

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ МАТЕРИАЛА МР

© 2006 А.М. Жижкин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Обоснован выбор способа экспериментального определения эффективной теплопроводности пористых образцов из материала МР. Приведены основные данные и принципиальная схема установки для исследования теплопередающих свойств изделий из МР и результаты определения теплопроводности

С помощью теоретических методов можно сравнительно быстро получить значение эффективной теплопроводности пористых материалов (в дальнейшем просто теплопроводности) для приближенных (оценочных и проектных) тепловых расчетов.

Однако структура пористых материалов весьма сложная. Создаваемые модели зачастую не отражают всех особенностей внутреннего строения. Поэтому при определении теплофизических свойств в настоящее время широко используются и экспериментальные методы, которые еще являются и критерием правильности теоретических методов расчетов.

Для экспериментального определения теплофизических коэффициентов используются стационарные и нестационарные методы исследования.

Большинство экспериментальных методов основано на наблюдении за температурным полем в теле при нагревании (охлаждении) [1].

Применительно к стационарным условиям используются закон Фурье

$$Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} F \quad (1)$$

и дифференциальное уравнение теплопроводности для одномерного температурного поля

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{k_k - 1}{r} \cdot \frac{dT}{dr} = 0 \quad (2)$$

справедливое для тел, физические свойства которых не зависят от температуры; r – текущая координата; $k_k = 1, 2, 3$ – соответственно для пластины, цилиндра и шара; n – нормаль к изотермической поверхности.

Решения дифференциальных уравнений (1) и (2) для тел простой геометрической формы при граничных условиях первого рода

позволяют найти коэффициент теплопроводности λ из соотношения

$$\lambda = \frac{Q}{T_{C1} - T_{C2}} K, \quad (3)$$

где K – коэффициент формы, который выражается зависимостями соответственно для неограниченных плоского, цилиндрического, а также шарового слоев исследуемого тел:

$$K = \frac{\delta}{F_p}; \quad K = \frac{1}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1};$$

$$K = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right),$$

где $\delta = r_2 - r_1$ – толщина плоского слоя;

F_p – расчетная поверхность, нормальная к направлению теплового потока;

l – длина цилиндрического слоя;

d_1 и d_2 – соответственно внутренний и наружный диаметры цилиндрического и шарового слоев исследуемого вещества;

T_{C1}, T_{C2} – температуры на изотермических поверхностях, соответствующих этим диаметрам [1].

Стационарные методы позволяют найти из опыта значения коэффициентов теплопроводности для отдельных фиксированных значений температуры. Полная температурная зависимость строится по данным этих фиксированных значений. Поэтому стационарные методы удобны, когда температурные интервалы исследования невелики, хотя теория на область применяемых температур ограничений не накладывает.

Однако стационарные методы связаны со значительными затратами времени на подготовку необходимого теплового режима и на проведение самого опыта, необходимо применение значительного количества термпар для надежного осреднения температуры поверхности опытных образцов.

Несмотря на указанные недостатки, стационарные методы получили весьма широкое распространение, так как они позволяют использовать достаточно простые и надежные расчетные уравнения. Они обеспечивают достоверность полученных результатов и широко применялись в прошлом и в настоящее время считаются классическими [1].

Экспериментальное исследование теплопроводности образцов из материала МР проводилось с использованием метода неограниченного плоского слоя.

Исследуемый образец имел форму тонкой круглой пластины или втулки. Для создания температурного перепада по толщине пластины одна поверхность ее нагревалась, а другая – охлаждалась. С целью получения одномерного теплового потока при выборе толщины плоского образца для тел с плохой проводимостью теплоты ($\lambda < 2,3$ Вт/м·К) желательно выполнить условие:

$$\delta \leq \left(\frac{1}{7} - \frac{1}{10} \right) D,$$

где D – диаметр круглой пластины [1].

Толщины пластин имели значения в пределах 2...30 мм. При этом принимались меры к защите боковой поверхности опытного образца и нагревателя от потерь теплоты в окружающую среду. Температура горячей поверхности задавалась равной 40...80°C, а холодной – 15...25°C.

Существенным условием правильности определения коэффициента теплопроводности является отсутствие воздушных зазоров между поверхностью образца и плоскими поверхностями нагревателя и холодильника. Ошибка за счет этого контактного сопротивления может достигать 15...30% и более при толщине пластины 0,5...1,5 мм и 10...25% при толщине 1,5...3 мм.

Для экспериментального определения коэффициента теплопроводности пористых конструкций спроектирована установка, конструктивная схема которой представлена на рис. 1. Для проведения экспериментов могут быть использованы образцы цилиндрической формы.

