DOI: 10.17117/nv.2014.01.106

Поступило в редакцию: 24.11.2014

<http://ucom.ru/doc/nv.2014.01.106.pdf>

admin@zgia.zp.ua

Чейлытко А.А., Носов М.А.
Определение коэффициента теплопроводности
пористых металлических изделий

Cheylytko A.A., Nosov M.A.
Determination of the coefficient of thermal
conductivity in porous metal produce

В статье представлен способ получения коэффициента теплопроводности пористых металлических изделий по закону Видемана-Франца. Предложены варианты измерения температуры образца и его электропроводности. Рассмотрены положительные и отрицательные стороны каждого из вариантов и метода в целом
Ключевые слова: коэффициент теплопроводности, электрическая проводимость, термopара, температура, удельное электрическое сопротивление

Чейлытко Андрей Александрович
Кандидат технических наук, доцент
Запорожская государственная инженерная академия
г. Запорожье, Проспект Ленина, 226

Носов Максим Андреевич
Магистр
Запорожская государственная инженерная академия
г. Запорожье, Проспект Ленина, 226

In this work you can find determination of the coefficient of thermal conductivity in porous metal produce by the Wiedemann-Franz law. The variants of measuring the temperature and electrical conductivity were offered. Positive and negative sides of each variant and method on the whole were considered

Key words: coefficient of thermal conductivity, electrical conductivity, thermocouple, temperature, specific electrical resistance

Cheylytko Andrey Aleksandrovich
Candidate of Science, associate Professor
Zaporozhye State Engineering Academy
Zaporozhye, Lenin Ave., 226

Nosov Maxim Andreevich
Undergraduate
Zaporozhye State Engineering Academy
Zaporozhye, Lenin Ave., 226

Введение

Пористые металлические изделия, во всем своем разнообразии, это теплоизоляторы, которые используются зачастую в строительстве вместо пористых неметаллических изделий. Пористые металлические изделия, содержащие поры в виде газовых раковин и каналов всевозможных форм, можно изготовить из различных металлических материалов (стали, меди, чугуна, алюминиевых сплавов и т.д.). Форма, расположение пор, размеры, и масса изделий могут быть различны, в зависимости от требований потребителя. Такие изделия могут быть использованы для защиты зданий и сооружений от холода, из

них можно делать стены промышленных объектов, детали энергетических устройств.

Постановка задачи

Существуют большие перспективы для внедрения пористых металлических изделий. Однако для практического применения необходимо, чтобы изделия отвечали ряду параметров, например: износостойкость, малый удельный вес, прочность, долговечность, теплоизоляционные свойства и т.д. В данной работе рассматривается один из доступных и простых по своему применению способов исследования теплоизоляционных свойств пористых металлических изделий.

Анализ основных исследований

В 1897 г. Томсон открыл электрон. Это открытие оказало громадное и непосредственное воздействие на теорию материи и позволило также объяснить проводимость металлов. Через три года после открытия Томсона Друде разработал свою теорию электропроводности и теплопроводности. Он рассматривал электроны в металле как электронный газ и применил к нему кинетическую теорию газов. В кинетической теории, считается, что молекулы газа представляют собой одинаковые твердые сферы, которые движутся по прямым линиям до тех пор, пока не столкнутся друг с другом. Предполагается, что продолжительность отдельного столкновения пренебрежительно мала и что между молекулами не действует никаких иных сил, кроме возникающих в момент столкновения [1, с. 18].

Основные предложения теории Друде:

В интервале между столкновениями не учитывается взаимодействие электрона с другими электронами и ионами. Другими словами, предполагается, что в отсутствии внешних электромагнитных полей каждый электрон движется с постоянной скоростью по прямой линии. Далее, считают, что в присутствии внешних полей электрон движется в соответствии с законом Ньютона, при этом учитывают влияние только этих полей, пренебрегая сложными дополнительными полями, порождаемыми другими электронами и ионами. Приближение, в котором пренебрегают электрон-электронным взаимодействием в промежутках между столкновениями, известно под названием приближения независимых электронов. Соответственно приближение, в котором пренебрегают электрон-ионным взаимодействием, называется приближением свободных электронов.

В модели Друде, как и в кинетической теории, столкновения – это мгновенные события, внезапно меняющие скорость электрона. Друде связывал их с тем, что электроны отскакивают от непроницаемых сердцевин ионов (а не считал их электрон-электронными столкновениями по аналогии с доминирующим механизмом столкновений в обычном газе).

Предполагается, что за единицу времени электрон испытывает столкновение (то есть внезапное изменение скорости) с вероятностью, равной $1/\tau$. Имеется в виду, что для электрона вероятность испытать столкновение в те-

чение бесконечно малого промежутка времени dt равна просто dt/τ . Время τ называют временем релаксации, или временем свободного пробега; оно играет фундаментальную роль в теории проводимости металлов. Из этого предположения следует, что электрон, выбранный наугад в настоящий момент времени, будет двигаться в среднем в течение времени τ до его следующего столкновения и уже двигался в среднем в течение времени τ с момента предыдущего столкновения. В простейших приложениях модели Друде считают, что время релаксации τ не зависит от пространственного положения электрона и его скорости.

