

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Солдатов Андрей Алексеевич

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОВ, КОНТАКТНОГО И
ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов,
изделий, веществ и природной среды

Томск – 2025

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

Научный консультант:

Суржиков Анатолий Петрович

доктор физико-математических наук, профессор, Заведующий кафедрой – руководитель отделения контроля и диагностики на правах кафедры Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Официальные оппоненты:

Кузичкин Олег Рудольфович

доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и технологии электронных средств, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана» (г.Москва)

Клопотов Анатолий Анатольевич

доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной механики и материаловедения, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» (г.Томск).

Сырымкин Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (г.Томск)

Защита состоится «21» октября 2025 г. В 15-00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.13
кандидат технических наук, доцент

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Е.А. Шевелева'.

Шевелева Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

С открытием эффекта Зеебека термоэлектрический метод стал применяться для неразрушающего контроля проводящих металлов и сплавов. Долгое время его применение ограничивалось экспресс-контролем металлов и сплавов. По величине термоЭДС детектировалась марка стали либо структурное состояние, либо химический состав из-за влияния этих характеристик на величину термоЭДС. Область применения термоэлектричества в неразрушающем контроле активно развивается. Многие коллективы как в России, так и за рубежом проводят исследования по улучшению характеристик приборов термоэлектрического контроля, по изучению термоэлектрических характеристик металлов и сплавов. Большую работу проделали ученые из Белорусской академии наук Лухвич А.А., Шарандо В.И. и Каролик А.С. Они исследовали термоэлектрические характеристики благородных и переходных металлов. Им удалось математически описать величину термоЭДС используя в качестве отправной точки электронную структуру металла. Для оценки влияния примесей на термоЭДС они использовали энергетический спектр электронов, описав его с помощью поверхности Ферми. Ученые из Волгоградского государственного технического университета Корндорф С.Ф. и Нестерович Ю.И. исследовали термоэлектрические характеристики металлов, прошедших термическую обработку. На основе этих исследований был предложен термоэлектрический способ контроля твердости. При практической реализации этого способа выявился его основной недостаток, заключающийся в низкой повторяемости результатов контроля при многократных измерениях, что было вызвано использованием горячего электрода с точечным контактом и при неизбежной неоднородности поверхности изделия по химическому составу и невозможности обеспечения повторного попадания горячего электрода в то же место поверхности образца при ручном контроле приводило к изменению показаний прибора. Другим недостатком приборов термоэлектрического контроля является зависимость показаний от усилия прижима электродов к контролируемому изделию. Это явление отмечается в работах Лухвича А.А., Нестеровича Ю.И., Hu J. and Nagy P. Влияние многоциклового нагружения на термоЭДС металлов исследовала группа ученых из Орловского государственного технического университета под руководством Тупикина Д.А.

В начале 21 века сфера применения термоэлектрического контроля существенно расширилась. Была показана возможность и перспективность применения термоэлектрического метода для контроля пластической деформации металлов и сплавов. В работах Акулова была показана зависимость плотности дислокаций от величины деформации, дислокации напрямую влияют на величину термоЭДС. Однако многие металлы и сплавы имеют немонотонную зависимость величины термоЭДС от степени пластической деформации. Это ограничивает использование приборов термоэлектрического контроля для определения степени пластической деформации. Ученые из Волгоградского государственного технического университета Корндорф С.Ф., Мельник Е.Е., Плотников А.Л., Сергеев А.С. и Тихонова Ж.С. исследовали режимы токарной обработки металлов с помощью термоэлектрического метода. С появлением технологии сварки трением с перемешиванием, которая позволяет получить сварное соединение с более высокими механическими характеристиками, возникла необходимость контроля процесса сварки, при этом критически важно соблюдать стабильный технологический режим для получения качественного сварного соединения. Для этих целей использовали термопару, образованную сварным инструментом и свариваемыми металлами. Такие исследования были проведены Ана Magalhães, Jeroen De Backer и Gunnar Bolmsjö. Термоэлектрический метод успешно применяется и для контроля степени наводораживания титанового сплава. Такие исследования были проведены Лидером А.М., Ларионовым В.В. и Суртановым М.С. Ученые из научно-производственного центра «Полус» М.С. Васильев И.М. и Деменьев А.А., а также группа ученых из национального исследовательского Томского политехнического университета Солдатов А.А. и Костина М.А. применили термоэлектрический метод для контроля теплового сопротивления между силовым полупроводниковым прибором и радиатором охлаждения, которые широко применяются в радиоэлектронике. Такой подход позволил контролировать тепловое сопротивление после установки силового полупроводникового прибора на радиатор охлаждения, т.е. уже в собранном виде. Однако такой контроль позволял определять только тепловое сопротивление и не давал ответ на главный вопрос о причине возникновения большого теплового сопротивления. Контроль контактного сопротивления в сети электроснабжения термоэлектрическим методом был предложен и исследован группой ученых из национального исследовательского Томского политехнического университета. В своих работах Солдатов Д.А и Костина М.А. исследовали изменение термоЭДС контактной пары из

разнородных металлов при протекании тока нагрузки через эту контактную пару. Был предложен способ выделения сигнала термоЭДС в сети переменного тока. Было проведено лабораторное обоснование термоэлектрического метода для контроля контактного сопротивления с целью предупреждения возгорания изоляции подводящих проводов. Однако предложенный подход требует установки приборов термоэлектрического контроля на каждое контактное соединение, что является экономически нецелесообразным.

Отмеченные недостатки ограничивают сферу применения термоэлектрического метода, поэтому необходимо провести дополнительные исследования для выявления новых подходов к устранению указанных недостатков. Соответственно тема диссертационного исследования является актуальной.

Объект исследования – термоэлектрический метод.

Предмет исследования – электрические характеристики источника термоЭДС.

В соответствии с этим, целью работы является создание термоэлектрических приборов для контроля металлов и сплавов с разным структурным состоянием, а также контроля теплового и контактного сопротивления при соединении двух металлов.

Достижение поставленных целей потребовало решения следующих основных задач:

1. Разработать модель для исследования электрических характеристик эквивалентного источника термоЭДС, полученного за счет параллельного соединения нескольких источников термоЭДС.
2. Определить внутреннее сопротивление эквивалентного источника термоЭДС, полученного за счет параллельного соединения нескольких источников термоЭДС.
3. Исследовать влияние пластической деформации на электрические характеристики источника термоЭДС, образованного пластически деформированными металлами и сплавами.
4. Исследовать влияние границы соприкосновения двух плоских поверхностей на внутреннее сопротивление эквивалентного источника термоЭДС, полученного за счет параллельного соединения нескольких источников термоЭДС.
5. Разработать способ детектирования оптимального количества термоинтерфейса в зазоре между двумя соприкасающимися поверхностями для получения минимального теплового сопротивления между ними.

6. Разработать алгоритм детектирования контактного соединения с большим переходным сопротивлением из множества контактных соединений, подлежащих контролю с использованием одного термоэлектрического прибора.

Научная новизна работы.

Анализ экспериментальных и расчетных данных, полученных в исследовательской части работы, анализ результатов испытаний разработанных приборов термоэлектрического контроля позволили получить новые научные знания, которые формулируются следующим образом:

- Предложено использовать внутреннее сопротивление источника термоЭДС, образованного двумя разнородными металлами, в качестве дополнительного информативного параметра при контроле структурного состояния и дефектов в металлах и сплавах.

- Предложена методика корректного определения внутреннего сопротивления источника термоЭДС, основанная на учете контактного сопротивления и сопротивления подводящих проводов. Расчет внутреннего сопротивления источника термоЭДС производится путем умножения сопротивления нагрузки на дробь, числитель которой определяется путем вычитания величины термоЭДС при наличии нагрузки и напряжения на контактном сопротивлении и сопротивлении подводящих проводов из величины термоЭДС при отсутствии нагрузки, а знаменатель равен разности величины термоЭДС при наличии нагрузки и напряжения на контактном сопротивлении и сопротивлении подводящих проводов.

- Выявлено отсутствие влияния сопротивления нагрузки и разницы температур между горячим и холодным спаями источника термоЭДС на его внутреннее сопротивление.

- Выявлено влияние пластической деформации на внутреннее сопротивление источника термоЭДС, образованного пластически деформированным металлом или сплавом.

- Внутреннее сопротивление эквивалентного источника термоЭДС, образованного параллельным соединением нескольких источников термоЭДС, равно параллельному соединению внутренних сопротивлений этих источников термоЭДС.

- Предложен способ определения оптимального количества теплопроводящей пасты в зазоре двух соприкасающихся поверхностей для получения минимального теплового сопротивления между ними, основанный на использовании внутреннего сопротивления эквивалентного источника

термоЭДС, образованного параллельным соединением нескольких источников термоЭДС.

- Разработана методика детектирования большого контактного сопротивления в сети электроснабжения из некоторого множества контактных соединений, выбранных для контроля, основанная на данных о включенной электроустановке, токе через эту электроустановку и величине термоЭДС до и после включения электроустановки.

- Созданы уникальные термоэлектрические приборы для контроля степени пластической деформации, определения оптимального количества теплопроводящей пасты между двумя соприкасающимися поверхностями для получения минимального теплового сопротивления между ними, детектирования контактного соединения в сети электроснабжения с большим контактным сопротивлением, не имеющие аналогов в мире.

Совокупность полученных результатов позволила на высоком научно-техническом уровне решить важную техническую задачу по расширению сферы применения термоэлектрического метода для контроля металлов и сплавов.

Практическая значимость и внедрение результатов работы.

Результаты проведенных исследований позволили развить теорию термоэлектричества и существенно расширить сферу применения термоэлектрического контроля. Созданы уникальные приборы, нашедшие практическое применение в акционерном обществе «Томский электромеханический завод им. В.В. Вахрушева», г. Томск, акционерном обществе «Научно-производственный центр «Полус», г. Томск, АО «Прорыв» корпорации Росатома, г. Москва, АО «Химотест», г. Томск.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Национальном исследовательском Томском политехническом университете, а также при подготовке магистерских и кандидатских диссертаций.

Автор выносит на защиту следующие основные положения:

1. Внутреннее сопротивление источника термоЭДС является его уникальной характеристикой и может быть использовано в качестве дополнительного информативного параметра при контроле металлов и сплавов.

2. Внутреннее сопротивление источника термоЭДС не зависит от температуры горячего и холодного спаев, поэтому отпадает необходимость

стабилизации разности температур между горячим и холодным спаями при дефектоскопии металлов и сплавов.

3. При расчете внутреннего сопротивления источника термоЭДС необходимо использовать нагрузочное сопротивление в диапазоне от 10 до 100 Ом и учитывать контактное сопротивление и сопротивление подводящих проводов. В этом случае погрешности определения внутреннего сопротивления не превышает 10 %.

4. При пластической деформации металлов и сплавов изменяется не только величина термоЭДС, но и внутреннее сопротивление источника термоЭДС, образованного пластически деформированным металлом. Контроль степени пластической деформации необходимо проводить, используя отношение термоЭДС к внутреннему сопротивлению. При этом получается монотонная зависимость этого отношения от степени пластической деформации.

5. Для контроля оптимального количества теплопроводящей пасты в зазоре двух соприкасающихся поверхностей для получения минимального теплового сопротивления между ними следует использовать зависимость внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС от толщины слоя термопасты.

6. Для детектирования большого контактного сопротивления в сети электроснабжения из некоторого множества контактных соединений, выбранных для контроля, необходимо использовать данные о включенной электроустановке, токе через эту электроустановку, величине термоЭДС до и после включения электроустановки.

