью четырех для каждого стержня хромель-копелевых термопар с диаметром электродов 0,2 мм. Одна термопара крепилась со стороны нагревателя. Для фиксации показаний термопар использовался самопишущий потенциометр КСП-4 и осциллограф. В роли контролирующего прибора выступал гальванометр марки М-95.

Методика определения термосопротивлений для периодически контактирующих стержней заключается в следующем. Рассмотрим распределение усредненных по времени температур в горячем стержне, для чего разделим его на конечные элементы в соответствии с местом заделки термодатчиков, как это представлено на рис. 1а. Приведенные на этом

рисунке значения температур по длине стержня  $T_{1пр} \dots, T_{5пр}$  получены в процессе эксперимента для режима при периодическом контактировании для условий идеального контакта, когда термическое сопротивление непосредственного контакта  $R_k \rightarrow 0$ .



**Рис. 1.** Распределение усредненной температуры в «горячем» стержне в статическом и прерывистом состоянии (а), и стержень с местами установки температурных датчиков (б).

Тогда появляется возможность графической интерпретации длины участка стержней  $h_{пр}$ , представляющего собой термосопротивление вследствие периодического прерывания теплового потока. По сути дела на пути теплового потока в этом случае возникает термосопротивление, состоящее из двух независимых сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ . При этом  $R_1$  представляет сопротивление, создаваемое непосредственно материалом стержня длиной  $h$  в условиях постоянного контакта. Сопротивление  $R_2$  выражает собой термосопротивление за счет периодического прерывания теплового потока при разъединении стержней. Это сопротивление может быть выражено частью самого стержня –  $h_{пр}$ .

Анализируя рис. 1, можно выразить аналитически потери теплового потока при периодическом прерывании теплового потока за счет разъединения стержней, когда не учитывается влияние контактного термосопротивления при замкнутых контактах. В этом случае разность между тепловыми потоками для стационарного и квазистационарного состояния запишется в виде:

$$Q_{cm} - Q_{кв.см.} = \frac{\lambda_m (T_{1пр} - T_1)}{x_1 - x_0} = \frac{\lambda_m (T_{2пр} - T_2)}{x_2 - x_0} = \dots = \frac{\lambda_m (T_{5пр} - T_5)}{x_5 - x_0}. \quad (1)$$

Откуда в безразмерной форме

$$H = \frac{Q_{cm} - Q_{кв.см.}}{Q_{cm}} = \frac{T_{1пр} - T_1}{T_A - T_1} = \dots = \frac{T_{5пр} - T_5}{T_A - T_5} = \frac{h_{пр}}{h + h_{пр}}. \quad (2)$$

Тогда

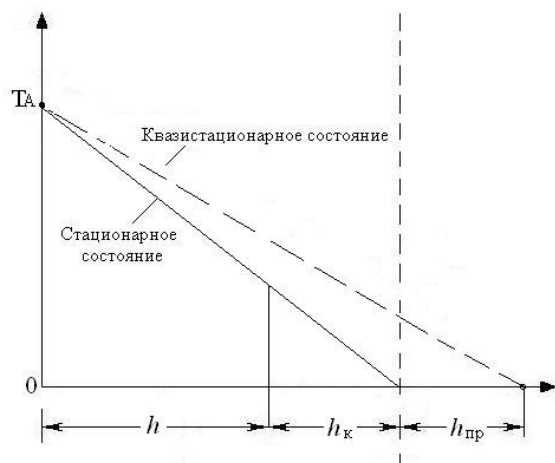
$$h_{np} = \frac{h H}{1 - H}. \quad (3)$$

Здесь  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности материала стержня;  $Q_{ст} - Q_{кв.ст}$  – тепловые потоки соответственно при стационарном и квазистационарном режиме теплообмена.

Для отражения независимости термосопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  введем безразмерные комплексы  $\left(\frac{\nu h_{np}^2}{a^2}\right)$  и  $(\nu \tau_k)$ , характеризующие собой термическое сопротивление вследствие периодического прерывания процесса теплообмена при разъединении стержней и непосредственно стержня, а также соотношение длительности контакта к длительности периода. Входящие в предлагаемые комплексы параметры характеризуют:  $\nu$  – частота циклов;  $\tau_k$  – время в течение одного цикла, когда поверхности находятся в контакте;  $a$  – коэффициент температуропроводности материала стержня.

Основной практический интерес представляет установление зависимости  $\left(\frac{\nu h_{np}^2}{a^2}\right) = f(\nu \tau_k)$ . Установление такой зависимости для условий, близких к реальным, возможно только при постановке физических экспериментов.

