

УДК 311.214

**ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ  
РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ  
ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ  
ПРОЦЕССОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ И  
ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

*А. О. Каландарашвили, М. С. Степанов*

Донской государственный технический  
университет, г. Ростов-на-Дону, Российская  
Федерация

[nastyushka.k25@yandex.ru](mailto:nastyushka.k25@yandex.ru)

Работа посвящена анализу возможных причин возникновения погрешности при измерении температуры с помощью термопары и методов их устранения с целью повышения достоверности результатов измерений. Результаты проведенного анализа могут быть использованы при исследовании химико-термической обработки стальных изделий.

**Ключевые слова:** измерение температуры, термоэлектрический термометр, погрешность измерения, достоверность измерений.

**Введение.** При изготовлении деталей машин, работающих в условиях интенсивного износа, часто проводят дополнительное упрочнение их поверхности с целью повышения эксплуатационных характеристик. К таким процессам относятся термическая и химико-термическая обработки. Их изучение не представляется возможным без измерений температуры. Таким образом, для получения достоверных результатов измерений температуры возникает необходимость изучения возможных причин возникновения погрешности измерения и способов их снижения или устранения.

**Основная часть.** Температура представляет собой интенсивную физическую величину, позволяющую описать тепловое (энергетическое) равновесие между двумя системами, находящимися в тепловом контакте [1, 2].

В настоящее время существует большое количество средств измерения температуры, но чаще всего в промышленности и в лабораториях применяются термометрические термометры. Они состоят из термоэлектрического преобразователя (термопары) и вторичного прибора, продемонстрированного на рис. 1.

UDC 311.214

**IMPROVING THE RELIABILITY OF  
MEASUREMENT RESULTS OF  
TEMPERATURE DURING THE  
PROCESSES OF THERMAL AND  
THERMOCHEMICAL TREATMENT**

*A. O. Kalandarashvili, M. S. Stepanov*

Don State Technical University, Rostov-on-Don,  
Russian Federation

[nastyushka.k25@yandex.ru](mailto:nastyushka.k25@yandex.ru)

The article is devoted to the analysis of possible causes of error when measuring temperature using a thermocouple and methods of their reduction with the aim of increasing the reliability of measurement results. The results of this analysis can be used in the study of thermochemical treatment of steel products.

**Keywords:** measurement of temperature, thermoelectric thermometer, measurement error, measurement accuracy.

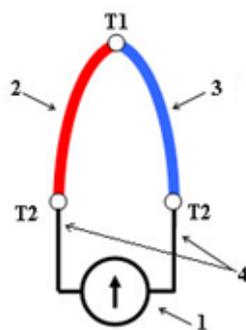


Рис. 1. Схема термометрического термометра: измерительный прибор (1); термоэлектроды (2, 3); соединительные провода (4); температура «горячего» и «холодного» спаев термопары ( $T_1$ ,  $T_2$ )

Термопара — это цепь из двух или нескольких соединенных между собой разнородных электропроводящих элементов. Они имеют широкое применение благодаря низкой цене, взаимозаменяемости, высокой надежности и широкому диапазону измеряемых температур (от  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Работа термоэлектрических термометров основана на эффекте Зеебека, согласно которому при неравенстве температур мест соединения двух различных проводников (рис. 1), связанных в единый контур, возникает разность потенциалов, которая может служить мерой разности температур [3, 4]. Если стыки связанных в кольцо проводников находятся при одинаковой температуре, то сумма разностей потенциалов равна нулю. Коэффициент пропорциональности зависимости разностей потенциалов и температур называют коэффициентом термо-ЭДС. При погружении спаев из металлов с отличными от нуля коэффициентами термо-ЭДС в среду с температурой  $T_1$  возникает напряжение между противоположными контактами, находящимися при другой температуре  $T_2$ , которое пропорционально разности температур  $T_1$  и  $T_2$  [5].

При измерении температуры с помощью термопары возникает погрешность. Анализ литературных источников [5–9] показывает, что источниками этой погрешности могут быть различные факторы. Проанализируем некоторые из них.

1. Дефекты формирования рабочего спаев термопары. Рабочий спай термопары может формироваться механическим скручиванием, пайкой, сваркой и т. д. При пайке в спай добавляется третий металл, имеющий более низкую температуру плавления, что может приводить к загрязнению электродов третьим металлом при его плавлении или испарении. Поэтому рекомендуется производить сварку рабочего спаев.

2. Недостаточный тепловой контакт между рабочим спаем термопары и металлическим образцом. Примеры недостаточного теплового контакта рабочего спаев термопары с поверхностью образца приведены на рис. 2 [5]. Недостаточность контакта проявляется в наличии воздушного зазора у любой границы спаев [6].