7. Комплекс разработанных приборов термоэлектрического контроля, не имеющих аналогов.

Апробация работы.

Материалы, вошедшие в диссертацию, доложены и обсуждены на следующих конференциях:

1. VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития термоэлектрического приборостроения», г. Махачкала, 2023.

2. XX Международная школа-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Инноватика-2024», г. Томск, 2024.

3. XVII Международная школа-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Инноватика-2021», г. Томск, 2021.

4. III Международный форум «Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции», г. Томск, 2020.

5. International Conference «Actual Trends in Radiophysics», 2020.
6. 5th International Workshop on Innovations in Information and Communication Science and Technology, Malang, Indonesia, 2020.
7. Всероссийская научно-методическая конференция «Современные технологии, экономика и образование», 2019.
8. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2019, г. Томск.
9. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2018.
10. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2017, г. Томск.
11. MATEC Web of Conferences. – 2017
12. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016, г. Томск.
13. 6th International Conference on Key Engineering Materials, ICKEM 2016, г. Томск
14. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015.
15. XVIII международная научно-практическая конференция «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность», «SibTest-2013», г. Иркутск, 2013.
16. XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ-2012», г. Томск, 2012.
17. XVII международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии СТТ-2011», г. Томск, 2011.
18. Международная конференция «SibTest-2011», г. Горно-Алтайск, 2011.
19. Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Методы и средства неразрушающего контроля», г. Томск, 2011.
20. XIII международная конференция «Materials, Methods and Tehnologies», Болгария, 2011.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 18 статьях, из них 13 в журналах индексируемых в базах данных SCOPUS, и 5 в журналах рекомендованных ВАК РФ, 22 докладах, 15 описаниях изобретений, общий список которых приведен в конце диссертации.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и приложения. Объем диссертации составляет 255 страницы, 129

рисунков и 17 таблиц. Обзор литературных данных содержит 269 наименования.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается непротиворечивостью полученных в исследовательской части работы результатов с данными других авторов (там, где таковые имеются), совпадением экспериментальных и расчетных значений величины термоЭДС и внутреннего сопротивления, работоспособностью изготовленных систем контроля, результатами лабораторных и натурных испытаний. Результаты испытаний и внедрений разработанных систем контроля приведены в Приложении А.

Работа выполнена с использованием результатов, полученных лично автором, совместно с коллегами – в равном участии, а также при творческом участии автора в постановке задач исследований и разработок.

Автором непосредственно проведено:

- анализ современного состояния исследований и разработок приборов термоэлектрического контроля изделий из металлов;
- исследования электрических характеристик источников термоЭДС;
- исследования электрических характеристик эквивалентного источника термоЭДС, образованного параллельным соединением нескольких источников термоЭДС;
- исследования электрических характеристик источников термоЭДС, образованных пластически деформированными металлами и сплавами;
- исследования электрических характеристик эквивалентного источника термоЭДС при параллельном соединении нескольких источников термоЭДС, образованных пластически деформированными металлами и сплавами;
- исследования электрических характеристик источников термоЭДС, образующихся при контактном соединении двух проводников;
- исследования электрических характеристик источников термоЭДС, образующихся при контактном соединении двух поверхностей;
- проведен анализ влияния количества теплопроводящей пасты в зазоре контактирующих поверхностей на величину внутреннего сопротивления источника термоЭДС, образованного этими соприкасающимися поверхностями.

При непосредственном участии автора, в качестве научного руководителя, разработан и изготовлен ряд действующих приборов для неразрушающего контроля металлов и сплавов термоэлектрическим методом.

Большая часть совместных исследований и разработок выполнена в творческом содружестве с сотрудниками отделения электронной инженерии инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы основные задачи, показана научная новизна работы и ее практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор областей использования термоэлектрического метода. На сегодняшний день на термоэлектрическом эффекте разработаны приборы для неразрушающего контроля металлов и сплавов, а именно для: входного контроля металлопроката; сортировке готовых изделий по маркам сталей и сплавов; определении глубины обезуглероженного слоя; определении глубины цементации; контроле качества термической обработки; контроле пластической деформации; контроле теплового сопротивления термоинтерфейса; контроле контактного сопротивления в сети электропитания.

Пластическая деформация оказывает значительное влияние на свойства металлов и может изменить кристаллическую структуру металла, привести к образованию новых зерен или увеличить размер существующих. Величину деформации определяют степенью пластической деформации ε (рис.1):

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где h_0 – размер образца до деформации; h – размер образца после деформации.

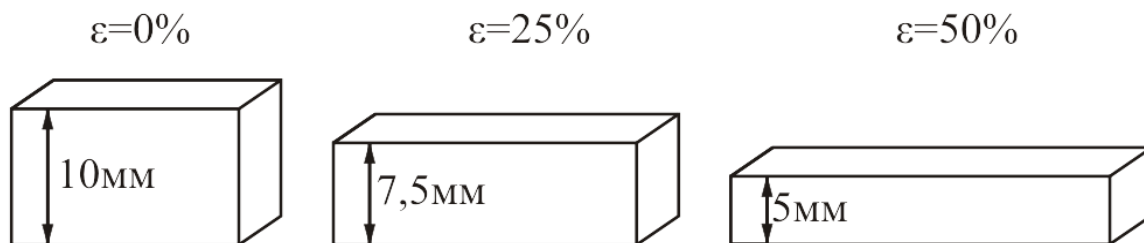


Рисунок 1 – Образцы с различной степенью пластической деформации

Получена зависимость термоЭДС от наличия деформации в металле:

$$\Delta E = \frac{N_m \omega \cdot [1 - e^{-\alpha_0(\varepsilon - \varepsilon_0)}] \cdot \alpha_1}{[1 + \alpha_1 e^{-\alpha_0(\varepsilon - \varepsilon_0)}] \cdot (1 + \alpha_1)}. \quad (2)$$

Контроль теплофизических параметров термоинтерфейса

Тепловое сопротивление между корпусом и радиатором в значительной степени зависит от толщины слоя термоинтерфейса. Чем тоньше слой термоинтерфейса, тем лучше будет теплопроводность между корпусом и радиатором. Толстый слой термоинтерфейса может создавать дополнительное тепловое сопротивление, которое приведет к более высокой температуре работы компонентов. Однако слишком тонкий слой термоинтерфейса также может привести к проблемам. Если слой слишком тонкий, то не все микронеровности заполнятся термоинтерфейсом и останутся пузырьки воздуха, что приведет к ухудшению теплоотвода. При соприкосновении двух металлов различной химической природы из-за разности носителей заряда на внешнем уровне, между разнородными металлами появляется термоЭДС. Т.к. корпуса полупроводниковых приборов и радиаторов покрыты или изготовлены из токопроводящих материалов, то в местах соприкосновений появится термоЭДС. Значение термоЭДС пропорционально тепловому сопротивлению термоинтерфейса.

Термоэлектрический метод контроля контактного соединения

Для соединения проводов друг с другом используют клеммные колодки, зажимы болтового типа, скрутку, гильзы и муфты – такие соединения относятся к разъемным. Для более прочного соединения используют неразъемные соединения, такие как сварка, опрессовка, пайка, клеевые соединения. Окисление, загрязнение или механический износ контактных поверхностей может увеличить переходное сопротивление. Недостаточное затягивание болтового соединения также приводит к увеличению переходного сопротивления, из-за малой площади соприкосновения проводников

Если переходное сопротивление становится достаточно высоким (более 0,05 Ом), это может привести к значительному нагреву контактов при прохождении тока от одного проводника к другому и, как следствие, к воспламенению. В некоторых работах было предложено использовать термоэлектрический метод для обнаружения места контактов электрической сети с высоким контактным переходным сопротивлением (>0,05 Ом). При протекании электрического тока в месте контакта проводников выделится тепло по закону Джоуля-Ленца:

$$dQ = P \cdot dt = I^2 \cdot R \cdot dt, \quad (3)$$

где dQ – количество выделившегося тепла; P – мощность потерь, переходящих в тепло; I – сила тока, протекающая через проводник за время t ; R – величина контактного сопротивления.

Выделившееся тепло разогреет контакт, и из-за эффекта Зеебека в цепи возникнет постоянная составляющая напряжения. Величина постоянного напряжения пропорциональна температуре, выделившейся в месте контакта. Измеряя эту постоянную составляющую напряжения в сети электроснабжения, можно судить о состоянии контактного соединения в действующей сети переменного тока, т.е. без отключения потребителей.

Термоэлектрический метод контроля степени наводораживания металлов

Негативными последствиями наводораживания являются увеличение хрупкости металлов и образование трещин, что приводит к снижению прочности и увеличению вероятности разрушения при механических нагрузках.

Одним из методов, позволяющих исследовать и количественно оценить степень наводораживания, является термоэлектрический метод. ТермоЭДС возникает в результате диффузии водорода в металлическую решетку. Была выявлена зависимость термоЭДС от концентрации водорода и его распределения в титане (рис. 2).

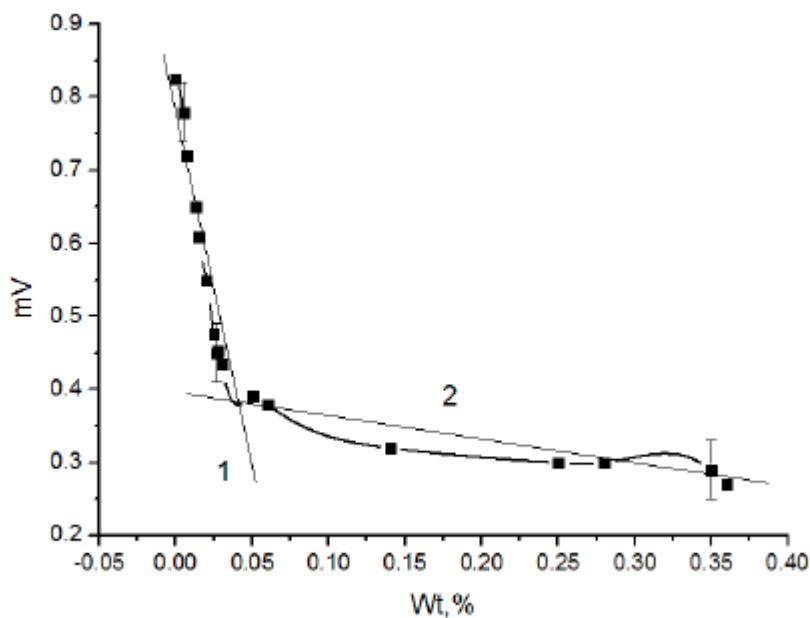


Рисунок 2 – Зависимость термоЭДС от концентрации водорода в металле

Исследование показало эффективность метода измерения термоЭДС для определения неоднородностей в распределении водорода в титане. Кроме того, было обнаружено, что наибольшие изменения термоЭДС происходят в

областях с высокой концентрацией водорода, что указывает на возможность использования этого метода для выявления зон повышенной склонности к водородному охрупчиванию.