Задача несколько усложняется, когда необходимо учитывать влияние контактного термосопротивления при замкнутых контактах. На рис. 2 представлена схема распределения температур в «горячем» стержне в статическом и прерывистом состоянии при наличии контактного термосопротивления. Появление дополнительной переменной в виде контактного термосопротивления, характеризуемого  $h_k$ , приводит к необходимости введения нового безразмерного комплекса  $\left(\frac{\nu h_k^2}{a^2}\right)$ , дополнительного к двум ранее введенным.



**Рис. 2. Распределение усредненной температуры в «горячем» стержне в статическом и прерывистом состоянии при наличии контактного термосопротивления.**

Таким образом, в этом случае безразмерный комплекс, характеризующий термосопротивление за счет периодического прерывания теплового потока, будет выражаться в виде:

$$\left( \frac{\nu h_{np}^2}{a^2} \right) = f \left[ (\nu \tau_k), \left( \frac{\nu h_k^2}{a^2} \right) \right]. \quad (4)$$

Установить конкретную форму уравнения (4) и границы его применения в расчетной практике можно также только при постановке физического эксперимента. Задача экспериментальной интерпретации уравнения (4) усложняется тем, что комплекс  $\left( \frac{\nu h_k^2}{a^2} \right)$  зависит от большого числа факторов, а именно: природы материала контактирующих тел, температурных условий, усилий прижима поверхностей и их геометрии.

Перед постановкой опытов по нахождению термосопротивления теплового потока для разомкнутых контактов на описанной выше установке исследовалось формирование контактного термосопротивления  $R_k$  в форме  $h_k$  от механической нагрузки на поверхности контакта.

Условия контакта рассматриваемой системы предполагают протекание нестационарного теплового режима, поэтому был использован модифицированный метод [6], в основу которого заложено условие установления при проведении эксперимента регулярного режима охлаждения образцов (стержней).

Контактное термосопротивление находилось по формуле:

$$R_k = \frac{S \Delta \tau}{C \ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}, \quad (5)$$

где  $C$  – теплоемкость верхнего стержня;  $S$  – номинальная площадь контакта стержней;  $\Delta \tau$  – время изменения перепада температур между верхним и нижним стержнями от  $\Delta T_1$  до  $\Delta T_2$ .

Полученное таким способом контактное термосопротивление  $R_k$  трансформировалось затем в длину участка стержня  $h_k$  (рис. 2) согласно выражения  $h_k = R_k \cdot \lambda_m$  [6].

Экспериментальные исследования проводились в два этапа. На рис. 3 приведены данные опытов для системы с периодически контактирующими поверхностями при отсутствии контактного термосопротивления, когда данные опытов представлены в безразмерной форме

в виде зависимости  $\left( \frac{\nu h_{np}^2}{a^2} \right) = f(\nu \tau_k)$ . В качестве объектов исследований выбраны стержни из

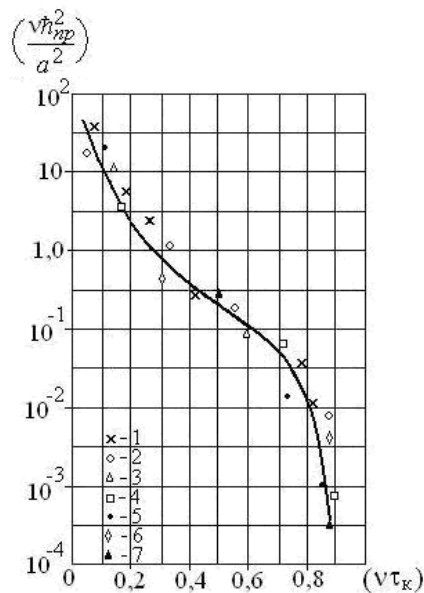
нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т с контактными поверхностями, обработанными плоским шлифованием до чистоты с  $R_z \approx 0,8$  мкм. На поверхность верхнего стержня наносились гальваническим способом кадмиевые покрытия толщиной  $\delta = 60$  мкм. Высокая чистота обработки и покрытие из высокотеплопроводного кадмия позволяют при усилиях прижима поверхностей до 0,16 МПа создавать соединения с хорошей тепловой проводимостью, когда влиянием контактного термосопротивления можно пренебречь.

Из рис. 3 видно, что при малых значениях потерь теплового потока при периодическом прерывании контакта стержней  $H$  из уравнения (2) представляется в виде:

$$\frac{h}{H} \approx \frac{h}{h_{np}} \quad (6)$$

Таким образом, согласно (6) и графику на рис. 3 видно, что при увеличении частоты  $\nu$   $H$  снижается, и при достаточно больших значениях комплекса  $(\nu\tau_k)$  потери теплового потока, вызываемые периодическим прерыванием теплового потока, будут минимальными.

