

На правах рукописи



Абуеллаиль Ахмед Али Сабри Ахмед Рефаат

**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛОВ
ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СКВАЖИН**

Специальность:

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ,
материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Солдатов Алексей Иванович

**Официальные
оппоненты:**

Зусв Лев Борисович,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт физики прочности и
материаловедения Сибирского отделения
Российской академии наук, заведующий
лабораторией физики прочности (г.Томск).

Смирнов Геннадий Васильевич,
доктор технических наук, профессор кафедры
радиоэлектронных технологий и экологического
мониторинга федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники».

Защита диссертации состоится «22» декабря 2020 года в 17:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 502.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: dis.tpu.ru

Автореферат разослан «14» ноября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Шевелева Е.А.

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность работы

Наличие дефектов в металлах и сплавах приводит к ухудшению их коррозионной стойкости и сокращению сроков эксплуатации металлических конструкций. Поэтому, регулярный мониторинг для своевременного обнаружения дефектов позволят предотвратить не только несчастные случаи на производстве, но и техногенные катастрофы, сохранить жизнь и здоровье обслуживающего персонала. Наиболее трудоемким процессом является неразрушающий контроль металлических изделий для геодезических скважин, особенно если он проводится на работающем оборудовании, поэтому не все методы неразрушающего контроля пригодны для проверки используемых изделий. Наиболее перспективным методом можно считать термоэлектрический, который позволяет проводить неразрушающий экспресс-контроль металлов и сплавов как в процессе производства так и в процессе эксплуатации. Однако, серийно выпускаемые в настоящее время термоэлектрические дефектоскопы не обладают высокой надежностью и воспроизводимостью результатов контроля. Это обусловлено наличием переходного сопротивления при контакте электрода с образцом, изменением температуры горячего электрода в процессе контроля, зависимостью термоЭДС от разности температур между горячим и холодным электродом, площади контакта горячего электрода с образцами и т. д. Эти проблемы термоэлектрического контроля отражены в работах K. Uchida et. al., Hu and P.V. Nagy, Лухвич А. А. и Шарандо В.И.

Кроме того, анализ литературы показал, что до сих пор не проводилось исследований электрических характеристик источников термоЭДС.

При производстве геодезического оборудования скважин наиболее часто используются две марки стали: сталь 40Х и сталь 35ХГСА, из которых изготавливаются различные изделия: шестерни, плунжеры, штоки, коленчатые и кулачковые валы и другие детали повышенной прочности. Эти стали представляют собой легированную структуру, которая содержит карбиды, и которые имеют собственные термоэлектрические свойства. Поэтому при термоэлектрическом контроле подобных структур конечный результат будет зависеть от эквивалентной термоЭДС.

Цель диссертационной работы: исследовать электрические характеристики эквивалентной термоЭДС, получаемой в результате многоточечного контакта электрода с тестируемым образцом при неразрушающем экспресс-контроле легированных сталей, для создания компактного дефектоскопа.

Достижение поставленных целей требует решения следующих **основных задач:**

1. Разработать математическую модель для расчета эквивалентного источника термоЭДС, получаемую при многоточечном контакте электродов с контролируемым образцом.

2. Провести исследования электрических характеристик различных типов термоэлектрических источников ЭДС.
3. Определить степень влияния на эквивалентную термоЭДС, получаемую при многоточечном контакте электродов с контролируемым образцом, различных источников термоЭДС.
4. Изучить термоэлектрические свойства легированных сталей 35ХГСА и 40Х.
5. Разработать макет устройства для термоэлектрического контроля легированных сталей и провести его испытания.

Научная новизна работы. По результатам работы были получены следующие новые научные знания:

1. Разработана модель, на основе метода наложения, для исследования электрических характеристик эквивалентного источника терморЭДС при параллельном соединении нескольких источников термоЭДС, возникающих при многоточечном контакте электрода с контролируемым образцом.
2. Исследованы электрические характеристики различных источников термоЭДС и эквивалентного источника термоЭДС при параллельном соединении различных типов источников термоЭДС.
3. Получены аналитические выражения на основе полинома Ньютона четвертой степени, позволяющие с погрешностью не более 6% описать нагрузочную характеристику источника термоЭДС в диапазоне температур от 100 до 300 градусов Цельсия
4. Выявлено, что при контроле легированных сталей необходимо обеспечить не менее 3 параллельно подключенных источников термоЭДС для получения эквивалентной термоЭДС с погрешностью не более 10% при нагрузке более 100 Ом при любом соотношении карбидной фазы.
5. Разработана экспериментальная установка для исследования характеристик источников термоЭДС, позволяющая проводить исследования в широком диапазоне температур.

Практическое значение.

1. Полученные аналитические выражения для описания нагрузочной характеристики источников термоЭДС могут быть использованы для определения влияния неоднородности и шероховатости поверхности металлов при термоэлектрическом контроле металлов.
2. Предложенный метод термоэлектрического контроля качества поверхностного слоя металла на основе многоточечного контакта, позволяет повысить достоверность и повторяемость результатов контроля.

Основные положения, подлежащие защите:

1. Модель, позволяющая определить характеристики эквивалентного источника термоЭДС при параллельном соединении различных типов источников термоЭДС.

2. Аналитические выражения на основе полинома Ньютона четвертой степени позволяют с погрешностью не более 6% описать нагрузочную характеристику источника термоЭДС в диапазоне температур от 100 до 300 градусов Цельсия.
3. При контроле легированных сталей с большим содержанием карбидной фазы, обладающих индивидуальными термоэлектрическими свойствами, необходимо обеспечить контакт со всеми типами источников термоЭДС. При этом наибольшее влияние на эквивалентную термоЭДС имеет источник с наименьшим внутренним сопротивлением.

Личный вклад автора:

Участие в постановке задач, разработка модели для расчета эквивалентного источника термоЭДС при многоточечном контакте, подготовке экспериментальной установки для исследования электрических свойств термоэлектрического источника энергии, исследовании характеристик разных типов источников термоЭДС, исследовании характеристик эквивалентной термоЭДС, получаемой при параллельном соединении различных их типов, и получении аналитических выражений для описания нагрузочной характеристики источника термоЭДС.

Апробация работы и публикации.

Материалы, включенные в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Инженерия для освоения космоса IV Всероссийского молодежного Форума с международным участием, 12-14 апреля 2016 г., Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск.
- VII Научно – практическая конференция «Информационно – измерительная техника и технологии» с международным участием, 25-28 мая 2016г., Томский государственный университет, Томск.
- 2016 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016; National Research University "Higher School of Economics", 12 May 2016, Москва.
- Информационно-измерительная техника и технологии: VII научно-практической конференции, 25–28 мая 2016 г., Томский политехнический университет, Томск.
- Неразрушающий контроль: VI Всероссийской научно-практической конференции «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». 23– 27 мая 2016 г., Томский политехнический университет, Томск.
- Международная конференция «Когнитивная робототехника», 7-10 декабря 2016 г., Томский государственный университет, Томск.
- IX ежегодная студенческая научно-практическая конференция «Приборостроение и информационные технологии», 8 декабря 2016 г. ОНИИП, Омск.

