

УДК 536.241: 536.248.2

Руденко А.И., Нищик А.П.*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»*

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБАХ СО СПИРАЛЬНО-НАКАТНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

Проведено експериментальне дослідження контактної термічної опору в біметалевих трубах зі спіраль-но-накатним оребренням, що створені в Україні. Порівняння результатів експериментів на зразках біметалевих оребрених труб вітчизняного виробництва з даними, що відповідають типовим закордонним аналогам, показали їх високу конкурентноздатність та перспективність застосування при виробництві теплообмінного устаткування.

Проведено експериментальне дослідження контактної термічної опору в біметаллических трубах со спіраль-но-накатным оребрением, созданных в Украине. Сравнение результатов экспериментов на образцах біметаллических оребренных труб отечественного производства с данными, соответствующими типичным зарубежным аналогам, показали их высокую конкурентную способность и перспективность применения при производстве теплообменного оборудования.

The results of experimental investigations into the contact thermal resistance at bimetal pipes with spiral rolling finning produced in Ukraine are demonstrated. The comparison of the experimental results, which were received at the samples of nationally produced finned bimetal pipes, with the data that correspond to typical foreign analogues demonstrated the high competitiveness of the samples as well as the prospectively of their application in manufacturing of heat-transfer equipment.

D – наружный диаметр оребрения;
 d_1 – внутренний диаметр оребрения;
 d_2 – наружный диаметр несущей трубы;
 h_p – высота ребра;

s – шаг оребрения;
 δ_p – толщина ребра;
 φ – коэффициент оребрения.

Введение

Трубы со спирально-накатным оребрением из алюминиевых сплавов находят широкое применение в качестве эффективных теплопередающих элементов различного теплообменного оборудования и устройств, предназначенных для ресурсосберегающих технологий во многих отраслях промышленности [1, 2].

Возможность создания развитой поверхности ($\varphi \leq 20$) и интенсификации теплообмена в межреберном пространстве, а также высокий коэффициент теплопроводности материала оребрения способствуют значительному улучшению теплотехнических характеристик теплообменных аппаратов, в которых используются такие трубы, по сравнению с известными аналогами (например, трубы с приваренными ребрами в виде шипов, петельно-проволочным оребрением и пр.) [3, 4].

Кроме этого, использование обладающих удовлетворительными физико-механическими и технологическими свойствами конструкционных сталей и латуней в качестве материалов для несущих труб позволяет создавать теплообменные поверхности и системы самых различных конструкций, одновременно обеспечивая их необходимую каркасную прочность и долговечность.

В случае, когда элементы біметаллических труб – несущая труба и оребрение выполнены из различных материалов, при прохождении теплового потока через зону их соприкосновения всегда имеет место перепад температуры между контактирующими поверхностями этих элементов. Такое явление обусловлено наличием зазора, возникающего между внутренней (несущая) и внешней (заготовка под оребрение) трубами при изготовлении біметаллических труб, из-за шероховатости, волнистости или иных

неровностей, всегда имеющих на соприкасающихся поверхностях этих труб. Причём, с изменением рабочей температуры величина первоначального зазора может существенно изменяться вследствие различия коэффициентов термического расширения материалов несущей трубы и оребрения.

Теплообмен в этом случае осуществляется через дискретно расположенные пятна контактов, образующиеся при деформации (или сдвиге) выступов остаточной шероховатости, макронеровностей или волнистости контактирующих поверхностей, в результате воздействия приложенной нагрузки при накатывании рёбер, а также через среду, находящуюся в зазоре между поверхностями. Учитывая, что коэффициент теплопроводности этой среды всегда меньше коэффициента теплопроводности контактирующих металлов, а площадь пятен мала, в зоне контакта возникает термическое сопротивление [5], которое может существенно влиять на величину термического сопротивления как единичного элемента, так и всей теплообменной системы в целом.