Во второй главе приведены электрические характеристики источника термоЭДС. К электрическим характеристикам источника термоЭДС относятся внешняя и вольтамперная характеристики, внутреннее сопротивление и мощность. Каждый источник термоЭДС обладает своими, индивидуальными характеристиками, с помощью которых можно проводить дефектоскопию металлов и сплавов. В качестве исходных данных при определении электрических характеристик источника термоЭДС была взята внешняя характеристика, которую получали на экспериментальной установке. Описание экспериментальной установки приведено в основном тексте диссертации. Исследовались два источника термоЭДС из термопар хромель-алюмель и нихром-константан, горячий спай которых помещался в термокамеру, а холодный находился снаружи в боксе, который помещался в резервуар с тающим льдом, что обеспечивало температуру холодного спаев ноль градусов Цельсия. Доверительный интервал полученных зависимостей, приведенных на рис.3, не превысил 5,5 %

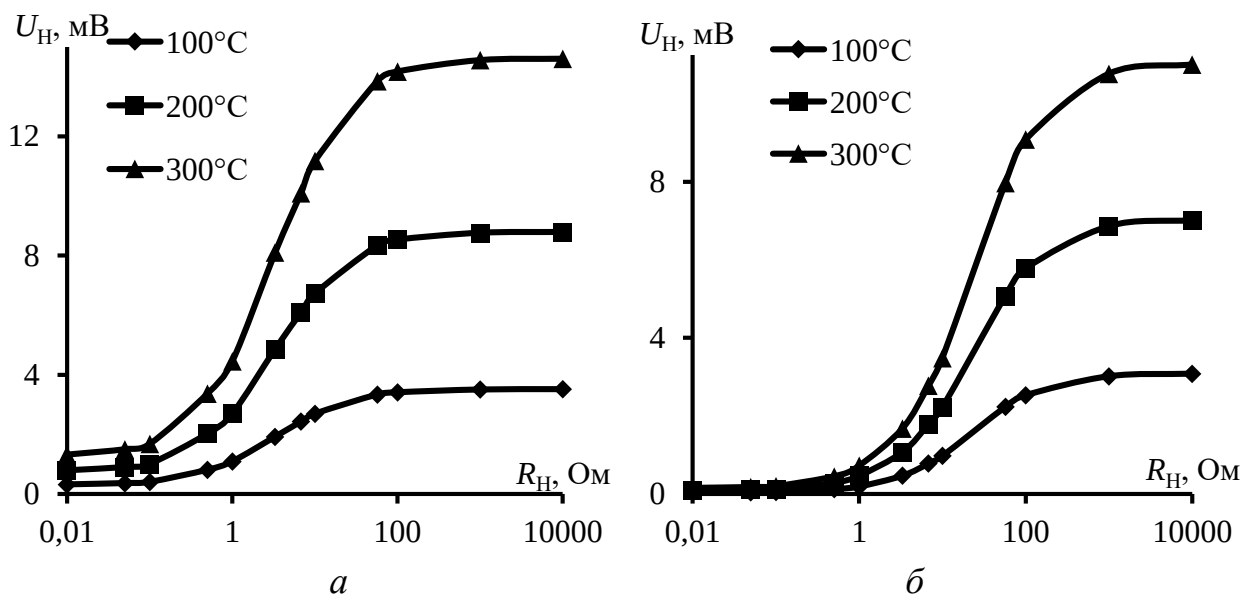


Рисунок 3 – Семейство внешних характеристик источников термоЭДС при разности температур горячего и холодного спаев 100 °С, 200 °С и 300 °С, *а* – хромель-алюмель, *б* – нихром-константан

Можно отметить, что характеристики обоих источников похожи друг на друга. На каждой характеристике можно выделить три характерных области: первая - от 0,01 до 0,1 Ом, вторая - до 60 Ом и третья – больше 100 Ом.

Еще одной электрической характеристикой источника ЭДС является его внутреннее сопротивление, которое характеризует качество этого источника. В идеальных источниках напряжения внутреннее сопротивление равно нулю. В реальных источниках оно отличается от идеального и, кроме того, может изменяться под действием внешних (различная нагрузка, различный ток) и внутренних (температурный нагрев или охлаждение, качество электролита, деформация пластин и т.д.) условий. Исследования внутреннего сопротивления можно провести косвенным способом используя внешние характеристики. Эквивалентная электрическая схема термоэлектрического датчика приведена на рисунке 4, а. Для замкнутого контура (рисунок 4) можно записать:

$$E_{\text{тэдс}}(t) = U_{R_n}(R_n, t) + U_{R_k} + U_{R_{\text{вн}}}(R_n, t) \quad (4)$$

где $E_{\text{тэдс}}(t)$ – термоэлектродвижущая сила; $U_{R_n}(R_n, t)$ – напряжение на сопротивлении R_n ; U_{R_k} – напряжение на сопротивлении R_k ; $U_{R_{\text{вн}}}(R_n, t)$ – напряжение на сопротивлении $R_{\text{вн}}$.

Используя методику расчета внутреннего сопротивления, представленную выше, были рассчитаны внутренние сопротивления термопар хромель-алюмели (рисунок 4, б) и нихром-константан (рисунок 4, в).

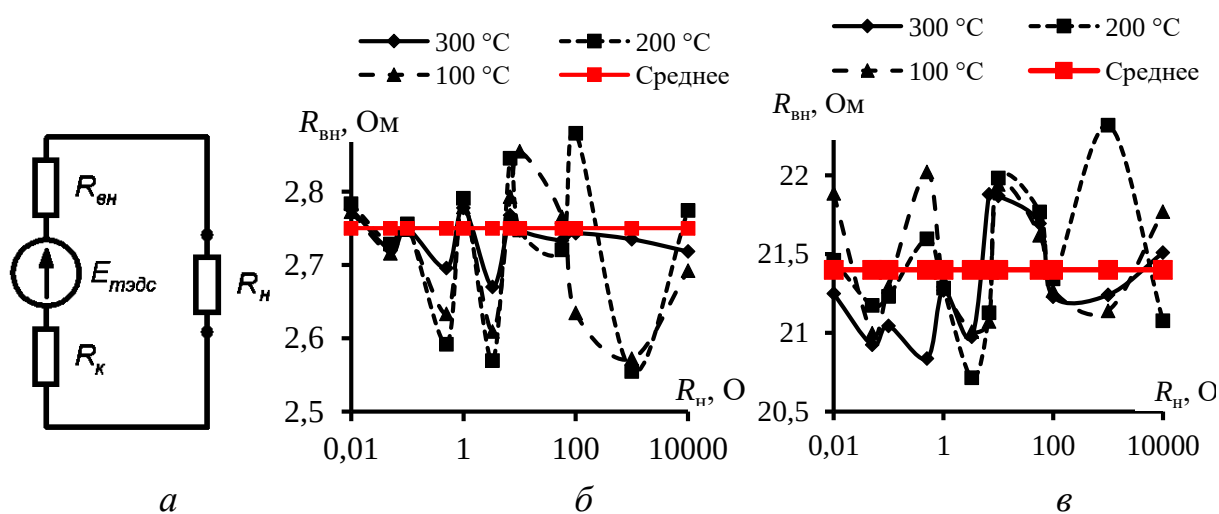


Рисунок 4 – Эквивалентная электрическая схема термоэлектрического датчика (а) и внутреннее сопротивление источников термоЭДС, красная линия – среднее значение, б – источник ЭДС хромель-алюмель, в - источник ЭДС нихром-константан

По результатам исследования были получены совершенно новые результаты. Выявлено, что внутреннее сопротивление источника термоЭДС является постоянной величиной и не зависит от сопротивления нагрузки.

Одним из недостатков приборов термоэлектрического контроля является применение электродов с острым наконечником. При этом получается точечный контакт электрода с исследуемой поверхностью. Но из-за неоднородности поверхности сплавов по химическому и фазовому составу повторяемость измерений термоЭДС с точечным контактом невысока, т.к. попасть электродом в одну и ту же точку практически невозможно. Разброс может достигать 40 %. Наиболее перспективным решением этой проблемы автор считает использование плоской поверхности электрода. При этом в зону контакта одновременно будут попадать разные области с химическим и фазовым составом.

Следует учесть, что из-за шероховатости поверхности, как измерительного электрода, так и тестируемого изделия, в зоне их соприкосновения образуется некоторое множество контактов. Каждый контакт будет образовывать отдельный источник термоЭДС. Электрические характеристики этих источников будут отличаться, и при параллельном соединении они образуют эквивалентный источник ЭДС.

Для определения характеристик эквивалентного источника термоЭДС использовали метод суперпозиции (наложения). При анализе схемы этим методом последовательно заменяют каждый источник термоЭДС, кроме одного, короткозамкнутой цепью, рассчитывают эквивалентное сопротивление, используя широко известные соотношения для параллельного и последовательного соединения резисторов и по известному сопротивлению и ЭДС в соответствии с законом Ома рассчитывают ток в нагрузке от этого источника. Такую процедуру необходимо провести для каждого источника ЭДС, а результирующий ток в нагрузке будет определяться суммой токов от всех источников.

Ток каждого источника ЭДС, можно найти:

$$I_k(R_n, t) = \frac{E_k(t)}{(R_{вн.k} + R_{к.k}) + R_{э.k}} \quad (5)$$

Ток эквивалентного источника $I_{э.кв}(R_n, t)$ равен току в нагрузке $I_n(R_n, t)$:

$$I_{э.кв}(R_n, t) = I_n(R_n, t) = \sum_{i=1}^n I_i(R_n, t) \quad (6)$$

Напряжение на нагрузке находим из закона Ома:

$$U_n(R_n, t) = I_n(R_n, t) \cdot R_n \quad (7)$$

В качестве исходных данных были взяты характеристики двух источников на основе соединения сплавов хромеля с алюмелем и нихрома с константаном.

На рисунке 5 показано семейство характеристик мощности, отдаваемой в нагрузку эквивалентными источниками ЭДС, содержащими разное количество источников термоЭДС. Коричневым цветом показана характеристика двух термопар, черным цветом - десять термопар. Красным цветом – сто термопар.

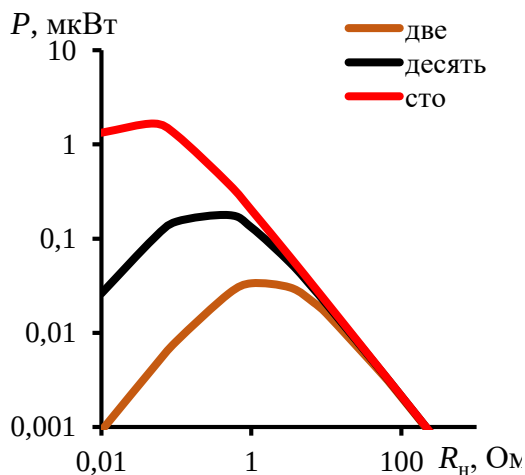


Рисунок 5 – Характеристики мощности источника термоЭДС из хромеля с алюмелем, от сопротивления нагрузки при $\Delta T = 300$ °С

Из рисунка 5 видно, что с увеличением количества параллельно соединенных термопар увеличивается мощность, отдаваемая в нагрузку. Пиковое значение мощности, отдаваемой в нагрузку, смещается в область меньших значений сопротивления нагрузки при увеличении количества параллельно соединенных термопар. Для двух термопар пик мощности соответствует сопротивлению нагрузки 1 Ом. Для десяти – 0,5 Ом и 0,05 Ом - для ста. Аналогичная тенденция наблюдается и для эквивалентного источника термоЭДС, состоящего из нескольких параллельно соединенных термопар нихром-константан.