- V International Forum for Young Scientists “Space Engineering,” Томский политехнический университет, Томск.
- Международная IEEE-сибирская конференция по управлению и связи (SIBCON-2017), 29–30 июня 2017 г., Астана, Республика Казахстан.
- Всероссийской молодежной научной школы по инновациям в неразрушающем контроле SibTest, 27–30 июня 2017г., Томский политехнический университет, Томск.
- II Международная конференция школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых, 08 – 12 октября 2013 г., Томский политехнический университет, Томск.
- 11th International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2017; Tomsk; Russian Federation; 4 December 2017 through 6 December 2017.
- Научная сессия ТУСУР–2018: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 16–18 мая 2018 г
- Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. Науч.-техн. конф. молодых специалистов (Томск, 12-13 апр. 2018г.) / АО «НПЦ Полус».

Публикации. Основные результаты диссертационных исследований опубликованы в 15 научных работах, из них работ опубликованных в рецензируемых журналах (из перечня ВАК) – 2, индексируемых в базах Scopus и Web of science – 7, в материалах конференций опубликовано – 6 работ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Объем диссертации составляет 128 страниц, 69 рисунков и 3 таблицы. Список использованных источников содержит 105 наименований.

Введение показывает актуальность работы, сформулированы цели и задачи работы, ее научную новизну и практическое значение, а также положения, выдвигаемые для защиты.

В первой главе проведен анализ современного состояния неразрушающих методов контроля металлов и сплавов. Широкое распространение получил рентгенографический метод неразрушающего контроля, который включает использование рентгеновских или гамма-лучей для просмотра внутренней структуры объекта. По сравнению с другими методами контроля, рентгенография имеет несколько преимуществ - не требует специальной подготовки поверхности, имеет высокую повторяемость результатов, может использоваться на различных материалах, а собранные данные могут быть сохранены для последующего анализа. Однако использование опасного для здоровья человека излучения ограничивает

сферу применения только в специализированных помещениях. Не менее широкое применение нашел ультразвуковой метод контроля. При использовании многоэлементных решеток можно получить 2D или 3D изображение внутренней структуры объекта контроля. Однако, при использовании ультразвукового метода необходима подготовка поверхности и наличие хорошего акустического контакта. Кроме того, материалы с высоким затуханием упругих волн не поддаются ультразвуковому контролю. Среди других, менее распространенных методов, можно отметить магнитный, тепловой и термоэлектрический методы контроля. Из рассмотренных методов только термоэлектрический метод чувствителен к химическому составу объекта контроля.

Недостатки термоэлектрического метода связаны с низкой повторяемостью результатов контроля, что обусловлено изменением температуры горячего электрода и контролируемого изделия в процессе контроля за счет теплообмена, неоднородностью контролируемого образца по химическому и фазовому составу, разной шероховатостью поверхности и т.д. Для уменьшения влияния неоднородности по химическому и фазовому составу на результат контроля применяют электроды не с точечным контактом, а с линейным или плоскостным. При этом следует учитывать тот факт, что в действительности будет иметь место не плоскостной контакт, а многоточечный из-за наличия шероховатости поверхности, как электрода, так и контролируемого изделия (рис.1).

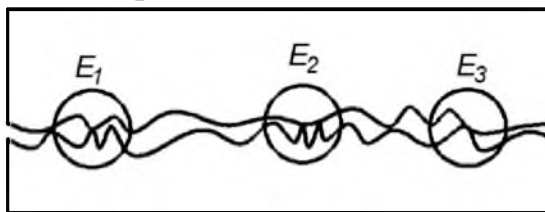


Рис. 1. Схема многоточечного контакта

При этом контролируется эквивалентная термоЭДС по поверхности контакта, получаемая в результате параллельного соединения различных термопар, которые могут иметь разные термоэлектрические характеристики: величину ЭДС, внутреннее сопротивление, мощность, а также переходное сопротивление контактов.

Вторая глава посвящена разработке математической модели и теоретическому исследованию метода термоэлектрических испытаний. В основу расчета электрических характеристик эквивалентного источника был взят метод наложения.

При разработке модели за основу была взята схема, содержащая несколько источников термоЭДС соединенных параллельно и подключенных к общей нагрузке (рис.3). Такая схема отражает многоточечный контакт, при котором в каждой точке контакта возникает источник термоЭДС. При этом с учетом неоднородности по химическому и фазовому составу поверхности

контролируемого образца, характеристики источников термоЭДС могут быть как одинаковыми, так и разными.

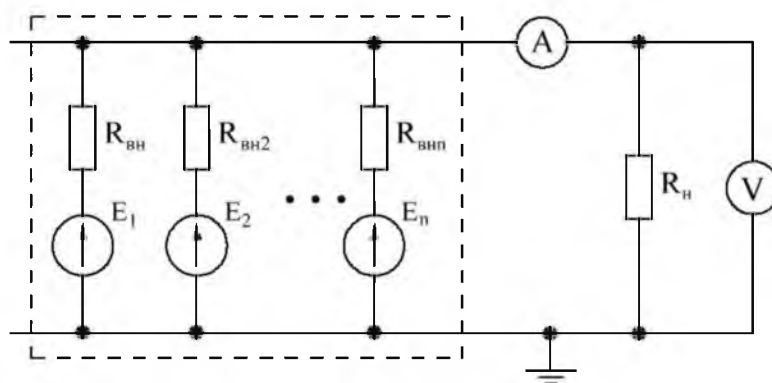


Рис. 3. Эквивалентная схема при многоточечном контакте испытуемого образца с электродом, $E_1, E_2, \dots, E_n$ - источники ЭДС, $R_{вн1}, R_{вн2}, \dots, R_{внn}$ - внутренние сопротивления источников термоЭДС

Алгоритм модели реализует вычисление токов от каждого источника термоЭДС на основе метода суперпозиции (для однотипных источников):

$$I = \frac{E}{R_{вн} + \left[(n-1) \frac{1}{R_{вн}} + \frac{1}{R_n} \right]^{-1}} \quad (1)$$

где n - количество источников термоЭДС, I - ток источника термоЭДС, E - ЭДС источника, $R_{вн}$ - внутреннее сопротивление источника, R_n - сопротивление нагрузки.