Известные работы по исследованию термического сопротивления контакта в биметаллических трубах со спирально-накатным оребрением [1, 6–9] касались, в основном, продукции ТМЗ им. Лауристана (Эстония). В Украине, где ряд предприятий комплектует выпускаемое ими теплообменное оборудование биметаллическими трубами со спирально-накатным оребрением отечественного производства, подобные исследования к настоящему времени не проводились, что ограничивает информацию о теплотехнических характеристиках изделий.

Цель настоящей работы – разработка и создание экспериментальной установки для исследования термического сопротивления контакта в биметаллических трубах со спирально-накатным оребрением, проведение исследований на образцах труб, созданных в Украине, и сравнение полученных данных с известными результатами.

Экспериментальная установка и методика проведения исследований

Рабочий участок экспериментальной установки (рис.1, а), представлял собой обечайку цилиндри-

ческой формы 1, в центре которой размещался сосуд Дьюара 2 с исследуемыми образцами биметаллических труб 3.

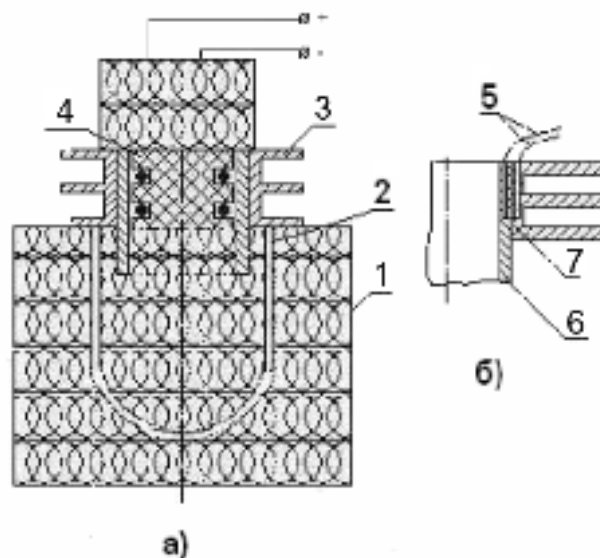


Рис. 1. Рабочий участок экспериментальной установки (а) и расположение термопар (б).

Каждый образец устанавливался внутри сосуда Дьюара таким образом, что его нижняя часть (несущая труба без рёбер) находилась в самом сосуде, а верхняя часть (несущая труба с оребрением) – снаружи. Подвод теплоты к оребрѐнной части образцов труб осуществлялся при помощи омического нагревателя 4, имеющего длину, равную длине оребрѐнной части образцов и который размещался внутри несущей трубы. Такая конструкция экспериментальной установки позволила отводить теплоту практически только через верхнюю (оребрѐнную) часть образцов, т.е. через зону контакта.

Подведенная мощность измерялась ваттметром, подключѐнным к источнику регулируемого напряжения постоянного тока. Температура измерялась хромель-алюмелевыми термопарами 5, установленными в двух диаметрально расположенных парах отверстий: в несущей трубе 6 и в основании оребрения 7 (рис.1, б). С целью улучшения контакта термопар со стенкой и уменьшения погрешности измерений температуры отверстия перед установкой термопар заполнялись теплопроводной пастой КПТ-8. Все термопары с помощью многоточечного переключателя поочерѐдно подключались к вторичному прибору.

Холодные спаи термодатчиков помещались в отдельный сосуд Дьюара с тающим льдом. Уменьшение тепловых потерь в окружающую среду от всех элементов установки достигалось за счёт применения ваты из базальтовых волокон БСТВ-1. Образцы вырезались из серийно выпускаемых труб различных партий и имели геометрические размеры, указанные в таблице.

Исследование контактного термического сопро-

тивления в биметаллических оребрённых трубах проводилось при установлении стационарного температурного режима для каждого значения подведённой мощности. Диапазоны температур и плотностей тепловых потоков в зоне контакта при проведении экспериментов составляли 30...255 °С и $(1,06...26,6) \cdot 10^3$ Вт/м² соответственно. Охлаждение образцов осуществлялось за счёт естественной конвекции воздуха.

