


КОМПЕТЕНТНОСТЬ

2/19/2005



Комплексный подход
к обеспечению
безопасности

с.3

8 / ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТА ТЕХНИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ **22 /** МЕЖЛАБОРАТОРНАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МЕТОДИК ИСПЫТАНИЙ **31 /** ПОГРЕШНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТА ОДНОКРАТНОГО ПРЯМОГО ИЗМЕРЕНИЯ **39 /** ОТ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА – К ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ МЕНЕДЖМЕНТА

Периодическая поверка термоэлектрических преобразователей

Показано, что результаты градуировки неоднородной термопары применимы только в случае использования этой термопары в среде с идентичным температурным распределением. Предлагается внести изменения в ГОСТ 8.338–2002 «Преобразователи термоэлектрические. Методика поверки» в части периодической поверки



А.В. Белевцев

главный метролог
производственной компании
«Тесей»,
г. Обнинск

А.В. Каржавин

директор
производственной компании
«Тесей»,
г. Обнинск

В.А. Каржавин

инженер-исследователь
производственной компании
«Тесей»,
г. Обнинск

Основная часть всех температурных измерений осуществляется с помощью термоэлектрических преобразователей (ТП), термочувствительными элементами которых являются термопары. Термоэлектрический метод измерения температуры основан на использовании термоэлектрического эффекта, сущность которого состоит в том, что при нагреве места соединения двух разнородных проводников или полупроводников возникает электродвижущая сила, значение которой зависит от материалов проводников и температуры места соединения. Ее называют термоэлектродвижущей силой (ТЭДС). Принцип действия термопары основан на явлении Зеебека: в цепи, состоящей из последовательно соединенных различных проводников (термоэлектродов), возникает электрический ток, если в местах контактов поддерживается различная температура. Непонимание физической основы явления Зеебека приводит к неправильной эксплуатации ТП и получению недостоверных результатов измерений температуры. Одним из способов повышения точности измерений является периодическая поверка ТП. Для понимания того, что такое поверка ТП и что мы определяем при ее проведении, рассмотрим подробнее физическую основу явления Зеебека.

Упрощенно возникновение ТЭДС в металлах и сплавах можно объяснить, опираясь на теорию электронного газа П. Друде. В модели, предложенной П. Друде [1], металл рассматривается как решетка атомов, на внешних орбиталях которых находятся валентные электроны, слабо связанные электромагнитными силами с ядром атома. Валентные электроны можно считать свободными частицами, так как они легко могут переходить от одного атома к другому. Эти

электроны в металлах называют электронами проводимости. Система свободных электронов при отсутствии внешних воздействий находится в равновесии. Средняя скорость электронов равновесной системы равна нулю, хотя каждый из электронов обладает конечной энергией и скоростью, пропорциональной локальной температуре металла.

При изменении температуры вдоль проводника система электронов отклоняется от равновесного состояния. Средняя скорость электронов в области горячего конца проводника становится отличной от нуля, а вектор скорости направлен в сторону области с более низкой температурой. Поскольку электроны являются носителями заряда, наличие такой скорости приведет к возникновению электрического тока. Но электрическая цепь разомкнута, и поэтому электрический ток существует лишь до тех пор, пока в более холодной области не накопится заряд, достаточный для создания замедляющего электрического поля. Это поле противодействует дальнейшему накоплению заряда и в точности компенсирует влияние градиента температуры на среднюю скорость электронов. Когда достигается новое равновесное состояние, электрический ток в цепи исчезает.

Таким образом, при наличии градиента температуры в проводнике возникает электрическое поле, направленное навстречу градиенту температуры. Различие в числе электронов на концах проводника и ток в цепи существуют до тех пор, пока есть градиент температуры. Соответственно градиент потенциала электрического поля, собственно и являющийся ТЭДС, не может возникнуть без температурного градиента. Суммарная ТЭДС термопары представляет собой сумму частных ТЭДС, имеющих

разную природу. Авторы [2] считают описанный механизм основной причиной возникновения ТЭДС и называют ее **диффузионной составляющей ТЭДС**. Она доминирует в чистых металлах при температурах выше температуры Дебая и является основной составляющей ТЭДС, возникающей во всем температурном диапазоне применения для сплавов, содержащих несколько процентов легирующих элементов.