Если в схеме присутствуют разные типы источников, то необходимо учесть отличие их характеристик:

$$I_1 = \frac{E_1}{R_{вн1} + \left[(n_1-1) \frac{1}{R_{вн1}} + n_2 \frac{1}{R_{вн2}} + \frac{1}{R_n} \right]^{-1}} \quad (2)$$

$$I_2 = \frac{E_2}{R_{внn_{вн}} + \left[n_2 \frac{1}{R_{вн1}} + (n_2-1) \frac{1}{R_{вн2}} + \frac{1}{R_n} \right]^{-1}} \quad (3)$$

где n_1, n_2 - количество источников термоЭДС первого и второго типа соответственно, I_1, I_2 - ток источников термоЭДС первого и второго типа соответственно, E_1, E_2 - ЭДС источников первого и второго типа соответственно, $R_{вн1}, R_{вн2}$ - внутренние сопротивления источников первого и второго типа соответственно, R_n - сопротивление нагрузки.

Соответственно, ток, протекающий через нагрузку I_{L_n} , от каждого типа источников:

$$I_{н1} = \frac{E_1 - (I_1 \times R_{вн1})}{R_n} \quad (4)$$

$$I_{н2} = \frac{E_2 - (I_2 \times R_{вн2})}{R_n} \quad (5)$$

Ток, протекающий в нагрузке, является суммой всех I_{hi} :

$$I_n = \sum_1^{n_1} I_{н1} + \sum_1^{n_2} I_{н2} \quad (6)$$

Напряжение на нагрузке равно:

$$V_H = I_H \times R_H \quad (7)$$

Программное обеспечение было разработано на основе программного пакета NI LabVIEW. Оно позволяет рассчитать характеристику эквивалентного источника при параллельном соединении бесконечного числа термоэлектрических источников, которые могут иметь как одинаковые, так и различные характеристики.

Интерфейс, показанный на рис.4, включает в себя пять вкладок различных функциональных задач. Вкладка «Read» предназначена для запуска файла из базы данных, который содержит экспериментальные данные об источниках термоЭДС. Вкладка «Adding New Type» служит для добавления данных нового источника термоЭДС. Вкладка «Edit» предназначена для редактирования исходных значений в базе данных в случае обнаружения ошибки. Вкладка «Delete» предназначена для удаления последних 6 столбцов недавно добавленных данных. Вкладка «Simulate» отвечает за расчет и представление результатов. Она содержит функциональные кнопки, такие как «Temperature» для задания температуры, и «Number of type X», чтобы выбрать желаемое количество источников термоЭДС, которые необходимо исследовать.

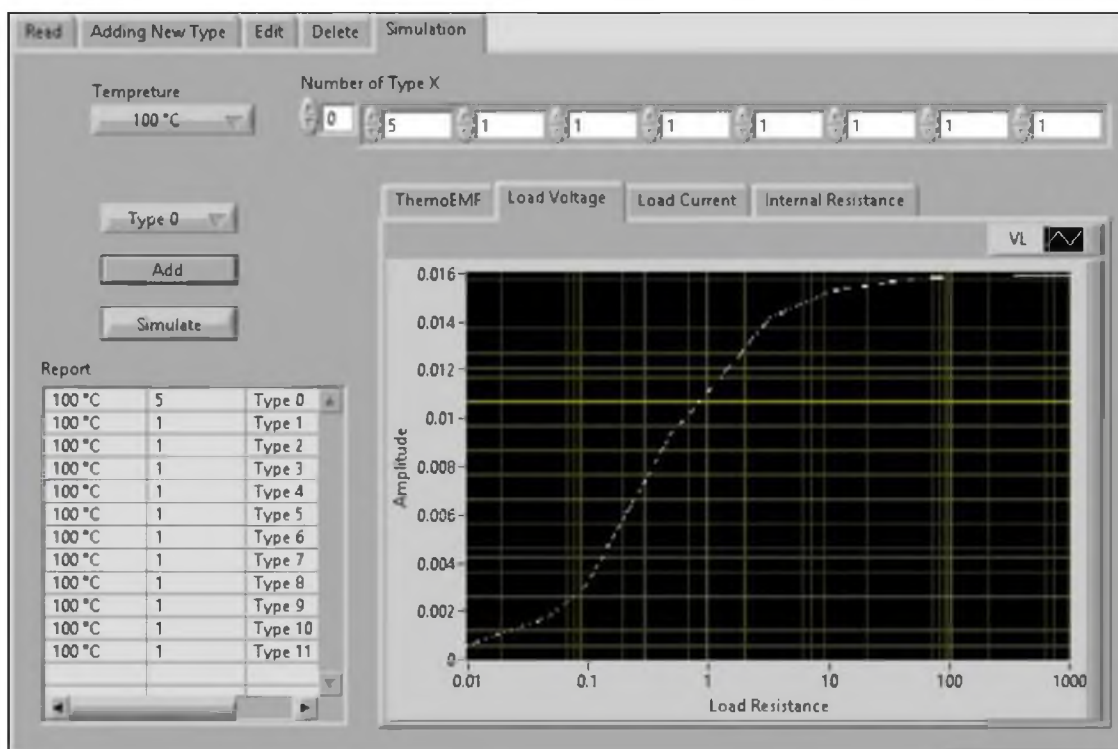


Рис. 4. Интерфейс программного обеспечения программы; вкладка «Simulate»

После настройки входных данных в соответствии с условием исследования программа отображает рассчитанные выходные данные, такие как: зависимость напряжения нагрузки «VL», тока нагрузки, внутреннего сопротивления и эквивалентной термоэдс от сопротивления нагрузки «RL»

(рис.4). Кнопка «Add» служит для добавления дополнительных источников термоЭДС к предыдущим расчетам. Кнопка «Simulate» служит для запуска процесса моделирования. Результат моделирования сохраняется во временном файле, который должен быть указан на вкладке «Read». Поле «Report» служит для отображения количества используемых термопар.

Для проверки предложенной модели необходим набор экспериментальных данных, отражающих электрические характеристики типичных источников термоЭДС и их комбинации. В качестве экспериментальных источников термоЭДС были выбраны термопары: хромель-алюмель и нихром-константан.

ТермоЭДС измеряли для различных значений сопротивления нагрузки, в то время как температура термопары поддерживалась постоянной. Зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки для термопары хромель-алюмель показана на рис.6.а. На рисунке 6.б показана та же зависимость для термопары нихром-константан. Изменяя температуру в термокамере, получаем семейство характеристик для источника термоЭДС (рис.5).

