

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожелупова Н. Г., Иоффе А. И., Наугольных К. А., Рой Н. А. Акустическое излучение длинной искры в воде, Акуст. ж., 1967, т. 13, вып. 2, стр. 208.
2. Наугольных К. А., Рой Н. А. О связи между гидродинамическими и электрическими характеристиками разряда в жидкости, Докл. АН СССР, 1966, т. 168, стр. 556.
3. Иоффе А. И., Наугольных К. А., Рой Н. А. О начальной стадии электрического разряда в воде. ПМТФ, 1964, № 4.
4. Брагинский С. И. К теории развития канала искрового разряда. Ж. эксперим. и теор. физ., 1958, т. 34, вып. 6, стр. 1548.
5. Martin E. A. Experimental Investigation of High-Energy Density High-Pressure Plasma. I. Appl. Phys., 1960, vol. 31, p. 255.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. Гостехиздат, 1960.
7. Rayleigh. On the Pressure developed in Liquid during the Collapse of Spherical cavity. Philos. Mag., 1917, vol. 34, p. 94.
8. Керсваг Дж. Давление, создаваемое при подводном взрыве проволочек. Сб. «Электрический взрыв проводников», Изд. «Мир», 1965.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ МЕТАЛЛОВ ПРИ БЫСТРОМ НАГРЕВЕ

О. А. Краев, Р. А. Фомин

(Новосибирск)

Большинство существующих методов измерения теплоемкости при высоких температурах требуют сравнительно длительного пребывания исследуемого вещества при повышенных температурах. Поэтому изучение веществ, свойства которых могут изменяться со временем (рекристаллизацию, аллотропные изменения и т. п.), при помощи существующих методов, за исключением импульсных [1], связано с трудностями. Ниже дается метод измерения теплоемкости металлов при их быстром нагреве в широком интервале температур, и, следовательно, исследуемый металл находится при высокой температуре сравнительно короткое время. Нагрев образца в виде тонкой проволочки, находящейся в вакууме, производится проходящим по нему электрическим током. Выделяющееся тепло идет на нагрев проволочки, а также отводится теплопроводностью через концы и излучается с поверхности. С увеличением скорости нагрева относительная часть тепла, теряемая с поверхности и через концы, по сравнению с теплом, идущим на нагрев, уменьшается.

Теоретическая оценка показывает, что потерями тепла практически можно пренебречь во всем интервале нагрева от комнатной температуры и до 1500°C , если проволочку длиной около 200 мм нагревать со скоростью порядка десятков тыс. град/сек. В этом случае все выделенное тепло идет на нагрев, и удельная теплоемкость может быть определена по формуле

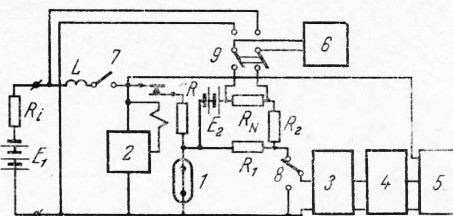
$$c_p = \frac{Q}{m dT / dt} \quad (1)$$

Здесь Q — тепловая мощность, выделяемая в проволочке; m — масса проволочки, T — температура.

Измеряя ход температуры от времени, а также тепловую мощность Q и вычисляя dT / dt , можно определить удельную теплоемкость.

Для этой цели была использована экспериментальная установка, схема которой приведена на фиг. 1, где 1 — образец, 2 — реле времени, 3 — усилитель, 4 — триггер Шмитта, 5 — измеритель времени, 6 — потенциометр, 7 — быстродействующий ключ, 8 и 9 — переключатели.

Исследуемая нить 1 с последовательно включенным сопротивлением R при помощи быстродействующего ключа 7 подключается к источнику постоянного тока. При этом нить нагревается, ее сопротивление растет, и, следовательно, падение напряжения на ней изменяется во времени. Для измерения зависимости этого напряжения от времени применяется следующий способ: измеряется время от начала нагрева до достиже-



Фиг. 1

ния напряжением на провололке определенного уровня. Проводя многократно нагрев провололки при разных уровнях, можно таким образом определить зависимость напряжения от времени. Уровень задается вспомогательной цепью (источник E_2 , сопротивления R_1, R_2, R_N) и равен падению напряжения на сопротивлении R_1 . Разность напряжений на исследуемой нити и сопротивлении R_1 подается на вход пороговой схемы, состоящей из широкополосного усилителя постоянного тока 3 и триггера Шмитта 4.

В момент включения провололки на нагрев импульсом, снимаемым с контакта 7, запускается измеритель времени 5.

Последний останавливается, когда разность напряжений на провололке и сопротивлении R_1 равна нулю.

