

УДК 536:631

А. М. Саламатина  
Л. П. Филиппов

ПРИМЕНЕНИЕ ШУМОВОЙ ТЕРМОМЕТРИИ  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ  
ТВЕРДЫХ МЕТАЛЛОВ

Описана методика измерений теплоемкости металлических проволок, основанная на принципах шумовой термометрии.

Шумовая термометрия представляет собой новое, развивающееся направление в технике измерений температуры. Этот метод подкупает возможностью непосредственного определения термодинамической температуры, независимостью показаний датчиков от рода материала, возможностью широкого использования современных радиотехнических измерительных средств. Большие возможности для применения шумовой термометрии имеются в теплофизических экспериментах, связанных с использованием проволочных образцов в качестве чувствительных рабочих элементов устройств для измерения теплопроводности, тепловой активности и температуропроводности газов и жидкостей. Следует отметить большое применение шумовой термометрии в экспериментах с применением термоанометров и термических газоанализаторов, а также в случаях, когда проволочные образцы служат объектами измерения, при исследованиях теплофизических свойств металлов. Эти возможности, однако, до сих пор не реализованы. Имеется лишь одна работа, где шумовая термометрия применялась для определения температурной зависимости удельного сопротивления образцов, и эти данные использовались при измерениях теплоемкости методом периодического нагрева [1]. Для непосредственных измерений теплоемкости метод шумовой термометрии не применялся.

Предлагаемая работа представляет собой первый шаг в этом направлении. Проведение методической работы такого рода целесообразно, так как существующие в настоящее время различные методы измерения теплоемкости проволочных образцов при высоких температурах далеко не всегда дают единообразные результаты.

В проведенном нами эксперименте исследуемый проволочный образец подвергается нагреву переменным током. В соответствии с теорией метода периодического нагрева [2] теплоемкость образца в таком эксперименте может быть определена по известным значениям переменной составляющей мощности нагрева  $w_{\sim}$ , амплитуде колебаний температуры  $\theta$ , круговой частоте переменного тока  $\omega$  и массе образца  $m$ :

$$c_p = \frac{w_{\sim}}{2\omega m \theta} \quad (1)$$

Для определения  $\theta$  и температуры отнесения используется шумовая термометрия. Для линейной измерительной системы из соотношения Найквиста следует:

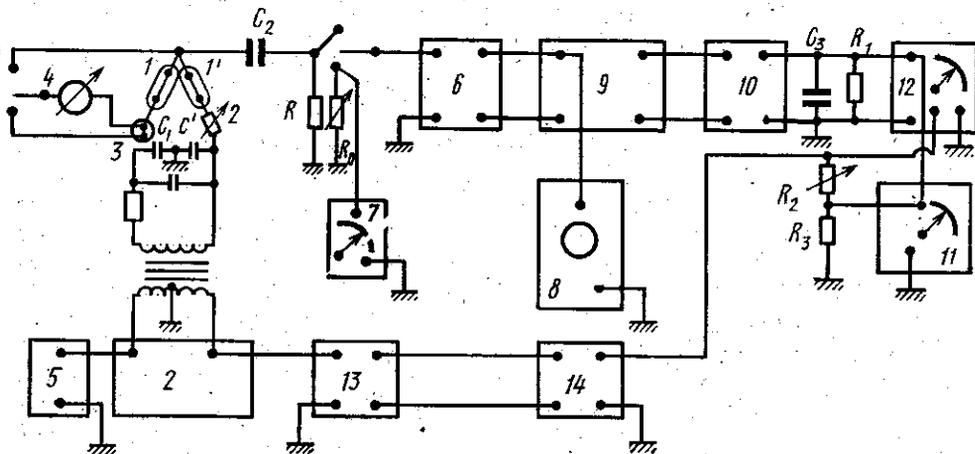
$$\theta = T \frac{2E_{\sim}}{E_{\sim}(1 + \alpha T)} \quad (2)$$

где  $T$  — средняя абсолютная температура,  $E_{\sim}$  — средняя величина сигнала флуктуационной э. д. с.,  $E_{\sim}$  — амплитуда периодического измене-

ния шумового сигнала,  $\alpha$ -температурный коэффициент сопротивления ( $\theta/T \ll 1$ ).