В третьей главе приведены электрические характеристики пластически деформированных материалов. Наличие пластической деформации приводит к изменению электрических свойств металла: проводимости и термоЭДС. Относительная деформация определяется как отношение изменения размера деформированного образца относительно размера недеформированного образца к начальным размерам недеформированного изделия (рис.6, а):

$$X = \frac{D_0 - D_1}{D_0} \cdot 100\% . \quad (8)$$

Для исследования были выбраны широко распространенные термопары хромель-алюмель и хромель-капель. По шесть термопар каждого типа были подвергнуты деформации в размере 17 % и 33 % и по шесть термопар – в исходном состоянии, т.е. без пластической деформации (рисунок 6, б).

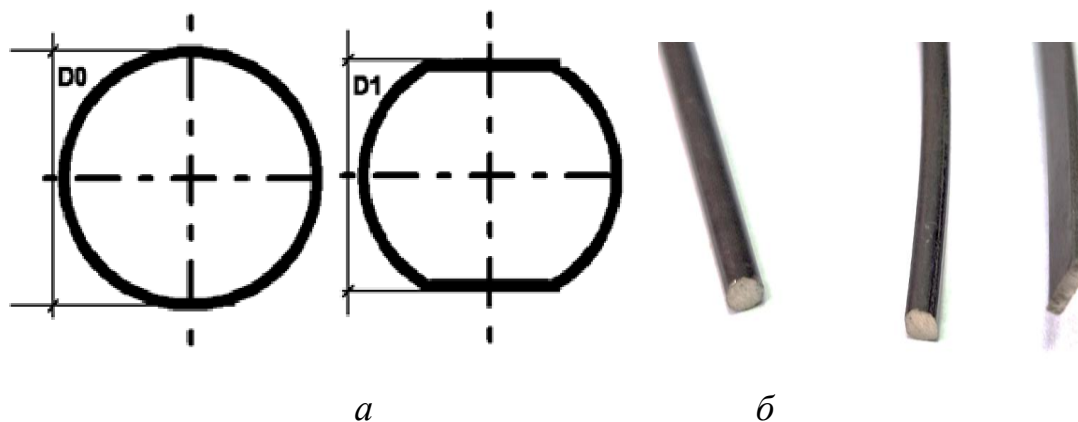


Рисунок 6 – Образцы до деформации и после деформации, *а* - схематичное изображение, *б* - экспериментальные образцы термопар, левый – без деформации, средний – деформация 17 %, правый – деформация 33 %

Экспериментальные исследования проводились на установке, которая состоит из термокамеры, в которую помещалась термопара, вольтметр, набор переключаемых нагрузочных резисторов и блок управления термокамерой и набором переключаемых нагрузочных резисторов, ПК для получения данных с вольтметра. Эта установка позволяет получить внешние характеристики термопар (зависимость напряжения на нагрузке от величины нагрузки) для различных значений температуры. При исследовании использовались четыре температуры нагрева термопар 100 °С, 150 °С, 200 °С и 228 °С. В автореферате будут представлены зависимости только для температуры 200 °С, т.к. внутреннее сопротивление не зависит от температуры.

Данные по полученным внешним характеристикам для термопар хромель-капель и хромель-алюмель от степени деформации приведены в 3 главе диссертации. По полученным данным можно рассчитать величину внутреннего сопротивления:

$$R_{вн} = R_n \frac{U_{xx,n} - U_{Rн} - U_{Rк}}{U_{Rн} - U_{Rк}}, \quad (9)$$

где R_n – сопротивление нагрузки; U_{xx} – напряжение холостого хода на нагрузке; $U_{Rн}$ – напряжение на нагрузке; $U_{Rк}$ – напряжение на контактном сопротивлении.

При расчете в качестве напряжение холостого хода было взято напряжение на нагрузке при сопротивлении нагрузки 10 кОм. Результат

расчета внутреннего сопротивления от сопротивления нагрузки для трех видов деформаций термопары хромель-капель в соответствии с выражением 3.1 в графическом виде показан на рис.7.

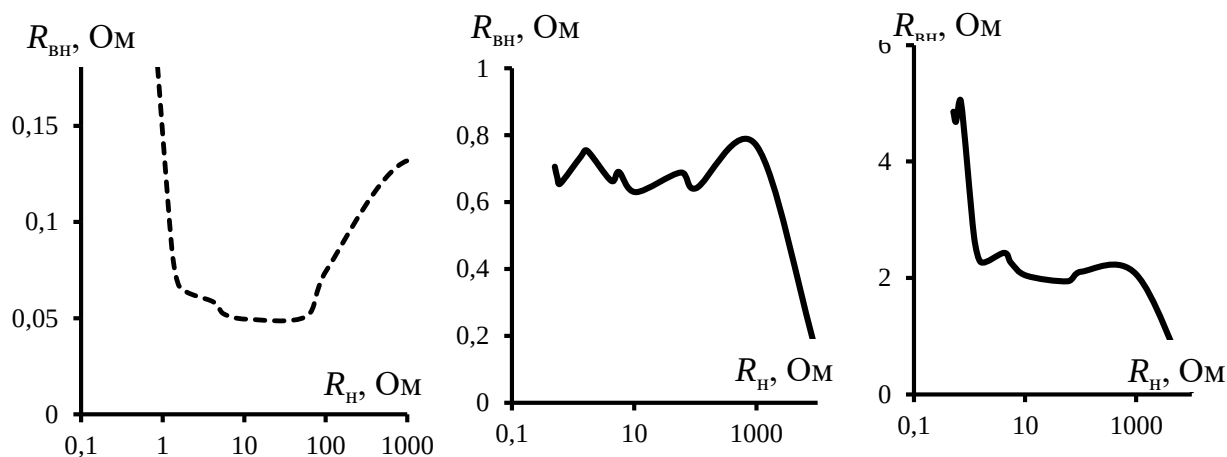


Рисунок 7 – Характеристики внутреннего сопротивления термопары хромель-капель, для трех видов деформаций

При сопротивлении нагрузки менее 1 Ом и более 100 Ом внутреннее сопротивление определяется с большой погрешностью. Поэтому необходимо использовать данные из диапазона сопротивления нагрузки от 1 до 100 Ом. С увеличением степени деформации термопар увеличивается среднее внутреннее сопротивление.

Данные расчета внутреннего сопротивления для термопар хромель-алюмель приведены в графическом виде на рис. 8

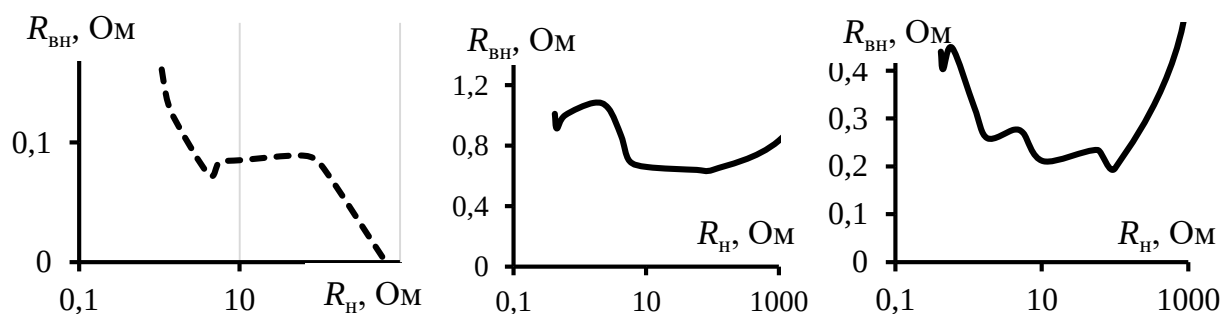


Рисунок 8 – Характеристики внутреннего сопротивления термопары хромель-алюмель, для трех видов деформаций

Величина деформации влияет на количество дефектов в структуре металлов и сплавов, что приводит к изменению электрических характеристик источников термоЭДС, образованных этими металлами и сплавами.

Анализ полученных данных полученных выше показывает, что по полученной зависимости невозможно однозначно определить степень относительной пластической деформации. Изменение внутреннего сопротивления термопар хромель-алюмель и хромель-капель показано на рис.9.

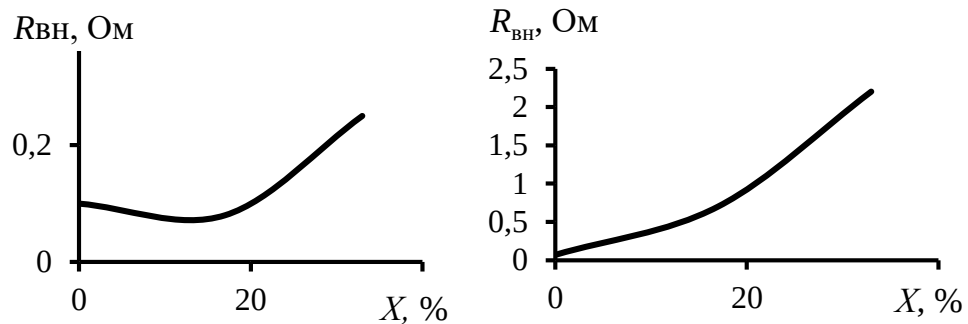


Рисунок 9 – Зависимость внутреннего сопротивления термопар от относительной степени деформации

Если ввести безразмерный коэффициент, определяемый из выражения:

$$K = \frac{U_{н.хх}}{R_{вн}},$$

где $U_{н.хх}$ – напряжение на нагрузке в режиме холостого хода, $R_{вн}$ – внутреннее сопротивление источника термоЭДС,

то получим монотонную зависимость этого коэффициента от величины пластической деформации. Результаты расчета безразмерного коэффициента K представлены на рис.10.

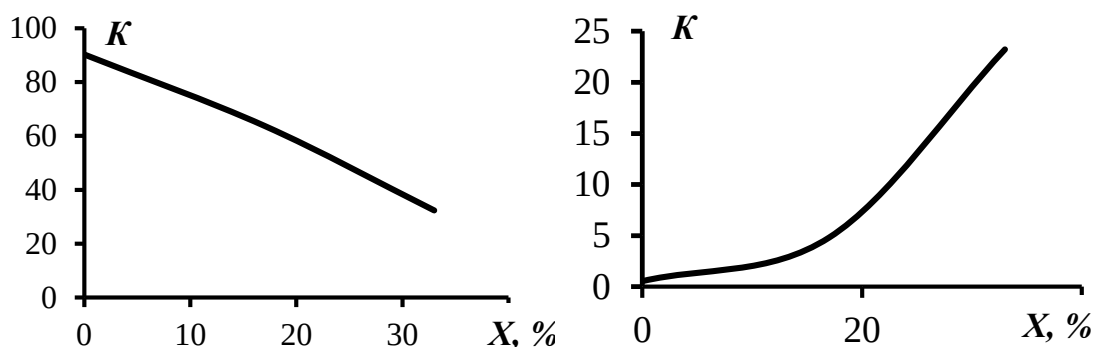
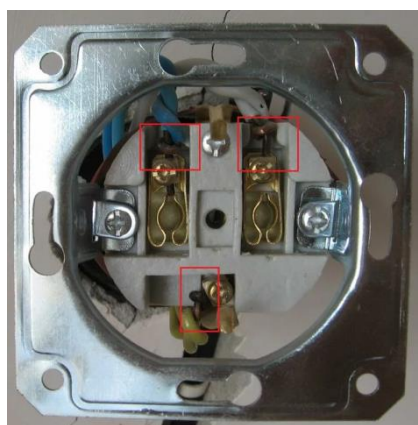


Рисунок 10 – Зависимость коэффициента K от относительной деформации термопар

Анализ полученных данных позволяет утверждать, что по полученной зависимости можно однозначно определить относительную степень пластической деформации. Однако, зависимости безразмерного

коэффициента термопар хромель-алюмель и хромель-капель имеют противоположный наклон. Это позволяет сделать вывод, что для использования безразмерного коэффициента в диагностике необходимо предварительно получить градуировочную характеристику этого коэффициента для контролируемых металлов и сплавов.

