

2. Разработаны рекомендации по конструированию приборов, реализующих дифференциальный метод локального теплового воздействия.

3. Рассмотрено влияние различных факторов на получаемый результат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулаков М.В., Макаров Б.И. Измерение температуры поверхности твердых тел / Библиотека по автоматике, вып.598.– М.: Энергия, 1979.– 96 с.

Получено 19.10.2004 г.

УДК 536.2.022

МУРОВАННАЯ Л.С.

Ин-т технической теплофизики НАН Украины

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Описано установку, що реалізує абсолютний метод вимірювання теплопровідності в стаціонарному режимі. Наведені результати експериментальних досліджень теплопровідності піролітичних графітових матеріалів різного походження.

Описана установка, реалізующая абсолютный метод измерения теплопроводности в стационарном режиме. Приведены результаты экспериментальных исследований теплопроводности пиролитических графитовых материалов различного происхождения.

The plant realizing an absolute method of thermal conductivity measurement in a steady-state conditions is described. Results of experimental researches of thermal conductivity of pyrolytic graphite materials of a various origin are described.

F – расчетная площадь поверхности, нормальной направлению теплового потока, м²;

L – длина прядей (или образца из пирографитовой ткани), м;

N – количество прядей в пучке, шт.;

Q – тепловой поток, Вт;

R_T – термическое сопротивление, м²·К/Вт;

r_T – удельное термическое сопротивление, (м·К)/Вт;

S – ширина образца, м;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 ρ – плотность;
 Δh – расстояние между точками измерения температуры, м;

ΔT – разность температур, К.

Индексы:

1 – графит;

i – номер материала.

Цели исследования

Целью исследования является определение коэффициента теплопроводности пиролитических графитовых материалов различного происхождения и структуры: плотного и пористого пиролитического графита, а также пряжей из волокон двух типов и ткани из пиролитических графитовых волокон.

Методы исследования

Для исследования теплопроводности высоко-теплопроводных материалов в отделе теплотехники ИГТФ НАНУ была создана установка, реализующая абсолютный метод измерения теплопроводности в стационарном режиме [1]. На рис. 1 показана функциональная схема данной установки, а на рис. 2 – внешний вид ее центрального узла.

Перепад температур на испытываемых образцах (примерно 10К) создавался путем нагрева одного края образца с помощью электрического нагревателя и охлаждения другого края водой заданной температуры, регулируемой термостатом. Для точного определения коэффициента теплопроводности необходимо создать малую величину термического сопротивления между поверхностями образца и нагревателя, образца и холодильника. Обычно в этих целях используются различные смазки, но в данном случае их применение исключено, поскольку их термическое сопротивление по величине сравнимо с величиной термического сопротивления образца. Поэтому в данной установке для уменьшения контактных термических сопротивлений торцевые поверхности всех образцов были гальваническим способом покрыты

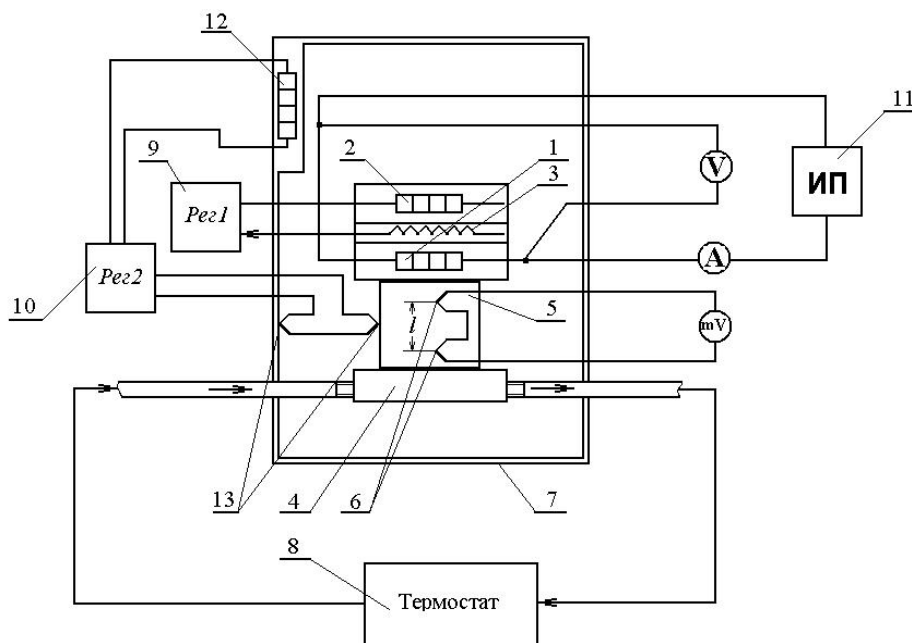


Рис. 1. Функциональная схема установки для измерения теплопроводности пирографитовых материалов: 1 – нагреватель; 2 – охранный нагреватель; 3 – ПТП; 4 – холодильник; 5 – образец; 6 – дифференциальные термопары; 7 – защитный корпус; 8 – термостат; 9, 10 – регуляторы; 11 – источник питания; 12 – нагреватель; 13 – дифференциальные термопары.