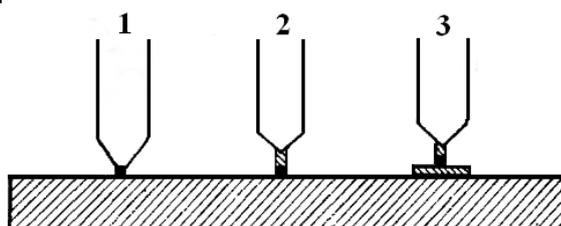


Рис. 2. Неправильное крепление измерительного спаев термопары к поверхности образца: точечный контакт (1); длинная скрутка термоэлектродов (2); точечный контакт к вспомогательной накладке (3)

В работе [6] представлены результаты численного анализа тепловых полей, в ходе которого были получены зависимости погрешности измерения температуры термопарой от времени при различных месторасположениях и размерах воздушного зазора (рис. 3, 4) [6].

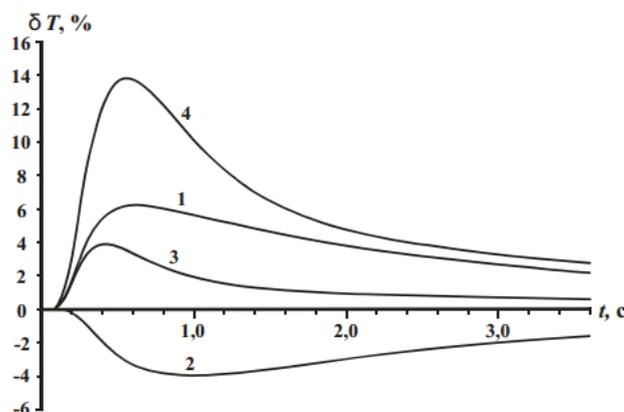


Рис. 3. Зависимость погрешности измерения температуры термопарой от времени при различном месторасположении воздушного зазора: со стороны нагрева (1); с «холодной» стороны сая термопары (2); с двух сторон сая (3); вокруг всего сая (4)

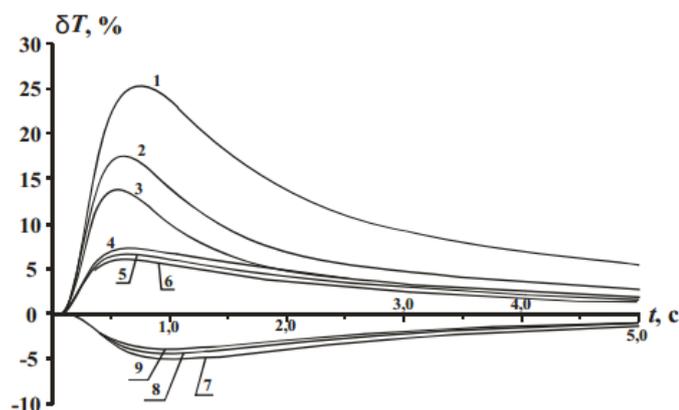


Рис. 4. Зависимость погрешности измерения температуры термопарой от времени при различной толщине воздушного зазора: зазор вокруг всего сая термопары (1–3); зазор со стороны нагрева (4–6); зазор с «холодной» стороны сая (7–9); толщина зазора равна толщине сая (1, 4, 7); толщина зазора равна 50 % толщины сая (2, 5, 8); толщина зазора равна 30 % толщины сая (3, 6, 9)

Для уменьшения вероятности возникновения воздушного зазора рекомендуется использовать способы крепления измерительного сая термопары, представленные на рис. 5 [5].

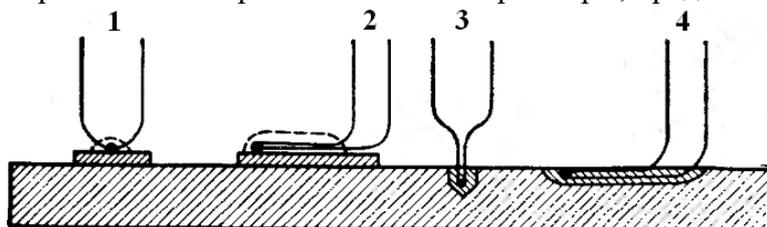


Рис. 5. Правильное крепление измерительного сая термопары к поверхности образца: припаивание к вспомогательной накладке (1); припаивание к вспомогательной накладке измерительного сая и частично ветвей термопары (2); впаивание скрутки ветвей термопары со спаем в засверловку (3); впаивание измерительного сая и частично ветвей термопары в фрезерованный паз (4)

Обычно для измерения температуры используют механическое крепление термопары с образцом зачеканкой в отверстие либо приваркой [5, 6]. В первом случае вероятность недостаточного контакта довольно велика. При приварке термопары (рис. 6) в точке (а) и внахлест (б) горячий спай термопары отделен от поверхности образца тонким слоем материала термопары, из-за чего температура горячего спая при нагревании всегда меньше температуры поверхности образца. При раздельной приварке термопары к образцу (в) сам образец является частью горячего спая. Это позволяет значительно уменьшить погрешность измерения температуры образца [7].

