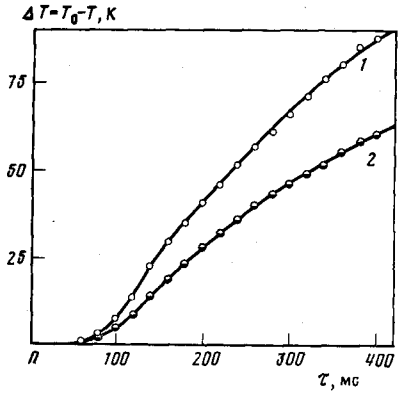

Рис. 2. Кривые охлаждения для покрытия № 1: *1* – T=1440 К; *2* – 1275

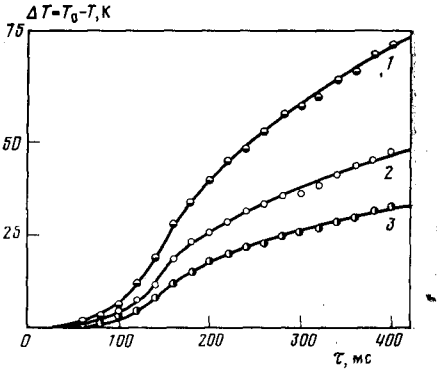

Рис. 3. Кривые охлаждения для покрытия № 2: *1* – T=1474 К; *2* – 1280; *3* – 1165

Величина неучтенной ошибки при определении интегральной излучательной способности составит 10% в работе [6], 26% в [5, 7] и 80% в [9]. Поэтому в каждом случае исследования конкретного типа покрытия и теплоизоляции необходимо проводить специальный анализ влияния охлаждения на величину погрешности получаемых данных.

Институт высоких температур
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
15.I.1982

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вильямс С. Д., Карри Д. М.*– РТК, 1978, т. 16, № 1, с. 161.
2. *Stewart A., Leiser P.*– AIAA Paper, 1976, N 444, p. 1.
3. *Garofdlini S. H., Banas R., Greedon J.*– Sample Quart., 1980, v. 11, N3, p. 27.
4. *Blome J. C., Brennan D. N., Shmitt R. J.*– Rad. Transfer and Thermal Control, N. Y., 1976, p. 131.
5. *Clayton W. A.*– In: Measurement of Thermal Radiation Properties of Solids, Washington, 1963, p. 445.
6. *Пикашов В. С., Корень Е. М.*– ТВТ, 1979, т. 17, № 4, с. 759.
7. *Mc-Mahon H. O.*– J. Amer. Ceram. Soc., 1951, v. 34, N 3, p. 91.
8. *Clark H. E., Moore D. G.*– J. Res. NBS, 70A (Physics and Chemistry), 1966, N 5, p. 393.
9. *Olson O. H., Weigant A.*– In: Radiative Transfer from Solid Materials, N. Y., 1962, p. 110.
10. *Andrianova V. G., Vasilieva I. A., Nefedov A. P. et al.*– Acta IMECO, 1979, p. 541.

УДК 536.2:666.3.001.5

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В МЕТОДЕ ПЛОСКОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ВОЛНЫ

Миклашевская Е. П., Федорович С. Д.

Отличительной особенностью перспективных методов исследования теплофизических свойств материалов является их комплексность, т. е. одновременное определение целого ряда свойств на одном образце в процессе одного эксперимента. Перспективность комплексных методов обусловлена как существенным повышением надежности получаемых данных за счет ликвидации неопределенностей, связанных с составом, конфигурацией и способами обработки образцов, исследуемых разными методами, так и уменьшением времени и затрат на проведение исследования. Реализация комплексных исследований методом температурной волны предполагает проведение измерений теплового потока, формирующего в образце периодические колебания температуры [1]. В случае использования светового источника переменного сигнала именно эта часть измерений связана с наибольшими трудностями.

Примененный в работе [2] относительный метод определения количества тепла, попадающего от источника света на образец, требует проведения тарировочных опытов на образцах с известными свойствами. Отсутствие эталонных образцов для области высоких температур и низких значений теплопроводности, а также невысокая надежность тарировки из-за сложности воспроизведения условий экспонирования образца является характерным недостатком относительного метода. Анализ методов

измерения тепловых потоков [3] показывает, что бо́льшими преимуществами обладают абсолютные методы, в частности электрокомпенсационные. Их, как правило, отличает простота электрической схемы, компактность и высокая точность измерений. Одной из реализаций этих методов является пиргелиометр Ангстрема, послуживший прототипом предлагаемого авторами данной работы радиометра.

