

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Солдатов Алексей Иванович

Томск – 2020

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....	11
1.1 Методы контроля металлов и сплавов.....	11
1.1.1 Рентгенографический метод.....	12
1.1.2 Ультразвуковой контроль.....	13
1.1.3 Метод магнитоупругого эффекта.....	15
1.1.4 Тепловой метод контроля.....	16
1.2 Термоэлектрический метод.....	18
1.2.1 Явления Зеебека.....	18
1.3 Измерение термоЭДС.....	20
1.4 Основные требования для точных термоэлектрических измерений.....	22
1.5 Проблемы измерения термоЭДС.....	24
1.6 Типовые методы измерения термоЭДС.....	26
1.7 Термоэлектрическая характеристика тонкопленочного образца.....	29
1.8 Улучшенные измерения термоЭДС с использованием четырехточечного метода.....	34
1.9 Измерительные приборы.....	41
1.10 Постановка задачи.....	63
ВЫВОДЫ.....	65
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ.....	66
2.1 Методика расчета эквивалентного источника.....	66
2.2 Разработка модели.....	68
2.2.1 Интерфейс программного обеспечения.....	71

2.3	Экспериментальное исследование характеристик термоэлектрических источников ЭДС	74
2.4	Верификация модели	87
2.5	Теоретические исследования характеристики эквивалентного источника при многоточечном контакте	91
ВЫВОДЫ		98
ГЛАВА 3 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ		99
3.1	Экспериментальная установка для исследования	99
3.1.1	Блок управления термокамерой	103
3.2	Термоэлектрический дефектоскоп «Thermo Fitness Testing»	109
3.3	Экспериментальные исследования	116
3.4	Основные технические характеристики прибора «Thermo Fitness Testing»	120
ВЫВОДЫ		122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		125
ПРИЛОЖЕНИЕ А		138

ВВЕДЕНИЕ

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 К. 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 для исследования электрических характеристик эквивалентного источника термоЭДС при параллельном соединении нескольких источников термоЭДС, возникающих при многоточечном контакте электрода с контролируемым образцом на основе метода наложения.

2. Разработана экспериментальная установка для исследования характеристик источников термоЭДС, позволяющая проводить исследования в широком диапазоне температур.

3. Исследованы электрические характеристики различных источников термоЭДС и эквивалентного источника термоЭДС при параллельном соединении различных типов источников термоЭДС.

4. 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.

5. Выявлено влияние сопротивления нагрузки на электрические характеристики термоэлектрического источника.

Практическое значение:

1. Полученные аналитические выражения для определения взаимосвязи между термоЭДС и сопротивлением нагрузки в предлагаемой модели могут быть использованы для определения влияния неоднородности и шероховатости поверхности металлов при термоэлектрическом контроле металлов.

2. Предлагаемый метод термоэлектрического контроля качества поверхностного слоя металла 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 Полюс».

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, список которых приведен в конце диссертации.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Объем диссертации составляет 139 страниц, 76 рисунков и 7 таблиц. Список использованных источников содержит 130 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 приведены основные сведения о методах контроля металлов и о термоэлектродвижущей силе, причинах ее возникновения. Описаны явления Зеебека, Томсона и Пельтье. Кроме того, представлен обзор приборов и методов контроля термоЭДС. Оценено влияние электрических и тепловых контактных сопротивлений на результат контроля. Рассмотрены особенности контактного соединения электродов с контролируемым образцом при ручном контроле. Выявлены недостатки термоэлектрического метода контроля при использовании точечного контакта электрода с контролируемым образцом. На основе проведенного анализа сделан выбор в пользу дифференциального термоэлектрического метода контроля.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований электрических характеристик нескольких типов источников термоЭДС. Получено аналитическое выражение для описания нагрузочной характеристики источника термоЭДС на основе полинома Лагранжа четвертой степени. Рассмотрена методика расчета эквивалентного источника термоЭДС, который состоит из нескольких соединенных параллельно индивидуальных источников термоЭДС, при многоточечном контакте электрода с контролируемым образцом, основанная на методе наложения. На основе метода наложения разработана математическая модель с использованием пакета прикладных программ LabView. Проведена верификация модели на основе экспериментальных данных, полученных в предыдущем разделе. На основе

разработанной модели проведены исследования характеристик эквивалентного источника термоЭДС при различных вариациях параметров и количества индивидуальных источников термоЭДС. Показана необходимость многоточечного контакта электрода с контролируемым образцом при контроле легированных сталей.

В третьей главе представлена техническая реализация результатов исследования. В разделе 3.1 описывается экспериментальная установка, которая позволяет проводить практические исследования электрических характеристик различных типов источников термоЭДС, а также их комбинации при параллельном соединении. В разделе 3.2 дано описание устройства контроля металлов на основе дифференциального термоэлектрического метода. В разделе 3.3 представлены результаты экспериментальных исследований.

Выводы по работе выполняются в конце каждой главы.

В заключении отражены основные результаты, полученные в диссертации.

ГЛАВА 1. ОБЗОР НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Сегодня современные неразрушающие испытания используются при производстве изделий, в процессе их эксплуатации, чтобы гарантировать целостность и надежность продукции, контролировать производственные процессы, снижать производственные затраты и поддерживать постоянный уровень качества. Неразрушающий контроль используется для обеспечения качества материалов и их соединения в процессе изготовления, а неразрушающий контроль в процессе эксплуатации используется для обеспечения целостности и безопасности изделий.

1.1 Методы контроля металлов и сплавов

Испытание металла – это процесс или процедура, используемая для проверки состава неизвестного металлического вещества. Есть деструктивные процессы и неразрушающие процессы. Испытания металлов могут также включать определение свойств вновь созданных металлических сплавов. Поскольку многие базы данных о химических свойствах легко доступны, идентификация чистых металлов без маркировки может быть быстрым и легким процессом, при этом исходный образец пригоден для повторного использования. Этот тип тестирования является неразрушающим. Однако при работе со сплавами определение точного состава может привести к тому, что исходный образец будет разделен на исходные материалы, а затем измерен и рассчитан. После того, как объекты известны, их можно найти и сопоставить с известными сплавами. Если оригинальный образец будет уничтожен в процессе контроля, то этот тип тестирования является разрушающим.

Наиболее часто используемые методы испытаний - это рентгенографическое исследование, ультразвуковое испытание, электромагнитное

испытание и термоэлектрическое испытание. В следующих разделах рассматриваются некоторые известные традиционные и современные методы идентификации металлов, а также достоинства и недостатки их использования.

1.1.1 Рентгенографический метод

Рентгенографический метод – это метод неразрушающего контроля, который включает использование рентгеновских или гамма-лучей для просмотра внутренней структуры объекта [1]. В нефтехимической промышленности рентгеновский метод часто используется для проверки машин, таких как сосуды под давлением и клапаны, для выявления дефектов и также используется для проверки качества ремонта сварного шва. По сравнению с другими методами контроля, рентгенография имеет несколько преимуществ. Он имеет высокую достоверность результатов контроля, может использоваться на различных материалах, а собранные данные могут быть сохранены для последующего анализа. Рентгенография - эффективный инструмент, который требует очень небольшой подготовки поверхности. Кроме того, многие рентгенографические системы являются портативными, что позволяет использовать их в полевых условиях.

Существуют многочисленные типы рентгеновских методов, включая обычную рентгенографию и цифровое рентгенографическое тестирование. Каждый из них имеет небольшое отличие и свой набор преимуществ и недостатков. Обычная рентгенография (рисунок 1.1) использует чувствительную пленку, которая реагирует на испускаемое излучение, чтобы захватить изображение тестируемой детали. Затем это изображение можно проверить на наличие повреждений или дефектов. Самым большим ограничением этой техники является то, что пленка может использоваться только один раз, и на ее обработку и интерпретацию уходит много времени. В отличие от обычной рентгенографии, цифровая рентгенография не требует пленки [2]. Вместо этого используется цифровой детектор для почти мгновенного отображения рентгенографических изображений на экране компьютера. Это позволяет значительно сократить время

экспозиции, чтобы изображения могли интерпретироваться быстрее. Кроме того, цифровые изображения имеют гораздо более высокое качество по сравнению с обычными рентгенографическими изображениями. Благодаря возможности получать высококачественные изображения эта технология может быть использована для выявления дефектов в материале, посторонних предметов в системе, проверки качества ремонта сварного шва и проверку наличия коррозии под изоляцией. Четырьмя наиболее часто используемыми методами цифровой радиографии в нефтегазовой и химической промышленности являются компьютерная рентгенография, прямая рентгенография, рентгенография в реальном времени и компьютерная томография [3].

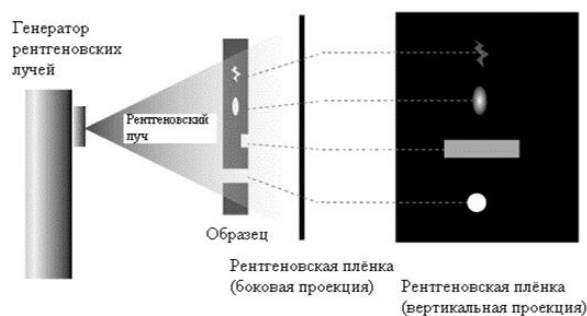


Рисунок 1.1 – Система рентгенографии для неразрушающего контроля металлов

1.1.2 Ультразвуковой контроль

Ультразвуковой контроль – это группа методов неразрушающего контроля, которые используют короткие высокочастотные ультразвуковые волны для выявления дефектов в материале [4, 5]. Принцип работы основан на излучении упругой волны в контролируемый материал (рисунок 1.2). Измеряя эти волны, свойства материала и внутренние недостатки могут быть идентифицированы. Большинство устройств ультразвукового контроля состоят из множества отдельных блоков. Они могут включать в себя излучатели и приемники, преобразователи и мониторы. Виды контролируемых объектов зависят от типа ультразвукового контроля, который выполняет инспектор.

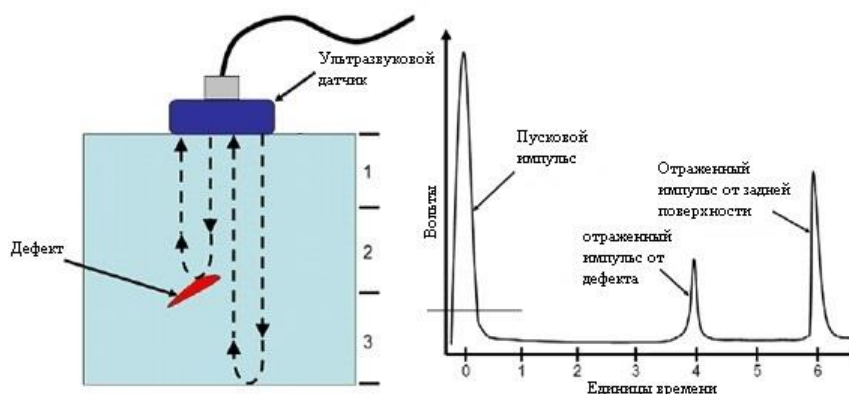


Рисунок 1.2 – Принцип ультразвукового контроля

Существует несколько различных типов ультразвукового контроля, в том числе:

- Ультразвуковая методика обратного рассеяния [6, 7].
- Ультразвуковой контроль фазированными решетками – это методика ультразвукового контроля, в которой используется набор зондов, состоящих из множества (от 16 до более 250) мелких элементов. Каждый из элементов в системе способен пульсировать индивидуально. Это делается с помощью рассчитанного компьютером времени, с помощью процесса, известного как фазирование. Это позволяет системе направлять сфокусированный луч под различными углами и фокусными расстояниями [8].
- Ультразвуковой контроль протяженных объектов – это метод ультразвукового контроля, разработанный для тестирования больших объемов материала из одной контрольной точки. Этот метод работает путем равномерного закрепления колец преобразователя вокруг трубы. Эти кольца затем генерируют серию низкочастотных волн. Волны могут затем распространяться симметрично вдоль оси трубы. Это обеспечивает полное покрытие стенки трубы [9].
- Внутренняя вращающаяся инспекционная система – это ультразвуковой метод, используемый для обнаружения коррозии в трубопроводах. Зонд помещается в затопленную трубу и движется по трубе, сканируя по ходу движения [10].