Величина ТЭДС $E_A(T)$, возникающей на однородном участке проводника А, определяется как

$$E_A(T) = \int_{T_1}^{T_2} S_A(T) dT, \quad (1)$$

где $S_A(T)$ – локальная чувствительность участка проводника.

Из выражения (1) следует, что:

$$S_A(T) = \frac{dE}{dT}. \quad (2)$$

Формула (2) выражает абсолютный коэффициент Зеебека локального участка – физическую характеристику любого электропроводящего материала, которая не зависит от наличия других материалов в цепи.

Величину ТЭДС можно также представить как

$$E_A(X) = \int_{X_1(T_1)}^{X_2(T_2)} S_A(T) \frac{dT}{dX} dX, \quad (3)$$

откуда видно, что ТЭДС, вырабатываемая участком термоэлектрода длиной $(X_2 - X_1)$ при разности температур $\Delta T = T_2 - T_1$, генерируется на каждом участке термоэлектрода dX , и ее значение пропорционально градиенту температуры на данном участке.

Для практических расчетов обычно используют средний коэффициент Зеебека, который на участке термоэлектрода между точками 1 и 2 равен:

$$S_A(T_A) = E_{12}/(T_2 - T_1). \quad (4)$$

Здесь E_{12} – суммарная ТЭДС, генерируемая между концами отрезка X_1 и X_2 ; T_2 и T_1 – температуры в точках X_1 и X_2 соответственно;

$T_A = (T_1 + T_2)/2$ – локальная средняя температура.

Выражение (4) определяет локальный средний коэффициент Зеебека локального участка и не зависит от его длины и от функциональной формы $S_A(T_A)$. Как следует из (4), реальная координата, в которой S_A мгновенно возникает на коротком участке проводника, точно не определена, но для большинства целей произвольно и соразмерно задается как $X_A = (X_1 + X_2)/2$.

ТЭДС цепи, состоящей из двух проводников А и В, спаян которых находятся при температурах T_1 и T_n , а изотермические участки которых имеют возрастающие температуры $T_1 > T_2 > \dots > T_n$, равна алгебраической сумме ТЭДС, развиваемых между этими участками:

$$E_{AB}(T_1, T_n) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{AB}(T_2, T_3) + \dots + E_{AB}(T_{n-1}, T_n). \quad (5)$$

Зависимость ТЭДС от температуры для термопары, состоящей из изотропных термоэлектродов, представляется в интегральном виде:

$$E_{AB} = \int_{T_1}^{T_n} S_{AB}(T) dT. \quad (6)$$

Коэффициент Зеебека пары проводников АВ S_{AB} представляет собой разность коэффициентов Зеебека материала А и материала В:

$$S_{AB} = S_A - S_B. \quad (7)$$

Коэффициент Зеебека S_{AB} , характеризующий изменение E_{AB} в зависимости от температуры, называют также коэффициентом ТЭДС, дифференциальной ТЭДС или чувствительностью термопары. Для большинства пар металлов и сплавов S_{AB} имеет порядок 10^{-5} – 10^{-4} В/К.

справка

Зеебек (Seebeck) Томас Иоганн (1770 – 1831) – немецкий физик, член Берлинской Академии Наук (1818 г.).

В 1821 году открыл явление термоэлектричества (эффект Зеебека). Совместно с Ж. Пельтье поставил ряд опытов, в которых был показан переход тепловой энергии в электрическую и обратно. Зеебеку принадлежат также работы по физической оптике, физической химии и др.