Предполагается, что электроны приходят в состояние теплового равновесия со своим окружением исключительно благодаря столкновениям. Считается, что столкновения поддерживают локальное термодинамическое равновесие чрезвычайно простым способом: скорость электрона сразу же после столкновения не связана с его скоростью до столкновения, а направлена случайным образом, причем ее величина соответствует той температуре, которая превалирует в области, где происходило столкновение. Поэтому чем более горячей является область, где происходит столкновение, тем большей скоростью обладает электрон после столкновения [1, с. 21].

В рамках модели Друде предполагается, что основная часть теплового потока в металле переносится электронами проводимости. Это предположение основано на эмпирическом наблюдении, что металлы проводят тепло гораздо лучше, чем диэлектрики. Поэтому теплопроводность, обусловленная ионами (хотя ионы в металле и не могут перемещаться по нему, они могут переносить тепловую энергию, ионы могут колебаться относительно среднего положения, что приводит к передаче тепловой энергии в форме упругих волн распространяющихся по ионной решетке), гораздо менее важна по сравнению с теплопроводностью, обусловленной электронами.

После многочисленных испытаний Друде вывел уравнение зависимости теплопроводности от электропроводности

$$\frac{\lambda}{\sigma} = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{k_B}{e} \right)^2 \cdot T$$

где λ – коэффициент теплопроводности;

σ – коэффициент электропроводности (удельная электрическая проводимость);

k_B – постоянная Больцмана.

Зоммерфельд заново рассмотрел модель Друде заменив всюду классическое распределение по скоростям Максвелла – Больцмана распределением Ферми – Дирака. Использование квантового распределения по скоростям в классической во всех других отношениях теории требует определенного обоснования. Классическое описание движения электрона возможно в том случае, когда его координата и импульс могут быть измерены с необходимой точностью без нарушения принципа неопределенности [1, с. 66]. После чего уравнение зависимости теплопроводности от электропроводности обрело свой окончательный вид

$$\frac{\lambda}{\sigma} = \frac{\pi^2}{3} \cdot \left(\frac{k_B}{e}\right)^2 \cdot T,$$

где $\frac{\pi^2}{3} \cdot \left(\frac{k_B}{e}\right)^2 = L$ – число Лоренца.

Исходя из выше написанной формулы можно рассчитать число Лоренца [2]. Которое будет равно

$$L \approx 2,47 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\text{Вт} \cdot \text{Ом}}{\text{К}^2}$$

Вернувшись к окончательно измененному уравнению Видемана-Франца можно увидеть, что для определения коэффициента теплопроводности неизвестны всего две переменные: температура образца (при которой будет осуществляться измерение электропроводности) и, конечно же, удельная электрическая проводимость образца.

Основная часть

Для измерения температуры предлагается использовать термопару, т.е. применить термоэлектрический метод измерения температуры. Данный метод основан на зависимости термоэлектродвижущей силы (термоЭДС), развиваемой термопарой от температуры ее рабочего конца. ТермоЭДС возникает в цепи, составленной из двух разнородных проводников (электродов), если значения температуры мест соединения t и t_0 не равны (при равенстве температур термоЭДС равна нулю). Возникающая в цепи термопары ЭДС является результатом действия эффектов Зеебека и Томпсона. Первый связан с появлением ЭДС в месте спая двух разнородных проводников, причем величина ЭДС зависит от температуры спая. Эффект Томпсона связан с возникновением ЭДС в однородном проводнике при наличии разности температур на его концах. Существуют термопары из благородных и неблагородных металлов. Термопары из неблагородных металлов очень широко используются во всех отраслях промышленности. Они дешевы и просты в обращении, устойчивы к вибрациям. Однако недостатком является образование термоэлектрической неоднородности в зоне максимального градиента температур, что может привести к ошибке в градуировке более 5 °C [3]. Термопары с термоэлектродами из благородных металлов: платинородий-платиновые ПП (тип S (Pt-10%Rh / Pt) (тип R (Pt-13%Rh / Pt), платинородий-платинородиевые ПР (тип В (Pt-30%Rh / Pt-6%Rh)). Преимуществом является значительно меньшая термоэлектрическая неоднородность, чем у термопар из неблагородных металлов, устойчивость к окислению, вследствие чего высокая стабильность. Преимуществом термопары типа ПР также является практически нулевой выходной сигнал при температурах вплоть до 50 °C, таким образом устраняется необходимость термостатирования холодных спаев [3]. Недостатком является высокая стоимость и малая чувствительность (около 10 мкВ/К при 1000 °C).

Взвесив преимущества и недостатки двух видов термопар, можно однозначно сказать, что лучше всего использовать термопары с термоэлектродами из благородных металлов. Ведь это может существенно повлиять на уменьшение погрешности измерения.

Для определения электропроводности пористого металлического образца необходимо воспользоваться экспериментальным методом, т.к. определение удельного электрического сопротивления расчетным путем не представляется возможным в пористых образцах.