– Дифракция во время распространения волны – это метод, используемый для поиска дефектов в сварных швах. Информативным параметром является время распространения ультразвукового импульса, чтобы найти местоположение отражателя. При этом используются отдельные датчики. Передатчик излучает низкочастотные волны, которые распространяются под углом. Они возвращаются к приемнику только в том случае, если они попали в дефект [11, 12].

– Ультразвуковой контроль в сухом состоянии – это альтернативный, недорогой метод, для которого не требуется иммерсионная жидкость для получения хорошего акустического контакта датчика с контролируемым изделием. Кроме того, преобразователи способны выдерживать высокие напряжения. Это универсальный метод, который может быть выполнен с использованием гибких, контактных, колесных или дистанционных преобразователей [13].

В целом ультразвуковой контроль имеет несколько преимуществ и недостатков. Во-первых, можно определять внутренние дефекты изделий. Во-вторых, метод очень прост и очень точен. С другой стороны, не все материалы восприимчивы к ультразвуковому контролю. У него также есть недостаток, заключающийся в том, что для его выполнения требуется высокая квалификация и большой опыт работы.

1.1.3 Метод магнитоупругого эффекта

Обратный магнитострикционный эффект (также известный как магнитоупругий эффект) - это название, данное изменению магнитной восприимчивости (мера, указывающая степень намагниченности материала в ответ на приложенное магнитное поле) материала, когда он подвергается механическому воздействию (рисунок 1.3) [14].

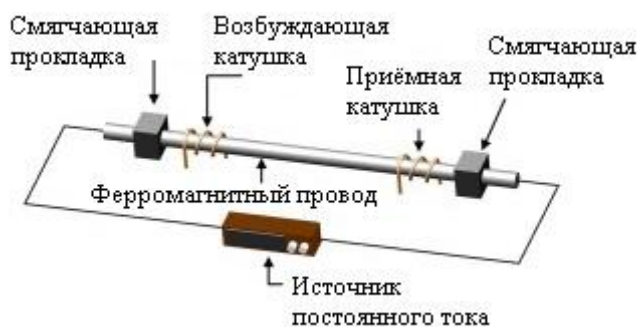


Рисунок 1.3 – Магнитострикционная технология контроля

По сравнению с традиционными технологиями контроля, такими как ультразвук, магнитострикционная технология имеет преимущества, заключающиеся в том, что она является стационарной техникой и имеет хорошую чувствительность, долговечность, широкое применение, простоту внедрения. Этот метод широко применяется в химической, нефтяной, газовой и электроэнергетической промышленности, а также при испытаниях вантовых мостов. Недостаток этого метода заключается в том, что могут быть проверены только объемные материалы, и эффективность преобразования может быть низкой на более высоких частотах.

1.1.4 Тепловой метод контроля

Тепловое или инфракрасное тестирование, используется для измерения или отображения температуры поверхности на основе инфракрасного излучения, испускаемого объектом при прохождении тепла через этот объект или к нему [15, 16]. Большая часть инфракрасного излучения длиннее волны, чем видимый свет, но его можно обнаружить с помощью тепловизоров, обычно называемых «инфракрасными камерами». Для точного ИК-тестирования исследуемая деталь должна находиться в прямой видимости с камерой, то есть не должна перекрываться посторонними предметами, поскольку они рассеивают тепло и могут привести к ложным показаниям. При правильном использовании тепловизионные изображения могут использоваться для обнаружения

коррозионных повреждений, расслоений, отслоений, пустот, включений, а также многих других вредных условий.

Кроме того, как показано на рисунке 1.4, в термографическом контроле существует два подхода: первый - пассивный, при котором интересующие признаки естественным образом находятся при более высокой или более низкой температуре, чем фон (рисунок 1.4.а); и второй - активный, в котором источник энергии необходим для создания теплового контраста между интересующим элементом и фоном (рисунок 1.4.б) [17, 18, 19].

ИК термография имеет ряд преимуществ - это бесконтактное измерение, она захватывает фиксированную область (аналогично классической видеокамере в видимом спектре) или может измерять движущиеся или вращающиеся объекты, даже если объекты имеют очень высокую температуру. Основным недостатком ИК-термографии является тот факт, что на результат влияет ряд факторов, таких как термооптические свойства объекта (излучательная способность, коэффициент пропускания, отражательная способность), температура окружающей среды, свойства окружающей среды и т. д.

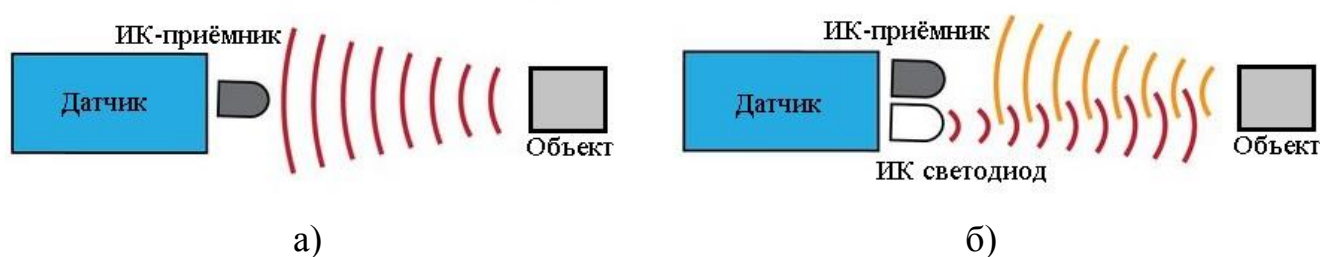


Рисунок 1.4 – Принципы термографического измерения, а) пассивный термографический контроль, б) активный термографический контроль

Кроме того, для точного измерения температуры основополагающим является знание оптических свойств измеряемого объекта. Определение этих свойств часто является сложной задачей и требует опыта и соответствующего оборудования.

1.2 Термоэлектрический метод

Термоэлектрический метод широко используется в области неразрушающего контроля металлов и сплавов [20, 21]. Это позволяет наиболее легко решить некоторые конкретные производственные проблемы:

- входной контроль на соответствие сертификату поставляемой продукции;
- определение наличия обезуглероженного слоя и его глубины [22];
- определения толщины слоя цементации стали [23];
- сортировка готовой продукции по маркам сталей и сплавов [24-27];
- контроль качества термической обработки [28].

Одним из несомненных достоинств термоэлектрического метода является возможность экспресс-контроля [29, 30]. Еще одним преимуществом является указание на простоту технической реализации этого метода и, следовательно, компактность и автономность термоэлектрических контрольных устройств, простоту подготовки образцов и интуитивно понятную технику контроля, которая не требует специальной подготовки персонала [31 -35]. Вот почему в последнее время растет интерес к таким устройствам контроля.

1.2.1 Явления Зеебека

Явление термоэлектричества впервые было обнаружено в 1826 г. Зеебеком [36 - 40], который обнаружил, что ток будет течь в замкнутой цепи, состоящей из двух разнородных металлов, когда два перехода поддерживаются при разных температурах. В настоящее время, когда рассматривается эффект Зеебека, обычно подразумевается, что исследуется разомкнутая цепь (режим считывания), такая как показанная на рисунке 1.5. Напряжение представляет собой термоэлектрическую мощность пары, а термоэлектрическая мощность пары определяется формулой:

$$E = -S * \Delta T \quad (1.1)$$

где S - коэффициент Зеебека, ΔT - градиент температуры.

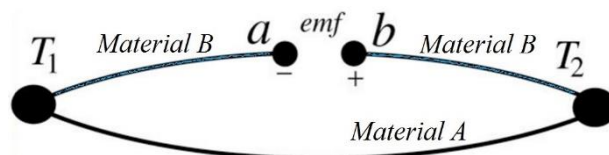


Рисунок 1.5 – Открытая цепь, которая отображает эффект Зеебека

Термоэлектрические эффекты связаны с фундаментальным взаимодействием между электронными и тепловыми свойствами системы. Эти эффекты чаще всего наблюдаются путем измерения электрических величин (напряжения и тока), вызванных тепловыми градиентами. Электрически индуцированный тепловой поток генерирует температурный градиент и его не следует путать с нагревом Джоуля. Двумя первыми термоэлектрическими эффектами являются эффект Зеебека и эффект Пельтье, который в сочетании с законами термодинамики может быть использован для получения всех других термоэлектрических эффектов [41]. Когда проводящий материал подвергается термическому градиенту, носители заряда мигрируют вдоль градиента от горячего к холодному; это эффект Зеебека. В условиях разомкнутой цепи носители заряда будут накапливаться в холодной области, что приводит к образованию разности электрических потенциалов (рисунок 1.5). Как правило, эффект Зеебека описывается локально созданным термоэлектрическим полем и определяется как:

$$S = -\frac{\Delta V}{\Delta T}, \quad (1.2)$$

где V – напряжение;

S – коэффициент Зеебека;

ΔT – разность температур между проводниками.

Когда один из двух проводников нагревается, электроны движутся от горячего к холодному проводнику. Если проводники соединены в электрическую цепь, создается постоянный ток (DC), который соответственно протекает через

эту цепь. Однако величина термоЭДС очень мала, как правило, всего несколько микровольт на градус Кельвина. Если разность температур достаточно велика, то в лучшем случае можно получить несколько милливольт.

На рисунке 1.5 показаны два полупроводника из разных материалов А-типа и В-типа, которые последовательно соединены для получения термоэлектрического генератора. Если вольтметр подключен между концами «а» и «b», схема будет работать как датчик температуры. Такая схема может быть соединена последовательно для увеличения выходного напряжения или параллельно для увеличения выходного тока. Большое количество термоэлектрических устройств может использоваться для получения электроэнергии, когда большая разница температур поддерживается на стыках.

Явление Зеебека объясняет работу термопар, используемых для измерения температуры. Эта особенность также используется в технологии термоэлектрического охлаждения и контроля качества металлов и сплавов. Наиболее распространенными комбинациями металлов для термопар являются медь-константан, железо-константан, хромель-константан, алюмель-константан и хромель-алюмель.

1.3 Измерение термоЭДС

Измерение термоэлектричества производится по разным методикам. Широко распространены два метода: интегральный и дифференциальный [42].

Интегральный метод

Схема контроля термоЭДС с помощью интегрального метода приведена на рисунке 1.6.

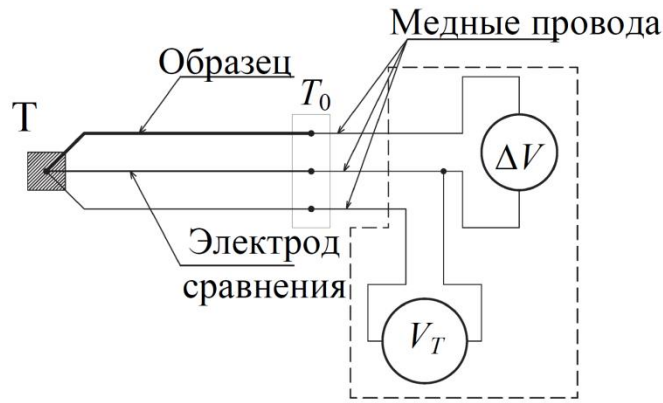


Рисунок 1.6 – Интегральный метод контроля термоЭДС: T – температура рабочего спая, T_0 – опорная температура, V_T – напряжение термопары

Схема включает два разнородных проводника, причем один это испытуемый образец, а другой - эталон, соединенных с вольтметром. Для измерения температуры (T) контакта испытуемого образца и электрода сравнения используют дополнительный электрод с известной термоЭДС, который образует вместе с эталоном термопару.

$$\Delta V = -\int_{T_0}^T (S_x - S_l) \cdot dT, \quad (1.3)$$

где $(S_x - S_l)$ - относительная термоЭДС проводников, T – температура рабочего спая, T_0 – опорная температура.

При использовании этого метода необходимо изготавливать образцы в виде однородных проволок, что является основным недостатком этого метода, т.к. изготовление образцов такой формы очень трудно или невозможно. Поэтому этот метод измерения термоЭДС не получил широкого распространения.

