

КОНТАКТНОЕ ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЕ МЕЖДУ ПЕРИОДИЧЕСКИ СОПРИКАСАЮЩИМИСЯ ПОВЕРХНОСТЯМИ

В.М. Попов, А.А. Карпов, И.Ю. Кондратенко

Опытным путем установлена зависимость общего термосопротивления тепловому потоку через периодически контактирующие металлические поверхности при отсутствии контактного термосопротивления от частоты и времени контакта

Ключевые слова: термосопротивление, теплопроводность, контактная пара, периодически контактирующие поверхности

При разработке современных теплонапряженных технических систем в ряде случаев возникает необходимость учитывать влияние, оказываемое контактным термосопротивлением, обусловленным несовершенством механического соединения из металлических поверхностей.

Как правило, в большинстве случаев в ранее проведенных исследованиях контактного теплообмена рассматривались процессы теплопереноса в соединениях со статическими контактами [1 - 3]. Вместе с тем в таких технических системах, как паро- и газотурбинные установки, двигатели внутреннего сгорания, металлообрабатывающие комплексы и других подобных системах функционируют соединения с периодически контактирующими металлическими поверхностями, через которые транспортируются тепловые потоки зачастую достаточно высокой плотности.

При проектировании и эксплуатации таких систем требуется информация о формировании температурных полей в зонах контакта отдельных элементов конструкций и в целом узлов.

Первые попытки изучения этой достаточно нетривиальной как в экспериментальном, так и в теоретическом аспекте задачи положены в работах авторов [4 - 6]. Из этих работ видно, что ввиду многообразия факторов, оказывающих влияние на процесс переноса тепла через такие соединения, решить подобную задачу достаточно сложно. Этот тезис подтверждается тем, что отдается предпочтение операциям с аналоговой машиной, с помощью которой исследуется одномерный перенос тепла между двумя периодически соприкасающимися стержнями.

Более приближенное к реальным условиям аналитическое решение процесса контактной теплопроводности через периодически соприкасающиеся поверхности двух стержней предложено в работе авторов [7]. На основе метода разложения по собственным функциям краевой задачи предложен эволюционный алгоритм построения решения для циклов контактирования, при этом получено явное

решение для первого цикла и разработана компьютерная программа расчета температурного поля.

Полученные аналитические решения позволяют проводить лишь качественный анализ теплового процесса периодического контактирования двух твердых тел. Для получения информации о влиянии факторов, таких как чистота обработки поверхностей контакта стержней, усилие прижима, температуры, рода материалов стержней на указанный процесс требуется проведение комплексных экспериментальных исследований. Для этих целей спроектирована и создана экспериментальная установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

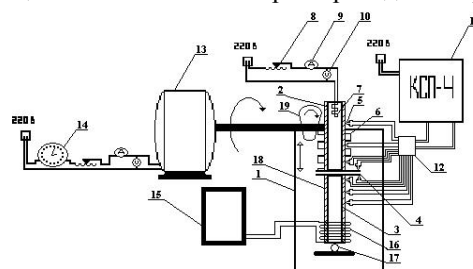


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 - рабочая ячейка; 2 - верхний стержень; 3 - нижний стержень; 5 - термодатчики; 6 - пружина; 7 - электронагреватель; 8 - реостат; 9 - амперметр; 10 - вольтметр; 11 - потенциометр; 12 - распределительная коробка; 13 - электродвигатель; 14 - таймер включения и выключения электродвигателя; 15 - ультратермостат; 16 - холодильник; 17 - шарик устойчивости; 18 - слой изоляции; 19 - кулачок привода толкателя

Установка позволяет находить термосопротивление на перенос тепла между периодически соприкасающимися металлическими поверхностями и изучать влияние контактного термосопротивления при замкнутых контактах на общее термосопротивление.

Основным элементом установки является рабочая ячейка, в которой установлены образцы в виде стержней из исследуемых металлов диаметром 24 мм и длиной 120 мм, покрытых с боков теплоизоляцией, позволяющей снизить до минимума радиальные потери тепла. В верхнем стержне установлен электродвигатель, мощность которого регулируется реостатом. Конструкция крепления электронагревателя предусматривает возможность его замены. Этот стержень совершает возвратно-поступательное движение с помощью электродви-

гателя через вал с кулачком. Время контакта стержней регулируется специальным таймерным устройством, позволяющим отключать электродвигатель на заданный период времени. Задание давления в зоне контакта стержней поддерживается сменными пружинами. Нижний стержень охлаждается через специальное устройство с проточной водой.