Первый из предложенных методов заключается в определении удельной электрической проводимости по формуле

$$\sigma = \frac{1}{\rho_v}, \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

где ρ_v – удельное электрическое сопротивление $\text{Ом} \cdot \text{м}$.

Удельное электрическое сопротивление образца будет рассчитано по формуле

$$\rho_v = R \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot l}, \text{Ом} \cdot \text{м}$$

где R – экспериментальное сопротивление образца Ом .

Экспериментальное сопротивление образца будет

$$R = \frac{U}{I}, \text{Ом}$$

где U – разность электрических потенциалов (напряжение) на концах проводника, В;

I – сила тока, протекающего между концами проводника под действием разности потенциалов, А.

Для проведения эксперимента понадобятся: источник постоянного тока, миллиамперметр, милливольтметр, комплект соединительных проводов, измерительная линейка, образец. Первым шагом является сбор схемы в соответствии с рис. 1. Вторым шагом является снятие показателей с миллиамперметра и милливольтметра. Третьим и окончательным шагом будет расчет удельной электрической проводимости по полученным данным с использованием вышеуказанных формул [4].

Рис.1 Схема подключения образца

Недостатком данного метода является дополнительное падение напряжения на проводах, наличие источника постоянного тока (ведь если не будет постоянного тока, необходимо использовать выпрямители или диодный мост) и относительная громоздкость схемы.

Второй из предложенных методов заключается в использовании измерителя электропроводности металлов SIGMASCOPE SMP10. Предназначены для измерения электропроводности цветных металлов и сплавов при неразрушающем контроле. Основной областью применения являются заводские лаборатории металлургических, металлообрабатывающих, приборостроительных и машиностроительных предприятий. Измеряет электропроводность по методу вихревых токов в соответствии со стандартами DIN EN 2004-1 и ASTM E 1004. Возможно определение электропроводности металлов даже под слоем краски или синтетического покрытия толщиной до 500 мкм. При этом методе минимизировано влияние шероховатости поверхности на результаты измерений [5].

Отличительные характеристики SIGMASCOPE SMP10:

- память на 100 значений калибровки, 20 000 замеров в 4 000 блоках данных;
- определение температурного коэффициента в зависимости от материала;
- автоматическое измерение при установке датчика на образец;
- быстрое аналоговое отображение значений измерения;
- статистическая обработка серий измерений (с вычислением среднего и отображением гистограммы);
- два способа отображения: исследовательский и статистический;
- сохранение в памяти значения тока в привязке ко времени измерения;
- возможность ручного ввода температуры;
- отслеживание изменения температуры во времени;
- звуковое предупреждение об отклонении температуры от допустимых значений;
- базовая калибровка по 8 шаблонам и коррекционная калибровка по 4 шаблонам.

Для определения электропроводности нужна высокая точность измерений. Для калибровки инструмента требуются точные шаблоны, поскольку процесс измерения представляет собой сравнение по методу вихревых токов. К прибору прилагаются сертифицированные шаблоны для всего применяемого диапазона измерений электропроводности. Основным недостатком является цена прибора [5].

При расчете коэффициента теплопроводности по закону Видемана-Франца основным недостатком является то, что предполагается, мол, все столкновения упругие, то есть энергия сохраняется при столкновении. Однако если имеют место неупругие столкновения, то, конечно же, будут иметь место и процессы рассеяния, которые могут уменьшить поток тепла, при этом не уменьшая электрический ток (поток тепла определяется кроме энергии электрона также химическим потенциалом). В связи с этим следует ожидать нарушения закона Видемана-Франца.

Вывод

При проведении эксперимента был использован первый вариант измерения электропроводности. Была сооружена схема в соответствии с рис. 1. После чего были сделаны замеры всех необходимых величин и рассчитан удельный коэффициент электрической проводимости. Далее был получен коэффициент теплопроводности. Полученный коэффициент отличался от табличного приблизительно на 6%. Подобная погрешность обусловлена использованием первого варианта измерения электропроводности и не малую роль сыграло использование хромель-копелевой термопары. Общие затраты на проведение эксперимента были незначительны, а погрешность является не существенной. Из чего следует сделать вывод, что данный способ прекрасно подходит для изучения изменения коэффициента теплопроводности пористых металлических изделий как в учебных так и в промышленных целях.

Список литературы:

1. Ашкрофт Н., Мермин. Н. Физика твердого тела. Т. 1. М.: Мир, 1979. 392 с.
2. Калашников С.Г. Электричество. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 624 с.
3. Геращенко О.А. Тепловые и температурные измерения: справочное руководство. К.: Накова думка, 1965. 304 с.
4. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983. 463 с.
5. Fischer Technology SigmaScope SMP10.
URL: <http://ndtsupply.com/fischer-technology-sigmatascope-smp10.html>

© 2014, Чейлытко А.А., Носов М.А.

Определение коэффициента теплопроводности
пористых металлических изделий

© 2014, Cheylitko A.A., Nosov M.A.

Determination of the coefficient of thermal
conductivity in porous metal produce