Измерительная схема изображена на рисунке.

Два тождественных образца  $I$  и  $I'$ , изготовленные из вольфрамовой проволоки диаметром 9 мк, помещены внутри вакуумированных стеклянных колб. Сопротивление образцов в холодном состоянии составляло около 70 Ом. Образцы были включены в мостовую схему, уравнивание которой предотвращает попадание в измерительную схему нагревающего напряжения и комбинационного напряжения уг-



роенной частоты, возникающего за счет нелинейности схемы при периодическом нагреве проволок. Два другие плеча моста образуют емкости  $C_1$  и  $C_2$ . Применение емкостных элементов для уравнивания моста позволяет избежать дополнительного шумового сигнала, который появился бы для моста с активными сопротивлениями в этих плечах. Для точного уравнивания моста используется подстроечная емкость, параллельная  $C_1$ , и малое переменное сопротивление  $r$ . Мост питается звуковым генератором (2) ГЗ-16 через трансформатор и RC-фильтр. Вся мостовая схема расположена в металлическом экранированном кожухе.

Напряжение на образце и нормальном сопротивлении 3 (1 Ом) измеряется цифровым вольтметром 4 (В7-16). Для измерений частоты используется частотомер 5 (ЧЗ-24). Напряжение с диагонали моста через  $RC_2$ -фильтр подается на предусилитель 6, собранный по схеме, описанной в работе [3]. Для определения шумовой температуры методом сравнения на вход предусилителя может подключаться термостатированное переменное проволочное сопротивление  $R_0$ , величина которого измеряется мостом 7 (В7-16). Поскольку эксперимент проводится в условиях, когда эквивалентные сопротивления в хорошем приближении являются чисто активными, величина средней температуры  $T$  находится с помощью соотношения

$$T = T_0 \frac{R_0}{R}, \quad (3)$$

где  $R_0$  — соответствует значению сопротивления сравнения, при котором шумовой сигнал от моста равен шумовому сигналу от сопротивления сравнения при абсолютной температуре  $T_0$ . (Поправки на роль  $RC_2$  и  $C_1$ ,  $C_2$  в наших условиях пренебрежимо малы.) В отдельном эксперименте шкала шумовой температуры (образец в форме цилиндрической спирали) была сопоставлена со шкалой, полученной методом яркостной

пирометрии, и разистивной шкалой. Все три шкалы температуры согласовались друг с другом в пределах 0,5% при температурах  $\sim 1500$  К.

Осциллограф 8, включенный после предусилителя, контролирует отсутствие заметного сигнала частот  $\omega$  и  $3\omega$  — на входе усилителя 9, в качестве которого используется избирательный усилитель типа У2-6.

Одним из существенных вопросов в рассматриваемом эксперименте является вопрос о выборе полосы частот, в которой проводится изучение шумового сигнала. Из общих соображений следует, что выгодно, возможно, более широкая полоса частот, поскольку величина флуктуации шумового сигнала на выходе усилительного устройства обратно пропорциональна квадратному корню ширины полосы [4], а малость уровня флуктуации необходима для возможности четко измерять периодические изменения уровня шумов, обусловленные колебаниями температуры образцов. С другой стороны, широкая полоса частот и связанное с ней уменьшение избирательности приводит к нежелательному проникновению нескомпенсированного остатка частот  $\omega$  и  $3\omega$  в регистрирующую схему. С учетом изложенного в описанной схеме оптимальной оказалась полоса частот  $\sim 1$  кГц при рабочей частоте  $\sim 30$  кГц.

После усиления сигнал шумовой э. д. с. подавался на детектор 10, работавший в линейном режиме, постоянная составляющая на интегрирующей высокой частоте цепочке  $R_1C_3$  измерялась цифровым вольтметром 11 (В7-16).

