

Графический интерфейс разработан самостоятельно и прошит в памяти НМІ (рис. 2).

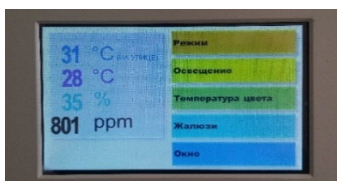


Рисунок 2 – Дисплей управления «Умной аудиторией»

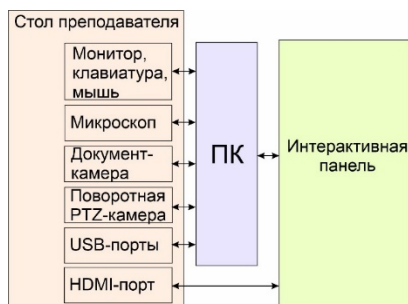


Рисунок 3 – Структурная схема рабочего стола и системы отображения информации

Рабочий стол преподавателя оснащен монитором на подвижном кронштейне, клавиатурой, мышкой, микроскопом с цифровым интерфейсом, документ-камерой (разработана самостоятельно), поворотной PTZ-камерой (для проведения онлайн

конференций), выдвижной панелью с розетками, USB и HDMI портами (рис. 3).

Дополнительный HDMI порт позволяет преподавателю использовать свой ноутбук для проведения занятий.

Для качественного отображения учебных материалов, результатов научных исследований и моделирования в формате 3D использована интерактивная панель.

Учебная аудитория по экспериментальному проекту «Умный класс» реализована на приборостроительном факультете Белорусского национального технического университета.

Литература

1. Адаптивный светильник для «умной» аудитории // Новые направления развития приборостроения: материалы 15-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов (20–22 апреля 2022 г.) / Ю. Д. Сороко [и др.]. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 46–47.

2. Адаптивное освещение в «умной» аудитории // Новые направления развития приборостроения: материалы 15-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов (20–22 апреля 2022 г.) / Сороко, Ю.Д. [и др.]. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 47–48.

УДК 681.2.08

КОМПЛЕКСНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМО-ЭДС ТЕРМОПАР

Мороз А.С., Тьявловский А.К.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данном докладе рассмотрены причины изменения и возможности компенсации дрейфа термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС) термопары типа ТХА (тип К) при долговременных измерениях температуры. Компенсация изменения термо-ЭДС обеспечивается за счет обработки нормирующим преобразователем сигналов термопары большей выборки и сравнения результатов измерения при применении двух и более датчиков, но с разным сечением измерительных проводников и разными типами термопар.

Ключевые слова: термопара, преобразователь, датчик.

COMPLEX COMPENSATION OF CHANGES IN THE THERMAL EMF OF THERMOCOUPLES

Moroz A., Tyavlovsky A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This report, the reasons for the change and the possibility of compensation for the drift of the thermoelectromotive force (thermo-EMF) of a thermocouple of type TNA (type K) during long-term temperature measurements are considered. Compensation of changes in the thermo-EMF is provided by processing a larger sample of thermocouple signals by a normalizing converter and comparing the measurement results when using two or more sensors, but with different cross-sections of measuring conductors and different types of thermocouples.

Key words: thermocouple, converter, sensor.

Адрес для переписки: Мороз А.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: artur.moroz.97@mail.ru

Термопара хромель-алюмель ТХА (тип К) – самая распространенная в промышленности. В термопарах ТХА наблюдаются два вида нестабильности термоЭДС: необратимая нестабильность постепенно накапливающаяся со временем

(длительная, кумулятивная), и обратимая нестабильность (циклическая, кратковременная) [1].

Необратимая нестабильность термопары типа ТХА в основном подвержена взаимодействию с окружающей средой. Особенно заметно

изменение термоЭДС при работе термопар ТХА при температурах, начиная с $\sim 600^\circ\text{C}$ в течении ~ 1000 ч.