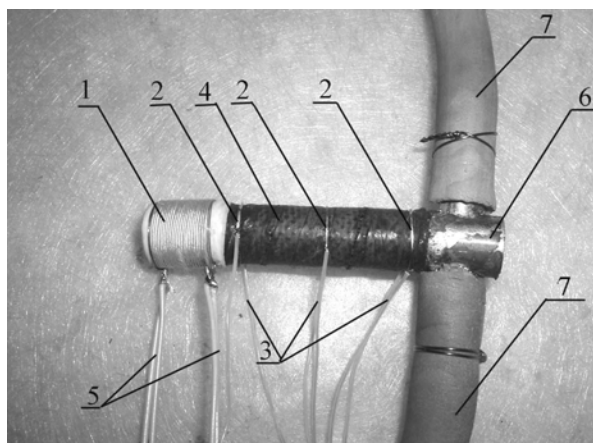


Рис. 2. Центральный узел теплового блока установки для измерения теплопроводности пирографитовых материалов: 1 – нагреватель, 2 – спаи дифференциальных термопар, 3 – выводы дифференциальных термопар, 4 – исследуемый образец (рулон ткани из пирографитовых волокон), 5 – выводы нагревателя, 6 – холодильник, 7 – трубки для охлаждения водопроводной водой.

ты слоем меди, после чего образцы впаивались в специальные пазы в корпусах нагревателя и холодильника. Нагреватель и боковая поверхность образца должны быть защищены от потерь теплоты в окружающую среду. Тогда величины потерь и радиального теплового потока будут пренебрежимо малы. При проведенных исследованиях для исключения боковых оттоков теплоты над нагревателем 1 ставился охранный нагреватель 9, а между ними – преобразователь теплового потока (ППП). С помощью регулятора мощность охранного нагревателя поддерживается такой, чтобы сигнал ППП был равен нулю, а следовательно, не было тепловых потерь. Образец, нагреватель и холодильник изолировались минеральной ватой. Второй регулятор 10 обеспечивал равенство температуры защитного корпуса средней температуре образца (в данной системе регулирования использовался нагреватель 12 и дифференциальные термопары 13), что минимизировало боковые теплотери образца. Таким образом, тепловой поток можно было считать одномерным и для определения коэффициента теплопроводности использовать расчетную формулу

$$\lambda = \frac{Q \cdot \Delta h}{F \cdot \Delta T}. \quad (1)$$

Тепловой поток, создаваемый нагревателем в образце, определялся путем измерения напряжения и силы тока нагрева, а также площади сечения образца. Для измерения разности температур образца использовался дифференциальный преобразователь температуры типа ТХК. Расстояние между спаями термопар порядка 25 мм измерялось штангенциркулем с разрешающей способностью 0,05 мм.

Исследовались образцы твердого пиролитического графита в виде прямоугольных пластин, которые были получены осаждением из метана при температуре 2100...3200 °С. Этот вид графита обладает совершенной кристаллической структурой, высокой анизотропией свойств и является высокотемпературным конструкционным материалом. Пористые образцы и образцы в виде пряжей и ткани получены иными способами и имеют не столь совершенную микроструктуру. Измерения проводились при распространении теплового потока вдоль слоев осажденного графита в твердых образцах, вдоль пряжей волоконных материалов и слоя ткани, то есть был определен продольный коэффициент теплопроводности. Для твердого пористого образца измерения проводились при распространении теплового потока перпендикулярно к наименьшему размеру образца.

Для проведения измерений из ткани и пряжей были подготовлены специальные образцы цилиндрической формы, пригодные для установки в специализированное устройство для измерения коэффициента теплопроводности. Образец ткани был плотно свернут в рулон и обернут слоем фторопластового уплотняющего материала (ФУМ), а пряжи волоконных материалов собраны в пучки по 20 и 18 пряжей и также обернуты ФУМ. Для усадки слоя ФУМ и уплотнения образцов они были запечены при температуре 270 °С.

Для подтверждения достоверности полученных результатов также проведены измерения на контрольных образцах из нержавеющей стали и меди. Относительная погрешность измерения коэффициентов теплопроводности не превышает $\pm 10\%$. Полученные значения коэффициента теплопроводности пиролитических графитовых материалов представлены в таблице. Все испытываемые об-

разцы имели значительные пустоты, и поэтому для каждого из них измерялась также массовая плотность и определялась плотность по отношению к плотному пирографитовому материалу. Поскольку образцы имели разную структуру, дополнительно были рассчитаны специфические характеристики термического сопротивления и теплопроводности, которые удобно применять на практике.