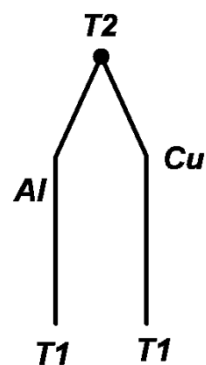
В четвертой главе представлены электрические характеристики проводников тока в электрической сети переменного тока. Сеть электроснабжения даже одного помещения содержит провода, изготовленные из разных проводящих материалов, и контактные соединения, также изготовленные из разных проводящих материалов. Контактные соединения могут быть как разъемными, так и неразъемными. Неразъемные соединения используют при сращивании проводов или ответвлении, при этом возможны разные способы соединения: скручивание, пайка, сварка, обжим. Разъемные соединения используют для оперативного подключения и отключения разного рода электроустановок: утюги, чайники, фены, электроплиты и т.п. Примеры разъемного и неразъемного соединений показаны на рис.11, *а* и рис.11, *б*. При протекании тока через контактное соединение оно нагревается больше, чем сам проводник за счет большего сопротивления, т.е. появляется разность температур и если контактное соединение выполнено из материалов с отличными друг от друга коэффициентами Зеебека, то такое контактное соединения становится источником термоЭДС (рис.11, *в*).



а



б



в

Рисунок 11 – Примеры соединений, *а* – разъемное (розетка), *б* – неразъемное (скрутка), *в* – искусственная термопара, образованная соединением двух проводников

Таких термопар в сети электроснабжения даже одного помещения может быть несколько и каждое из них будет представлять собой искусственную термопару, которая будет генерировать термоЭДС.

Каждый потребитель электроэнергии, называемый нагрузкой, подключается к сети электроснабжения через разъемное или неразъемное контактное соединение. При включении питания нагрузки через нее потечет ток, который будет одновременно и током контактного соединения. Проходящий ток будет нагревать контактное соединение. В соответствии с эффектом Зеебека в цепи появится термоэлектродвижущая сила. Ее величина зависит от материалов контактов и от разности температур горячего и холодного спаев:

$$E = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot (T_2 - T_1), \quad (10)$$

где T_2 и T_1 – температура горячего и холодного спаев, соответственно; α_1 и α_2 – коэффициенты Зеебека для первого и второго материала соответственно.

Температура горячего спая определяется температурой нагрева контактного соединения. Температура холодного спая определяется температурой противоположного конца провода, соединяющего гнездо с вводным щитом, и температурой противоположного конца провода, соединяющего вилку с нагрузкой, т.е. это температура окружающей среды. Температуру нагрева можно найти из уравнения теплового баланса:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2 \quad (11)$$

где dQ_1 – тепло, выделяемое на контактном сопротивлении, dQ_2 – тепло, рассеиваемое в окружающую среду за счет конвекции и излучения.

При расчете использовались три значения массы контакта: 1 г, 2 г и 3 г. Также использовались три значения контактного сопротивления 0,01 Ом, 0,1 Ом и 1 Ом. Ток, протекающий через контакт, составлял 10 А, удельная теплоемкость меди - $\alpha=385$ Дж/(кг*К). Результаты моделирования процесса нагрева контактного сопротивления массой 2 г и сопротивлением 0,01, 0,1 и 1 Ом приведены на рис.12.

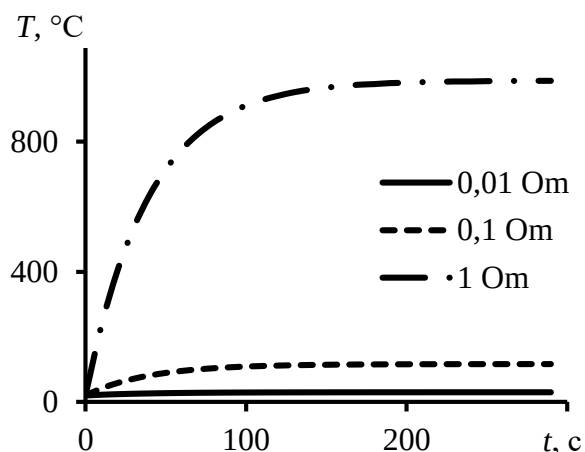


Рисунок 12 – Зависимость температуры перегрева контактного соединения

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что в стационарном режиме температура перегрева медного контакта может достичь 1000 °C, если сопротивление контакта составляет 1 Ом (штрихпунктирная линия). Чем меньше значение контактного сопротивления, тем короче во времени переходный процесс.

Исходя из данных, представленных на рис. 12 можно сделать вывод, что независимо от массы контактного соединения, температура перегрева контактного соединения, достаточная для воспламенения изоляции, достигается уже при сопротивлении контактного соединения 0,35 Ом и токе 10 А. Поэтому контроль контактного соединения необходимо выполнять в режиме реального времени.

Для детектирования переходного сопротивления контактов определяют момент включения и номер электроустановки по наличию тока, протекающего через эту электроустановку, полученные данные о включенной электроустановке и величине протекающего тока передают в микроконтроллер, анализируют изменение термоЭДС при включении и выключении каждой электроустановки. По номеру включаемой или отключаемой электроустановки определяют номера контактных соединений, составляющих цепь электропитания этой установки. Для примера рассмотрим схему электропитания трех электроустановок с системой мониторинга переходного сопротивления контактного соединения (рис.13).

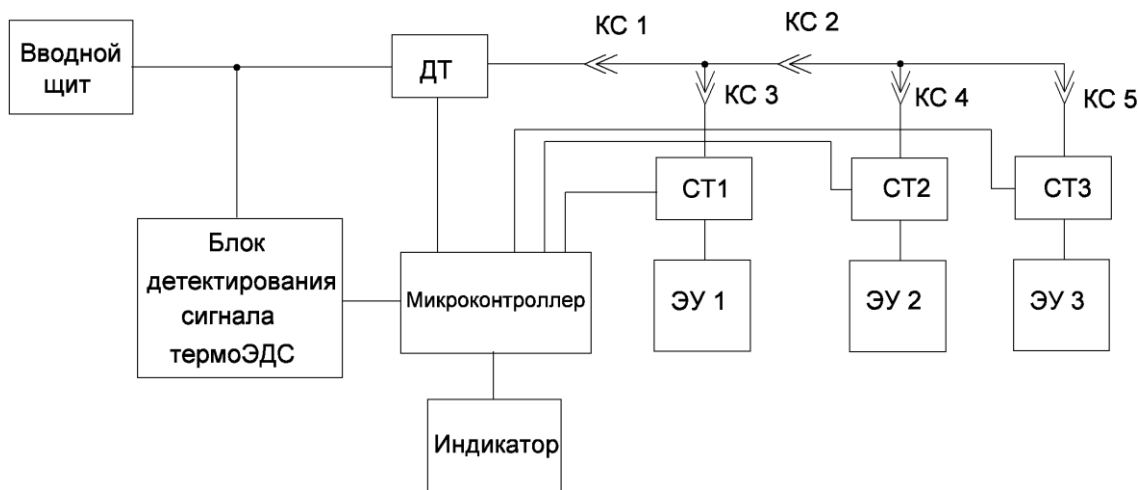


Рисунок 13 – Схема электропитания трех электроустановок с системой мониторинга сопротивления контактного соединения

Схема содержит вводной щит, датчик тока (ДТ), контактные соединения КС1...КС5, сигнализаторы тока СТ1...СТ3, три электроустановки ЭУ1, ЭУ2 и ЭУ3, блок детектирования сигнала термоЭДС, микроконтроллер и индикатор. Первая электроустановка подключена к вводному щиту через датчик тока (ДТ), контактные соединения КС1 и КС3, сигнализатор тока СТ1. Вторая электроустановка подключена к вводному щиту через датчик тока (ДТ), контактные соединения КС1, КС2 и КС4, сигнализатор тока СТ2. Третья электроустановка подключена к вводному щиту через датчик тока (ДТ), контактные соединения КС1 и КС5, сигнализатор тока СТ3.

При включении первой электроустановки, ток протекает через датчик тока (ДТ), контактное соединение КС1, контактное соединение КС2, сигнализатор тока СТ1 и первую электроустановку. Блок детектирования сигнала термоЭДС выделяет сигнал термоЭДС из суммарного сигнала сети электроснабжения и передает его в микроконтроллер. Микроконтроллер считывает этот сигнал только в момент включения первой электроустановки. Момент включения электроустановки определяется по началу протекания тока через сигнализатор тока СТ1. Также в микроконтроллер поступают данные с датчика тока. Микроконтроллер определяет ток, протекающий через первую электроустановку путем вычитания тока до включения из тока после включения. Полученное значение сохраняется в памяти микроконтроллера. Аналогичная процедура осуществляется и при выключении первой электроустановки. По полученным данным о величине тока и термоЭДС микроконтроллер рассчитывает контактное сопротивление. С учетом того, что первая электроустановка подключена к вводному щиту через два контактных

соединения КС1 и КС3 возможно два варианта: первый - через контактное соединение КС1 протекает только ток первой электроустановки, т.е. вторая и третья электроустановки не включены. В этом случае микроконтроллер может рассчитать только суммарное сопротивление двух контактных соединений. Во втором случае включенной может быть вторая или третья электроустановки, либо обе вместе. В этом случае на величину термоЭДС сопротивление контактного соединения КС1 не влияет и микроконтроллер рассчитывает сопротивление контактного соединения КС3.

При включении второй и третьей электроустановки ток протекает аналогично включению первой электроустановки и описаны в 4 главе диссертационной работы

Процесс вычисления контактных соединений КС1, КС2, КС3, КС4 и КС5 из полученных данных включает решение нескольких уравнений. При включении первой электроустановки и включенных второй и/или третьей определяется контактное сопротивление КС3. При включении второй электроустановки и включенных первой и/или третьей рассчитывается контактное сопротивление КС4. При включении третьей электроустановки и включенных первой и/или второй рассчитывается контактное сопротивление КС5. При других комбинациях включения электроустановок рассчитывается суммарное сопротивление нескольких контактов, а затем вычисляется неизвестное контактное сопротивление, например:

$$R_{KC1} = (R_{KC1} + R_{KC3}) - R_{KC3}, \quad (12)$$

где R_{KC1} – сопротивление первого контактного соединения, R_{KC3} – сопротивление третьего контактного соединения.

$$R_{KC2} = (R_{KC2} + R_{KC4}) - R_{KC4}, \quad (13)$$

где R_{KC2} – сопротивление второго контактного соединения, R_{KC4} – сопротивление четвертого контактного соединения.

При другой схеме соединения электроустановок алгоритм прописывается аналогичным образом с учетом наличия конкретных контактных соединений. Таким способом возможно детектировать сопротивление контактов в сети электроснабжения и определять величину этого сопротивления.

В пятой главе приведены электрические характеристики термопары образованной корпусом электронного компонента и радиатором охлаждения в зависимости от толщины нанесенного термоинтерфейса.