Температурный режим по длине стержней и в зоне контакта фиксируется с помощью четырех для каждого стержня хромель-копелевых термопар с диаметром электродов 0,2 мм, заделанных в специальные сверления диаметром до 0,3 мм на глубину радиуса стержней и прикрепленных с помощью полимерных зажимов. Одна термопара устанавливалась в районе электронагревателя.

Для фиксации показаний термопар используются самопишущий потенциометр КСП-4 и осциллограф. Частота и длительность непосредственного контакта стержней замерялись с помощью секундомера. Усилие прижима между стержнями предварительно рассчитывалось путем тарировки отдельных пружин.

Постановка экспериментов осуществлялась в следующем порядке. Для каждой серии опытов перед включением нагревателя осуществлялся пуск электродвигателя и проводилось порядка 50 циклов контактирования и разъединения стержней. После подобного механического тренинга включались электронагреватель, холодильник и потенциометр. С помощью реостата и таймера задавались частота и длительность контакта. По достижению выраженного квазистационарного теплового режима по длине стержней осуществлялся замер температур в периоды непосредственного контакта и размыкания торцов стержней. Производилось по три замера температуры по четыре в каждом стержне и температуры по термопаре, установленной в области нагревателя. На рис. 2 приведена схема распределения температур в «горячем» стержне для замкнутых контактов ($T_1...T_4$) и для состояния, когда стержни разъединены ($T_{1пр}...T_{4пр}$). Температура в области нагревателя фиксируется, как отмечалось, отдельной термопарой и составляет T_A .

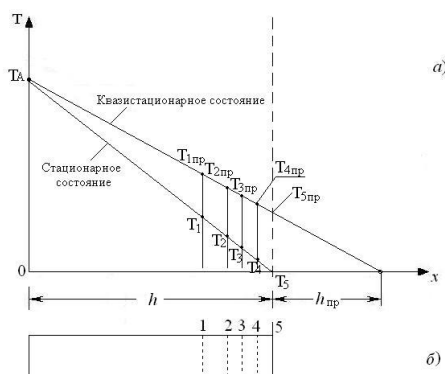


Рис. 2. Распределение усредненной температуры в «горячем» стержне в статическом и прерывистом состоянии (а) и стержень с местами заделки температурных датчиков (б)

Кроме нахождения термосопротивления тепловому потоку для случая разомкнутых контактов исследовалось влияние контактного термосопротивления при замкнутых контактах на общее термосопротивление. Ранее применяемые методы экспериментального определения контактного термосопротивления [1-3] пригодны только при стационарном тепловом режиме.

В данном случае применяется метод, в основу которого положен модифицированный способ, который использовался авторами работы [12]. Для реализации этого способа использовалась описанная выше установка (рис.1). При установлении регулярного режима верхний стержень вводился в контакт с нижним, имеющим постоянную температуру, значительно меньшую, чем температура верхнего стержня. При соприкосновении стержней температура верхнего стержня T_1 снижается, а нижнего T_2 повышается. Изменение температур замеряется двумя термопарами, задействованными в обоих стержнях у зоны контакта. Контактное термосопротивление рассчитывалось по формуле:

$$R_k = \frac{S_n \cdot \Delta \tau}{C \ln \Delta T_1 / \Delta T_2} \quad (1)$$

Здесь S_n - номинальная поверхность контакта стержней; C - теплоемкость материала верхнего стержня; $\Delta \tau$ - время изменения перепада температур между верхним и нижним стержнями от ΔT_1 до ΔT_2 .

Приведенное на рис. 2 распределение температур характерно для условия идеального контакта, когда контактное термосопротивление $R_k \rightarrow 0$. Тогда появляется возможность графической интерпретации длины участка стержня $h_{пр}$, представляющего собой термосопротивление за счет периодического прерывания теплового потока. Таким образом на пути теплового потока возникает сопротивление R_1 , создаваемое непосредственно материалом стержня длиной h в условиях постоянного контакта, и R_2 , как термосопротивление за счет периодического прерывания теплового потока при разъединении стержней и выражаемого частью этого стержня, т.е. $h_{пр}$.

В целях отражения независимости термосопротивлений R_1 и R_2 вводятся безразмерные комплексы $(\nu h_{пр}^2 / a^2)$ и $(\nu \tau_k)$, характеризующие собой термосопротивления соответственно вследствие периодического прерывания процесса теплопереноса при разъединении стержней, а также соотношение длительности контакта и длительности периода [8, 9]. Здесь ν - частота; τ_k - время в течение одного цикла, когда поверхности находятся в контакте; a - коэффициент температуропроводности.