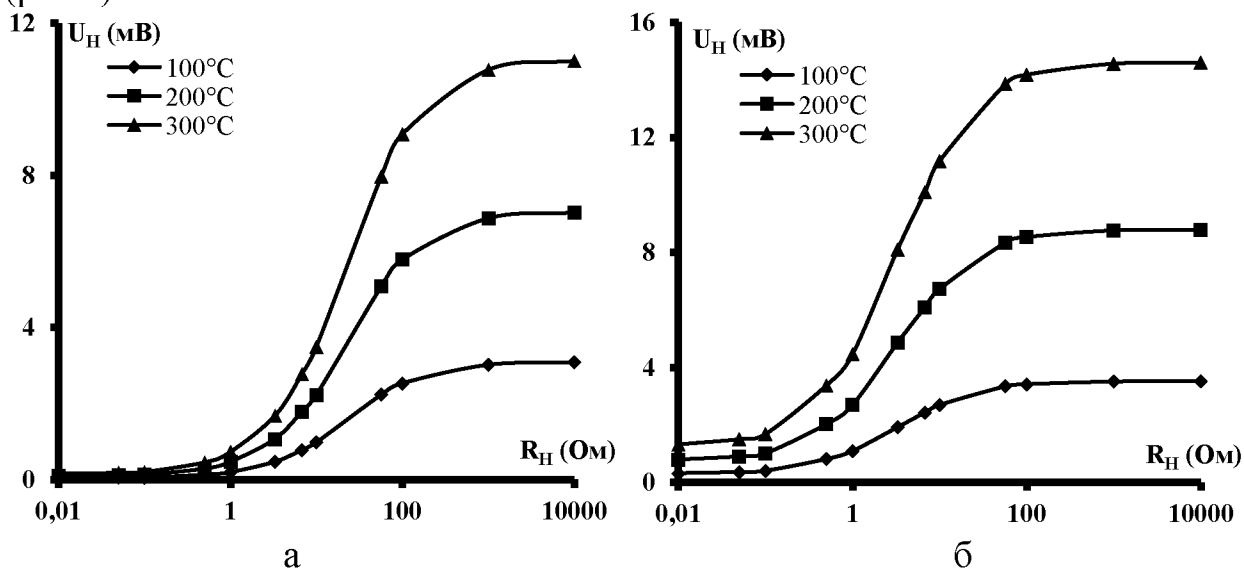


Рис.5. Зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки для температур 100, 200 и 300 °С, (а) - термопара хромель-алюмель, (б) - термопара нихром-константан

Используя полученные данные, были рассчитаны внутренние сопротивления двух источников термоЭДС для различных значений сопротивления нагрузки. В соответствии с рис.5 напряжение холостого хода будет совпадать с ЭДС источника термоЭДС, а сумма падений напряжения на внутреннем сопротивлении источника термоЭДС и на нагрузке будет равна ЭДС источника. Исходя из этого:

$$R_{вн} = R_H \left(\frac{U_{xx} - U_H}{U_H} \right), \quad (8)$$

где R_H – сопротивление нагрузки, U_H – напряжение на нагрузке, измеренное вольтметром, U_{xx} – напряжение холостого хода, в качестве которого

использовалось напряжение при нагрузке 10 кОм, которое на три порядка превышает внутреннее сопротивление источника термоЭДС.

Пример зависимости внутреннего сопротивления источника термоЭДС от сопротивления нагрузки показан на рис. 6.а для термопары хром-алюмель и на рис. 6.б для термопары нихром-константан. Анализ рисунка 6 позволяет сделать вывод, что в режиме короткого замыкания внутреннее сопротивление термопары стремится к нулю, а в режиме холостого хода оно составляет 22 Ом для термопары хромель-алюмель и 3,1 Ом для термопары нихром-константан.

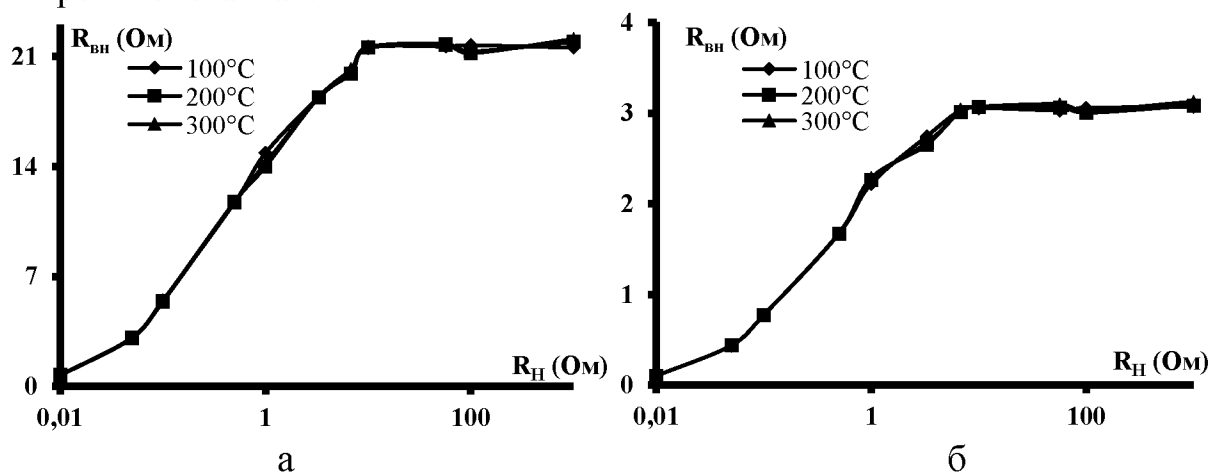


Рис.6. Зависимость внутреннего сопротивления источника термоЭДС от сопротивления нагрузки для температур 100, 200 и 300 °С, (а) - термопара хромель-алюмель, (б) - термопара нихром-константан

Кроме того был произведен расчет зависимости внутреннего сопротивления от тока:

$$R_{вн} = \frac{U_{xx} - U_H}{I} \quad (9)$$

где I – ток в цепи, U_{xx} – напряжение холостого хода, U_H – напряжение, измеренное вольтметром на нагрузке.

Полученная зависимость показана на рис.7. На рис.7.а - для термопары хромель-алюмель и на рис.7.б - для термопары нихром-константан.