Современные радиоэлектронные устройства, как отмечалось в первой главе, широко используют системы охлаждения для поддержания допустимого температурного режима тепловыделяющих электронных компонентов. Система охлаждения состоит из радиатора и теплопроводящей пасты (термоинтерфейса), основная задача которой уменьшить тепловое сопротивление между радиатором и тепловыделяющим электронным компонентом (рис.14).

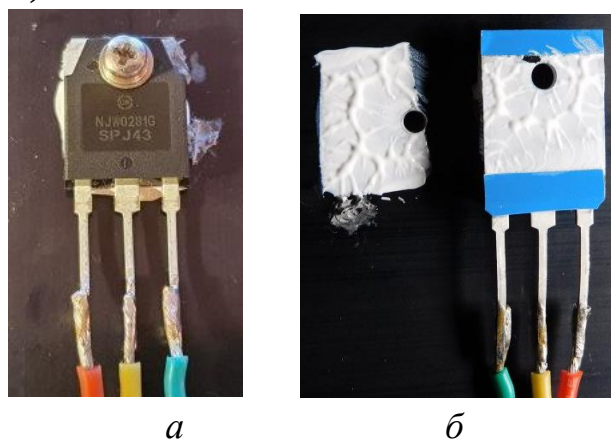


Рисунок 14 – Система охлаждения тепловыделяющего радиоэлектронного компонента в корпусе TO220

Теплопроводящая паста позволяет исключить воздушные полости, возникающие из-за шероховатости соприкасающихся поверхностей, что приводит к некоторому уменьшению теплового сопротивления. Но при этом электрический контакт между двумя поверхностями, изготовленными из проводящего металла, должен остаться. Если контакт отсутствует, то термоэлектрический метод контроля применить невозможно. Поэтому термоэлектрический контроль теплового сопротивления контактной пары корпус тепловыделяющего электронного компонента-радиатор охлаждения, соединенных через керамическую или полимерную прокладки невозможен. Это и есть ограничение термоэлектрического метода контроля теплового сопротивления контактной пары корпус тепловыделяющего электронного компонента-радиатор охлаждения.

Как показал литературный обзор тепловое сопротивление двух соприкасающихся поверхностей зависит от толщины слоя термоинтерфейса между тепловыделяющим электронным компонентом и теплоотводом.

При оптимальном объеме термоинтерфейса заполняются все воздушные полости в зазоре и тепловое сопротивление зазора становится минимальным. При изменении объема термопасты в зазоре в сторону уменьшения или увеличения, увеличивается тепловое сопротивление зазора, и соответственно,

изменяется разность температур по разные стороны зазора, что в свою очередь приводит к увеличению термоЭДС. В результате измерения термоЭДС невозможно сделать заключение о недостатке или избытке термоинтерфейса в зазоре между тепловыделяющим электронным компонентом и теплоотводом.

Для проверки теоретических результатов, представленных выше, был разработан экспериментальный стенд содержащий радиатор охлаждения, транзистор в корпусе ТО220, подключенный к нагрузке, реле для подключения нагрузки. Источник питания для нагрева транзистора. Микроконтроллер для измерения термоЭДС.

ТермоЭДС измеряли дважды, сначала при отключенном резисторе, а потом при подключенном резисторе между корпусом ТО220 транзистора и радиатором охлаждения, после этого проводят расчет внутреннего сопротивления по формуле:

$$R_{\text{вн}} = R \cdot \left(\frac{U_{\text{xx}} - U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \right), \quad (13)$$

где R – сопротивление подключенного резистора; $U_{\text{н}}$ – величина термоЭДС, измеренная при подключенном резисторе; U_{xx} – величина термоЭДС, измеренная при отключенном резисторе.

При экспериментальном исследовании сначала использовалось контактное соединение корпуса ТО220 с радиатором охлаждения без теплопроводящей пасты. При этом тепловое сопротивление между соприкасающимися поверхностями максимально. Затем понемногу добавлялась теплопроводящая паста. Тепловое сопротивление постепенно снижалось, достигая минимального значения, а затем оно стало увеличиваться. При этом ток через транзистор поддерживался постоянным. Транзистор нагревался, его температура контролировалась термопарой. Также контролировалась температура радиатора.

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис.15 -17. На рис.15 показана зависимость разницы температур радиатора и корпуса ТО220 транзистора КТ808А от времени при наличии и при отсутствии теплопроводящей пасты в зазоре между ними. Штрихпунктирная линия соответствует отсутствию теплопроводящей пасты в зазоре, сплошная линия соответствует наличию теплопроводящей пасты в зазоре.

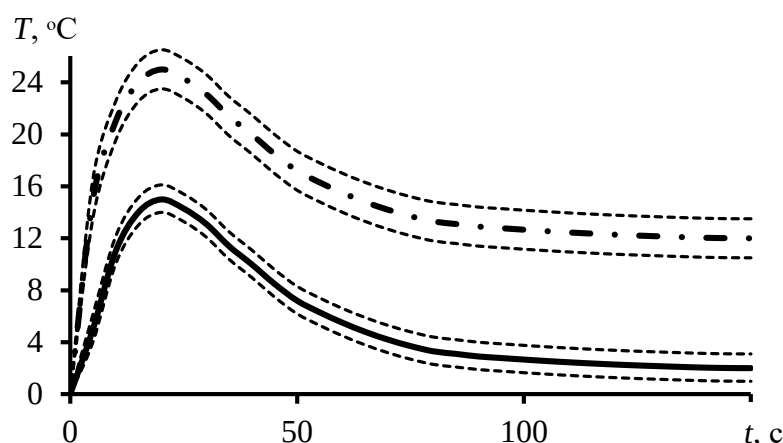


Рисунок 15 – Изменение разницы температур между корпусом ТО220 и радиатором охлаждения от времени, полученные с помощью термопар, штрихпунктирная линия - при отсутствии теплопроводящей пасты в зазоре между ними, сплошная линия - при наличии теплопроводящей пасты в зазоре между ними

Зависимость разницы температур между корпусом ТО220 и радиатором охлаждения от времени имеет экстремум примерно на 25 секунде как с теплопроводящей пастой, так и без нее. До 25 секунды идет увеличение, а после – уменьшение стремясь к установившемуся значению. Длительность переходного процесса не зависит от количества теплопроводящей пасты в зазоре, т.к. определяется только теплоемкостью радиатора и корпуса ТО 220. Доверительный интервал не превышает 10 %. Относительное изменение термоЭДС показано на рис.16. Так как толщину теплопроводящей пасты измерить было невозможно, то определяли зависимость термоЭДС эквивалентного источника от количества теплопроводящей пасты в зазоре, которое коррелирует с толщиной слоя теплопроводящей пасты.

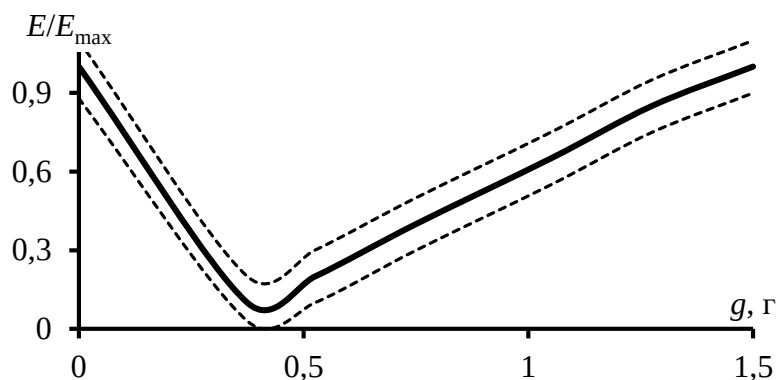


Рисунок 16 – Зависимость относительной термоЭДС эквивалентного источника от количества теплопроводящей пасты

Характер зависимости относительной термоЭДС эквивалентного источника от количества теплопроводящей пасты очень похож на классическую зависимость теплового сопротивления от толщины слоя теплопроводящей пасты в зазоре между корпусом TO220 и радиатором охлаждения. Зависимость внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС в относительных единицах от количества теплопроводящей пасты показана на рис.17.

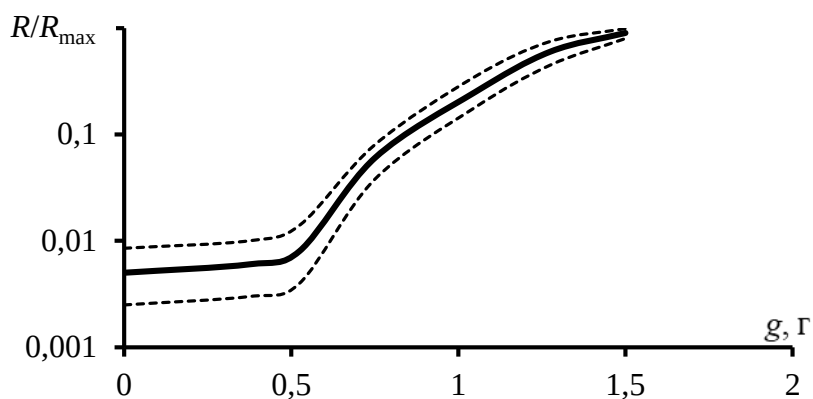


Рисунок 17 – Зависимость внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС в относительных единицах от количества теплопроводящей пасты

Анализируя полученные результаты можно сказать, что гипотеза о характере изменения внутреннего сопротивления от толщины слоя теплопроводящей пасты подтвердилась. Однако, характер экспериментальной зависимости внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС в относительных единицах от количества теплопроводящей пасты отличается от характера расчетной кривой в области превышения теплопроводящей пасты минимально необходимого количества. При отсутствии теплопроводящей пасты внутреннее сопротивление эквивалентного источника термоЭДС оказалось больше расчетного.

Полученная зависимость изменения относительного внутреннего сопротивления от количества теплопроводящей пасты в промежутке между соприкасающимися поверхностями позволяет использовать термоэлектрический метод для контроля теплового сопротивления зазора. При использовании радиаторов и электронных компонентов в корпусах, изготовленных из разных сплавов, необходимо сначала получить калибровочную зависимость изменения относительного внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС, образованного корпусом электронного компонента и радиатором охлаждения от количества

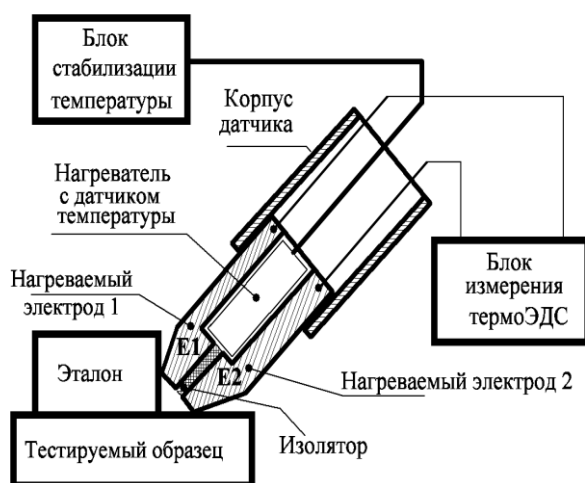
теплопроводящей пасты в промежутке между соприкасающимися поверхностями. Следует отметить, что метод термоэлектрического контроля может быть использован непосредственно во время эксплуатации электронного оборудования.

В шестой главе приведены разработанные варианты устройства по термоэлектрическому контролю металлов и сплавов.