Большой энциклопедический словарь. – М.: БРЭ, 2000

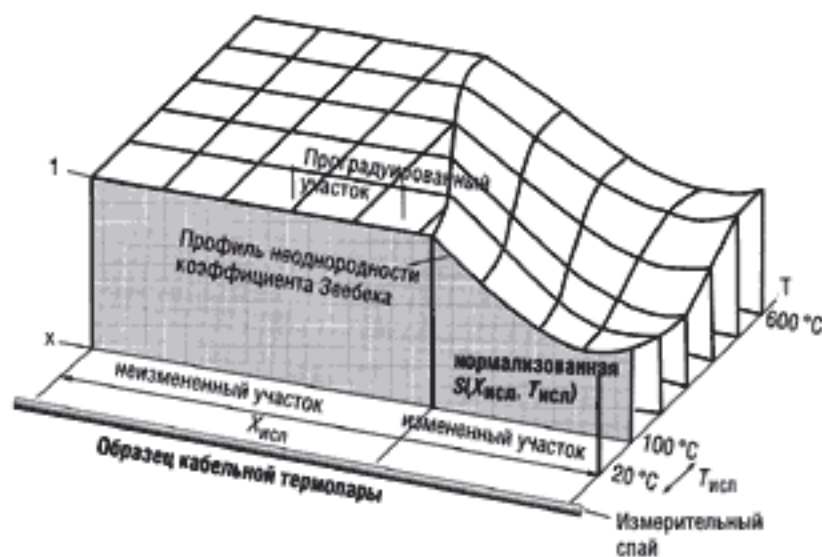


Рис. 1. Профиль неоднородности коэффициента Зеебека

На практике электроды термопар на разных участках своей длины имеют неодинаковый коэффициент ТЭДС. Это проявление неоднородности физических свойств реальных материалов и сплавов, обусловленной колебаниями их состава и структуры, получило название термоэлектрической неоднородности (ТЭН) [2]. Исходная ТЭН термоэлектродной проволоки возникает при ее изготовлении, развивается в процессе изготовления термоэлектродов и термопар и представляет собой, как правило, небольшие колебания ТЭДС. У отработавших некоторое время термопар ТЭН термоэлектродов является результатом наложения исходных неоднородностей и неоднородностей, развивающихся в процессе эксплуатации вследствие ряда причин: изменения состава сплава за счет избирательного окисления, испарения или связывания в соединения; поглощения элементов извне при взаимодействии с изолирующими материалами и окружающей средой; рекристаллизации, роста зерна; превращений в твердом состоянии (упорядочения, распада твердого раствора). Неоднородность может возникнуть в любое время в процессе использования термопары.

Для неоднородных термоэлектродов коэффициент Зеебека является функцией не только температуры T_1 , но и координаты по длине X :

$$\delta S(T, X) = S(T, X) - S_n(T). \quad (8)$$

Эта функция отклонения выражает изменение коэффициента Зеебека вдоль термоэлектрода или термопары относительно опорной функции S_n . Приведенное соотношение описывает ТЭН в общем виде. Профиль неоднородности коэффициента Зеебека удобно изобразить как поверхность [4] (рис. 1). Здесь неоднородность коэффициента Зеебека – это отклонение от определенной нормы $S_n(X_{исл}, T_{исл})$. Нормой считается средний коэффициент Зеебека на нормальном, неповрежденном участке внутри исследуемого отрезка $X_{исл}$ при температуре $T_{исл}$. В качестве опорных функций $S_n(X_{исл}, T_{исл})$ логично выбирать среднее значение коэффициента Зеебека, однако его определение в «чистом» виде для бесконечно малого участка невозможно. На практике в качестве опорной используется функция, определенная для конкретного участка термопары путем градуировки, либо, с удовлетворительной точностью, применяется номинальная статистическая характеристика. Каждый профиль строится как $(1 + \delta S)$, при этом отклонение от нормы $\delta S(X, T_{исл})$ определяется по формуле

$$\delta S(X, T_{исл}) = \frac{S(X, T_{исл}) - S_n(X_{исл}, T_{исл})}{S_n(X_{исл}, T_{исл})}, \quad (9)$$

где $S(X, T_{исл})$ – измеренное значение коэффициента Зеебека;
 $X_{исл}$ – длина исследуемого участка;
 $T_{исл}$ – температура, при которой проводилось исследование.

Совокупность таких профилей, построенных при разных температурах, и дает поверхность, изображенную на рисунке 1. Однородная термопара имеет постоянный профиль относительной неоднородности от начала до конца.

Изменение ТЭДС относительно номинальных или первоначальных значе-

ний при проведении исследований является только очевидным признаком ТЭН, так как величина ТЭДС является сопряженной функцией действительного профиля неоднородности и конкретного температурного профиля, с помощью которого она получена.

Интегральная ТЭДС $E(T_1, T_2)$, развиваемая на участке X_1, X_2 неоднородной термопары, помещенной в температурное поле $T(X)$ с градиентом ΔT , равна:

$$E(T_1, T_2) = \bar{E}_n(T_1, T_2) + \int_{T_1}^{T_2} \delta S[X(T), T] dT = \bar{E}_n(T_1, T_2) + \delta E(T_1, T_2), \quad (10)$$

где $\bar{E}_n(T_1, T_2)$ – среднее значение ТЭДС на однородном участке;

$\delta E(T_1, T_2)$ – ТЭДС, возникающая за счет неоднородности термоэлектродов.