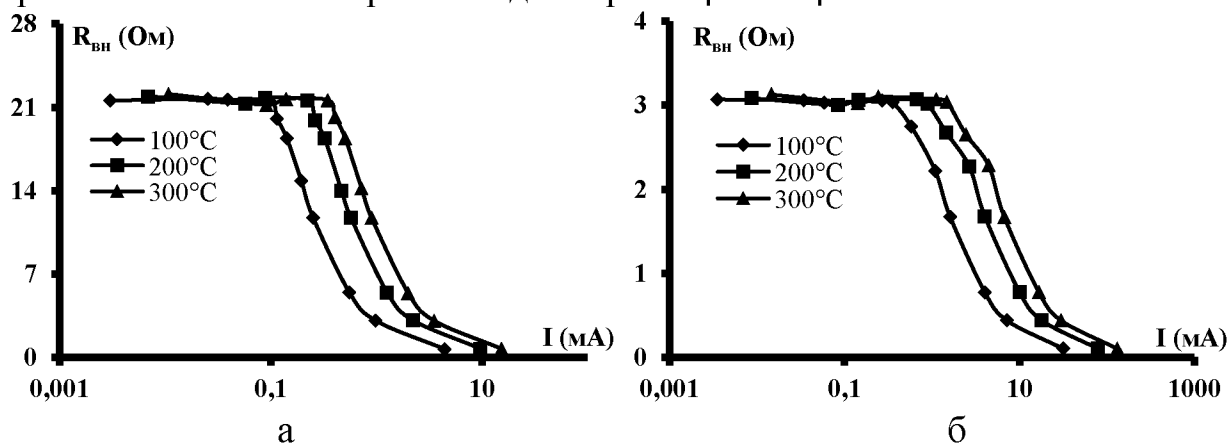


Рис.7. Зависимость внутреннего сопротивления от тока для температур 100, 200 и 300 °С, (а) - термопара хромель-алюмель, (б) - термопара нихром-константан

Анализ полученной зависимости показывает, что при увеличении тока нагрузки внутреннее сопротивление падает с 22 Ом при токе нагрузки менее 0,1 миллиампера до 0,6 Ом при токе более 4 миллиампер. В режиме номинальной нагрузки (менее 0,1 мА для обоих типов термопар) внутреннее сопротивление не изменяется.

Другой важной характеристикой источника термоЭДС является его вольт-амперная характеристика, которая показана на рис.8 для обеих термопар. Расчет вольт-амперных характеристик проводился в соответствии с выражением:

$$E_{\text{ЭДС}} = I * R_{\text{вн}}, \quad (10)$$

где I – ток в цепи, $R_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление источника термоЭДС, $E_{\text{ЭДС}}$ – напряжение источника термоЭДС.

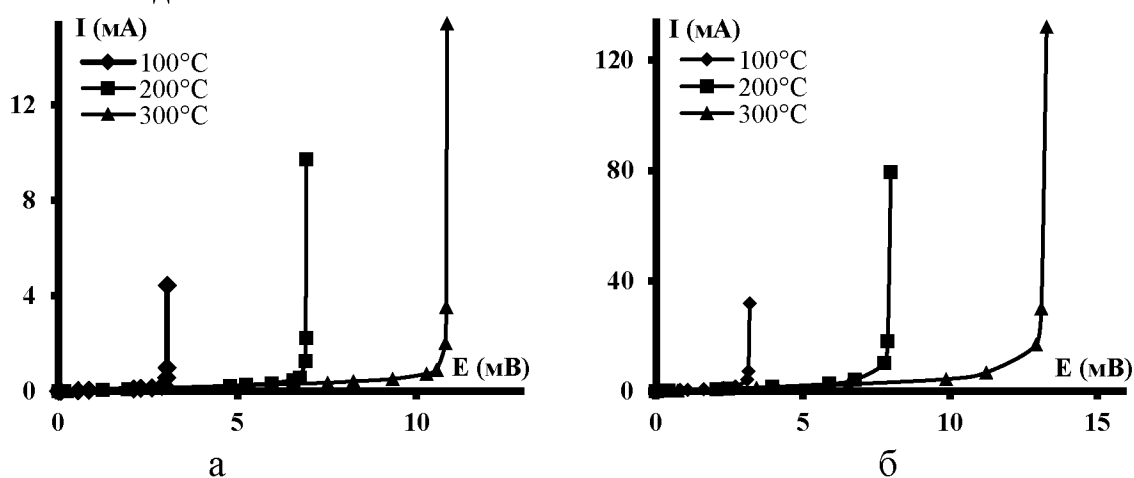


Рис.8. Вольт-амперная характеристика для температур 100, 200 и 300 °С, (а) - термопара хромель-алюмель, (б) - термопара нихром-константан

С использованием полученных экспериментальных данных на основе полинома Ньютона были получены аналитические выражения, описывающие характеристики источников термоЭДС. Для интерполяционного полинома Ньютона существует компактный и эффективный алгоритм для объединения членов при нахождении коэффициентов полинома. Это важно для того, чтобы найти общую формулу, которая описывает различные кривые, полученные из экспериментальных данных, а также найти коэффициенты уравнения для всех полученных характеристик. В рассматриваемом случае для описания характеристик был взят полином Ньютона четвертой степени, что позволит обеспечить отклонение расчетных зависимостей от экспериментальных не более 6%. Кроме того, для получения более точного описания характеристики экспериментальная кривая была разделена на кусочную функцию, описываемую в двух диапазонах, как показано в выражении (11) и на рисунке 9, где показаны результирующие кривые. Полученные характеристики отличаются от экспериментальных не более 6%.

$$U(t) = \begin{cases}
 \begin{aligned}
 &(-4.53 \times 10^{-13} * t^2 - 3.68 \times 10^{-10} * t - \\
 &1.64 \times 10^{-9})R_H^4 + (1.77 \times 10^{-10} * t^2 + \\
 &1.43 \times 10^{-7} * t + 6.64 \times 10^{-7})R_H^3 + \\
 &(-2.49 \times 10^{-8} * t^2 - 2.02 \times 10^{-5} * t - \\
 &9.16 \times 10^{-5})R_H^2 + (1.52 \times 10^{-6} * t^2 + \\
 &1.25 \times 10^{-3} * t + 4.85 \times 10^{-3})R_H + \\
 &(4.16 \times 10^{-6} * t^2 + 3.18 \times 10^{-3} * t + 0.02)
 \end{aligned} & 0 < R_H < 100 \\
 \\
 \begin{aligned}
 &(-4.37 \times 10^{-24} * t^2 - 3.66 \times 10^{-21} * t + \\
 &1.31 \times 10^{-20})R_H^4 + (6.70 \times 10^{-19} * t^2 + \\
 &5.57 \times 10^{-16} * t + 2.18 \times 10^{-15})R_H^3 + \\
 &(-1.85 \times 10^{-14} * t^2 - 3.31 \times 10^{-11} * t + \\
 &6.93 \times 10^{-10})R_H^2 + (1.70 \times 10^{-10} * t^2 + \\
 &5.79 \times 10^{-7} * t - 1.81 \times 10^{-5})R_H + \\
 &(3.82 \times 10^{-5} * t^2 + 0.03 * t + 0.09)
 \end{aligned} & 100 \leq R_H \leq 10000
 \end{cases} \quad (11)$$

где $U(t)$ - напряжение нагрузки, t - температура.