Дифференциальный метод

Контроль образцов небольших размеров и произвольной формы, включая тонкие пленки, проводят дифференциальным методом [43], схема которого показана на рисунке 1.7. Разность температур между двумя точками на образце измеряется с помощью двух термопар (или других датчиков температуры), а термоЭДС ΔV измеряется между одноименными ветвями этих же термопар.

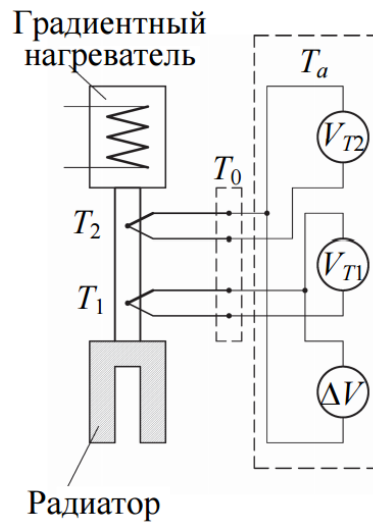


Рисунок 1.7 – Схема дифференциального метода измерения термоЭДС

Нагреватель формирует тепловой поток, который проходя через контролируемый образец, создает в нем градиент температуры. Для измерения этого градиента температур используются две термопары, установленные в разных точках на поверхности образца. Формула для расчета абсолютной термоЭДС имеет вид:

$$S_x = -\frac{\Delta T}{\Delta V} + S_l, \quad (1.3)$$

где S_x и S_l - коэффициенты термоЭДС образца и эталона, ΔV - разность потенциалов между образцом и эталоном, ΔT - градиент температуры.

1.4 Основные требования для точных термоэлектрических измерений

Из предыдущего обсуждения можно сделать следующие заключения:

1. Величина ЭДС зависит от материалов проводников и разности температур между точками их соединения [44-50].

2. Процесс преобразует тепловую энергию в электрическую, и этот процесс обратим [51-62].

3. Измерение термоЭДС не может быть связано с измерением температуры, если ток потока внутри термопары не заблокирован. Поскольку, если ток пропускается, он изменяет температурные параметры переходов (эффект Пельтье) [63, 64].

Температурный градиент ΔT в металлах пропорционален градиенту плотности подвижных носителей заряда и, соответственно, электрическому градиенту потенциала ΔV . Отношение электрического градиента потенциала ΔV к температурному градиенту ΔT дает коэффициент Зеебека $S = \Delta V / \Delta T$. В отличие от эффекта Холла потенциал термоЭДС однозначно имеет корреляцию с основным типом носителей заряда, не обращая внимания на систему их движения. Однако следует принимать осторожные меры безопасности, если необходимы точные измерения термоЭДС. Например, следует тщательно рассмотреть существенные характеристики переноса носителей заряда. Однако, многие из коммерчески доступных устройств не удовлетворяют этим существенным условиям и, как следствие, имеют методическую погрешность измерения [59-61].

При точных измерениях термоЭДС необходимо выполнить следующие условия:

- Измерения температуры и потенциала должны быть произведены в одной и той же точке контролируемого образца.
- Механический контакт электрода с контролируемым образцом приводит к скачку температуры между электродом и образцом.
- При механическом прижиге электрода к образцу создается барьер Шоттки.
- При механическом соединении двух проводящих твердых материалов возникает контактная разность потенциалов, в том числе и в паяных соединениях. Знак и величина контактной разности потенциалов определяется положением уровня Ферми. Кроме того, имеются другие, трудно учитываемые поверхностные

эффекты. Для достоверного измерения термоЭДС необходимо устранить влияние контактной разности потенциалов.

- Коэффициент Зеебека S является функцией температуры, поэтому и контактная разность потенциалов ΔV зависит от ΔT . Следовательно, коэффициент Зеебека $S(T_0)$ необходимо определять для $S(T)$ при $T \rightarrow T_0$.

1.5 Проблемы измерения термоЭДС

Обычно коэффициент Зеебека, который непосредственно связан с термоЭДС, рассчитывается как $S = \Delta V / \Delta T$, и вычисляется путем измерения термоэлектрического потенциала $V(T)$ при двух разных температурах. При этом предполагается, что $S(T)$ является линейной функцией [65, 66], что не учитывает возможное влияние контактной разности потенциалов (рисунок 1.8). Это может привести к тому, что в некоторых случаях даже знак S может оказаться неправильным [67, 68, 69].

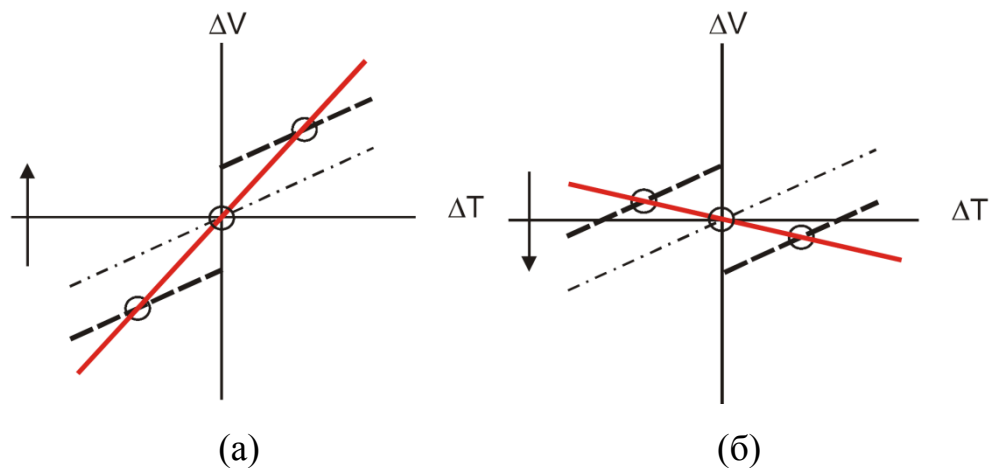


Рисунок 1.8 – Влияния контактной разности потенциалов на коэффициент Зеебека, (а) положительная контактная разность потенциалов; (б) отрицательная контактная разность потенциалов

На рисунке 1.8 приняты следующие обозначения: кружочком показаны результаты измерения; стрелками показана контактная разность потенциалов;

жирными пунктирными линии показано влияние контактной разности потенциалов; красной сплошной линией показано ложное значение термоЭДС и штрихпунктирной линией показано истинное значение, без влияния контактной разности потенциалов.

Измерение термоЭДС только в двух точках не позволяет выявить нелинейный характер функции термоЭДС от температуры (рисунок 1.9). Эта проблема решается при выборе небольшого изменения ΔT , однако это приводит к тому, что изменение ΔV тоже будет очень маленьким, зачастую на уровне шумов усилителя, это затрудняет проведение точных измерений.

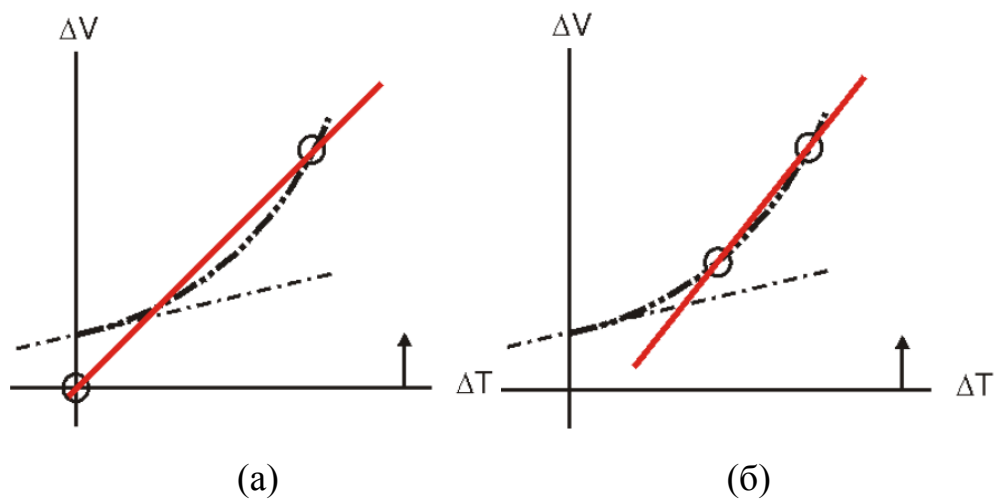


Рисунок 1.9 – Ошибки двухточечного измерения термоЭДС, (а) $T = T_0, T > T_0$;
(б) $T_1 > T_0, T_2 > T_1$

На рисунке 1.9 приняты следующие обозначения: кружочком показаны результаты измерения; стрелками показана контактная разность потенциалов; жирными штрих пунктирными линиями показаны истинные значения термоЭДС, сдвинутые на ΔV ; красной сплошной линией показано ложное значение термоЭДС и черной штрихпунктирной линией показано истинное значение при T_0 , без влияния контактной разности потенциалов. Как видно из рисунке 1.9 измерения термоЭДС, проведенные при двух температурах могут привести к ложным результатам. Достоверное значение коэффициента Зеебека можно определить построив асимптоту $S(T_0) = \lim (\Delta V/\Delta T)$, (рисунок 1.10).

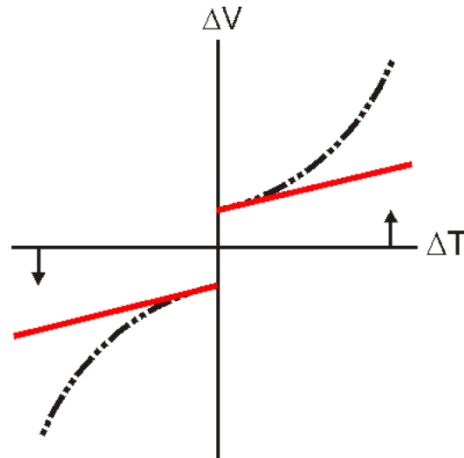


Рисунок 1.10 – Достоверное измерение термоЭДС

На рисунке 1.10. приняты следующие обозначения:; стрелками показана контактная разность потенциалов; черная штрих пунктирная линия показывает истинное значение термоЭДС; красной сплошной линией показана асимптота к кривой термоЭДС в точке T_0 .

1.6 Типовые методы измерения термоЭДС

В своем большинстве методы измерения термоЭДС не удовлетворяют идеальным условиям измерения и поэтому обладают большой погрешностью. Однако, в настоящее время существует два преобладающих метода измерения термоЭДС, как показано на рисунке 1.11.а и рисунке 1.11.б [70], которые менее подвержены ошибкам в измерении. В первом методе (рисунок 1.11.а), объект контроля помещается между двумя металлическими проводниками, которые являются горячим и холодным электродами.

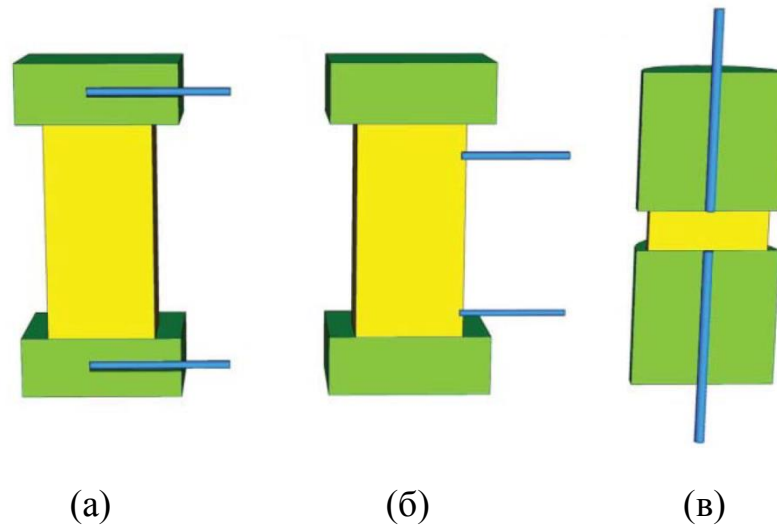


Рисунок 1.11 – п Три основных конструкции для измерения термоЭДС:
 (а) 2-точечный метод, (б) несоосный 4-точечный метод, (в) одноосной 4-точечный метод

Верхние и нижние зеленые блоки представляют нагреватели и/или теплоотводы, желтый блок - исследуемый образец, синие узкие стержни - электроды. Такая конструкция не позволяет протекать химическим реакциям между образцом и электродом, но имеет некоторые недостатки. В частности появляется термическое и электрическое сопротивления между электродами и нагревателем и охладителем, а также между исследуемым образцом и нагревателем, что может привести к погрешности измерения температуры.