Стабильность в окислительных средах. При эксплуатации термопары типа ТХА на воздухе и в других окислительных средах (особенно с высоким содержанием кислорода) наблюдается необратимое возрастание ее термо-ЭДС. Только в некоторых случаях при 500°C наблюдается отсутствие дрейфа термо-ЭДС. Величина дрейфа термо-ЭДС растет с увеличением температуры и времени эксплуатации, график изменения представлены на рис. 1 [1].

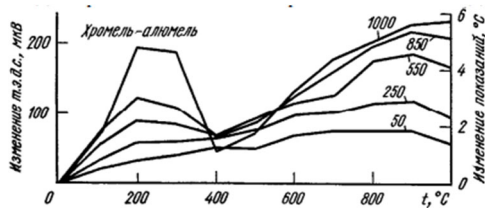


Рисунок 1 – Изменение градуировочной характеристики термопары хромель–алюмель (ТХА) и ее термоэлектродов в результате нагрева на воздухе при 1000°C (диаметр электродов 3,2 мм).

Исходная градуировка ось абсцисс.

Цифры у кривых – время, ч. [1]

Обратимая нестабильность термопары типа ТХА в основном обусловлена протеканием в хромеле превращений по типу ближнего упорядочения в интервале температур $250\text{--}550^\circ\text{C}$. В результате этих превращений термопары типа ТХА после нагревания до $250\text{--}550^\circ\text{C}$ увеличивают термоЭДС. Этот рост термоЭДС исчезает после прохождения верхнего предела упорядочения хромеля ($\sim 550^\circ\text{C}$). Такое обратимое изменение термоЭДС всегда имеет место, если температура горячего спая выше 250°C , и наблюдается даже тогда, когда она превосходит верхний температурный предел упорядочения ($\sim 550^\circ\text{C}$), так как на дрейф термоЭДС оказывает влияние участок термопары $250\text{--}550^\circ\text{C}$ [1].

Величина обратимого дрейфа зависит от предыдущей истории термоэлектродов, температур градуировки, скорости охлаждения, а также от градиента температурного поля в котором находится термопара. Обратимый дрейф очень трудно отличить от необратимой нестабильности термоЭДС. При использовании классических методов измерения и нормализации значений термоЭДС, практически невозможно исключить обратимый дрейф (влияние порядка $3\text{--}5^\circ\text{C}$ на конечный результат измерений).

Подобные исследования изменения термоЭДС неоднократно отмечались в различных исследованиях, например [2].

Методы компенсации изменения термо-ЭДС. Обратимые нестабильности термоЭДС термопар возможно компенсировать применением

микроконтроллерного нормирующего преобразователя температуры (НПТ) с возможностью длительного хранения результатов измерения и часами реального времени ведущие журнал измерений. Используя полученные данные в автоматическом режиме возможна последующая математическая обработка результатов измерений и мгновенное внесение компенсирующих коэффициентов обратимую нестабильность термопары. Также повышение точности компенсации обеспечит построение соответствующего полинома для нормализации значений термоЭДС (обычно для нормализации значений используется аппроксимация табличных значений, что негативно влияет на точность измерений).

Практические советы по измерительной части НПТ можно получить в [3].

Совместное применение нескольких термопар с переменной коммутацией на один измерительный вход НПТ для исключения погрешности самого измерительного и нормирующего тракта. При установке нескольких термопар с различным сечением проводников будет разное время изменения градуированной характеристики с возможно введение специальных алгоритмов усреднения показаний датчиков для достижения меньшей погрешности измерения температуры, а также введения статистики измерений позволит опираться на доверенное значение погрешности.

При помещении нескольких измерительных спаев термопар в условия одинаковой температуры возможна их калибровка в 0 относительно друг друга программным методом. Этим методом также можно на некоторое время добиться точности на уровне эталонных измерителей температуры в случае калибровки на нескольких реперных точках температуры.

При необходимости многоточечного мониторинга процесса, протекающего при высоких температурах (более 800°C), можно использовать относительно дешевые термопарами типа ТХА, а повышение точности компенсации необратимого дрейфа термоЭДС обеспечить совместны применении термопары платиновой группы ТПП (Тип S), которая позволит отслеживать и компенсировать долговременный дрейф группы термопар, что сильно удешевит систему без потери точности измерения.