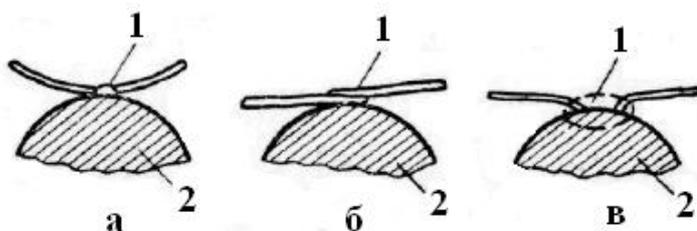


Рис. 6. Приварка термопары: в точке (а); внахлест (б); раздельно (в)

3. Приток или отвод тепла за счет собственной теплопроводности термоэлектродов. Его необходимо снижать с помощью контактирования с объектом измерения не только спая термопары, но и некоторой длины проводов термопары, как это продемонстрировано на рис. 7 [5].

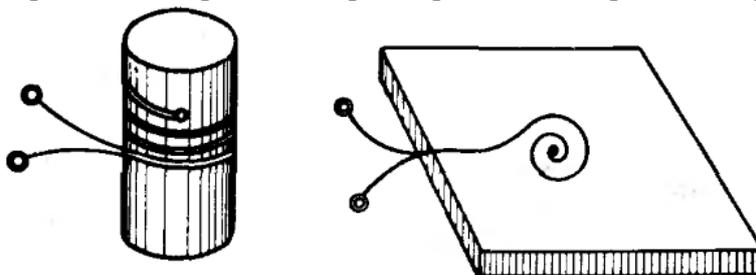


Рис. 7. Способы крепления термопары к образцу, уменьшающие приток или отвод тепла по термоэлектродам

4. Возникновение термоэлектрической неоднородности по длине термоэлектродов и изменение градуировочной характеристики термопары. Термоэлектрическая неоднородность может быть результатом диффузии примесей из окружающей атмосферы при высоких температурах, воздействии радиации и электромагнитных полей. Она может образоваться в результате неосторожного обращения с электродами, ударов и вибраций, вызывающих напряжение в проволоке [10]. Изменение состава сплава может наблюдаться и на отдельном участке проволоки, находящемся длительное время в зоне резкого температурного градиента. Однако неоднородность влияет на изменение градуировочной характеристики только в том случае, если она попадает в зону температурного градиента при измерении. Чем больше градиент температуры, тем больше погрешность, возникающая из-за неоднородности.

Один из способов уменьшения данной погрешности — это более плавное изменение температуры на длине термоэлектрода, для чего, например, можно использовать металлические рукава и чехлы.

5. Электрическое шунтирование проводников изоляцией и возможное возникновение гальванического эффекта [9].

6. Электрические шумы и помехи. Многие процессы термической обработки предусматривают нагрев металлов пропусканием электрического тока, что может приводить к

появлению погрешности, возникающей из-за наложения на термо-ЭДС падения напряжения на образце между точками приварки термопары.

При нагреве переменным током и возникновении синусоидальной помехи можно воспроизвести термическую кривую по серединам амплитуд пилообразной кривой, а также значительно повысить достоверность результатов измерений (рис. 8) [7].

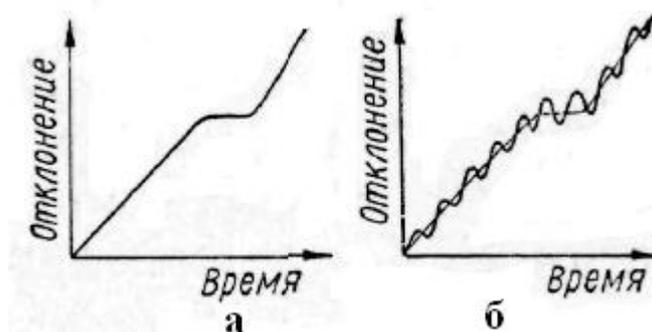


Рис. 8. Термическая кривая: без помех (а); с наложением помех переменного тока (б)

В этом случае с помехами борются с помощью электрических фильтров или увеличения частоты нагревающего тока до 1000–1500 Гц. При такой частоте в образцах диаметром 1,5–2,0 мм еще не сказывается поверхностный эффект, при этом переменная составляющая возможной помехи не оказывает влияния на результат измерения, т. к. ее максимальная частота составляет 600–800 Гц [7].