Лучшими параметрами обладает конструкция, изображённая на рисунке 1.11.б, в которой увеличено количество контактных точек с 2-х до 4-х и измеряется электрическое сопротивление контакта.

Для измерения термоЭДС материалов, имеющих низкое электрическое сопротивление, используют 4х-точечный метод, при котором уменьшается погрешность измерения (рисунок 1.11.в). Отличие от рисунка 1.11.а заключается в размещении электродов вдоль боковой поверхности образца, что позволяет исключить тепловое сопротивление контакта между образцом и электродами. Однако, следует учитывать, что:

- во-первых, при высокой разности температуры между образцом и электродом, за счет теплопроводности электродов, будет уменьшаться температура образца, что приведет к возникновению погрешности измерения термоЭДС и температуры (рисунок 1.12.а);

- во-вторых, чтобы обеспечить хороший тепловой контакт между термопарами и поверхностью образца, следует хорошо прижать термопару к образцу. Однако, если образец нагрет до высокой температуры, то это может привести к пластической деформации мягких образцов и разрушению хрупкого образца, при этом контакт ухудшится в обоих случаях. При слабом прижиме появляется высокое переходное сопротивление контакта термопара-образец;

- в третьих, градиент температуры на поверхности образца приводит к невозможности достоверного измерения его температуры (рисунок 12.а).

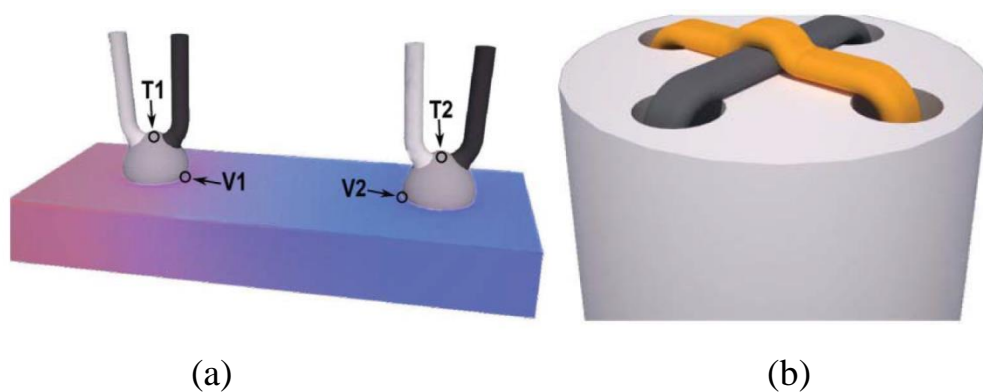


Рисунок 1.12 – Схема измерения термоЭДС двумя термопарами: (а) две термопары со спаем, (б) конструкция со скрещённой проволокой

Уменьшение погрешности измерения термоЭДС и температуры достигается использованием конструкции со скрещённой проволокой на изотермической поверхности образца (рисунок 1.12.б). Однако, сложность подготовки образца вследствие того, что хорошие термоэлектрические материалы зачастую являются хрупкими и легко повреждаются при сверлении и резании, ограничивает сферу применения этого метода. Кроме того, такая конструкция не позволяет измерить теплопроводность.

Уменьшение температуры горячего электрода за счет передачи части теплоты контролируемому образцу, приводящее к изменению термоЭДС, исследовалось в работах [65, 71]. Авторами выявлен градиентный характер изменения температуры в точке контакта. Многоточечный контакт измерительного электрода с тестируемым образцом отмечался авторами при контроле пластически деформированных образцов [72, 73].

1.7 Термоэлектрическая характеристика тонкопленочного образца

Измерение термоЭДС плоских объектов

Термоэлектричество - это свойство собственного материала, не зависящее от размера образца или геометрии. Однако неоднородные материалы могут иметь неоднородную термоЭДС, зависящую от координат. ТермоЭДС отрицательна для материалов n-типа и положительна для материалов p-типа. Измерение термоЭДС плоских объектов предполагает наложение градиента температуры на образец при измерении генерируемого напряжения и разности температур [74]. Как правило, образец подвешивается между двумя изотермическими блоками (рисунок 1.13), так что два конца образца можно легко поддерживать при двух разных температурах.

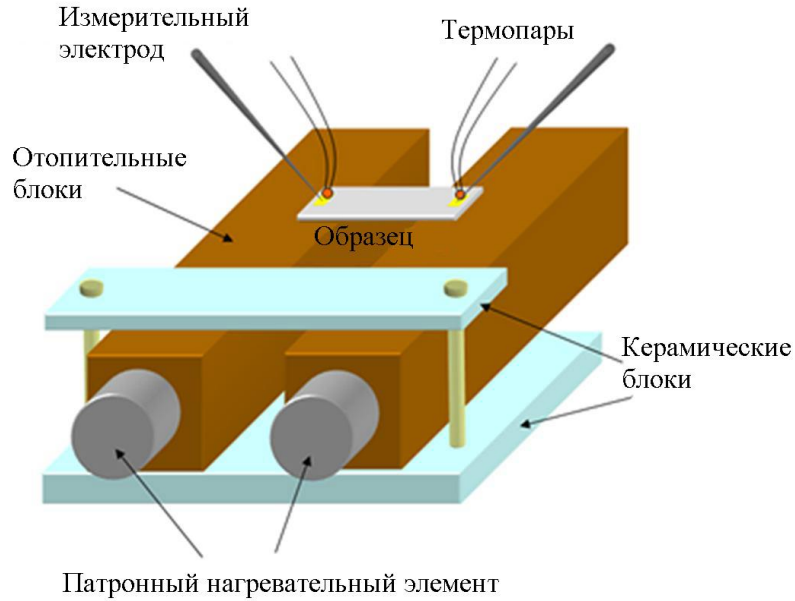


Рисунок 1.13 – Схема установки для измерения термоЭДС с использованием двух патронный нагревателей

Одновременные измерения электропроводности и термоЭДС могут также быть возможны, если используется 4-зондовая схема измерения, при этом образец установлен между двумя нагревательными блоками. Схематическое изображение образца с четырех проводным зондом показано на рисунке 1.14.

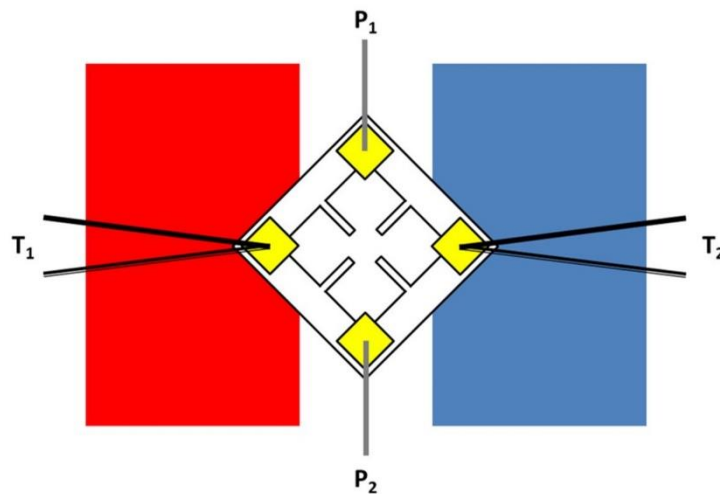


Рисунок 1.14 – Схема для одновременных измерений электропроводности и термоЭДС, P_1 и P_2 - электрические зонды, T_1 и T_2 - термопары

В настоящее время существует несколько коммерчески доступных систем для измерения термоЭДС, включая ULVAC ZEM-3, MMR SB-100 и Linseis LSR-3 (которые будут обсуждаться далее в этой главе). Большинство из них, однако, в основном подходят для измерения объемных образцов, обычно превышающих несколько миллиметров. С другой стороны, для измерения тонкой пленки необходимо применять специальные приборы, описанные далее в этой главе.

Для термоэлектрического измерения тонких пленок обычно используются два подхода: интегральный метод и дифференциальный метод. В интегральном методе [67] один конец образца удерживается при контрольной температуре (обычно при комнатной температуре или 0 °С), а другой нагревается непрерывно в диапазоне температур, представляющих интерес. Зависимость термоэлектрического напряжения от температуры может быть нелинейной и коэффициент Зеебека при каждой температуре определяется производной от кривой напряжения-температуры:

$$S(T) = -\frac{dV(T)}{dT}, \quad (1.4)$$

где dV – изменение термоЭДС, dT – изменение температуры.

Этот метод предполагает, что тепловое равновесие между соединением термопара-образец достигается мгновенно, и между измерениями нет задержки. Дифференциальный метод измерения термоЭДС более широко используется для тонкопленочных термоэлектрических материалов. [68, 69, 70] Небольшие термические градиенты применяются вдоль длины образца вблизи температуры, представляющей интерес; т.е. в линейном режиме. Для расчета используется набор данных с разной разностью температур, а наклон кривой напряжения по разности температур дает коэффициент Зеебека (пример показан на рисунке 1.15). В этом случае измеряют шесть ΔT , но на каждом ΔT берут сто точек. Установление достаточного времени ожидания после каждого шага температуры перед измерением позволит достичь теплового равновесия, что может уменьшить

нестабильность показаний. Кроме того, оценка погрешности в ΔT должна включать погрешность калибровки термопар или термометров, используемых для измерения температуры, которая может быть $1 \sim 2$ К при всех температурах. Общая погрешность измерения термоЭДС может достигать $10 \sim 15$ % и обычно увеличивается с температурой [75, 76].

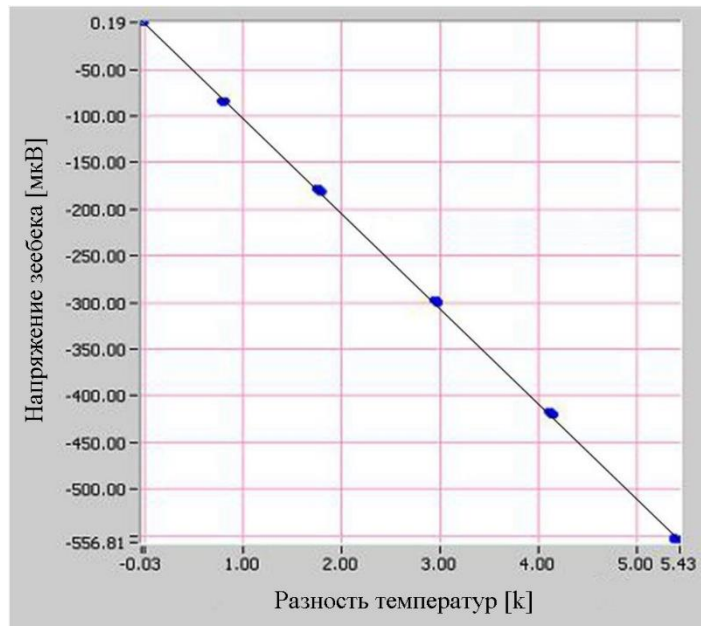


Рисунок 1.15 – Зависимость напряжения Зеебека от температуры

ТермоЭДС определяли путем вычитания паразитной термоЭДС от платинного электрода из измеренной термоЭДС. Для точности этого метода важно, чтобы измерение проводилось в стационарных условиях, а тепловой поток был одномерным, учитывая конечные размеры соединений термопары и наконечников зондов. Чтобы уменьшить погрешность из-за трехмерного теплового потока, температуру следует измерять как можно ближе к моменту измерения напряжения. Поэтому целесообразно использовать зонды, способные измерять температуру и напряжение одновременно в одинаковых местах на образце [77]. Для этого один из проводов термопары используется для измерения наведенного напряжения.