Установка состоит из холодильника 1, герметично закрытого крышкой 2. На крышке 2 центрируется с помощью кольца 3 и за-

крывается стаканом 4 образец 5 из материала МР. Винтом 14 медный сердечник 7 крепится к втулке 8, а плоской своей поверхностью прижимается к теплоподводящей поверхности образца 5. Сердечник 7 и втулка 8 заключены в защитный стакан 9 из стали 12Х18Н10Т. На стакан 9 устанавливается сверху упор 10 для сжатия образца 5. Крышка 2 крепится к холодильнику 1 болтами 11 (4 шт.) через уплотнительную прокладку 12. Между сердечником 7 и втулкой 8 установлены основной и защитный нагреватели 15 и 13, между которыми помещена кольцевая пластина 16 из стали 12Х18Н10Т. Средняя часть втулки 8 покрыта теплоизоляционным покрытием 17. Зазор между 7 и 9 перекрывается кольцом 6. Холодильник 1 устанавливается на динамометр системы Токаря. Установка снабжается системой измерения длины образца при проведении эксперимента (на схеме условно не показана).

Образец 5 из материала МР нагреваемой поверхностью прижимается к плоской поверхности сердечника 7. Охлаждаемая поверхность образца 5 прижимается к крышке 2 холодильника 1. Стакан 4 центрирует холодильник 1 и образец 5 относительно деталей 7-10 и является теплоизолирующим элементом боковой поверхности исследуемого образца.

Определение теплового потока через образец 5 производилось путем измерения подводимой к основному нагревателю 15 электрической мощности. Для этого возможно использование амперметра и вольтметра в цепи основного нагревателя. Для измерения температуры нагреваемой поверхности образца 5 на сопрягаемой поверхности 7 зачеканивались по радиусу три термомпары из хромель-копелевой проволоки диаметром 0,2 мм. Для измерения температуры охлаждаемой поверхности образца 5 на сопрягаемой поверхности крышки 2 установлены по радиусу три термомпары.

Для предотвращения утечек тепла от основного нагревателя в атмосферу устанавливается охранный нагреватель 13. Для регулировки его работы между нагревателями 13 и 15 устанавливается кольцо 16, на поверхностях которого закреплена дифференциальная термомпара.

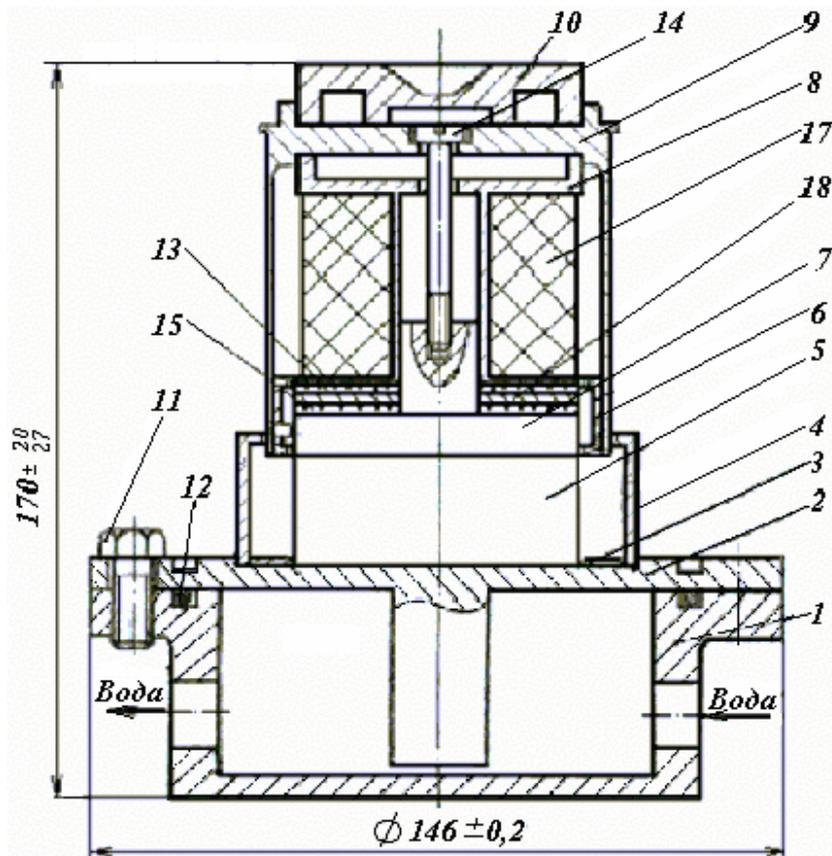


Рис. 1. Схема установки для определения коэффициента эффективной теплопроводности материала МР

Температура образца 5 зависит от подводимой тепловой мощности, которая определялась величиной напряжения, подаваемого на нагревательный элемент 15 и тока, которые подбирались экспериментально. Температура при проведении исследований изменялась от 300 до 470 К. Падение напряжения на основном нагревателе 15 измерялось вольтметром типа М1108, а тока – амперметром типа М1104. ЭДС термопар измерялись потенциометром ПП-63 (класс точности 0,05) или мостом типа ЭПП-09.