Любой неоднородный термоэлектрод можно рассмотреть как цепь нескольких локально однородных участков произвольной длины и с заданными температурами на концах. В этом случае напряжение, возникающее на концах термопары, – это сумма ТЭДС от всех участков с различной температурой на концах (см. формулу 5). Участки с постоянной температурой не генерируют ТЭДС.

Для иллюстрации появления ТЭН приведем результаты исследования платинородиевых термопар [5] (рис. 2). Исследовались кабельные термопары типа R (Pt + 13Rh – Pt) с минеральной изоляцией в оболочке из сплава 90 % Pt + 10 % Rh. Внешний диаметр 0,13 мм, диаметр термоэлектродов 0,08 мм. Термопары изменяли свои показания более чем на 80 °С в зависимости от величины и места приложенного градиента температуры. Изменение характеристик термопары было вызвано ТЭН, образовавшейся в результате взаимодействия термоэлектродов со сталью AISI 304 и сплавом Инконель 625. Величина и характер изменений также зависели от способа отжига.

Показательны и результаты исследования ТЭН, образовавшейся после многократного термоциклирования ка-

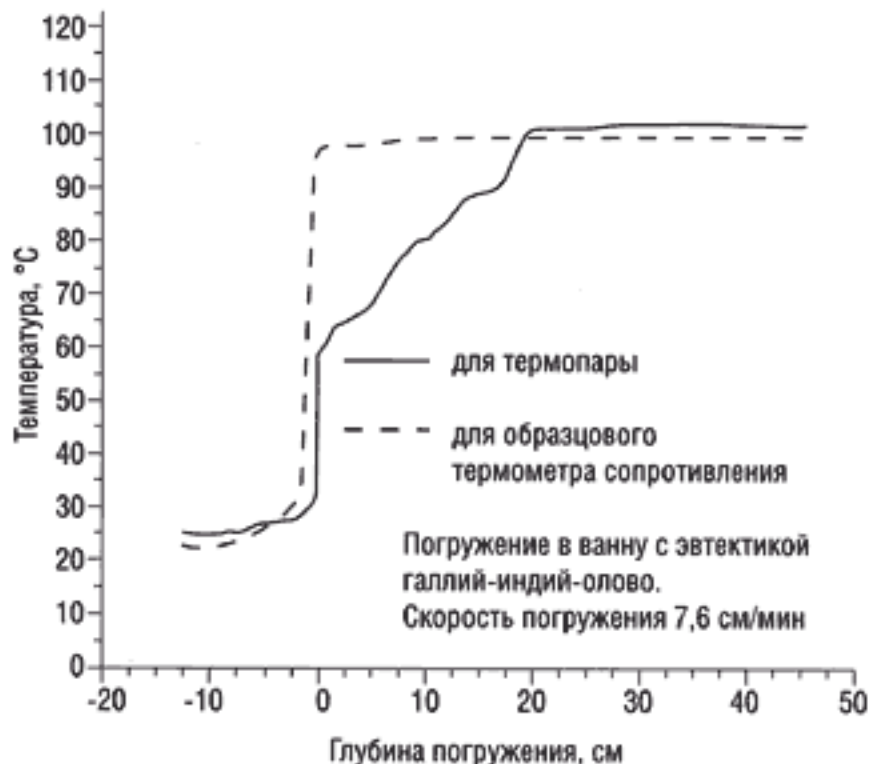


Рис. 2. Результат исследования термоэлектрической неоднородности для термопары, отожженной медленным погружением (1 см/ч) в печь при 1100 °С

бельных термоэлектрических преобразователей типа КТНН диаметром 3 мм, полученные авторами (рис. 3). Один термоцикл включал в себя нагрев до 1085 °С, затем охлаждение до 660 °С и 420 °С, при каждом значении температуры преобразователи выдерживались в течение 1 часа.

Так как общее значение ТЭДС, генерируемой неоднородной термопарой, зависит от обычно неизвестного температурного распределения вдоль термоэлектродов, неоднородная термопара не может быть градуирована в общем смысле этого понятия. «Градуировка» неоднородной термопары, произведенная с высокой точностью для одного температурного распределения, даст недостоверные результаты при измерении в другом температурном поле. Градуировка, осуществляемая без уверенности в однородности термопары, не определена независимо от того, с какой точностью она осуществлена. И это крайне важно понимать.