Выбор нагревательных элементов и конструкция измерительной ступени сильно различаются между измерительной аппаратурой. Световые импульсы,

горячие зонды и резистивные нагреватели были использованы для создания градиентов температуры [78, 79, 80]. На рисунке 1.13 показана экспериментальная установка для измерения термоЭДС в тонкой пленке с использованием резистивных патронных нагревателей в качестве источника нагрева. Поскольку толщина тонкопленочного образца мала по сравнению с длиной и шириной, можно достичь одномерных градиентов температуры по длине образца просто путем нагрева дна образца, как показано на рисунке.

Нагревательные блоки под образцом должны быть теплопроводными, но электрически изолированы от самого образца. Обычно используют материалы с низкой электропроводностью и высокой теплопроводностью, такие как нитрид бора. Электрически изолирующая краска может изолировать образец, если стойки являются электропроводящими. Термальная паста применяется на границах между образцом и нагревательным блоком, а также между образцом и термопарой для эффективной передачи тепла и быстрого термического выравнивания. Тонкие термопары помогут минимизировать потери тепла с поверхности образца через провода термопары. Напряжение, измеренное непосредственно из разности температур, будет включать паразитные термоэлектрические напряжения от самих зондов, поэтому обычно требуются термоэлектрические данные относительно материала проволоки. Обычно материалы с небольшими термоэлектрическими напряжениями, такими как платина (Pt), выбираются для использования в качестве эталонного зонда, так что введенная ошибка мала. Чтобы получить абсолютную термоЭДС материала, необходима тщательная калибровка установки.

Установлено, что термоЭДС термопары свинец-платина составляет 3,14 мкВ/К для условий эксперимента, относящихся к рисунку 14. Это соответствует погрешности 3 % или менее для хороших термоэлектрических материалов, для которых абсолютная термоЭДС обычно больше, чем 100 мкВ/К.

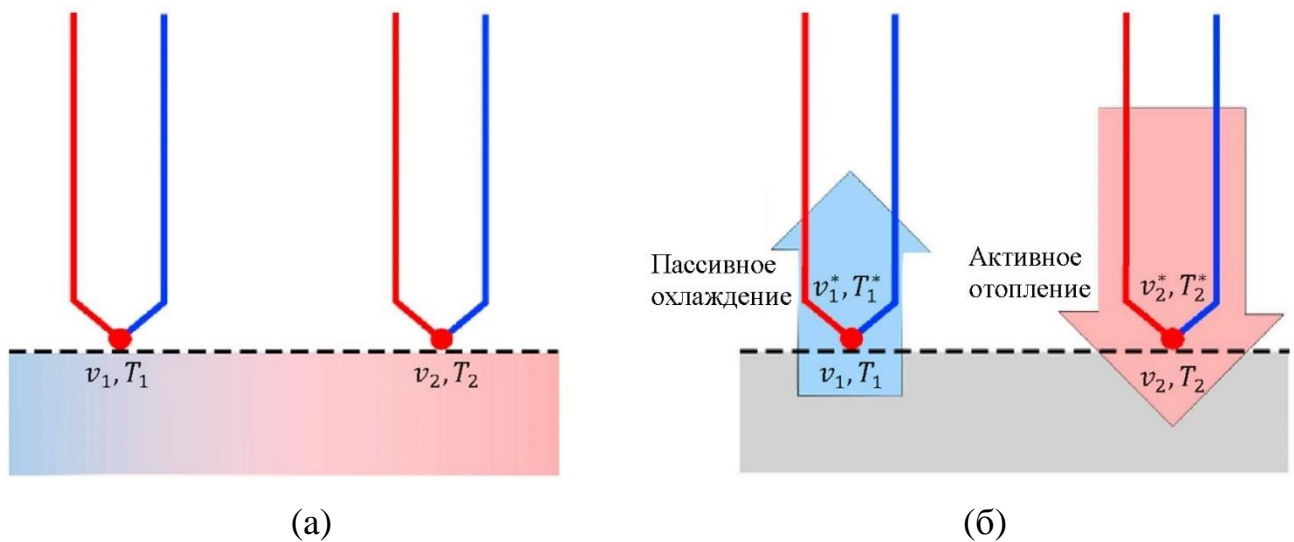
1.8 Улучшенные измерения термоЭДС с использованием четырехточечного метода

К сожалению, ожидается, что изменение термоЭДС вследствие тонкой эволюции материала будет незначительным, а пространственное изменение может быть значительным [81]. Эффективным средством устранения неопределенности из-за пространственного изменения является постоянная установка датчика, так что измерения всегда проводятся точно в одном месте, а повторные измерения прямо сопоставимы. Постоянная установка оборудования также привлекательна, поэтому измерения могут быть выполнены в исходном месте, что значительно увеличивает частоту измерений. Точность и стабильность измерений термоЭДС будут иметь решающее значение. Особое значение имеет чувствительность к состоянию поверхности образца, которая может не контролироваться в промышленной среде и может изменяться при длительной эксплуатации. Настоящее исследование в основном сосредоточено на достижении нечувствительности к состоянию поверхности, необходимой для долгосрочных локальных измерений.

Обзор двух-, трех- и четырехточечных термоэлектрических измерений.

На рисунке 1.16.а измерения контактной термоЭДС производятся путем контроля разности температур и электрического потенциала на двух отдельных электродах, прижатых при контакте с поверхностью испытуемого материала, причем электроды содержат термопары, которые служат для контроля температуры и измерительные провода, через которые измеряется разность потенциалов. Обычно коммерческие измерительные системы термоЭДС используют «двухточечную» методику, где температурный дифференциал вводится с использованием нагревательного элемента, встроенного в один из электродов, для создания «горячего наконечника», в то время как другой пассивный электрод остается при температуре окружающей среды, как показано на рисунке 1.16.б. Проблема может возникнуть, если напряжение или температура измерительных электродов не соответствуют напряжению на поверхности

образца. Если межфазный контакт приводит к появлению либо разности температур, либо электрических потенциалов между поверхностью образца (T_1 , T_2 , v_1 , v_2) и измерительными электродами (T_1^* , T_2^* , v_1^* , v_2^*), то соответственно будут получены ошибочные расчетные значения термоЭДС.



Рисунке 1.16. Схема определения термоЭДС с помощью двух термопар, находящихся в контакте с поверхностью объекта: (а) внешний нагрев образца, (б) нагрев через электрод с горячим наконечником

Несовершенные межфазные условия могут приводить к появлению электрического или теплового сопротивлений контакта. Электрическое контактное сопротивление будет приводить к появлению разности потенциалов, если ток течет через сопротивление. Однако, поскольку электрический потенциал измеряется с использованием высокоимпедансного дифференциального усилителя (обычно 10 МОм или выше), будет присутствовать незначительный ток, и поэтому электрическое контактное сопротивление не имеет большого значения для точности измерения. Соответственно, тепловое контактное сопротивление будет создавать проблемы, если на границе раздела есть тепловой поток, который приведет к появлению разности температур. Для «горячего электрода», который вводит тепло в объект контроля, этот тепловой поток является неотъемлемой частью конструкции. Менее значительный тепловой

поток может существовать из-за теплопроводности термопары, известный как эффект «холодного касания». Проблема, связанная с разницей температур, двояка; прежде всего, погрешность измеренной температуры приводит к ошибочным рассчитанным значениям термоЭДС, а во-вторых, может возникнуть паразитный дополнительный термоэлектрический потенциал из-за разницы температур по любому межфазному материалу, который может иметь свою собственную термоЭДС. Поэтому точность двухточечного измерения термоЭДС ограничена тепловым контактным сопротивлением.

Влияние теплового контактного сопротивления учтено при проектировании лабораторного оборудования для измерений малогабаритных образцов [82, 83-85]. Уменьшение теплового контактного сопротивления является самым простым способом уменьшить случайную неопределенность при двухточечных измерениях термоЭДС, однако для количественного термоэлектрического NDE материалов, подвергающихся деградации, требуемая неопределенность измерений требует более эффективных методов решения. Целесообразно уменьшить температурный градиент между электродами и образцом путем нагрева или охлаждения обеих сторон термоактивного электрода, так чтобы тепловой поток через контакт минимизировался [84, 86]. Альтернативно, другой подход заключается в том, чтобы избежать нагревания или охлаждения через сенсорные контакты в целом и ввести температурный градиент путем нагрева удаленных мест [82,84,85], важность этого подхода была подчеркнута в литературе, но не была продемонстрирована явно, демонстрация предложена в работе [82]. Это совершенно аналогично с измерением сопротивления 4-х точечным методом, где ток вводится в удаленных местах, чтобы исключить ошибки контактного сопротивления. Результат двух-, трех- и четырехточечных методов измерения термоЭДС показывает разницу в чувствительности к контактным сопротивлениям.

Влияние электрических и тепловых контактных сопротивлений.

Подробные описания измерения контактной термоЭДС можно найти в ссылках [82,84,85,87,88]. Контактные измерения термоЭДС обычно проводятся с

использованием системы, аналогичной той, которая показана на рисунке 1.17.а. Две термопары, имеющие форму двух отдельных электродов, прижимаются к поверхности объекта. Каждая термопара состоит из двух отдельных термоэлементов с коэффициентами Зеебека S_{TC1} и S_{TC2} . Разность температур в объекте $T_1 - T_2$ дает разность термоэлектрических потенциалов $v_1 - v_2$, зависящую от искомого коэффициента Зеебека материала, S_s :

$$v_2 - v_1 = \int_{T_1}^{T_2} S_s \cdot dT, \quad (1.5)$$

где S_{TC1} – коэффициент Зеебека первого термоэлемента;

S_{TC2} – коэффициент Зеебека второго термоэлемента;

v_1 – термоэлектрический потенциал первого термоэлемента;

v_2 – термоэлектрический потенциал второго термоэлемента;

T_1 – температура первого термоэлемента;

T_2 – температура второго термоэлемента.

Для расчета S_s измеряются четыре разности потенциалов, обозначенные $\Delta v_1 - \Delta v_4$ на рисунке 1.17.а. Разности потенциалов Δv_3 и Δv_4 состоят из термоэлектрического потенциала от коэффициента Зеебека и разности температур объекта $T_2 - T_1$, а также термоэлектрического потенциала, полученного за счет коэффициента Зеебека и разности температур каждого из термоэлементов $T_1 - T_0$, и $T_2 - T_0$:

$$v_3 = \int_{T_0}^{T_1} S_{TC1} dT + \int_{T_1}^{T_2} S_s dT + \int_{T_2}^{T_0} S_{TC1} dT = \int_{T_1}^{T_2} (S_s - S_{TC1}) dT = (\overline{S_s} - \overline{S_{TC1}})(T_2 - T_1), \quad (1.6)$$

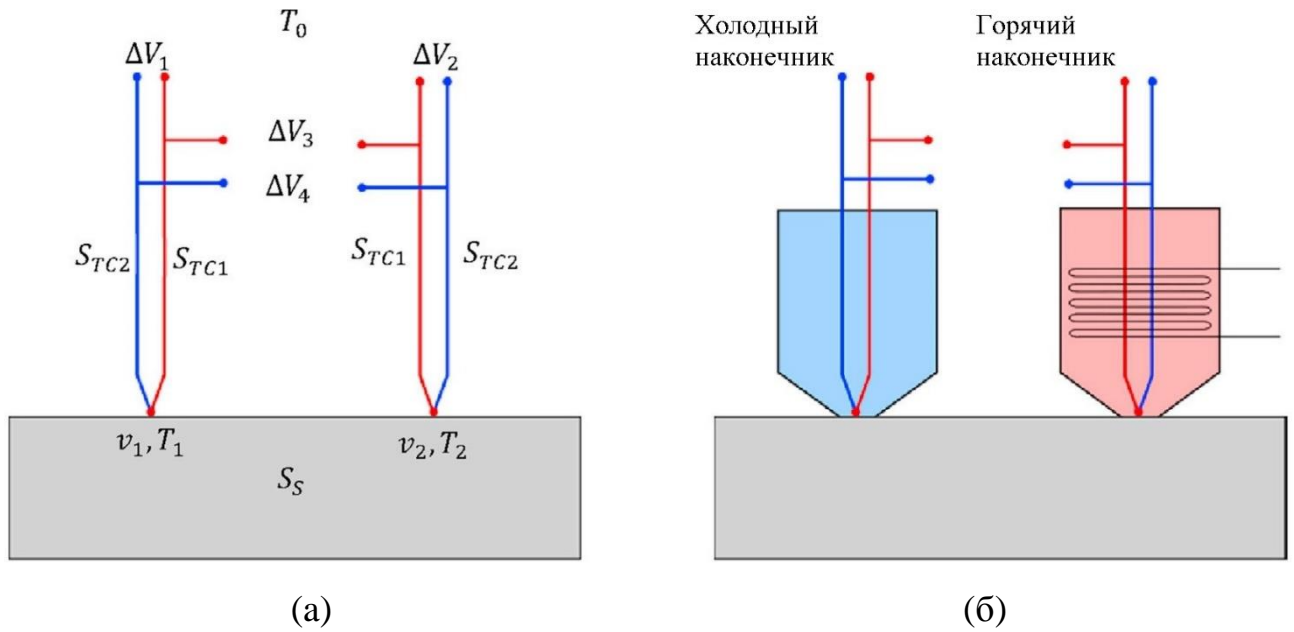


Рисунок 1.17 – (а) Схема, иллюстрирующая контактное измерение термоЭДС, (б) иллюстрация обычного «двухточечного» измерения, в котором нагревательный элемент встроен в один из электродов для введения тепла