Первый способ дает удовлетворительные результаты при скорости нагрева до 2000 град/с и частоте нагревающего тока 50 Гц, поскольку в качестве фильтров используются конденсаторы большой емкости (200–1000 мкф) [7].

При использовании постоянного тока для нагрева образцов в термопаре также существуют помехи, поэтому необходимо использовать устройства для подавления помех. Пример такого устройства показан на рис. 9 [7].

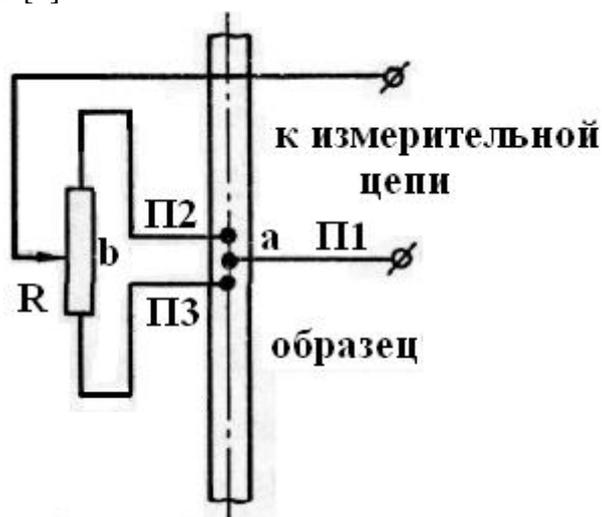


Рис. 9. Схема устройства для подавления помех

В этом устройстве термопара состоит из 3 проволок П1, П2 и П3, причем П2 и П3 выполнены из одного и того же материала и подключены к потенциометру  $R$ . После приварки термопары через образец пропускают небольшой переменный ток, усиливают и измеряют напряжение между точками  $b$  (ползунок потенциометра) и  $a$  (средний провод термопары). Затем с

помощью потенциометра добиваются эквипотенциальности точек  $a$  и  $b$ , т. е. доводят этот сигнал до нуля. Это позволяет значительно уменьшить помехи при последующем нагреве образца постоянным током [9].

**Заключение.** Проведенный авторами анализ позволяет минимизировать вклад погрешности в результаты измерений температуры в процессе поверхностной обработки, а также повысить достоверность результатов измерений. Приведенные способы уменьшения погрешности измерения температуры термопарой планируется использовать при проведении экспериментальных исследований химико-термической обработки стальных изделий с нагревом посредством пропускания электрического тока.

#### Библиографический список.

1. Секацкий, В. С. Методы и средства измерений и контроля: Учебное пособие / В. С. Секацкий, Н. В. Мерзликина. — Красноярск : ИПЦ СФУ, 2007. — 284 с.
2. Куинн, Т. Температура / Т. Куинн. — Москва : Мир, 1985. — 448 с.
3. Глухов, Д. А. Технические измерения и приборы: учебное пособие / Д. А. Глухов. — Воронеж : Воронежская государственная лесотехническая академия, 2009. — 251 с.
4. Морозова, И. М. Методы и средства измерения температуры: Учебное пособие / И. М. Морозова, Е. В. Тархова, Е. В. Кононенко. — Екатеринбург : Уральский институт государственной противопожарной службы МЧС России, 2008. — 84 с.
5. Коленко, Е. А. Технология лабораторного эксперимента: Справочник / Е. А. Коленко. — Санкт-Петербург : Политехника, 1994. — 751 с.
6. Кузнецов, Г. В. Численная оценка погрешности измерений температур в условиях локального неидеального контакта спая термопары и материала / Г. В. Кузнецов, К. М. Мухамадеев // Известия Томского политехнического университета. — 2009. — № 4. — С. 12–16.
7. Черепин, В. Т. Экспериментальная техника в физическом металловедении / В. Т. Черепин. — Киев : Техніка, 1968. — 280 с.
8. Кулаков, М. В. Измерение температуры поверхности твердых тел / М. В. Кулаков, Б. И. Макаров. — Москва : Энергия, 1979. — 96 с.
9. Гарсия, В. Измерение температуры: теория и практика // В. Гарсия / Современные технологии автоматизации. — 1999. — №1. — С. 82–87.
10. Каржавин, В. А. Влияние термоэлектрической неоднородности на точность измерения температуры термопарами: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. А. Каржавин. — Обинск, 2010. — 20 с.