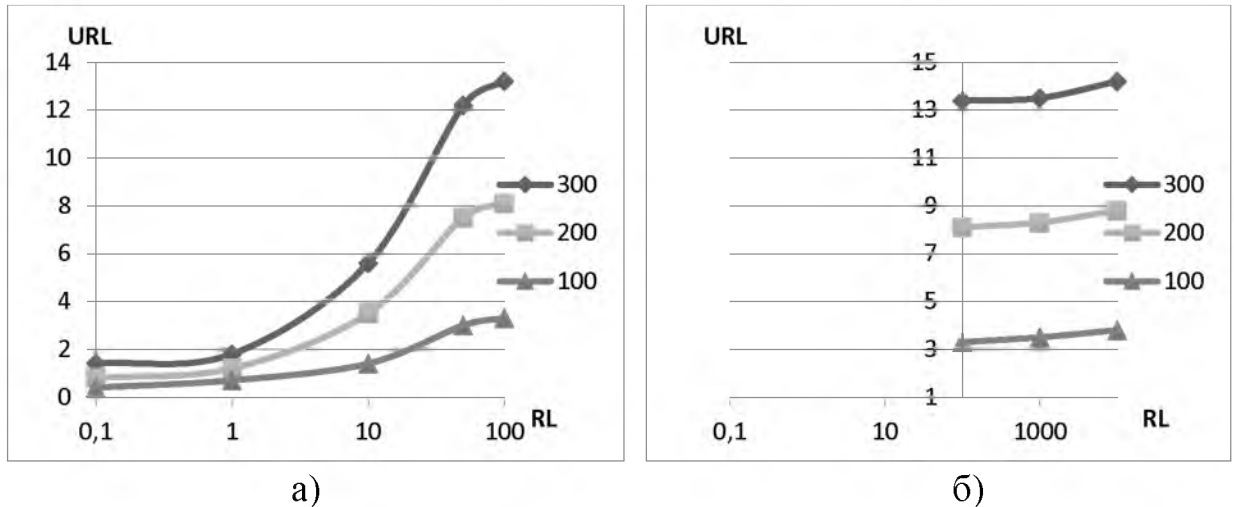


Рис.9. Зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки для параллельного соединения термопар хромель-алюмель и нихром-константан для температур 100°C, 200°C и 300°C; а) первый диапазон кусочной функции $U(t)$, б) второй диапазон кусочной функции $U(t)$

Верификация модели была выполнена путем сравнения результатов расчета напряжения на нагрузке «VL» для разного количества термопар с экспериментальными результатами. Для этого были использованы три различных типа термопар в качестве источников термоЭДС. Каждый тип был исследован в отдельности, получены их характеристики, которые использовались для дальнейшего теоретического исследования.

При легировании железа в структуре сплава появляются карбиды, которые имеют другие термоэлектрические характеристики по отношению к железу. Поэтому при контроле термоэлектрическим методом в месте контакта электрода с тестируемым изделием будет два типа источников термоЭДС, один образован железом, а другой карбидом. Эквивалентная термоЭДС будет определяться параллельным соединением этих двух типов источников. Количество источников будет зависеть от размеров электродов и шероховатости поверхности.

Анализ возможных комбинаций двух типов источников термоЭДС при термоэлектрическом контроле проведем с помощью модели. На рис.10 представлены результаты моделирования эквивалентного источника при параллельном соединении двух типов источников термоЭДС, отличающихся на 25% и 100% для различного их соотношения (1:1, 1:2, 1:6, 2:6, 10:20, 50:100 для линий 1, 2, 3, 4, 5 и 6 соответственно).

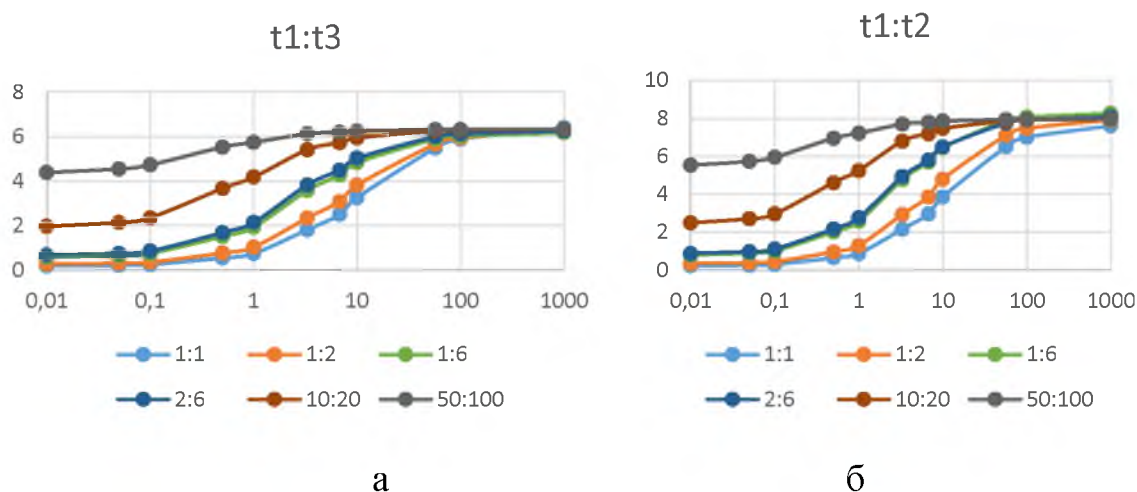


Рис.10. Зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки для эквивалентного источника, полученного параллельным соединением двух типов источников термоЭДС, отличающихся на 25% (а) и 100% (б); (1:1, 1:2, 1:6, 2:6, 10:20, 50:100 для линий 1, 2, 3, 4, 5 и 6 соответственно)

Анализ рис.10 показывает, что для отклонения эквивалентной термоЭДС не более 7% при нагрузке более 100 Ом необходимо иметь не менее 3 параллельно подключенных двух типов источников термоЭДС.

Следовательно, очень важно учитывать термоэлектрические характеристики различных химических соединений, которые находятся на поверхности испытуемого объекта, для получения высокой повторяемости результатов контроля.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований.

Для исследования электрических характеристик источников термоЭДС разработана экспериментальная установка, управляемая с компьютера. В состав установки входят термокамера, магазин сопротивлений,

прецизионный вольтметр, блок управления и персональный компьютер. Установка позволяет исследовать зависимость напряжения термоэлектродвижущей силы от сопротивления нагрузки и температуры нагрева электродов. Данные о термоЭДС, сопротивлении нагрузки и температуры электрода передаются в ПК, отображаются на экране монитора в графическом виде и сохраняются в базе данных. По этим данным рассчитываются внутреннее сопротивление и мощность источника термоЭДС.

