

лочки от перегорания применяется реле времени 2, которое выключает нагрев через определенное время.

Опыты по определению теплоемкости проводятся в следующем порядке. При помощи сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  устанавливается определенный уровень напряжения на  $R_1$ , затем устанавливается нуль пороговой схемы. Для этого переключателем 8 вход усилителя закорачивается и регулировкой «баланс» осциллографа добиваемся срабатывания триггера. При коэффициенте усиления усилителя около 1000 разброс порога срабатывания не превышает 0.5 мс. После установки нуля переключатель 8 устанавливается в рабочее положение и замыкается ключ 7. В этот момент (начало нагрева) импульсом, снимаемым с контакта 7, запускается измеритель времени. При достижении провололкой определенной температуры срабатывает пороговая схема, которая останавливает измеритель времени 5.

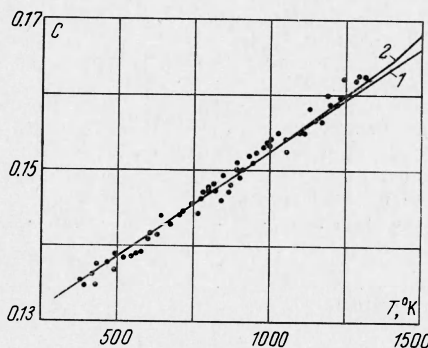
В таблицу измерений записываются показания измерителя времени, напряжения  $U$  и  $E_1$ . После этого необходимо 2—3 мин для остывания проволоки до исходной температуры, в течение которых устанавливается новый уровень  $U$ , затем проверяется нуль пороговой схемы и проводится следующее измерение и т. д.

Дифференцирование функции напряжения от времени производилось с применением метода наименьших квадратов.

В проведенных опытах скорость нагрева образцов варьировалась выбором различных значений сопротивления  $R$  от 6 до 100 тыс. град/сек. В результате оказалось, что при скоростях нагрева, меньших 20 тыс. град/сек, величина, рассчитанная по формуле (6), при высоких температурах зависит от скорости нагрева, что объясняется отводом тепла теплопроводностью через концы образца. При более высоких скоростях нагрева зависимости от скорости нагрева не наблюдалось.

Измерения были проведены в интервале температур от 400 до 1800° К. Однако из-за отсутствия надежных данных по  $\alpha$  при более высоких температурах теплоемкость была рассчитана до 1470° К.

Результаты измерения теплоемкости платины  $C$  в тыс. дж/кг град при 400—1470° К, полученные при скоростях нагрева 20—100 тыс. град/сек, представлены на фиг. 3, где точками обозначены наши данные 1— [2], 2— [3]. По предварительной оценке погрешность измерения теплоемкости составляет около 3%. Полученные данные теплоемкости в пределах точности метода согласуются с данными других авторов.



Фиг. 3

Поступила 2 I 1967

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хоткевич В. Н., Багров Н. Н. Импульсный метод определения теплоемкости. Докл. АН СССР, 1951, т. 81, № 6.
2. Temperature, its Measurement and Control in Science and Industry, 1962, No. 2.
3. Крафтмахер Я. А., Ланна Е. Б. Энергия образования и концентрация вакансий в платине. Физ. твердого тела, 1965, т. 7, № 1.

## КОМПЕНСАЦИОННАЯ СХЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ

Я. А. Крафтмахер (Новосибирск)

Модуляционный метод изучения теплового расширения [1] предназначен для непосредственного измерения коэффициента теплового расширения на проволочных образцах. Он заключается в том, что создаются колебания температуры образца около среднего значения и определяются амплитуды колебаний температуры и длины образца. При использовании этого метода удобно пользоваться описываемой ниже компенсационной схемой. В этом случае определение коэффициента теплового расширения облегчается, а чувствительность может быть повышена.