Пиргелиометр Ангстрема представляет собой компенсационный двухэлементный радиометр, один элемент которого освещается измеряемым потоком, а по другому пропускается электрический ток. Определение компенсирующей электрической мощности можно проводить с очень высокой точностью (до 0,01%), однако существенную погрешность вводит поправка на теплопроводность чувствительных элементов. Непосредственное использование этого прибора в экспериментальной установке по исследованию комплекса теплофизических свойств материалов при высоких температурах (до 1500 К) методом плоской температурной волны [4] невозможно по следующим причинам: а) применение двух чувствительных элементов существенно усложнит конструкцию установки; б) предложенный в пиргелиометре Ангстрема материал чувствительных элементов непригоден для высоких температур; в) большая инерционность пиргелиометра не позволит проводить на нем измерения в нестационарном режиме.

В данной работе предлагается новый одноэлементный компенсационный радиометр, лишенный указанных выше недостатков. Датчик радиометра в виде кольцевой металлической полоски напыляется непосредственно на верхнюю поверхность охранного кольца образца и чернится вместе с ним. Ширина полоски равна ширине охранного кольца. Представляется возможным использование одного датчика для нескольких сменных образцов, слабо отличающихся по своим свойствам. Кольцо и образцы должны быть неэлектропроводными. Толщина напыляемой полоски мала, что позволяет пренебречь ее термическим сопротивлением и инерционностью и приравнять температуру полоски к температуре верхней поверхности охранного кольца. Выбор материала датчика зависит от диапазона исследуемых температур, а также от значения температурного коэффициента электросопротивления [5]. Для высоких температур (до 1900 К) можно применить платиновый датчик. Слой металла можно нанести методами вакуумного напыления или катодного распыления.

Регулярный тепловой режим III рода создается в системе образец – охранное кольцо с помощью источника света, генерирующего прямоугольные тепловые импульсы заданной частоты [4]. Радиометр, расположенный на поверхности охранного кольца, воспринимает эти импульсы света и идентичные импульсы электрического тока и реагирует на них, как термометр сопротивления. Одновременно он выполняет функции нагревателя при пропускании постоянного электрического тока. Таким образом, в отличие от калориметрических методов измерение пульсирующего теплового потока с помощью радиометра производится непосредственно при заданном рабочем режиме эксперимента. Условия теплообмена датчика с окружающей средой в случаях освещения тепловым потоком и пропускания электрического тока совершенно идентичны за исключением того, что при освещении датчика и образца световым потоком излучение с датчика на «горячий» образец практически отсутствует, а при пропускании через датчик электрического тока последний светит на «холодный» образец. Эта неадекватность условий, по мнению авторов, очень незначительно влияет на результаты измерений и может быть учтена в виде поправки. Поправка определяется при проведении сравнительных измерений в отсутствие и при наличии образца.

Электрическая схема радиометра включает в себя платиновый датчик, компенсационную и электронагревательную схемы и схему записи колебаний температуры на нижней поверхности охранного кольца. Принципиальная схема компенсации изображена на рис. 1. При условии синфазности источников переменного напряжения ε_1 и ε_2 ток $i_2=0$, если $|\varepsilon_2|=|i_{изм}|R_g=|U_{AB}|$. Таким образом, меняя амплитуду э.д.с. источника ε_2, удается скомпенсировать напряжение U_{AB} на входе нуль-прибора. Если после компенсации напряжения U_{AB} включить периодический нагрев датчика светом или постоянным током $I_н$, то нуль-прибор покажет приращение амплитуды $\Delta|U_{AB}|$, вызванное дополнительным нагревом датчика. Так как $|i_{изм}|=\text{const}$, то $\Delta|U_{AB}|\sim\Delta R_g\sim\Delta T$. Сравнение амплитуд периодических колебаний температуры проводится непосредственно на верхней поверхности кольца, поэтому можно достаточно точно подобрать ток периодического нагрева $I_н$, чтобы при одинаковой частоте включения света и тока выполнялось равенство

$$\Delta T_{св}=\Delta T_н, \tag{1}$$

где $\Delta T_{св}$ – амплитуда колебаний температуры образца под действием света; $\Delta T_н$ – амплитуда колебаний температуры образца при периодическом пропускании постоянного тока.

Измерив величины $I_н$ и $U_н$, а также зная площадь датчика S, получим плотность светового потока $q_{св}$

$$q_{св}=U_н I_н/S. \tag{2}$$

При переменном измерительном токе $i_{изм}$, проходящем через разделительные конденсаторы C_1, C_2, и постоянном токе нагрева датчика можно одновременно использовать датчик как термометр сопротивления и как электронагреватель.