В ранее выполненных исследованиях [8, 9] рассматривался процесс теплообмена через периодически соприкасающиеся металлические поверхности при наличии контактных термосопротивле-

ний. В тоже время для контактных пар с поверхностями высокой чистоты обработки, при наличии в зоне раздела заполнителей или покрытий из высокопластичных и теплопроводных металлов, при больших усилиях прижима и малом тепловом потоке можно пренебречь контактным термосопротивлением. Следует особо отметить, что возможность экспериментального рассмотрения системы с периодически контактирующими поверхностями при отсутствии контактного термосопротивления, как дополнительной переменной, позволит натурализовать сам процесс, и таким образом, описать влияние отдельных факторов на процесс теплопереноса.

На рис. 3 представлены опытные данные в безразмерной форме в виде зависимости $(\nu h_{np}^2/a^2) = f(\nu\tau_k)$. Исследовались контактные пары из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с контактными поверхностями, обработанными плоским шлифованием до чистоты с $R_z \approx 0,8 \text{ мкм}$. На поверхность «горячего» стержня было нанесено гальваническим способом кадмиевое покрытие толщиной $\delta = 60 \text{ мкм}$. Высокая чистота обработки и наличие на одной из поверхностей кадмиевого покрытия позволяют считать, что $R_k \rightarrow 0$.

Правомерность выбора в качестве межконтактного заполнителя кадмиевого покрытия, снижающего до минимального значения контактное термосопротивление, обосновывается результатами специально поставленных опытов. Как видно из таблицы, максимальное снижение термосопротивления достигается для соединения с контактной парой, имеющей кадмиевое покрытие.

Экспериментальные значения контактного термосопротивления для образцов из стали 12Х18Н10Т с гальваническим покрытием или прокладками

№ серии опытов	Материал покрытия или прокладки	Толщина δ , мм	Температура в зоне контакта T_k , К	Удельный тепловой поток $q \cdot 10^3$, Вт/м ²	Усилия прижима P , МПа	Контактное термосопротивление $R_k \cdot 10^4$, м ² К/Вт
1	Без заполнителя	—	382	60,3	0,12	1,45
2	Кадмиевое покрытие	0,06	378	65,4	0,11	0,32
3	Медное покрытие	0,08	380	72,8	0,12	0,61
4	Прокладка из кадмия	0,1	380	63,4	0,12	0,84
5	Прокладка из свинца	0,2	375	62,8	0,12	0,73

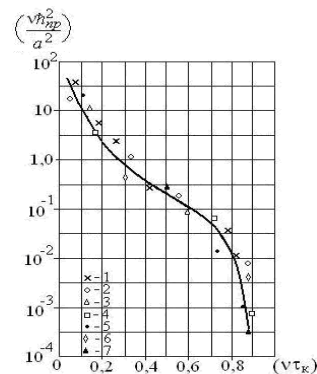


Рис. 3. Зависимость термосопротивления за счет периодического прерывания теплового потока от отношения длительности контакта к длительности периода при различной частоте контактов стержней для условия отсутствия контактного термосопротивления в зоне сопряжения стержней: 1 – 0,08 гц; 2 – 0,11 гц; 3 – 0,25 гц; 4 – 0,6 гц; 5 – 0,96 гц; 6 – 1,7 гц; 7 – 3,6 гц
Температура в зоне контакта $T_k = 418 \text{ К}$.

Из приведенного на рис. 3 графика видно, что зависимость $(\nu h_{np}^2/a^2) = f(\nu\tau_k)$ описывается единой кривой при различной частоте контактов стержней, которая приближенно может считаться как имеющая S-образный вид. Ввиду довольно сложного характера зависимости комплексов $\nu h_{np}^2/a^2$ и $\nu\tau_k$ её аналитическое описание может быть проведено по частям, т.е. с использованием нескольких уравнений.

Для области, когда $(\nu\tau_k)$ изменяется от 0,05 до 0,2.

$$\nu h_{np}^2/a^2 = 0,255 (\nu\tau_k)^{-1,728} \quad (2)$$

при $\nu\tau_k$ в пределах от 0,2 до 0,6

$$\nu h_{np}^2/a^2 = 0,012 (\nu\tau_k)^{-3,575} \quad (3)$$

и при $\nu\tau_k$ от 0,6 до 0,9

$$\nu h_{np}^2/a^2 = 1,024(\nu\tau_k)^{-1,534} - 1,873(\nu\tau_k) + 0,856 \quad (4)$$

Полученные уравнения (2) ... (4) могут быть использованы в расчетной практике для периодически контактирующих поверхностей при отсутствии или малом значении контактного термосопротивления.