Если термоЭДС остается практически постоянной в интервале температур между T_1 и T_2 , то можно использовать приближенное выражение:

$$\bar{S} = \frac{\Delta v_3}{T_2 - T_1} + \bar{S}_{TC1}, \quad (1.7)$$

где Δv_3 – термоэлектрический потенциал одного из электродов термопары;

$T_2 - T_1$ – разность температур в объекте;

\bar{S}_{TC1} – коэффициент Зеебека первого термоэлемента.

Следует отметить, что линейное приближение, сделанное в уравнении (1.7), остается в силе даже тогда, когда термоЭДС в подынтегральном выражении изменяется в интервале температур между T_1 и T_2 линейно, а средний по интервалу берется как коэффициент Зеебека при температуре $(T_1 + T_2)/2$.

Также возможно провести второе измерение разности потенциалов, ΔV_4 , что приводит к выражению аналогичному (1.7):

$$\bar{S}_S = \frac{\Delta v_4}{T_2 - T_1} + \bar{S}_{TC2}, \quad (1.8)$$

Хотя это дополнительное измерение является избыточным, его можно использовать в качестве дополнительного измерения для повышения точности [88].

Чтобы рассчитать S_S , необходимо знать S_{TC1} и T_1 и T_2 [89]. Опять же, поскольку термоЭДС зависит от температуры, температура, используемая для этой компенсации, будет равна $(T_1+T_2)/2$. T_1 и T_2 измеряются с использованием стандартной технологии термопар. Измеренное напряжение термопары, ΔV , преобразуется в температуру согласно соотношению:

$$T = \sum_{m=0}^n c_m \cdot (\Delta V + V_0)^m, \quad (1.9)$$

где коэффициенты c_m , можно найти в базе данных *NIST ITS-90* [90], V_0 – напряжение, обусловленное холодным спаем, которое может быть вычислено из измерений внутренней температуры холодного спая T_0 и обратного отношения к уравнению (1.9) [88]. Затем S_S можно вычислить из уравнения (1.7) или (1.8).

Обычно коммерческие измерительные системы термоЭДС используют метод «двух потоков», где температурный дифференциал вводится с использованием нагревательного элемента, встроенного в один из электродов, для получения «горячего электрода», как показано на рисунке 1.17.б.

Как упоминалось ранее, разница температур между горячим электродом и объектом может возникать из-за теплового контактного сопротивления и наложенного теплового потока. Проблема, связанная с разницей температур, двойка, во-первых, термопара не будет отражать искомую температуру поверхности объекта, а во-вторых, разность температур по любому межфазному материалу будет создавать паразитный термоэлектрический потенциал. Из

рисунка 1.16.б при наличии разности температур $\Delta T_1^* = T_2$, уравнение (1.6) становится [86]:

$$\Delta V_3 = (\bar{S}_s - \bar{S}_{TC1}) \cdot (T_2 - T_1) + (\bar{S}_i - \bar{S}_{TC1}) \cdot \Delta T_i, \quad (1.10)$$

где S_i представляет коэффициент Зеебека любого межфазного материала.

Самый правый член выражения (1.10) представляет собой систематическую ошибку, которая вводится из-за несовершенного теплового контактного сопротивления и теплового потока между «горячим» электродом и объектом. Эта проблема аналогична двухточечному измерению сопротивления, когда ток пропускается через электроды в объект, и полученная разность потенциалов измеряется с использованием тех же электродов; разность потенциалов между кабелями и контактами приводит к ошибочным измерениям. Проблему можно избежать, используя измерение сопротивления по четырем точкам; два электрода используются исключительно для введения тока и отдельная пара с высоким импедансом для измерения потенциала, так что в чувствительных электродах имеется незначительный ток.

Схематическая иллюстрация измерения электрического потенциала показана на рисунке 1.18. Когда электрический ток I протекает по межфазному электрическому контактному сопротивлению, R_{e-int} , возникает разность потенциалов между поверхностью объекта и электрода:

$$v - v^* = I \cdot R_{e-int}, \quad (1.11)$$

где I – электрический ток в цепи;

R_{e-int} – межфазное электрическое контактное сопротивление.

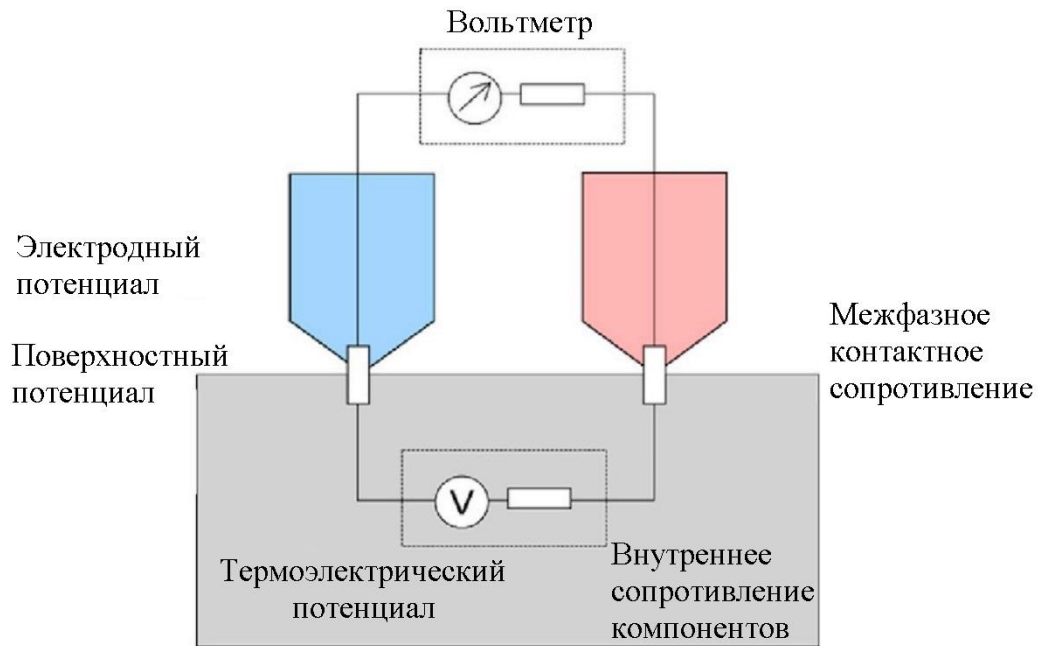


Рисунок 1.18 – Схема измерения разности потенциалов между поверхностью объекта и электрода

Термоэлектрический потенциал измеряется с помощью высокоимпедансного вольтметра, так что незначительный ток проходит через контактные сопротивления, и будет наблюдаться незначительная разность потенциалов между искомым потенциалом поверхности объекта и потенциалом электрода. Этот краткий анализ показал, что измерения электрического потенциала почти полностью нечувствительны к контактным сопротивлениям. Следует отметить, что наиболее широко используемые металлы и сплавы имеют термоЭДС в пределах $\pm 20 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$ [91], и поэтому ожидается, что термоэлектрический потенциал будет порядка микровольт.

1.9 Измерительные приборы

В технологическом процессе любого производства, как правило, используется небольшой ассортимент сталей и сплавов, однако пересортица остается острой проблемой даже наличия входного контроля. Это связано и с недобросовестностью поставщика, который может сформировать партию из

различных марок, что трудно определяется при входном контроле, и неправильное хранение, и плохая производственная дисциплина работников, которые используют любую подвернувшуюся заготовку для скрывания своего брака. Иногда возникают сомнения при сборке узла, когда определить марку стали известными способами (спектральным, химическим, рентгено-флуоресцентным) просто невозможно. В итоге снижается качество выпускаемой продукции [92-95].

Наиболее доступным и простым методом входного контроля является термоэлектрический, который позволяет проводить экспресс-контроль практически любых изделий и на любой стадии. Для этого выпускается целая линейка различных термоэлектрических приборов.

SETARAM SeebeckPro - это анализатор коэффициента Зеебека и электросопротивления / проводимости (рисунок 1.19).



Рисунок 1.19 – SETARAM SeebeckPro Seebeck анализатор коэффициента Зеебека

Он предназначен для измерения коэффициента Зеебека различных материалов. SeebeckPro также может измерять электрическое сопротивление и проводимость для образцов различных форм: цилиндрических, прямоугольных, листовых, пленок и т.д. Кроме того, прибор может иметь три разных типа нагревателя с различными температурными диапазонами. Его технические характеристики приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Технические характеристики прибора

Диапазон температур	от -100°C до 500°C ; комнатная температура до 800°C или 1150°C (elective)
Скорость нагрева	$0,01 - 100 / 27^{\circ}\text{C}/\text{минут}$
Точность поддержания температуры	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
Измеряемые параметры	Коэффициент Зеебека, статический постоянный ток
Метод измерения	Четырехточечный
Диапазон измерения: коэффициента Зеебека, сопротивления, проводимости	$0,5 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C} - 25 \text{ В}/^{\circ}\text{C}$; $0,2 \text{ мкОм} - 2,5 \text{ кОм}$; $0,00025 - 150000 \text{ См}/\text{см}$
Разрешение: коэффициента Зеебека, удельного сопротивления	$10 \text{ нВ}/^{\circ}\text{C}$; 10 нОм
Погрешность измерения	Коэффициент Зеебека – 7 %; проводимость – 7 %
Репродукция	Seebeck – 3 %; Conductance – 3 %
Ток	$0 - 160 \text{ мА}$
Атмосфера	Гелий, окисление, восстановление, вакуум
Степень вакуума	$10\text{E}-3 \text{ мБар}$
Размер образца	Диаметр, $2 - 4 \text{ мм}$; длина, $6 - 22 \text{ мм}$
Размер образц	$\text{Ø } 10 - 12,7 - 25,4 \text{ мм}$

Применение

Подходит для контроля различных термоэлектрических материалов, таких как: Bi_2Te_3 / Sb_2Te_3 , PbTe , SiGe , CoSb_3 , Zn_4Sb_3 , силицида металла (такого как $\beta\text{-FeSi}_2$, MnSi_2 , CrSi_2 и т.д), NaCo_2O_4 и оксидных термоэлектрических материалов.

Linseis – анализатор коэффициента Зеебека и электрического сопротивления (рисунок 1.20).



Рисунок 1.20 – SR-3 Linseis – анализатор коэффициента Зеебека и электрического сопротивления

Принцип измерения. Образец должен иметь форму цилиндра или призмы и располагаться вертикально между двумя электродами. Нижний электрод оборудован нагревателем, а измерительный блок размещен в термокамере. Термокамера предназначена для нагрева образца до заданной температуры. Нагреватель, расположенный в нижнем электроде, предназначен для создания заданного температурного градиента, относительно заданной температуры. Как видно из рисунка 1.21, температурный градиент измеряется двумя термопарами. Для получения максимальной точности измерения термоЭДС применен уникальный механизм контакта термопар с образцом. Прибор позволяет измерять электрическое сопротивление четырехпроводным методом.