Для входного контроля металлов и сплавов, контроля толщины обезуглероженного слоя и качества термической обработки был разработан и изготовлен первый вариант устройства термоэлектрического контроля металлов и сплавов «ТЕРМОТЕСТ-1М», с дифференциальным датчиком. Авторы разработали и внедрили оригинальную конструкцию датчика, которая удобна в эксплуатации, и является составной частью термоэлектрического прибора «ТЕРМОТЕСТ-1М», на который был получен патент RU 2498281 C1.

Использование дифференциального датчика позволило получить высокую разрешающую способность. При этом производится сравнение эталона с тестируемым изделием. Например, при контроле содержания углерода на поверхности изделия (контроль толщины обезуглероженного слоя) можно выявить изменение от 0,05 %. Основные технические характеристики прибора термоэлектрического контроля металлов и сплавов «ТЕРМОТЕСТ-1М» приведены в главе 6 диссертации.

Конструкция датчика и его положение на тестируемом и эталонном образцах показано на рис.18, *а*. На рис.18, *б* приведена фотография электронного блока.



а



б

Рисунок 18 – Дифференциальный датчик, *а* – схематичное изображение датчика, *б* – фотография электронного блока

Электроды закрепляются в общем корпусе, так чтобы не было электрического контакта между ними. Это можно обеспечить путем установки изолирующей пластины между ними. Результирующая термоЭДС:

$$E_{dif} = E_1 - E_2 \pm E_3 \quad (17)$$

где E_1 – термоЭДС, образованная первым нагреваемым электродом и контрольным образцом, E_2 – ЭДС, образованная вторым нагреваемым электродом и контролируемым изделием, E_3 – ЭДС, образованная эталоном и контролируемым изделием.

Прибор термоэлектрического контроля «ТЕРМОТЕСТ-1М» имеет недостаток, заключающийся в отсутствии контроля контактного сопротивления, которое оказывает влияние на результат контроля. Этот недостаток был устранен в приборе «ТЕРМОТЕСТ-2» путем контроля контактного сопротивления на переменном токе высокой частоты. Был доработан электронный блок устройства и добавлен тракт контроля контактного сопротивления. Фотография прибора показана на рис.19, а. На способ контроля контактного сопротивления и устройство контроля контактного сопротивления были получены патенты РФ №2652657 и №2670365.

Суть метода контроля контактного сопротивления заключается в пропускании высокочастотного переменного тока через первый электрод и детектирование этого тока вторым электродом, при отсутствии контакта на втором электроде не будет переменного тока. При исследовании образцов происходит замыкание между первым и вторым электродом, на котором выделяется этот ток для анализа и принятия решения о наличии или отсутствии контакта. При протекании тока генератора на контактном сопротивлении появится напряжение. Напряжение на контактном сопротивлении, в соответствии с законом Ома, определяется из выражения:

$$U_k = I_m \cdot R_k, \quad (18)$$

где I_m – ток генератора, R_k – контактное сопротивление.

Третья версия устройства термоэлектрического контроля металлов и сплавов с названием «Thermo Fitness Testing» является доработанной версией 2 варианта устройства. Фотография этого прибора показана на рис.19, б, в котором добавлен электронный блок контроля внутреннего сопротивления источников термоЭДС. Это дополнительный параметр контроля, позволяющий различать металлы и сплавы, обладающие близкими

значениями термоэлектрических параметров. Внутреннее сопротивление источников термоЭДС вычисляется по формуле:

$$R_{\text{вн}} = R \cdot \left(\frac{U_{\text{xx}} - U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \right), \quad (19)$$

где R – сопротивление подключенного резистора; $U_{\text{н}}$ – величина термоЭДС, измеренная при подключенном резисторе, U_{xx} – величина термоЭДС, измеренная при отключенном резисторе.

В данной версии устройства сопротивление нагрузки подключено через управляемое реле с возможностью измерения напряжения холостого хода и напряжения при подключенном сопротивлении.



а

б

Рисунок 19 – Приборы термоэлектрического контроля «Термотест-2» (а) и «Thermo Fitness Testing» (б)

Четвертая версия прибора предназначена для контроля металлов и сплавов цилиндрической формы «Термотест-4» (рис.20). Исследование образцов происходит в автоматическом режиме, используется три независимых канала. Блок горячих электродов содержит три горячих электрода с возможностью автоматического перемещения с помощью системы перемещения для обеспечения электрического контакта с контролируемым образцом, что позволяет получить одинаковое усилие прижима электродов к тестируемому образцу. Все три горячих электрода имеют один общий холодный электрод. Такая конфигурация экспериментальной установки позволяет контролировать изделия цилиндрической формы диаметром от 8 до 11 мм и высотой от 60 до 300 мм в автоматическом режиме. При этом происходит одновременное измерение термоЭДС в трех точках, расположенных под углом 120 градусов друг от

друга на поверхности цилиндра. Экспериментальная установка управляется программным обеспечением, с помощью интерфейса оператора.

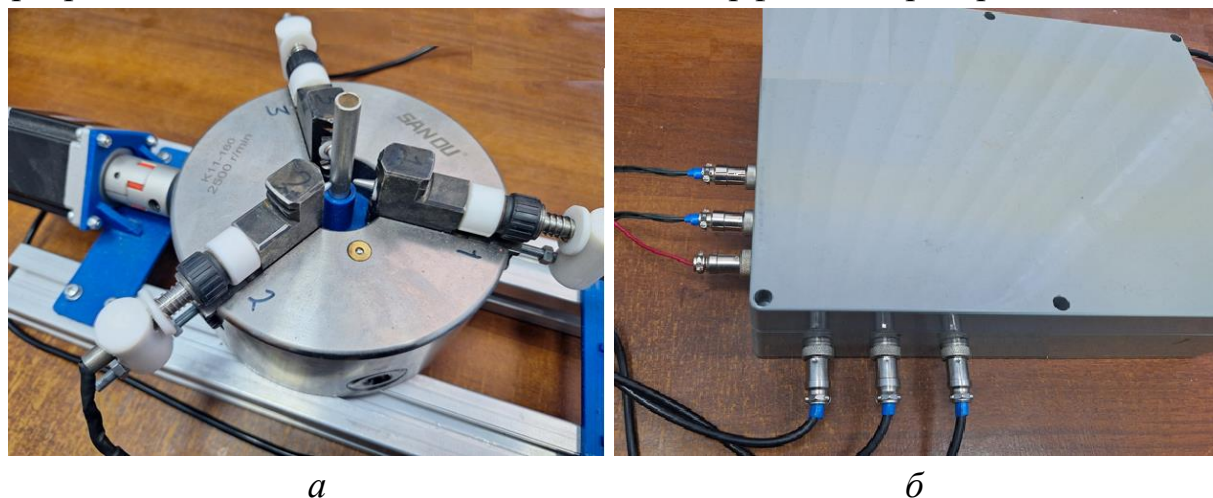


Рисунок 20 – Система перемещения трех горячих электродов, *а* – блок перемещения горячих электродов датчика, *б* – электронный блок

Управление блоком электроники осуществляется с персонального компьютера через блок связи. Для управления блоком электроники была разработана специализированная программа. Интерфейс оператора включает несколько вкладок. Основная вкладка «Измерение» показана на рис.21.

Рисунок 21 – Интерфейс оператора для работы в автоматическом режиме.
Вкладка «Измерение»

«Термотест-4» позволяет измерять термоЭДС от 1 до 1000 мкВ с погрешностью 0,5 мкВ. Для уменьшения уровня шумов в тракте измерения термоЭДС применен низкочастотный фильтр. Измерение температуры горячих электродов производится с точностью 0,5 °С. Измерение термоЭДС производится при разнице температуры горячего и холодного электродов равной заданному значению с отклонением 0,5 °С и только в момент перехода переменного напряжения сети электроснабжения через ноль. Дальнейшая фильтрация осуществляется путем вычисления среднего значения из 10 измерений. Диапазон изменения температуры горячего электрода составляет от 50 °С до 130 °С. Каждый электрод имеет свою систему терморегулирования. Учет температуры окружающей среды осуществляется отдельным датчиком, что позволяет вычислять разницу температур между горячим и холодным электродами.

Описание программы интерфейса оператора представлено в 6 главе диссертации.

Заключение

В диссертации представлены результаты исследования термоэлектрического метода для контроля пластически деформированных металлов и сплавов, металлов и сплавов с близкими значениями термоэлектродвижущей силы, теплового сопротивления зазора между двумя соприкасающимися поверхностями, а также контроль контактного сопротивления в сети электроснабжения без отключения потребителей энергии. В качестве нового информативного параметра был введен параметр «внутреннее сопротивление источника термоЭДС». Представленные результаты расширяют сферу применения термоэлектрического метода на такие области как контроль теплового сопротивления зазора между двумя соприкасающимися поверхностями и контроль контактного сопротивления в сети электроснабжения без отключения потребителей энергии.

Использование нового информативного параметра позволило повысить достоверность контроля металлов и сплавов с близкими термоэлектрическими характеристиками, пластически деформированных металлов и сплавов, а также детектировать количество термоинтерфейса в зазоре двух соприкасающихся поверхностей.

В результате выполнения диссертационной работы были получены новые научные знания, имеющие самостоятельное научное и практическое значение:

- Предложено использовать внутреннее сопротивление источника термоЭДС, образованного двумя разнородными металлами, использоваться в качестве дополнительного информативного параметра при контроле дефектов в металлах и сплавах.

- Предложена методика корректного определения внутреннего сопротивления источника термоЭДС, основанная на учете контактного сопротивления и сопротивления подводящих проводов. Расчет внутреннего сопротивления источника термоЭДС производится путем умножения сопротивления нагрузки на дробь, числитель которой определяется путем вычитания величины термоЭДС при наличии нагрузки и напряжения на контактом сопротивлении и сопротивлении подводящих проводов из величины термоЭДС при отсутствии нагрузки, а знаменатель равен разности величины термоЭДС при наличии нагрузки и напряжения на контактом сопротивлении и сопротивлении подводящих проводов.

- Выявлено отсутствие влияния разницы температур между горячим и холодным спаями источника термоЭДС на его внутреннее сопротивление.

- Выявлено влияние пластической деформации на внутреннее сопротивление источника термоЭДС, образованного пластически деформированным металлом или сплавом.

- Внутреннее сопротивление эквивалентного источника термоЭДС, образованного параллельным соединением нескольких источников термоЭДС, равно параллельному соединению внутренних сопротивлений этих источников термоЭДС.

- Предложен способ определения оптимального количества теплопроводящей пасты в зазоре двух соприкасающихся поверхностей для получения минимального теплового сопротивления между ними, основанный на использовании внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС, образованного параллельным соединением нескольких источников термоЭДС.

- Разработана методика детектирования большого контактного сопротивления в сети электроснабжения из некоторого множества контактных соединений, выбранных для контроля, основанная на данных о включенной электроустановке, токе через эту электроустановку и величине термоЭДС до и после включения электроустановки.

- Созданы уникальные термоэлектрические приборы для контроля степени пластической деформации, определения оптимального количества теплопроводящей пасты между двумя соприкасающимися поверхностями для получения минимального теплового сопротивления между ними, детектирования контактного соединения в сети электроснабжения с большим контактным сопротивлением, не имеющие аналогов в мире.

В процессе выполнения исследований была рассмотрена проблематика определения внутреннего сопротивления источника термоЭДС. Был определен диапазон нагрузочного сопротивления, при котором возможно определение внутреннего сопротивления с достаточной точностью.