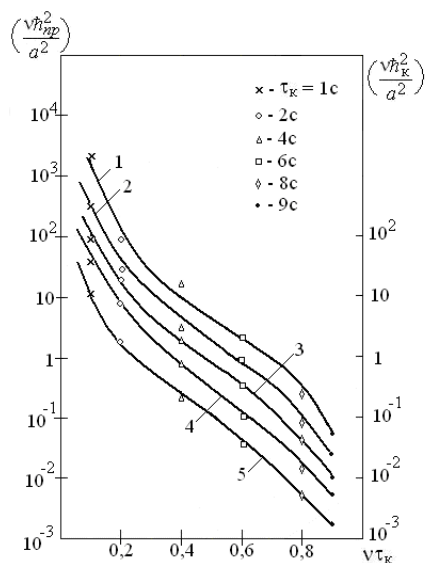
На втором этапе опытных исследований изучался процесс теплообмена в периодически контактирующих стержнях, когда необходимо учитывать контактные термосопротивления для замкнутых контактов. Принимая во внимание выводы ранее проведенных исследований [1–4], в качестве доминирующего фактора, влияющего на формирование КТС при непосредственном контакте стержней, следует считать геометрию контактирующих поверхностей.



**Рис. 3. Зависимость термосопротивления за счет периодического прерывания теплового потока от отношения длительности контакта к длительности периода при различной частоте контактов стержней для условия отсутствия КТС: 1 –  $\nu = 0,08$  Гц; 2 – 0,11 Гц; 3 – 0,25 Гц; 4 – 0,6 Гц; 5 – 0,96 Гц; 6 – 1,7 Гц; 7 – 3,6 Гц. Температура в зоне контакта  $T_k = 413...418K$ .**

В процессе испытаний менялись верхние стержни из стали 12Х18Н10Т, у которых поверхности контакта обрабатывались путем строгания, фрезерования и шлифования. Исследования проводились при фиксированных значениях  $\nu = 0,1$  Гц,  $P = 0,15$  МПа,  $a^2 =$

$6,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Результаты опытов для различных значений времени одного цикла приведены на рис. 4.



**Рис. 4. Зависимость термосопротивления за счет периодического прерывания теплового потока от отношения длительности контакта к длительности периода при наличии КТС в зоне контакта различных по чистоте обработки поверхности стержней: 1 – строгание,  $R_z \approx 53$  мкм; 2 – строгание,  $R_z \approx 32,4$  мкм; 3 – фрезерование,  $R_z \approx 18,3$  мкм; 4 – фрезерование,  $R_z \approx 11$  мкм; 5 – шлифование,  $R_z \approx 2,8$  мкм.**

Анализируя данные рис. 4, можно видеть, что, как и следовало ожидать, с повышением чистоты обработки поверхностей контакта безразмерный комплекс, характеризующий влияние КТС  $\left(\frac{v h_k^2}{a^2}\right)$ , уменьшается. Также очевидно, что общее термосопротивление тепловому потоку в виде комплекса  $\left(\frac{v h_{np}^2}{a^2}\right)$  зависит от КТС и тем заметнее, чем больше отношение длительности контакта к длительности периода.

Приведенные в статье результаты исследований позволяют проводить операции по прогнозированию термосопротивлений в зоне раздела периодически контактирующих поверхностей для теплонапряженных технических систем с составными элементами, периодически контактирующими между собой.

### Список литературы

1. Мадхусудана К.В., Флетчер Л.С. Контактная теплопередача. Исследования последнего десятилетия // Аэрокосмическая техника. – 1987. – № 3. – С. 103–120.
2. Меснянкин С.Ю., Викулов А.Г., Викулов Д.Г. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179. – № 9. – С. 945–970.
3. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. – М. : Энергия, 1971. – 214 с.

4. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. – М. : Энергия, 1977. – 328 с.

5. Jacobs R.B., Starr C. Thermal conductance of Scientific Instruments. – 1939. – Vol. 10. – № 5. – Pp. 140–141.

6. Popov V.M., Karпов A.A., Chernyshov A.D. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2008. – V. 81. – № 5. – Pp. 1021–1032.

**Рецензенты:**

Жучков А.В., д.т.н., профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств» ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных систем», г. Воронеж.

Шитов В.В., д.т.н., профессор кафедры промышленной энергетики ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных систем», г. Воронеж.