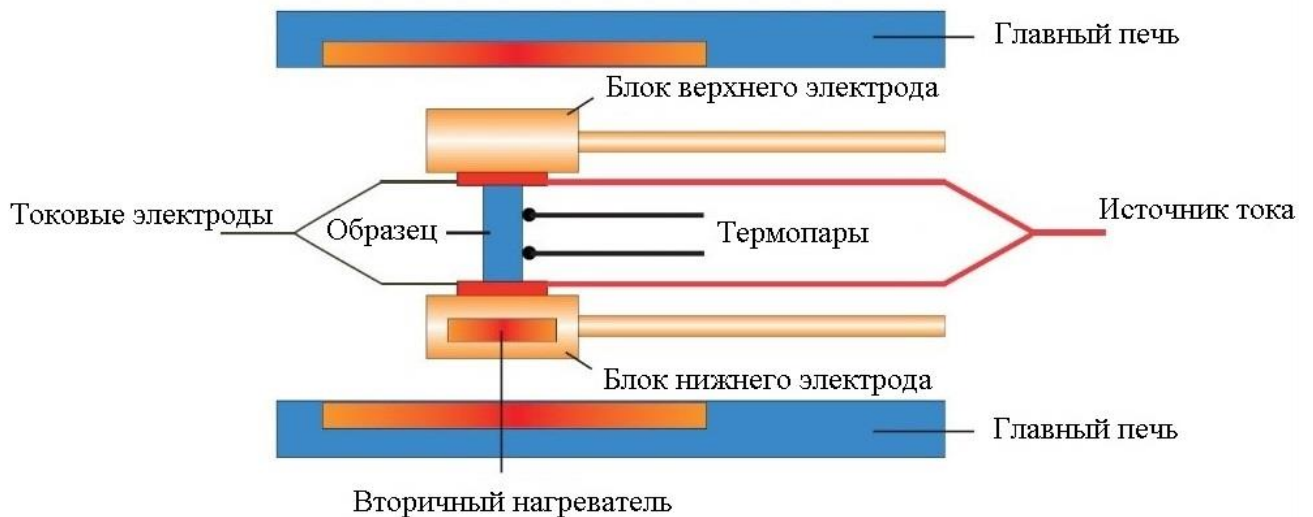


Рис. 1.21. Принцип работы прибора LSR-3

Особенности прибора:

- LSR-3 может одновременно измерять как коэффициент Зеебека, так и электрическое сопротивление (измерение удельного сопротивления);
- Форма и размеры образца: призма и цилиндр длиной от 6 до 23 мм;
- провода и пленки могут быть проанализированы с помощью уникального измерительного адаптера;
- три разных сменных нагревателя охватывают диапазон температур от 100 до 1500 °С;
- конструкция держателя образца гарантирует высочайшую воспроизводимость измерений;
- современное программное обеспечение позволяет выполнять автоматические процедуры измерения;
- данные измерений можно легко экспортировать.

Основные технические данные прибора LSR-3 приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Основные технические данные прибора LSR-3

Диапазон температур	от $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$; комнатная температура до $800/1100/1500\text{ }^{\circ}\text{C}$
Метод измерения	Коэффициент Зеебека: метод статического постоянного тока. Электрическое сопротивление: четырехконтактный метод
Держатель образцов	между двумя электродами
Атмосфера	Инертный газ, СО, вакуум
Размер образца	диаметр от 2 до 4 мм, длина от 6 до 23 мм
Размер выборки (форма диска)	10; 12,7; 25,4 мм
Интервал свинец	4, 6, 8 мм
Охлаждение водой	обязательно

Прибор NETZSCH SBA 458 Nemesis (рисунок 1.22) имеет уникальную установку измерения, которая может контролировать образцы больших размеров. Измерения можно проводить при температурах до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 1.22 – Прибор NETZSCH SBA 458 Nemesis

Конструкция датчика SBA 458 Nemesis включает в себя две системы нагрева (рисунок 1.23). Нагревание осуществляется попеременно для каждой выбранной ступени температуры. Отклонения гистерезиса и линейности из-за неправильного измерения могут мгновенно наблюдаться до и во время измерения.

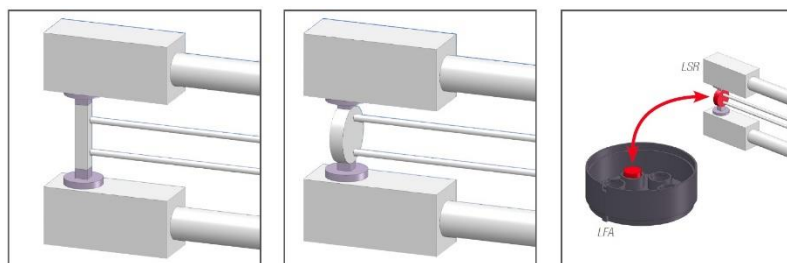


Рисунок 1.23 – Плоские диски, цилиндрические или прямоугольные образцы могут быть измерены с помощью адаптера

SBA 458 Nemesis позволяет быстро и легко менять образцы без каких-либо инструментов. Это предотвращает прилипание образца к электродам, что может привести к его повреждению. Из-за того, что положения термопары механически фиксированы, утомительный процесс определения расстояния при каждом измерении устраняется. Устранение этого потенциального источника ошибки при определении электропроводности повышает точность и воспроизводимость результатов.

Ключевые особенности:

- Высоконадежная и прочная конструкция;
- настройка измерения для разнообразных геометрий объекта контроля;
- удобная смена образца;
- отличная система с двумя нагревателями;
- не требуется определение расстояния;
- механическое крепление положений термопары;
- гибкость в размерах образцов.

Основные технические данные прибора NETZSCH SBA 458 Nemesis приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Основные технические данные прибора NETZSCH

Конструкция	Система с двумя нагревателями, контроль качества, горизонтальное расположение образцов
Диапазон температур	Температура в помещении до 800 °С Температура в помещении до 1100 °С
Диапазон настройки температуры	Неограниченное количество ступеней умеренного действия
Термопары	Температура в помещении до 800 °С Inconel®-оболочка типа К (NiCr / NiAl) Фиксированные позиции
Геометрия выборки	Квадратные, круглые, прямоугольные, полоски
Размеры образцов	Ø: от 12,7 до 25,4 мм длина от 12,7 до 25,4 мм; ширина от 2,0 до 25,4 мм Толщина: от 100 нм до 3 мм, в зависимости от теплофизических свойств
Диапазон коэффициентов Seebeck	10 – 2000 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ Погрешность $\pm 7\%$ Повторяемость $\pm 3\%$
Диапазон электропроводности	0,05 – 150000 См/см Погрешность $\pm 5\%$ Повторяемость $\pm 3\%$
Проверка качества контакта электропроводности	До и во время измерения
Проверка качества контакта для измерения коэффициент Зеебека	До и во время измерения
Количество отсчетов усреднения	≥ 100
атмосфера	Инертный газ, CO, восстанавливающее (не более 2 % H ₂)
Вакуумная герметичность	10 – 2 мбар
Программного обеспечения	На основе Windows 7 32/64-разрядные

Принцип работы.

Электропроводность определяется четырехточечным методом используя токовые штыри и термопары, установленные на нижней поверхности образца (рисунок 1.24). Микро нагреватели располагаются ниже образца с двух краев, создавая температурные градиенты в обоих направлениях образца. Результирующее напряжение измеряется на выходе термопары, а затем используется для расчета коэффициента Зеебека.

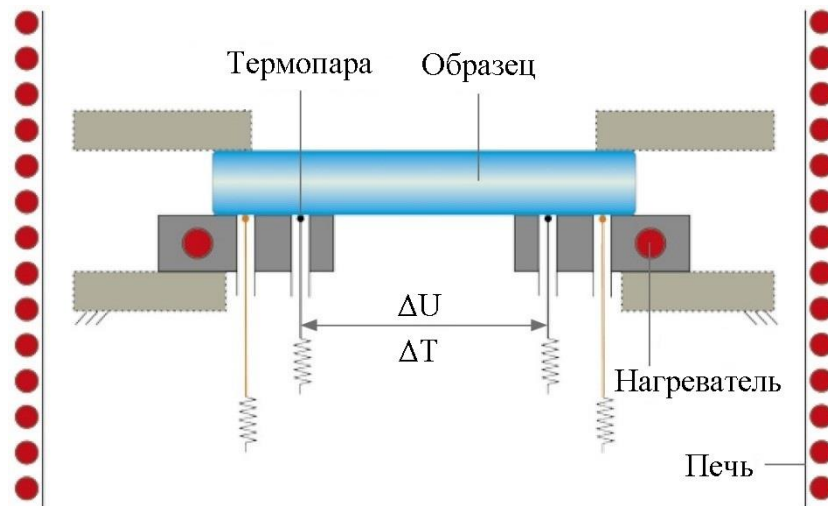


Рисунок 1.24 – Установка измерения SBA 458 Nemesis

Пока выполняется циклическое нагревание, измеряются результирующие напряжения (U_A , U_B). U_A и U_B представляют собой напряжения между двумя положительными и двумя отрицательными проводами термопар, которые расположены с разных концов образца, имеющих разность температур ΔT . ΔT определяется двумя термопарами.

На рисунке 1.25 изображены зависимости коэффициента Зеебека (зеленая кривая) и электропроводности (синяя кривая) от температуры. Пунктирная зеленая линия представляет значения, полученные прибором РТВ-1. Наблюдается хорошая корреляция, указывающая надежность системы.

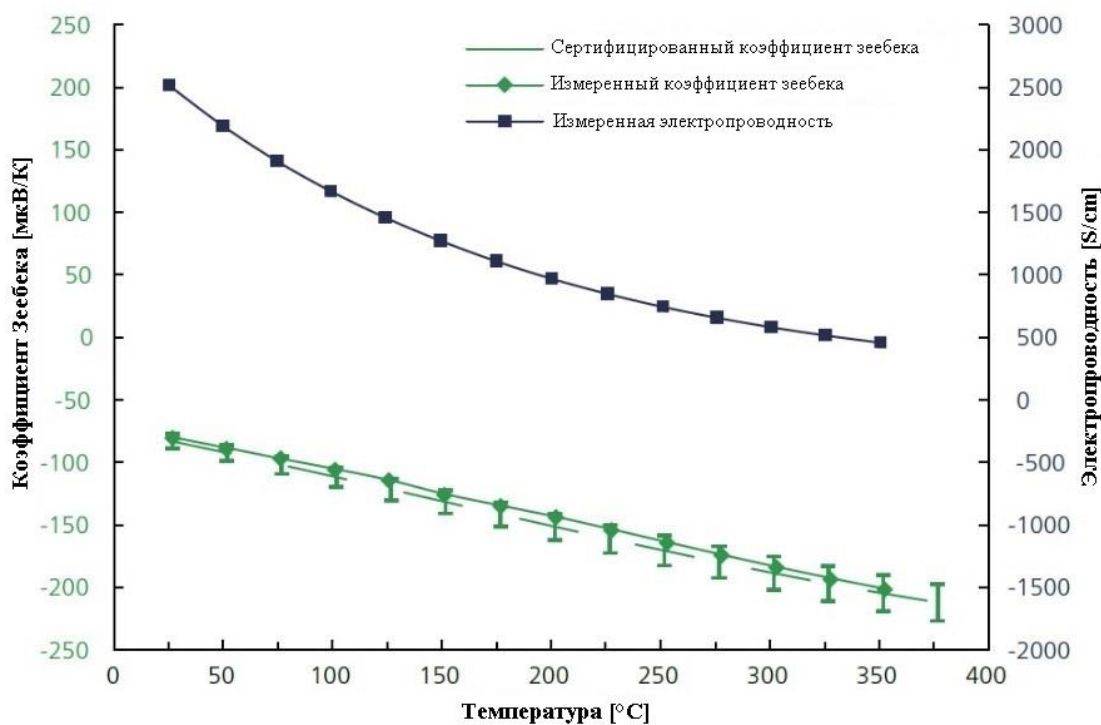


Рисунок 1.25 – Коэффициент Зеебека и электропроводность, измеренные между комнатной температурой и 350 °С

Прибор ULVAC ZEM-3 является популярным инструментом в области контроля термоэлектричества (рисунок 1.26). Исследовательские лаборатории во всем мире пользуются этой автоматической и надежной системой для проведения измерений коэффициента Зеебека и электропроводности.