Совокупность полученных результатов позволила на высоком научно-техническом уровне решить важную техническую задачу по расширению сферы применения термоэлектрического метода для контроля металлов и сплавов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях рекомендованных ВАК

1. Солдатов А.И., **Солдатов А.А.**, Егоров Ю.П., Костина М.А. Дифференциальный датчик для термоэлектрического контроля металлов и сплавов / Известия вузов. Физика. – 2023. – Т. 66. – № 7. – С. 62-65.

2. Солдатов А.И., Абуеллаиль А.А., **Солдатов А.А.**, Сорокин П.В., Костина М.А. Автоматизированная установка для исследования характеристик источников термоэлектродвижущей силы / Приборы и техника эксперимента. – 2018. – № 3. – С. 152–153.

3. Абуеллаиль А.А., **Солдатов А.А.**, Сорокин П.В., Солдатов А.И., Хан В. Исследование характеристик термоэлектрических источников ЭДС / Дефектоскопия. – 2018. – № 7. – С. 54–60.

4. **Солдатов А.А.**, Солдатов А.И., Хаскова Е.С. Экспериментальные исследования термоэлектрических характеристик пластически деформированных сталей СТ3, 08КП и 12Х18Н10Т / Контроль. Диагностика. – 2014. – № 13. – С. 149–151.

5. Сорокин П.В., **Солдатов А.А.**, Солдатова М.А. Программно-аппаратный комплекс для исследования переходного процесса при экспресс-контроле методом термоЭДС / Контроль. Диагностика. – 2013. – № 13. – С. 22-25.

В изданиях, индексируемых в SCOPUS и WoS

6. Soldatov A.I., **Soldatov A.A.**, Kostina M.A., Abouellail A.A., Bortalevich S.I. Detection algorithm for faulty contact joints in electrical network / Eurasian Physical Technical Journal. – 2025. – Vol. 22(1). – P. 76–82.
7. **Soldatov A.A.**, Soldatov A.I., Kostina M.A., Abouellail A.A. Direct contact resistance measurement during thermoelectric testing / Eurasian Physical Technical Journal. – 2024. – Vol. 21(2). – P. 38–48.
8. **Soldatov A.A.**, Soldatov A.I., Kostina M.A., Abouellail A.A. Hands-on experience of thermo fitness testing device use for thermoelectric evaluation of metallic materials / Devices and Methods of Measurements. – 2024. – Vol. 13(2). – P. 87–94.
9. Kostina, M.A., Soldatov, A.I., **Soldatov, A.A.**, Abouellail, A.A. Simulation of multipoint contact under thermoelectric testing / Eurasian Physical Technical Journal. – 2024. – Vol. 21(1). – P. 93–103.
10. Soldatov A.I., **Soldatov A.A.**, Kostina M.A. Modern trends in the application of thermoelectric method in nondestructive testing (Review) / Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2024. – Т. 60. – № 2. – С. 207–222. / Солдатов А.И., **Солдатов А.А.**, Костина М.А. Современные тренды применения термоэлектрического метода в неразрушающем контроле (обзор) / Дефектоскопия. – 2024. – № 2. – С. 64–83.
11. Abouellail A.A., Chang J., Soldatov A.I., **Soldatov A.A.**, Kostina M.A., Vasiliev I.M. Thermoelectric monitoring of thermal resistance in electronic systems / Eurasian Physical Technical Journal. – 2023. – Vol. 20(3). – P. 52–61.
12. Abouellail A.A., Chang Ts., Soldatov A.I., **Soldatov A.A.**, Kostina M.A., Bortalevich S.I., Soldatov D.A. Laboratory substantiation of thermoelectric method for monitoring contact resistance / Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – Т. 58. – № 12. – P. 1153–1161. / Абуеллаиль, А.А., Чан Ц., Солдатов А.И., **Солдатов А.А.**, Костина М.А., Борталевич С.И., Солдатов Д.А. Лабораторное обоснование термоэлектрического метода контроля переходного сопротивления контактов / Дефектоскопия. – 2022. – № 12. – С. 70–78.
13. Vasiliev, I., **Soldatov, A.**, Abouellail, A., ...Soldatov, D., Bortalevich, S. Thermoelectric quality control of the application of heat-conducting compound / Studies in Systems, Decision and Control. – 2021. – Vol. 351. – P. 59–68.
14. **Soldatov A.A.**, Soldatov A.I., Vasil'ev I.M., Dement'ev A.A. Control of quality of applying heat-conducting compound / Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2020. – Vol. 56. – № 3. – P. 284–290. / **Солдатов А.А.**, Дементьев А.А., Солдатов А.И., Васильев И.М. Контроль качества нанесения теплопроводящего компаунда. Дефектоскопия. – 2020. – № 3. – С. 65–71.

15. Abouellaill A.A., **Soldatov A.A.**, Sorokin P.V., Soldatov A.I., Obach I.I. Research of thermocouple electrical characteristics / Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 938. – С. 104–111.

16. Soldatov A.I., **Soldatov A.A.**, Sorokin P.V., Abouellaill A.A., Kostina M.A. Thermoelectric method of plastic deformation detection / Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 938. – P. 112–118.

17. **Soldatov A.A.**, Seleznev A.I., Fiks I.I., Soldatov A.I., Kroening M. Nondestructive proximate testing of plastic deformations by differential thermal EMF measurements / Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2012. – Vol. 48(3). – P. 184–186. / Солдатов А.И., Селезнев А.И., Фикс И.И., **Солдатов А.А.**, Крёнинг Х.М.В.А. неразрушающий экспресс-контроль пластической деформации с помощью измерения дифференциальной термоЭДС \ Дефектоскопия. – 2012. – № 3. – С. 49–52.

Патенты

18. Патент RU 2835959. Устройство предупреждения пожара из-за неисправности контактного соединения в электрической сети / Солдатов А.И., Костина М.А., **Солдатов А.А.**; заявитель и патентообладатель "Национальный исследовательский Томский политехнический университет". – № 2024116515; заявл. 17.06.2024; опубл. 06.03.2025, Бюл. № 7. – 13 с.

19. Патент RU 2796193. Способ предупреждения пожара из-за неисправности контактного соединения в электрической сети / Солдатов А.И., **Солдатов А.А.**, Костина М.А., Нариманова Г.Н.; заявитель и патентообладатель "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники". – № 2022127623; заявл. 17.05.2023; опубл. 25.10.2022. Бюл. № 14

20. Патент RU 221918. Устройство предупреждения пожара из-за неисправностей контактного соединения в электрической сети / Солдатов А.И., **Солдатов А.А.**, Костина М.А., Нариманова Г.Н.; заявитель и патентообладатель "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники". – № 2023126791; заявл. 19.10.2023; опубл. 30.11.2023, Бюл. № 34. – 7 с.

21. Патент RU 2762125. Устройство неразрушающего контроля неисправностей в электрической сети / Солдатов А.И., **Солдатов А.А.**, Костина М.А., Нариманова Г.Н., Солдатов Д.А., Борталевич С.И.; заявитель и патентообладатель "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники". – № 2021105791; заявл. 09.03.2021; опубл. 15.12.2021, Бюл. № 35. – 8 с.

22. Патент RU 2762526. Способ неразрушающего контроля неисправностей в электрической сети / Солдатов А.И., **Солдатов А.А.**, Костина М.А., Нариманова Г.Н., Солдатов Д.А., Борталевич С.И.; заявитель и патентообладатель "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники". – № 2021105793; заявл. 09.03.2021; опубл. 21.12.2021, Бюл. № 36. – 8 с.

23. Патент RU 2687300. Устройство для измерения теплового сопротивления между корпусом полупроводникового прибора и радиатором охлаждения / Солдатов А.И., **Солдатов А.А.**, Васильев И.М., Шульгина Ю.В., Костина М.А., Сорокин П.В.; заявитель и патентообладатель "Национальный исследовательский Томский политехнический университет". – № 2018131965; заявл. 05.09.2018; опубл. 13.05.2019, Бюл. № 14. – 9 с.

24. Патент RU 2686859. Способ измерения теплового сопротивления между корпусом полупроводникового прибора и радиатором охлаждения / Солдатов А.И., **Солдатов А.А.**, Васильев И.М., Шульгина Ю.В., Костина М.А., Сорокин П.В.; заявитель и патентообладатель "Национальный исследовательский Томский политехнический университет". – № 2018131969; заявл. 05.09.2018; опубл. 06.05.2019, Бюл. № 13. – 10 с.

25. Патент RU 2656128. Способ неразрушающего контроля неисправностей в электрической сети / Солдатов А.И., **Солдатов А.А.**, Костина М.А., Борталевич С.И., Логинов Е.Л.; заявитель и патентообладатель "Национальный исследовательский Томский политехнический университет". – № 2017105632; заявл. 20.02.2017; опубл. 14.06.2018, Бюл. № 16. – 8 с.

26. Патент RU 2656117. Устройство неразрушающего контроля неисправностей в электрической сети / Солдатов А.И., **Солдатов А.А.**, Костина М.А., Борталевич С.И., Логинов Е.Л., Сорокин П.В.; заявитель и патентообладатель "Национальный исследовательский Томский политехнический университет". – № 2017111730; заявл. 06.04.2017; опубл. 31.05.2018, Бюл. № 16. – 8 с.

27. Патент RU 2670365. Устройство контроля электрического контакта электродов с контролируемым изделием при разбраковке металлических изделий. Солдатов А.И., **Солдатов А.А.**, Костина М.А., Нариманова Г.Н.; заявитель и патентообладатель "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники". – № 2017137573; заявл. 26.10.2017; опубл. 22.10.2018, Бюл. № 30. – 9 с.

28. Патент RU 2652657. Способ контроля наличия контакта нагреваемого электрода с контролируемым изделием при разбраковке металлических изделий. Солдатов А.И., **Солдатов А.А.**, Костина М.А.,

Нариманова Г.Н.; заявитель и патентообладатель "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники". – № 2017108676 от 15.03.2017; опубл. 28.04.2018, Бюл. № 13. – 9 с.

29. Патент RU 2624787. Устройство для неразрушающего контроля шероховатости поверхностного слоя металла / Солдатов А.И., **Солдатов А.А.**, Сорокин П.В., Мельников А.Г., Костина М.А.; заявитель и патентообладатель "Национальный исследовательский Томский политехнический университет". – № 2016132020; заявл. 03.08.2016; опубл. 06.07.2017, Бюл. № 28. – 7 с.

30. Патент RU 2619798. Способ неразрушающего контроля шероховатости поверхностного слоя металла / Солдатов А.И., **Солдатов А.А.**, Сорокин П.В., Мельников А.Г., Костина М.А.; заявитель и патентообладатель "Национальный исследовательский Томский политехнический университет". – № 2016110551; заявл. 22.03.2016; опубл. 18.05.2017, Бюл. № 14. – 9 с.

31. Патент RU 2495410. Устройство для разбраковки металлических изделий / Солдатов А.И., **Солдатов А.А.**, Селезнев А.И., Кренинг Х.М.В.А.; заявитель и патентообладатель "Национальный исследовательский Томский политехнический университет". – № 2012116376/28; заявл. 23.04.2012; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 28. – 7 с.

32. Патент RU 2498281. Термоэлектрический способ неразрушающего контроля качества поверхностного слоя металла / Солдатов А.И., **Солдатов А.А.**, Селезнев А.И., Кренинг Х.М.В.А.; заявитель и патентообладатель "Национальный исследовательский Томский политехнический университет". – № 2012116375/28; заявл. 23.04.2012; опубл. 10.11.2013, Бюл. № 31. – 87 с.