Величина пульсации температуры  $\theta$  при измерениях теплоемкости должна быть относительно малой, поэтому отношение  $E_{\sim}/E_{=}$  невелико, не превосходит 10 процентов. При частотах нагрева в 10 Гц величина периодического шумового сигнала (величина периодических изменений шумовой э. д. с.) при этом оказывается сравнимой с величиной случайных флуктуаций уровня  $E_{=}$ , обусловленных статистической природой шумового сигнала, или даже меньше этой величины. Поэтому выделение периодического сигнала требует применения синхронного детектирования. В качестве синхронного детектора 12 в нашей схеме использован блок В9-2.

Поскольку частота колебаний температуры при нагреве переменным током равна удвоенной частоте напряжения нагревающего тока, для формирования опорного сигнала синхронного детектора был применен удвоитель частоты 13, собранный по схеме диодного кольца. Для увеличения амплитуды и улучшения формы опорного сигнала использовался избирательный усилитель 14 (У2-6), настроенный на частоту  $2\omega$ . Отсчет сигнала  $E_{\sim}$  по шкале прибора синхродетектора был бы недостаточно точным, поэтому измерения проводились сравнительным методом: на вход синхродетектора через делителя напряжения  $R_3/R_4$  подавался сигнал такой величины, которая соответствовала измеряемому на выходе синхродетектора напряжению (на вход предусилителя при этом было включено сопротивление  $R_0$ , обеспечивающее тот же уровень среднего флуктуационного сигнала). При обработке данных вводились поправки на характеристику детектора, на собственный шум усилительной аппаратуры.

Приведем пример измерений теплоемкости. Для вольфрамовой проволоки массой  $1,05 \cdot 10^{-4}$  г при токе через проволоку 18,5 мА и напряжении на проволоке 10,15 В напряжение  $E_{\sim}$  составляло 122 мВ, напряжение  $E_{=}$  равнялось 2,31 В (при  $R_0=0$ ,  $E_{=}=0,6$  В — собственный шум усилителя); частота переменного напряжения составляла 9 Гц, сопротивление сравнения  $R_0=1,311$  кОм при  $22^\circ\text{C}$ . Для средней температуры по формуле (3) получаем 1410 К, для мощности  $\omega_{\sim}$  находим 0,187 Вт. По формуле (4) для пульсации  $\theta$  находим величину  $92^\circ$  (при этом внесена небольшая поправка на характеристику детектора и сделан пересчет измеряемого эффективного напряжения в амплитудное,

учтено, что  $\alpha T = 1,22$ ). По формуле (1) теплоемкость равна 0,17 Дж/г·град, полученная величина согласуется с рекомендуемым в [5] значением 0,16 Дж/г·град.

Случайная погрешность измерений теплоемкости рассматриваемым методом определяется в основном воспроизводимостью результатов измерений пульсаций температуры, которая составляет  $\sim 5\%$  для температур выше 1000 К. Систематическая погрешность складывается из неточности определения средней температуры и систематических погрешностей измерений мощности, массы и постоянной составляющей шумов; в целом она составляет приблизительно 5%.

Опыт работы с описанной методикой позволяет утверждать что она сможет успешно конкурировать с существующими сейчас методами измерений. Особенно выгодно сочетание шумового метода с методами периодического нагрева, основанными на определении пульсации температуры по сопротивлению; комбинация этих методов дает возможность одновременно определять как теплоемкость, так и температурный коэффициент сопротивления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kraftmaker Ya. A., Cherevko A. G. «Phys. stat. sol.», 1974, 25a, 691.
2. Филиппов Л. П. Измерение тепловых свойств твердых и жидких металлов при высоких температурах. Изд-во МГУ, 1967.
3. Мякин Г. В. «Измерительная техника», 1971, № 7, 33.
4. Бунимович В. И. Флуктуационные процессы в радиоприемных устройствах. М., 1951.
5. Столович Н. Н., Миницкая Н. С. Температурные зависимости теплофизических свойств некоторых металлов. Минск, 1975.

Поступила в редакцию  
5.5 1976 г.  
Кафедра  
молекулярной физики