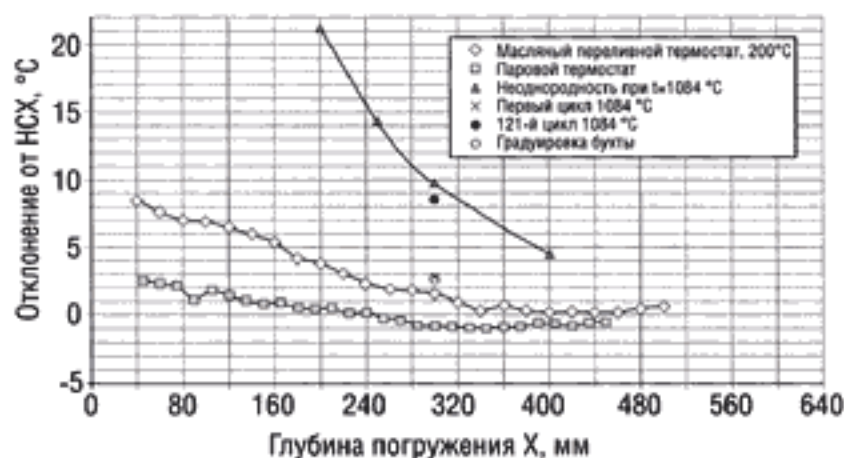


Рис. 3. Результат исследования термоэлектрической неоднородности для ТП типа КТНН, подвергшихся 120 циклам нагрева до 1085 °C

Градуировка, как и поверка, строго однородной термопары может быть проведена с любой выбранной точностью без знания налагаемого температурного профиля и глубины погружения. Традиционная поверка, в частности поверка ТП по ГОСТ 8.338–2002, проводится с заданной точностью и при неизвестном температурном распределении неопределенного участка термопары, считаемого однородным. Термоэлектрическая однородность термоэлектродов не исследуется. Такой подход можно понять и принять для первичной поверки ТП, но он приводит к заведомо ложным результатам при периодической поверке ранее эксплуатировавшихся, а значит, неизбежно приобретших ТЭН термоэлектрических преобразователей. На целесообразность периодической поверки в лабораторных условиях (читай: по методике, приведенной в ГОСТ 8.338–2002) указывается в международных нормативных документах. Так, в стандарте ASTM International E220-02, регламентирующем калибровку ТП методом

сравнения, вообще не рассматривается возможность калибровки эксплуатировавшихся ранее ТП, так как возникшая неоднородность не может быть идентифицирована или определена количественно стандартными методами калибровки. Аналогичная точка зрения изложена в рекомендациях (EAL-G31) Европейской ассоциации по аккредитации лабораторий для гармонизации процесса калибровки (поверки) ТП в различных лабораториях.

Исследование неоднородности (в отличие от градуировки однородной термопары) не может напрямую улучшить точность измерений термопары и не может в общем точно скорректировать результаты измерений. Однако важное преимущество исследования неоднородности заключается в подтверждении того факта, что точная градуировка и точные измерения на самом деле возможны. В случае оценки неоднородности эксплуатировавшегося ТП можно установить, что за время его использования изменение градуировки не превысило определенной величины для конкретных участков ТП.

Таким образом, для оценки достоверности результатов измерения температуры с помощью термоэлектрических преобразователей необходимо:

- ▶ отменить действие ГОСТ 8.338–2002 в части периодической поверки;
- ▶ разработать методику и эталонные средства измерения температуры для проведения периодической поверки ТП непосредственно на термометрируемом объекте;
- ▶ разработать методику периодической оценки достоверности показаний ТП на основе исследования его неоднородности.

Список литературы

1. Борн М. Атомная физика. – М.: Мир, 1965.
2. Рогельберг И.Л., Бейлин В.М. Сплавы для термопар: Справочник. – М.: Металлургия, 1983
3. Куин Т. Температура. – М.: Мир, 1985.
4. Reed R.P. The Effect of Interrogating Temperature Profile in the Seebeck Inhomogeneity Method of Test (SIMOT), Proc.: TMCSI, 7, Part 1, AIP, NY, 2003.
5. Rosch, W. et al. Damage of Fine-Diameter Platinum-Sheathed Type R Thermocouples at Temperatures Between 950 and 1100 °C. TMCSI, 6, Part 1, AIP, NY, 1992.