Приведенные выше результаты исследований могут быть реализованы непосредственно на технических объектах. Так, тенденция развития современного двигателестроения связана с форсированием мощности поршневых двигателей. В свою очередь это приводит к росту теплонапряженности основных деталей камеры сгорания и в первую очередь выпускных клапанов. Ранее установлено [10], что долговечность и надежность выпускных клапанов существенно зависят от продольных и поперечных градиентов температуры. Здесь следует иметь в виду, что выпускные клапаны поршневых двигателей работают в специфических условиях, когда периодически контактирующие поверхности фаски клапана и седла создают на пути теплового потока термосопротивления, приводящие к

значительным температурным градиентам в теле клапанов [11]. Естественно возникает необходимость снижения концентрации термических напряжений клапанов. В целях снижения термонапряжений клапанов проводятся мероприятия конструкторского характера или применяются материаловедческие решения. Приведенные выше результаты исследований для систем с периодически контактирующими металлическими стержнями дают основания предложить технологический прием, позволяющий снизить теплонапряженность, а, следовательно и концентрацию термонапряжений выпускных клапанов дизельных двигателей.

В основу предлагаемого технологического приема заложено нанесение гальваническим способом медного покрытия на кромку фаски выпускного клапана. В качестве объекта исследования был использован выпускной клапан быстроходного дизеля марки 6Ч12/12 (КАЗ - 4550), изготовленный из стали 55Х20Г9АНЧ, имеющий коэффициент теплопроводности порядка $\lambda = 29 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$. На кромку фаски клапана наносилось высокотеплопроводное медное покрытие толщиной 50 мкм.

На рис. 4 приведены температурные поля клапанов, изготовленных по стандартной технологии и с покрытой медью фаской. Испытания проводились на описанной выше установке (рис. 1) с модифицированной рабочей ячейкой, имитирующей выпускной клапан и седло.

Из приведенного рисунка видно, что во втором случае имеет место заметное снижение градиентов температуры вдоль образующей фаски клапанов. В этом случае ограничивается зона разрушения фаски в результате меньшей концентрации термических напряжений. Предлагаемый технологический прием снижения термических напряжений выпускных клапанов дизельных двигателей может найти применение на автопредприятиях.

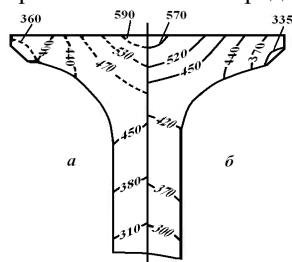


Рис. 4. Температурные поля выпускных клапанов дизелей марки 6Ч 12/12: а – стандартная технология изготовления; б – предлагаемая технология изготовления

Воронежская государственная лесотехническая академия

CONTACT THERMAL RESISTANCE BETWEEN PERIODICALLY CONTACTING SURFACES

V.M. Popov, A.A. Karpov, I.Yu. Kondratenko

Dependence of the total thermal resistance to heat flow through periodically contacting metal surfaces in the absence of the contact thermal resistance on the frequency and the time of contact is defined empirically

Key words: thermal resistance, thermal conductivity, contact pair, periodically contacting surfaces

Литература

1. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1977. 328 с.
2. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М.: Энергия, 1971. 216 с.
3. Меснянкин С.Ю., Викулов В.Г., Викулов Д.Г. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел // Успехи физических наук. 2009. Т.179. №9. С.945-970.
4. Howard Y.R., Satton A.E., An analogue Study of Heat Transfer Through Periodically Contacting Surface // Ynter. Journal of Heat Mass Transfer. 1970. Vol.13.
5. Говард И.Р., Саттон А.Е. Влияние теплового контактного сопротивления на перенос тепла между периодически контактирующими поверхностями // Теплопередача. 1973. №3. С.128-129.
6. Howard Y.R. An experimental Study of Heat Transfer Through Periodically Contacting Surface // Ynter. Journal of Heat Mass Transfer. 1976. Vol.19. Pp.367-372.
7. Чернышов А.Д., Попов В.М., Карпов А.А. Контактная теплопроводность через периодически соприкасающиеся металлические поверхности // Инженерно-физический журнал. 2008. Т.81. №5. С.977-988.
8. Теплопроводность между периодически контактирующими поверхностями [Текст] / В.М. Попов, А.А. Карпов, А.Е. Крючков, А.В. Иванов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2007. -Т.3. - №6. - С.101-105.
9. Попов В.М., Новиков А.П., Карпов А.А. Теплообмен через зону контакта периодически соприкасающихся металлических поверхностей при отсутствии контактного термосопротивления // Лесотехнический журнал. 2012. №3. С.24-30.
10. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 592 с.
11. Костин А.К., Ларионов В.А., Михайлов Л.И. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания. Л.: Машиностроение, 1979. 326 с.
12. Jacobs R.B., Starr C/ Thermal conductance of metallic contacts. The Review of Scientific Instruments. 1939. Vol 10. №5. Pp.140-141.