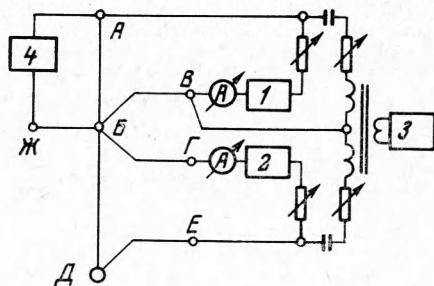
Сущность компенсационного метода измерений заключается в следующем. Проволочный образец состоит из двух частей — исследуемого образца  $ABC$  и образца с известным коэффициентом теплового расширения  $FBDE$  (фигура). Нагрев обеих частей

постоянным током осуществляется независимо от выпрямителей 1 и 2. Переменные составляющие токов от генератора низкой частоты 3 вызывают колебания температуры в частях  $ABC$  и  $FBDE$ , противоположные по фазе. При измерениях устанавливается такое соотношение между амплитудами колебаний температуры в обеих частях образца, чтобы суммарная амплитуда колебаний длины участка  $ABD$  была бы равной нулю. Это достигается регулировкой переменных составляющих тока в цепях питания. При таком способе измерений фотоэлектронный умножитель и усилитель, которые ранее использовались для измерения амплитуды колебаний длины образца, играют роль индикатора нуля. Вместо фотоумножителя можно использовать и фотодиод с низким напряжением.

Для расчета коэффициента теплового расширения необходимо знать длины участков  $AB$  и  $BD$  и амплитуды колебаний температуры в обеих частях образца. Определение амплитуд колебаний температуры производится на основании зависимости электрического сопротивления образцов от температуры или по известной теплоемкости [1]. Во втором случае легко получить расчетные формулы при использовании компенсационной схемы. Амплитуда колебаний температуры пропорциональна амплитуде колебаний подводимой мощности и обратно пропорциональна теплоемкости образца, а амплитуда колебаний мощности пропорциональна величине  $i_0 u$  ( $i_0$  — постоянная составляющая тока, питающего образец,  $u$  — падение переменного напряжения на образце). Поэтому при компенсации выполняется соотношение

$$\alpha_1 i_{01} u_1 l_1 / m_1 c_1 = \alpha_2 i_{02} u_2 l_2 / m_2 c_2$$

Здесь  $\alpha$  — коэффициент теплового расширения,  $l, m, c$  — соответственно длина, масса и удельная теплоемкость образцов. Индексы 1 и 2 относятся соответственно к исследуемому образцу и образцу с известным коэффициентом расширения. Образец  $FBDE$  находится при постоянной средней температуре, и все величины, кроме  $i_{01}, u_1, u_2, c_1$  и  $\alpha_1$ ,



являются постоянными, которые известны или легко измеряются. Отсюда

$$\alpha_1 = K u_2 c_1 / i_{01} u_1$$

Переменное напряжение на образцах измеряется ламповым вольтметром 4, включаемым параллельно участкам  $AG$  и  $EG$  (отвод  $BG$  сделан для исключения влияния падения напряжения при протекании переменного тока по участкам  $BC$  или  $BF$ ). При этом величина  $m_2$  соответствует массе участка  $BDE$ .

Таким образом, измерения коэффициента теплового расширения при использовании компенсационной схемы сводятся к установлению нулевой амплитуды колебаний длины составного образца  $ABD$  и измерению постоянного тока и переменных напряжений на двух частях образца. С применением компенсационной схемы можно определять коэффициент теплового расширения даже при амплитудах колебаний температуры порядка  $0.1^\circ$ . В этом случае колебания длины образца имеют порядок  $10^{-5}$  см, а чувствительность составляет  $10^{-7}$  см. Компенсационная схема оказалась очень удобной при практическом использовании. Этим методом изучено тепловое расширение платины при высоких температурах [2].

При изучении теплового расширения модуляционным методом возможно существенное искажение результатов за счет двух эффектов. Первый заключается в зависимости упругих свойств образца от температуры. При больших массах груза колебания длины образца при колебаниях его температуры могут быть частично связаны с периодическими изменениями модуля упругости. Второй эффект связан с изменениями натяжения образца в результате того, что груз, натягивающий образец, движется с ускорением. Поэтому необходимо, чтобы ускорение конца образца было значительно меньше ускорения силы тяжести, а масса груза не очень велика. Расчеты показывают, что оба этих эффекта могут быть сделаны несущественным уменьшением массы груза, частота модуляции температуры также не должна быть слишком высокой.

Автор благодарен П. Г. Стрелкову и Д. С. Миринскому за обсуждение.

Поступила 24 III 1967

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крафтмахер Я. А., Черемисина И. М. Модуляционный метод изучения теплового расширения. ПМТФ, 1965, № 2.
2. Крафтмахер Я. А. Образование вакансий и тепловое расширение платины. ФТТ, 1967, т. 9, № 5.