Блок-схема экспериментальной установки, показанной на рис. 3.1, состоит из:

Термокамеры.

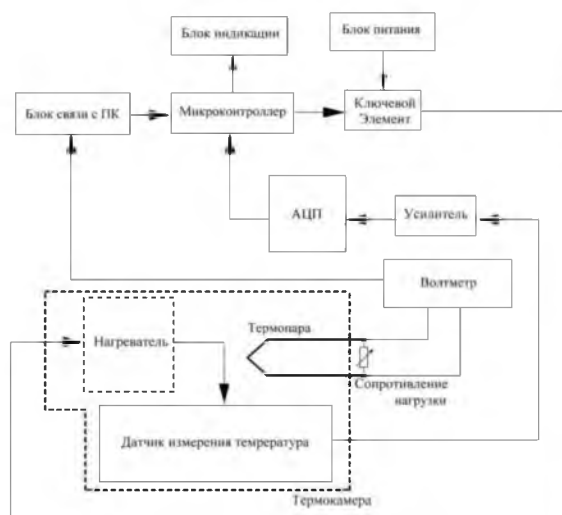
Блока управления термокамерой.

Нагрузки в виде магазина сопротивлений с номинальными значениями 0.1 Ом; 1 Ом, 10 Ом, 100 Ом, 1кОм, 10 кОм, 100 кОм и 1 Мом.

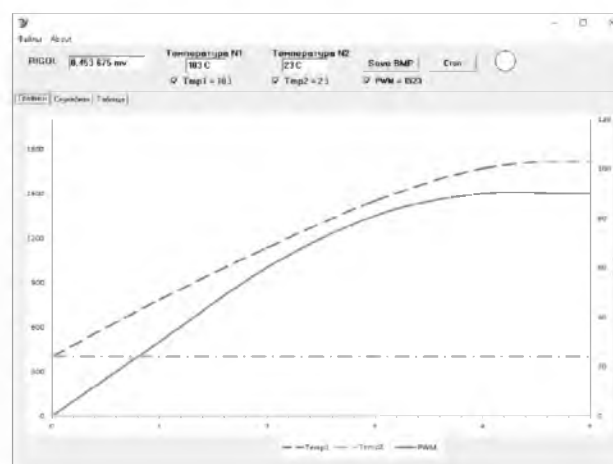
Измерительного прибора (прецизионный цифровой вольтметр).

Персонального компьютера.

Принципиальная схема блока измерения термоЭДС приведена на рис.11. ТермоЭДС электродов представлена на схеме в виде источника напряжения E с внутренним сопротивлением $R_{\text{вн}}$. Электрод помещают в термокамеру и изменяют температуру в интервале от 25 до 400°C. Для обеспечения стабильной температуры холодного спая, его помещают в сосуд с тающим льдом, для получения которого используют дистиллированную воду, получая тем самым температуру холодного спая близкого к 0°C. Источник термоЭДС создает ток в цепи, состоящей из источника термоЭДС, его внутреннего сопротивления и сопротивления нагрузки. Напряжение на нагрузке фиксируется милливольтметром, который соединен с персональным компьютером.



а



б

Рис.11. Структурная схема экспериментальной установки.

Измерение напряжения на нагрузке проводилось с помощью мультиметра Rigol DM3068, обозначенного символом V на рис. 11.а.

Интерфейс управления термокамерой разделен на несколько функционально различающихся закладок. На рис.11.б представлена основная закладка, которая используется для визуального контроля процесса изменения температуры в термокамере, температуры окружающей среды и величины управляющего воздействия, поступающего на ключевой элемент. Эти зависимости отображаются в центральном поле закладки. По оси абсцисс отложено время в секундах, по оси ординат слева – длительность управляющего воздействия в микросекундах, справа – температура в градусах Цельсия. В окне "RIGOL" отображаются текущие значения напряжения, измеренное вольтметром на нагрузке.

Для проверки теоретических исследований были подготовлены образцы из двух марок сталей: сталь 40Х и сталь 35ХГСА. Образцы подготовлены из прокатного материала толщиной 1 мм, которые исследовали вначале по отдельности, затем в смешанном виде. Было исследовано 10 образцов.

Исследование первого образца из стали 40Х относительно оловянной бронзы показало значение термоЭДС равной 30 мкВ. Исследования образцов из стали 35ХГСА показало значение термоЭДС равного 11 мкВ.

Дальнейшие обозначения: марка стали 40Х – материал А, марка стали 35ХГСА – материал Б, датчик – Д.

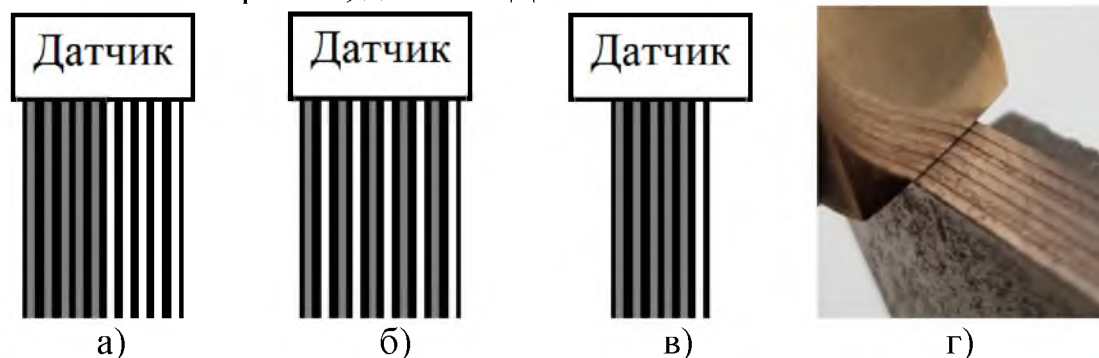


Рис.12 Условное расположение образцов при исследовании эквивалентной ТЭДС, серым цветом показан материал А, черным цветом – зазор, белым цветом – материал Б

На рисунке 12.а представлено измерение эквивалентной термоЭДС 10 образцов, в случае когда сгруппированы 5 образцов группы А и 5 образцов группы Б. В этом случае образуются источники термоЭДС между горячим электродом датчика (Д) и материалами А и Б: 5 источников термоЭДС А-Д и 5 источников термоЭДС Б-Д соединенных параллельно. Эквивалентная термоЭДС равно 22мВ. На рисунке 12.б показан пример поочередного расположения материалов А и Б. Эквивалентная термоЭДС такая же как и в случае на рисунке 12.а, и равна 22 мкВ. На рисунке 12.в измерению подвергли 5 образцов группы А и 1 образец из группы Б. Для этого случая эквивалентная термоЭДС равна 24 мкВ. Исследования сталей проводились относительно оловянной бронзы, как показано на рисунке 12.г. Бронза марки БрОФ6,5-0,15.