Реализация в образце регулярного теплового режима III рода контролируется термопарами, приклеенными к обратной стороне образца и охранного кольца. Регистрация показаний термопар производится самописцем, что позволяет также провести

Рис. 1. Принципиальная схема компенсации

Рис. 2. Измерительная схема радиометра

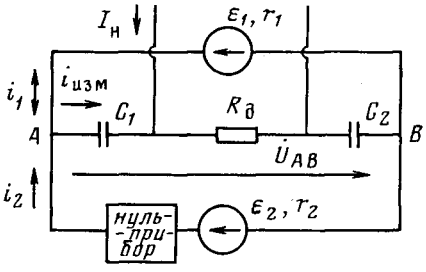

Рис. 1

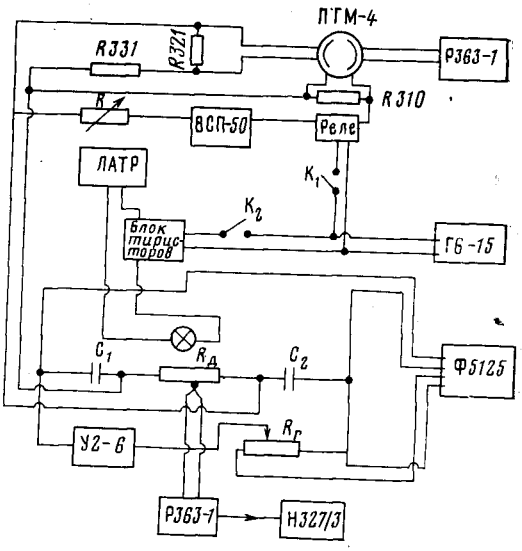

Рис. 2

предварительную настройку электронагревательной схемы и получить оценочное значение плотности светового потока.

Все приборы в измерительной схеме радиометра серийные (рис. 2). Условия синфазности и синхронности э.д.с. ε_1 и ε_2 обеспечивает калибратор фазовых сдвигов типа Ф5125. Прибор представляет собой двухканальный генератор с калиброванной задержкой в одном канале. В качестве нуль-прибора можно использовать измерительный усилитель типа У2-6. Усилитель У2-6 имеет выход на стрелочный прибор и работает в диапазоне частот 20–30·10³ Гц, нижний порог чувствительности – 3 мкВ. Периодичность нагрева датчика светом или током с заданной частотой осуществляется генератором сигналов специальной формы типа Г6-15. Измерения токов, напряжений и термо-э.д.с. производятся через переключатель ПМТ-4 электронным потенциометром постоянного тока типа Р363-1 класса точности 0,001. В схеме записи колебаний температуры на нижней поверхности охранного кольца можно использовать самописец типа Н327-3.

Расчет электрической схемы радиометра с платиновым датчиком показывает, что при толщине напыления порядка $1\cdot10^{-6}$ м, амплитуде измерительного тока $|i_{изм}|=1\cdot10^{-3}$ А, плотности теплового потока $q_{св}=3\cdot10^4$ Вт/м² и температуре образца $t_{обр}=1250°$ С нуль-прибор покажет разбаланс $\Delta|U_{AB}|=5{,}6$ мкВ.

Для увеличения сигнала $\Delta|U_{AB}|$ можно варьировать амплитуду измерительного тока $i_{изм}$ в диапазоне $(1–5)\cdot10^{-3}$ А. С уменьшением температуры образца величина $\Delta|U_{AB}|$ увеличивается.

Погрешность определения плотности теплового потока на образце оценивается в 1%.

Московский энергетический институт

Поступило в редакцию 6.VIII.1979

ЛИТЕРАТУРА

1. *Филиппов Л. П.* Измерение тепловых свойств твердых и жидких металлов при высоких температурах. М.: Изд. МГУ, 1967.
2. *Петрунин Г. И., Юрчак Р. П.* Установка для измерения температуропроводности материалов методом плоских температурных волн.– ТВТ, 1971, т. 9, № 3, с. 622.
3. *Геращенко О. А.* Основы теплометрии. Киев: Наукова думка, 1971.
4. *Миклашевская Е. П., Федорович С. Д., Носов П. В.* Экспериментальная установка для исследования комплекса теплофизических свойств конструкционных материалов при температурах до 1500 К.– Тр. МЭИ, 1979, вып. 441, с. 110.
5. *Bruce R. H., Canell D. S.* Accurate method for the simultaneous determination of the thermal conducting solids.— Rev. Sci. Instr., 1976, v. 47, N 11, p. 1323.