Методика проведения эксперимента состоит в следующем. На нагревательный элемент 15 подается напряжение и устанавливается соответствующий ток. Дается выдержка по времени, в течение которой устанавливается стационарный тепловой режим. Контроль за выходом на стационарный режим осуществляется по показаниям термопар на поверхностях подвода-отвода тепла сердечника 7 и крышки 2 холодильника 1.

По достижению стационарного режима фиксируется показание термопар, установленных на оси сердечника 7 и крышки 2 холодильника 1, величина тока и падение напряжения на основном нагревателе 15. Во

время проведения эксперимента охранном нагревателем задается и поддерживается с определенной точностью режим работы, при котором разность температур между поверхностями кольца 16 равна 0.

По измеренным данным вычисляется тепловая мощность, подводимая к образцу 5 и эффективный коэффициент теплопроводности по зависимости (3).

Перед проведением эксперимента по вышеприведенной методике и системе измерительных приборов производился предварительный анализ погрешностей опыта.

Количественной оценкой точности результата измерения является абсолютная и относительная погрешности измерений. Максимальная относительная погрешность измерений коэффициента теплопроводности определяется выражением

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta\delta}{\delta} + \frac{\Delta T_{C1} + \Delta T_{C2}}{T_{C1} - T_{C2}} + \frac{\Delta F_p}{F_p}, \quad (4)$$

где Δ – абсолютные ошибки измерений отдельных величин с помощью использованных приборов [1, 2].

Максимальная относительная погрешность определения теплопроводности образцов из материала МР в зависимости от измеряемых величин составляла $\pm 8...20\%$. На рис. 2 приведена графическая интерпретация результатов экспериментальных исследований теплопередающих свойств цилиндрических образцов из материала МР.

Результаты исследований обобщены в виде зависимости коэффициента эффективной теплопроводности от пористости цилиндрических образцов из материала МР.

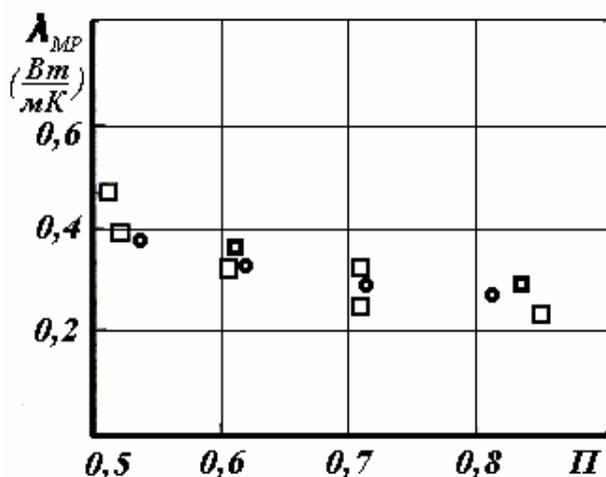


Рис. 2. Коэффициент эффективной теплопроводности МР из проволоки:
 \square - ЭИ-708А, $d = 0,09$ мм;
 \circ - X18Ni0T, $d = 0,2$ мм;

Диаметр проволок, использованных для изготовления образцов, изменялся в диапазоне 0,09...0,2 мм. При этом не было выявлено существенного влияния диаметра проволоки

на теплопроводность образцов из материала МР.

Следует отметить, что изменение теплопроводности образцов из материала МР в диапазоне изменения пористости 0,50...0,85 невелико, не превышает двух раз, тогда как теплопроводность материала проволоки составляет 14,6 Вт/мК (в 50 раз больше).

Сжатие образцов в направлении передачи тепла давлением от 8 до 100 КПа не вызывает значительного увеличения теплопроводности образцов из МР. Оно составляет не более 10...15%.

Результаты проведенных исследований послужило экспериментальным обоснованием вывода в работе [3] об определяющем влиянии на теплопередачу в материале МР взаимных контактов витков отрезков проволоочной спирали.

Список литературы

1. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.
2. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов экспериментов. – М.: Наука, 1971. - 192 с.
3. Жижкин А.М., Белоусов А.И. Анализ физической картины процесса теплопередачи в материале МР //Математическое моделирование информационных процессов и систем в науке, технике и обществе: Межвуз. сб. научн. трудов. Самара. 2004. С. 43 – 52.

EXPERT RESEARCH OF EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY OF SAMPLES MADE FROM MATERIAL MR

© 2006 A.M. Zhizhkin

Samara State Aerospace University

The choice of the method for determining effective thermal conductivity of porous samples made from material MR is substantiated. Listed are basic data and principal installment diagram for research of heat-conducting properties of goods made from MR results of thermal conductivity determination.