Пряди из тонких волокон типа I:
среднее удельное термическое сопротивление (на 1 м длины пряди) $r_T = 3777 \cdot \text{K}/(\text{м} \cdot \text{Вт})$;

Термическое сопротивление пучка из N прядей длиной L может быть определено по формуле:
 $R_T = r_T L / N$ (2);

- коэффициент теплопроводности материала вдоль волокна $\lambda = \lambda_{\text{обр}} \rho = 668 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Пряди из тонких волокон типа II:
- среднее удельное термическое сопротивление (на 1 м длины пряди) $r_T = 6943 \cdot \text{K}/(\text{м} \cdot \text{Вт})$;
- коэффициент теплопроводности материала вдоль волокна $\lambda = \lambda_{\text{обр}} \rho = 1100 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Ткань из пиролитических графитовых волокон:

- коэффициент теплопроводности материала вдоль слоя ткани $\lambda_{\text{т}} = \lambda_{\text{обр}} \rho = 19,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;
- удельное термическое сопротивление на м^2 поверхности $r_T = 476 \text{ К}/\text{Вт}$.

Термическое сопротивление прямоугольного образца ткани может быть определено по формуле:

$$R_T = r_T L / S. \quad (3)$$

Обсуждение результатов

Исследованные образцы плотного пирографита имеют значения коэффициента теплопроводности в диапазоне от 920 до 1280 Вт/(м·К). Коэффициент теплопроводности прядей имеет тот же порядок. Таким образом, проведенные испытания подтвердили уникально высокие значения коэффициента теплопроводности изделий из пиролитических графитовых материалов в продольном направлении [2]. Теплопроводность ткани и пористого пирографита значительно меньше, чем у твердого материала с упорядоченной кристаллической структурой, однако намного превышает

Т а б л и ц а . Результаты исследования теплопроводности пирографитовых материалов

Материал	Определяющий размер и другие характеристики образца	Средняя температура образца, °С	Массовая плотность образца ρ , г/см ³	Относительная массовая плотность ρ	Коэффициент теплопроводности образца $\lambda_{\text{обр}}$, Вт/(м·К)
Плотный пиролитический графит	Толщина 2,5 мм плоский, плотный, твердый	17 ± 3	2,15	1,0	1114
Твердый пористый	Товщина 11,2 мм	25 ± 3	0,919	0,427	67,3
Пряди из волокон типа I	Диаметр пучка 4,3 мм, 20 прядей по 1000 волокон	25 ± 3	1,174	0,546	365
Пряди из волокон типа II	Диаметр пучка 2,3мм, 18 прядей по 1000 волокон	25 ± 3	1,27	0,592	650
Ткань из пирографитовых волокон	Диаметр рулона 10,0 мм, длина образца ткани – 260 мм	25 ± 3	0,747	0,347	6,81

теплопроводность подобных изделий из других материалов. Полученные данные могут быть использованы при теплотехнических расчетах и проектировании теплообменных устройств. Перспективным является использование пиролитических графитов в малогабаритных устройствах с высокой тепловой нагрузкой, например, в устройствах охлаждения процессоров персональных компьютеров.

Выводы

Разработанные методика и установка позволяют исследовать материалы и изделия с высоким коэффициентом теплопроводности. Относительная погрешность измерения коэффициентов теплопроводности не превышает $\pm 10\%$. Предложен-

ная методика использована при исследовании различных пиролитических графитовых материалов: плотного и пористого пиролитического графита, пряжей из волокон двух типов и ткани из пиролитических графитовых волокон.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Осипова В.А.* Экспериментальное исследование процессов теплообмена.– М.: Энергия, 1969.– С. 48 – 50.
2. Теплопроводность твердых тел. Справочник. Под ред. *А.С. Охотина.*– М.: Энергоатомиздат, 1984.– С.88-89.

Получено 12.10.2004 г.

УДК 536.5: 536.6: 621.36: 006.05

Ковтун С.И.

Ин-т технической теплофизики НАН Украины

ПРОБЛЕМЫ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

Розглянуто сучасний стан метрологічного забезпечення теплотічних вимірювань. Обґрунтовано необхідність розробки вихідної установки вищої точності для відтворення та передачі одиниці щільності теплового потоку.

Рассмотрено современное состояние метрологического обеспечения теплоточных измерений. Обоснована необходимость разработки исходной установки высшей точности для воспроизведения и передачи единицы плотности теплового потока.

The modern condition of metrological maintenance of heat flow measurements is considered. Necessity of development of initial installation of the supreme accuracy for reproduction and transfer of density unit of heat flow is proved.

Введение

Прямое измерение поверхностной плотности тепловых потоков имеет широкое распространение во всех развитых странах. Созданием теплотехнической аппаратуры занимаются в Нидерландах, Японии, США, Англии, Германии, Венгрии, Чехии, России. В Украине – в Институте технической теплофизики НАН Украины (г. Киев), ГНПО

«Метрология» (г. Харьков), КБ «Фонон» (г. Черновцы).

В настоящее время в различных отраслях хозяйства Украины и стран СНГ получили широкое распространение первичные термоэлектрические преобразователи теплового потока вида вспомогательной стенки ПТП, применение которых воз-