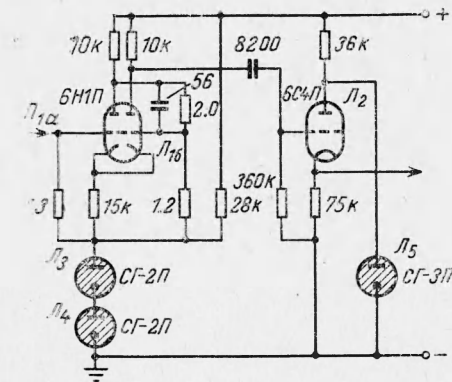
По измеренной зависимости напряжения на провололке от времени можно рассчитать теплоемкость. Тепловая мощность, выделяемая в провололке, как видно из схемы, равна

$$Q = U(E_1 - U) / R \quad (2)$$

где в R включено также и внутреннее сопротивление источника R_i .

Скорость нагрева нити определяется по зависимости падения напряжения на ней от времени. Напряжение на образце

$$U = ER_T / (R + R_T) \quad (3)$$



Фиг. 2

В формуле (3) E_1 и R — величины постоянные, а сопротивление провололки R_T зависит от ее температуры T , а T , в свою очередь, меняется со временем τ , т. е. величина $U = U(R_T(T(\tau)))$. Дифференцируя U по τ , получим формулу (4):

$$\begin{aligned} \frac{dU}{d\tau} &= \frac{\partial U}{\partial R_T} \frac{dR_T}{dT} \frac{dT}{d\tau} = E_1 \left\{ \frac{1}{R + R_T} - \frac{R_T}{(R + R_T)^2} \right\} \frac{dR_T}{dT} \frac{dT}{d\tau} = \\ &= \frac{E_1 R}{(R + R_T)^2} \frac{dR_T}{dT} \frac{dT}{d\tau} \end{aligned} \quad (4)$$

Отсюда скорость изменения температуры

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{dU}{d\tau} \frac{(R_T + R)^2}{E_1 R R_0 \alpha} \quad \left(\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dT} \right) \quad (5)$$

Здесь α — температурный коэффициент сопротивления. Подставив равенства (2) и (5) в (1), получим формулу для определения теплоемкости

$$c_p = \frac{R_0}{m E_1 R^2} \frac{U(E - U)^3}{dU/d\tau} \alpha \quad (6)$$

Для определения удельной теплоемкости была выбрана платиновая провололка диаметром 0.05 мм и длиной 180—200 мм, которая была приварена к специальным контактам держателя. После отжига для контроля степени чистоты металла измеряется ее сопротивление при 0 и 100° С и провололка устанавливается в вакуумную камеру. В качестве источника постоянного тока E_1 применяется аккумуляторная батарея на напряжении 115 в и внутренним сопротивлением 0.6 ом. Безреактивное сопротивление R варьируется в опытах от 20 до 60 ом. В быстродействующем ключе 7 один из контактов представляет собой свинцовую пластину, а другой — медный стержень с заостренным концом. Ключом замыкают цепь нагрева нити, с силой ударяя медным стержнем в пластину.

Сопротивления R_1 и R_2 — магазины сопротивлений высокого класса точности (0.02), а сопротивление R_N величиной 100 ом — образцовая катушка сопротивления. Напряжения E_1 и U , необходимые для расчета теплоемкости, измеряются потенциометром постоянного тока. Широкополосный усилитель постоянного тока 3 — усилитель вертикального отклонения осциллографа С1-19А. К выходу усилителя подключается триггер Шмитта, его схема представлена на фиг. 2. Триггер опрокидывается, когда напряжение на сетке лампы L_1 а увеличивается, становится равным порогу срабатывания. На аноде лампы L_2 образуется импульс, который подается на сетку катодного повторителя L_3 . С выхода последнего импульс подается на клеммы «стоп» измерителя времени 5 (фиг. 1) — частотомер Ф519 с разрешающей способностью 1 мксек. Для защиты прово-

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.

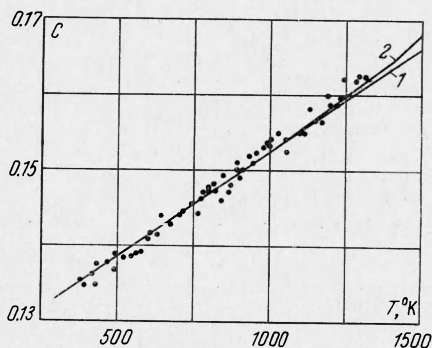
В таблицу измерений записываются показания измерителя времени, напряжения U и E_1 . После этого необходимы 2—3 мин для остывания проволоки до исходной температуры, в течение которых устанавливается новый уровень U , затем проверяется нуль пороговой схемы и проводится следующее измерение и т. д.

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 α 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 концентрации 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