Табл. Геометрические размеры образцов

№ п/п	Страна-изготовитель	D, мм	d ₁ , мм	d ₂ , мм	h _р , мм	s, мм	δ _р , мм	φ	Материал		Вид накатывания
									несущая труба	оробрение	
1	Украина	55	28	25	13,5	3	0,5	14,6	Ст. 10	АД 0	однозах.
2	Украина	55	28	25	13,5	3	0,5	14,6	Ст. 10	АД 0	однозах.
3	Эстония	49	28	25	10,5	3	0,5	10,8	Ст. 10	АД -1	двухзах.
4	Эстония	49	28	25	10,5	3	0,5	10,8	Ст. 10	АД-1	двухзах.

Средние температура контакта \bar{t}_k и его термическое сопротивление \bar{R}_k определялись как

$$\bar{t}_k = \frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 t_i, \quad (1)$$

$$\bar{R}_k = \frac{\Delta \bar{t}_k}{q_k} = \frac{\sum_{j=1}^2 \Delta t_{kj}}{2q_k}, \quad (2)$$

где t_i - температура в i -той точке измерения; Δt_{kj} - перепад температур между несущей трубой и оребрением в j -том сечении; $\Delta \bar{t}_k$ - средний перепад температуры в зоне контакта; q_k - плотность теплового потока.

Величина плотности теплового потока q_k рассчитывалась по подведённой к нагревателю мощности и номинальной площади контакта наружной поверхности несущей трубы.

Обсуждение результатов исследований

На рис.2 представлены результаты настоящего исследования.

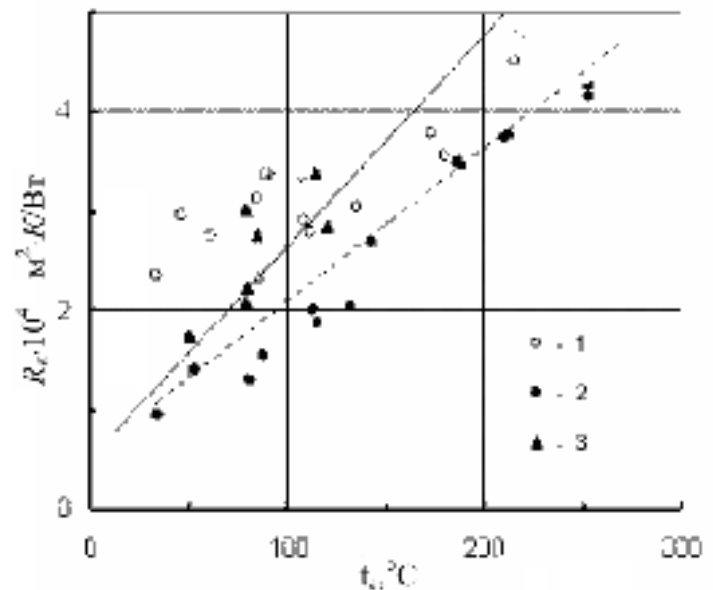


Рис. 2. Зависимость контактного термического сопротивления от средней температуры контакта. Обозначения: 1, 2 – данные настоящего исследования (образцы № 1, 3 соответственно); 3 – экспериментальные данные [7]. Кривые: — — расчёт по методике [8]; - - - - расчёт по методике [9].

Очевидно, что величины термического сопротивления контакта для образцов биметаллических оребренных труб различных изготовителей имеют один порядок и общую тенденцию к возрастанию с увеличением температуры в зоне контакта. Это объясняется тем, что с ростом температуры зазор между двумя соприкасающимися поверхностями постепенно увеличивается, а контактное давление, созданное первоначальным нагружением, характерным для данного технологического процесса изготовления биметаллических оребренных труб, уменьшается вследствие различия коэффициентов линейного расширения материалов несущей трубы и оребрения. Количество пятен контакта и, соответственно, площадь поверхности теплообмена при этом уменьшается, что и приводит к росту термического сопротивления в контактной зоне.