Применение продвинутых нормирующих преобразователей температуры (НПТ) для измерения термоЭДС термопар с использованием программных методов компенсации дрейфа позволяет исключить значительные погрешности измерения температуры (в полном диапазоне температур термопары типа ТХА до $\sim 15^\circ\text{C}$ в первые 1000 часов работы) и обеспечивать компенсацию от обратимых изменений температуры (в среднем до

~3–5°C) ведением журнала измерений в реальном времени.

Совместное применение нескольких термопар, с разным временем изменения градуированной характеристики дрейфа термоЭДС при одинаковой измерительной температуре позволяет сопоставлять результат измерений и внести поправочный коэффициент дрейфа термоЭДС при нормировании сигналов термопар. Это позволяет добиться повышения надежности измерительной системы и увеличивает достоверную выборку результатов измерений.

Литература

1. Рогельберг, И. Л. Сплавы для термопар. Справочник / И. Л. Рогельберг, В. М. Бейлин. – М., Металлургия, 1983. – 360 с.
2. Hysteresis Effects and Strain-Induced Homogeneity Effects in Base Metal Thermocouples / Iñigo González de Arrieta [et al.] // Int J Thermophys. – 2015. – Vol. 36. – P. 467–481.
3. Keysight Technologies Практические советы по измерению температуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://etk-komplekt.ru>. – Дата доступа: 25.10.2022.

УДК 620.179.14/15

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ НЕОДНОРОДНОСТИ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ АДДИТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ МАГНИТОШУМОВЫМ МЕТОДОМ

Бусько В.Н.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. При изготовлении аддитивных материалов, как правило, возникает значительная неоднородность свойств по поверхности. Степень неоднородности зависит от методов и режимов получения 3D-материалов, характеристик лазера и металлических порошков, последующих обработок и др. факторов. Цель работы – магнитошумовым методом выявить и оценить степень неоднородности свойств по длине образцов стали 09Г2С, полученных методом селективного лазерного сплавления с разными последующими режимами термообработок, и с помощью литья. Установлено, что трехмерные отожженные, нормализованные, а также литые образцы по степени неоднородности значительно отличаются между собой, причем, нормализация резко снижает остаточные напряжения и приводит к снижению степени неоднородности. Результаты показали возможность оценки и контроля степени неоднородности аддитивных материалов магнитошумовым методом.

Ключевые слова: степень неоднородности, аддитивные технологии и материалы, магнитошумовой метод, физические и механические свойства, стальные образцы.

ASSESSMENT OF STATE HETEROGENEITY OF ADDITIVE MATERIAL SAMPLES BY MAGNETIC NOISE METHOD

Busko V.

*Institute of Applied Physics of Belarus National Academy of Sciences
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. In the manufacture of additive materials, as a rule, there is a significant heterogeneity of properties in surface and depth. The degree of heterogeneity depends on the methods and modes of obtaining 3D materials, the characteristics of the laser and metal powders, subsequent treatments, and other factors. The purpose of the work is to detect and evaluate the degree of heterogeneity of FMS by the length of 09G2S steel samples obtained by selective laser fusion method under different thermal treatments and by casting. It was found that three-dimensional annealed, normalized, as well as cast samples differ significantly in the degree of heterogeneity among themselves, moreover, normalization sharply reduces residual stresses and leads to a decrease in heterogeneity. The results showed the possibility of evaluating and controlling the degree of heterogeneity of additive materials by the magnetic noise method.

Key words: degree of heterogeneity, additive technologies and materials, magnetic noise method, physical and mechanical properties, steel samples.

*Адрес для переписки: Бусько В.Н., ул. Академическая, 16, Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: busko@iaph.bas-net.by*

Благодаря применению инновационных аддитивных технологий (АТ) в последнее время происходит резкий рост объемов производства 3D-изделий/деталей и интенсивное внедрение их в различные отрасли промышленности (особенно, в

машиностроении, авиакосмической отрасли и ракетостроении, строительстве, медицине) [1].

В трехмерных изделиях ввиду отличного от традиционных способов их получения (литье, ковка, штамповка, фрезерование и др.), более