Результаты экспериментов подтвердили правильность проведенных теоретических исследований, которые осуществлялись дефектоскопом «Thermo Fitness Testing» (рис.13).



Рис.13. Внешний вид дефектоскопа «Thermo Fitness Testing»

Дефектоскоп разработан в «Национальном исследовательском «Томском политехническом университете» в отделении электронной инженерии. Имеет следующие технические характеристики: Напряжение питания - 220 В, 50 Гц; Температура датчика - 130° С; Точность поддержания температуры не хуже $\pm 2\%$; Пределы уставки порога при разбраковке от 1 до 40 мкВ; Пределы измерения термоЭДС $\pm 0 - 199$ мкВ,

Заключение

В диссертации сформулированы и обоснованы основные принципы реализации термоэлектрического дефектоскопа на основе дифференциального датчика с многоточечным контактом:

1. Проведены теоретические и экспериментальные исследования электрических характеристик различных источников термоЭДС. Выявлено влияние сопротивления нагрузки на внутреннее сопротивление и мощность источника термоЭДС.
2. Предложена методика расчета эквивалентного источника при параллельном соединении источников термоЭДС методом наложения.
3. Разработана модель для исследования электрических характеристик эквивалентного источника терморЭДС при параллельном соединении одиночных источников термоЭДС, возникающих при плоскостном контакте электрода с контролируемым образцом на основе метода наложения.
4. Разработана экспериментальная установка для исследования характеристик источников термоЭДС, позволяющая проводить исследования в широком диапазоне температур.
5. Исследованы электрические характеристики различных источников термоЭДС и эквивалентного источника термоЭДС при параллельном соединении различных типов источников термоЭДС.

6. Получены аналитические выражения на основе полинома Ньютона четвертой степени, позволяющие с погрешностью не более 6% описать нагрузочную характеристику источника термоЭДС в диапазоне температур от 100 до 300 градусов Цельсия
7. Выявлено влияние сопротивления нагрузки на электрические характеристики термоэлектрического источника.
8. Разработан термоэлектрический дефектоскоп «Thermo Fitness Testing», который нашел широкое применение для входного контроля марок сталей, контроля качества термообработки, контроля глубины обезуглероженного слоя и экспресс-контроля пластической деформации.

Список публикаций автора по теме диссертации:

Публикации в журналах рекомендованных ВАК

- [1] Абуеллаиль, А.А. Автоматизированная установка для исследования характеристик источников термоэлектродвижущей силы / Солдатов А. И., Солдатов А. А., Сорокин П. В., Костина М. А. // Приборы и техника эксперимента, 2018, №3.
- [2] Абуеллаиль, А.А. Исследование характеристик термоэлектрических источников ЭДС / Солдатов, П.В. Сорокин, А.И. Солдатов, В. Хан // Дефектоскопия, 2018, №7.

Публикации в журналах индексируемых в базе SCOPUS

- [3] Abouellail, A.A., Abouellail, Y.A., Soldatov, A.I., Soldatov, A.A., Kolosova, Y.R. Software simulation of thermocouples / SIBCON 2019 – Proceedings, 8729629
- [4] Obach, I.I., Abouellail, A.A., Soldatov, A.I., Soldatov, A.A., Sorokin, P.V., Shinyakov, Y.A., Sukhorukov, M.P. Monitoring of power supply / SIBCON 2019 – Proceedings, 8729572
- [5] Abouellaill, A.A., Obach, I.I., Soldatov, A.A., Sorokin, P.V., Soldatov, A.I. Research of thermocouple electrical characteristics / Materials Science Forum, 2018, 938, pp. 104-111
- [6] Soldatov, A.I., Soldatov, A.A., Sorokin, P.V., Abouellail, A.A., Kostina, M.A. Thermoelectric method of plastic deformation detection / Materials Science Forum, 2018, 938, pp. 112-118
- [7] Soldatov, A.I., Soldatov, A.A., Sorokin, P.V., Abouellail, A.A., Obach, I.I., Bortalevich, V.Y., Shinyakov, Y.A., Sukhorukov, M.P. An experimental setup for studying electric characteristics of thermocouples // SIBCON 2017 – Proceedings, 7998534
- [8] Abouellail, A., Obach, I., Soldatov, A., Soldatov, A. Surface inspection problems in thermoelectric testing / MATEC Web of Conferences, 2017, 102,01001

- [9] Soldatov, A.I., Soldatov, A.A., Sorokin, P.V., Loginov, E.L., Abouellail, A.A., Kozhemyak, O.A., Bortalevich, S.I. Control system for device «thermotest» / SIBCON 2016 – Proceedings, 7491869

Прочие публикации

- [10] Абуеллаиль, А.А. Surface inspection problems in thermoelectric testing / Обач И.И., Солдатов А.А., Солдатов А.И., Сорокин П.В. // Информационно-измерительная техника и технологии: VII научно-практической конференции, 25–28 мая 2016 г., Томский политехнический университет, Томск.
- [11] Абуеллаиль, А.А. Современные проблемы термоэлектрического контроля / Обач И.И., Солдатов А.А., Шульгина Ю.В. // VII Научно-практическая конференция «Информационно – измерительная техника и технологии» с международным участием, 25-28 мая 2016г., Томский государственный университет, Томск.
- [12] Абуеллаиль, А.А. Изучение контактных характеристик термоэлектрическим методом / Обач И.И., Солдатов А.А., Солдатов А.И. // Неразрушающий контроль: VI Всероссийской научно-практической конференции «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». 23– 27 мая 2016 г., Томский политехнический университет, Томск.
- [13] Абуеллаиль, А.А. Экспериментальная установка для исследования / Сорокин П.В., Солдатов А.И. // IX ежегодная студенческая научно-практическая конференция «Приборостроение и информационные технологии», 8 декабря 2016 г. ОНИИП, Омск.
- [14] Абуеллаиль, А.А. Математическая модель термопар / Солдатов А.А. // Всероссийской молодежной научной школы по инновациям в неразрушающем контроле SibTest, 27–30 июня 2017г., Томский политехнический университет, Томск.
- [15] Абуеллаиль, А.А. Мониторинг электрической сети с помощью термоэлектрической составляющей / Солдатов А. И., Обач И.И. // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. Науч.-техн. конф. молодых специалистов (Томск, 12-13 апр. 2018г.) / АО «НПЦ Полюс». – Томск, 2018. – 348с.