Анализ полученных результатов показывает, что, в целом, наблюдается удовлетворительное соответствие результатов представленной работы с данными других авторов. Некоторое отличие можно объяснить как погрешностью измерений и методикой подготовки образцов к проведению экспериментов, так и возможными отклонениями в технологическом процессе изготовления биметаллических оребренных труб (наличие загрязнений, окисных плёнок, износ оборудования и пр.).

Проведенные авторами исследования, а также результаты работ [7–9], полученные при обдуве экспериментальных образцов потоком воздуха в аэродинамической трубе показали, что термическое сопротивление контакта в биметаллических оребренных трубах не зависит от условий охлаждения и плотности теплового потока, а является функцией температуры в зоне контакта.

Попытки обобщения опытных данных по термическому сопротивлению контакта для биметаллических оребренных труб пока не привели к физически обоснованной зависимости, несмотря на многочисленные исследования по контактному теплообмену [5, 10, 11]. Это связано с тем, что теплопередача в таких устройствах происходит через зону контакта, которая формируется под воздействием накатывания по спирали и по сравнению с «плоским контактом» имеет существенные отличия и зависит от ряда факторов. К их числу относятся определяемые в большинстве случаев эксперимен-

тально физико-механические параметры контактирующих поверхностей (остаточная шероховатость, волнистость, фактическая площадь контакта и т.д.), а также параметры и особенности технологии изготовления (контактное давление, методика подготовки поверхности несущей трубы и пр.). Поэтому для понимания и объяснения всех закономерностей теплообмена, имеющих место при передаче теплоты через контактирующие поверхности, а также оценки вклада каждого фактора в этот процесс, необходимо дальнейшее накопление опытных данных и проведение экспериментальных исследований.

Выводы

Созданная экспериментальная установка, изложенные методики проведения экспериментов и обработки результатов измерений позволили получить данные о термическом сопротивлении контакта для биметаллических оребренных труб различных изготовителей. Имеет место удовлетворительное соответствие между результатами настоящего исследования и данными других работ, полученными при иных условиях проведения опытов. Показано, что биметаллические оребренные трубы, изготовленные в Украине, по своим теплотехническим характеристикам не уступают зарубежным аналогам, что говорит об их высокой конкурентной способности и позволяет рекомендовать к широкому применению при производстве теплообменного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М.* Тепловой и аэродинамический расчёты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. – С.-Пб.: Энергоатомиздат, Санкт – Петербург. отд-ние, 1992. – 280 с.
2. *Зарипов В.К., Гершуни А.Н.* Высокоэффективный компактный теплообменник – утилизатор на тепловых трубах. – Промышленная энергетика. – 1989. – №1. С. 37 – 39.
3. Справочник по теплообменникам. Т.1. / Пер. с англ., под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.
4. *Домнич В.И., Зиньковский Ю.Ф.* Конструирование РЭА. Оценка и обеспечение тепловых режимов. – Киев: УМК ВО, 1990. – 240 с.

5. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъёмных и неразъёмных соединений. – М.: Энергия, 1971. – 216 с.
6. Кунтыш В.Б., Пиир А.Э., Федотова Л.М. Исследование контактного термического сопротивления биметаллических оребренных труб АВО // Изв. вузов СССР. Лесной журнал. – 1980. – № 5. – С. 121 – 126.
7. Семена М.Г., Гершуни А.Н., Руденко А.И. Характеристики двухфазных термосифонов как элементов теплообменников // Промышленная энергетика. – 1988 – № 4. – С. 41 – 44.
8. Бакластов А.М., Зайцев В.Г., Кунтыш В.Б. К вопросу о контактном теплообмене в аппаратах воздушного охлаждения // Изв. вузов СССР. Энергетика. – 1982. – № 11. С. 114 – 116.
9. Бакластов А.М., Зайцев В.Г. Влияние температуры в контактной зоне биметаллической ребристой трубы на контактное термическое сопротивление // Промышленная энергетика.- 1982.- № 9.- С. 33 – 35.
10. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. – М.: Энергия, 1977. – 328 с.
11. Миллер В.С. Контактный теплообмен в элементах высокотемпературных машин. – Киев: Наукова думка, 1966. – 163 с.

Получено 25.06.2009 г.