Рисунок 1.26 – Прибор ZEM-3

Особенности:

- Использует инфракрасную печь для нагрева с превосходной контролируемостью температуры и микропереключатель для контроля разности температур.
- Измерения контролируются компьютером и выполняются при указанных температурах.
- Функция автоматической проверки омического контакта (участок V-I) является стандартным оборудованием.
- Один блок может использоваться для одновременного измерения коэффициента Зеебека и электрического сопротивления (удельного сопротивления).
- Прибор позволяет измерять как призму от 6 до 22 мм, так и цилиндрические образцы.
- Держатель образца использует уникальный механизм балансного контакта, позволяющий получить высокую воспроизводимость.
- Система автоматически проверяет, является ли контакт двух зондов с образцом омическим или нет, и находит наилучшее значение электрического тока для определения удельного сопротивления образца без влияния теплопередачи.
- Измерение контролируется компьютером, проводящим автоматическое измерение для каждой разности температур при заданной температуре образца и устранением паразитной электродвижущей силы.
- Измеренные необработанные данные сохраняются в текстовом формате.

Принцип измерения:

Призма или цилиндрический образец устанавливаются в вертикальном положении между верхним и нижним блоками в нагревательной печи (рисунок 1.27). Пока образец нагревается и удерживается при заданной температуре, он дополнительно нагревается нагревателем в нижнем блоке для обеспечения температурного градиента. Коэффициент Зеебека измеряется путем измерения верхних и нижних температур T_1 и T_2 с помощью термопар, прижатых к разным сторонам образца, с последующим измерением термоэлектродвижущей силы dE .

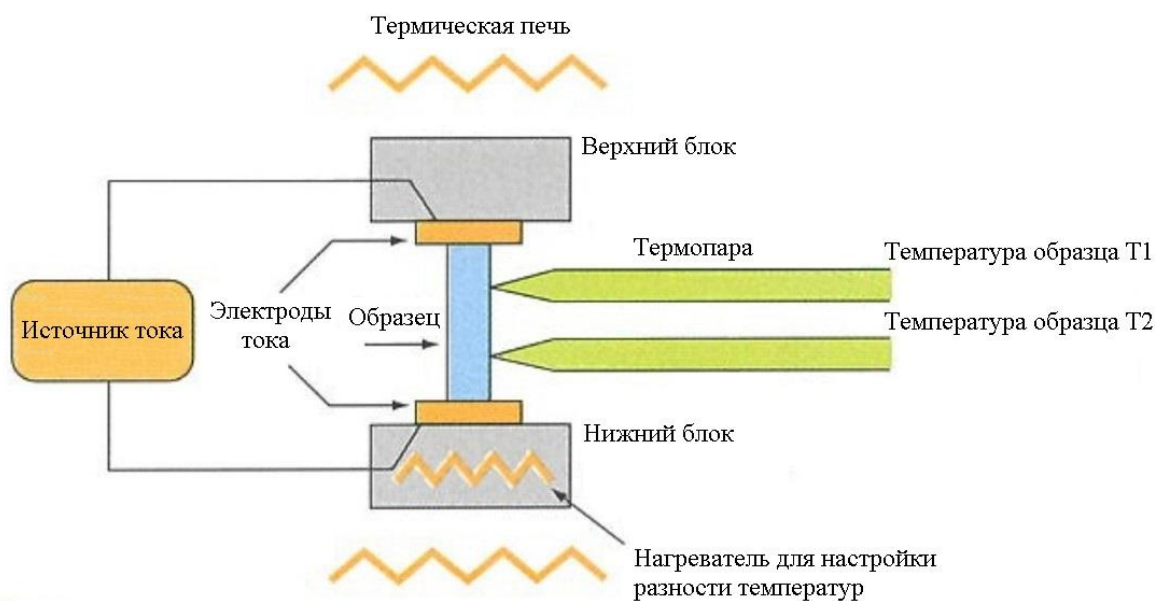


Рисунок 1.27 – Функциональная схема установки ZEM-3

Электрическое сопротивление измеряется четырехконтактным методом, в котором постоянный ток I подается на оба конца образца для измерения и определения падения напряжения dV между теми же проводами термопары путем вычитания термоэлектродвижущей силы между выводами.

Основные технические характеристики прибора ZEM-3 приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Основные технические характеристики прибора ZEM-3

Диапазон температур	От -80 до 100 °C
Диапазон настройки температуры	Количество этапов измерения температуры: максимум 125
Метод измерения	Коэффициент Зеебека: статический метод постоянного тока Электрическое сопротивление: четырехтерминальный метод
Атмосфера	Газ гелия низкого давления
Размер образца	От 2 до 4 мм или диаметр от 6 до 22 мм (максимум)
Требования к питанию	200 В переменного тока, однофазный, 40 А 100 В переменного тока, 20 А
Требования к охлаждающей воде	Проточная вода, давление воды $1,5 \text{ кгс/см}^2$ или больше. Расход 7 л/мин. или больше

В качестве примера измерения показана зависимость коэффициента Зеебека от температуры (рисунок 1.28).

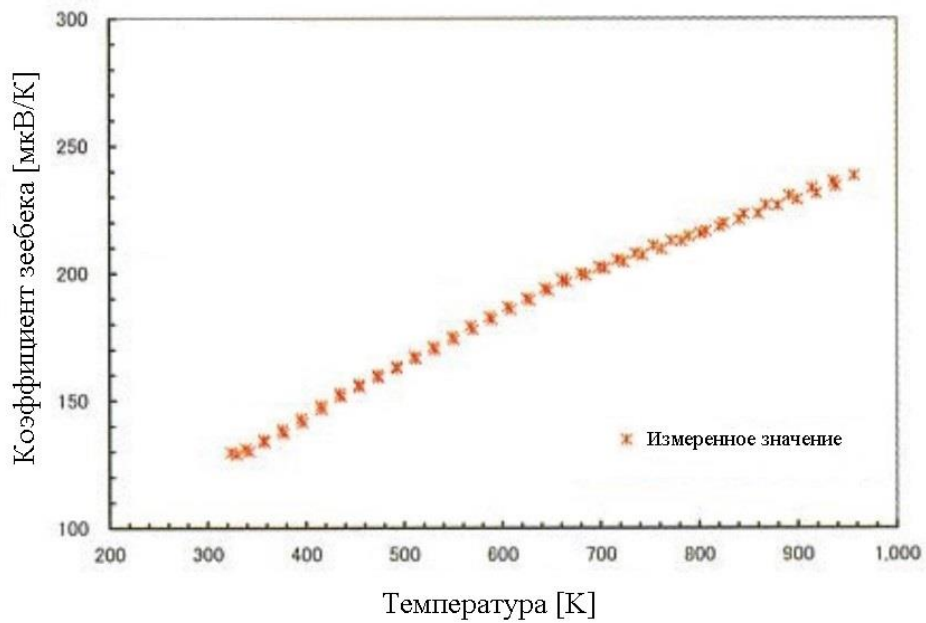


Рисунок 1.28 – Пример измерения Si80Ge20

Прибор MMR Seebeck System состоит из трех основных блоков (рисунок 1.29):

- ✓ контроллер SB1000;
- ✓ регулятор температуры K2000;
- ✓ вакуумная камера.

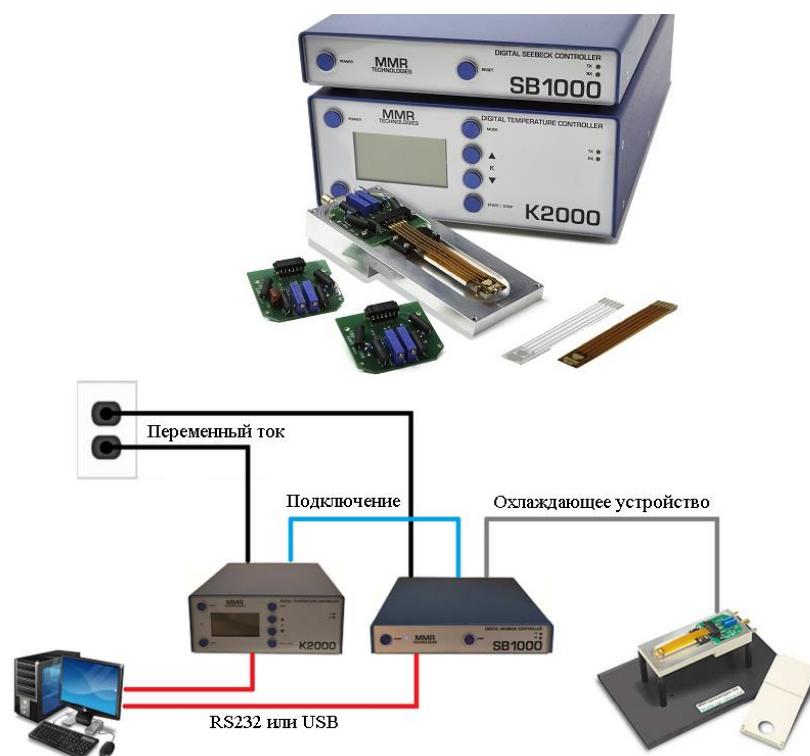


Рисунок 1.29 – Прибор MMR Seebeck

Измерительная система Seebeck MMR позволяет пользователям производить автоматические измерения коэффициента Зеебека металлов, полупроводников и других электропроводящих образцов в диапазоне температур от -200 до 455 °C и от 25 до 455 °C. Пробоподготовка проста, что позволяет быстро обменивать образцы. Система Seebeck включает в себя Контроллер Зеебека SB1000, цифровой регулятор температуры K2000 и аксессуары для тепловых испытаний, которые включают две пары термопар. Одна пара образована соединениями меди и постоянным эталонным материалом, а другая пара образована соединениями меди и материалом, для которого должен быть определен коэффициент Зеебека. В системе используется сложная параметрическая двойная эталонная методика измерения, которая дает точные, высоко воспроизводимые результаты.

Особенности:

- Максимальный диапазон рабочих температур от -200 до 455 К.
- Высокоточные и высоковоспроизводимые измерения коэффициента Зеебека при разрешении 50 нВ.

- Несоответствие прироста опорных и тестовых каналов $< 0,1 \%$.
- Минимальный шаг нагрева 0,1 мВт.
- Автоматическое управление.
- Простота измерений образцов от металлов до монокристаллов, от проводов до тонких пленок.
- Количество отсчетов, автоматически усредненных до 128.
- Полный комплект программного обеспечения для всех измерений.
- Длина образца > 2 мм и < 10 мм.
- Мощность для нагрева образца от 0,1 мВт до 1 Вт.
- Питание: 110 В, 60 Гц и 220 В, 50 Гц.
- Непрерывная компьютерная регулировка экспериментальных параметров может приводить к температурному градиенту с почти постоянной величиной и периодом.

Основные технические характеристики прибора MMR Seebeck приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Основные технические характеристики прибора MMR Seebeck

Диапазон рабочих температур	Доступно от – 200 до 455 °С
Размеры вакуумной камеры	Ширина: 2,5 дюйма (6,35 см) Длина: 6,0 дюймов (16,54 см) Глубина: 1,45 дюйма (3,7 см)
Погрешность	$< 0.1 \%$
Минимальный шаг изменения питания нагревателя	0,1 мВт (что определяет разность температур на образце) Максимальный шаг
Максимальный шаг питания нагревателя	900 мВт
Количество измерений, которые усредняются автоматически	до 128
Датчик температуры	Термометр сопротивления платины
Размер монтажной поверхности образца	10·12 мм
Длина образца	От 2 до 10 мм

Требования к контроллеру	Программируемые контроллеры MMR для измерения температуры и коэффициента Зеебека
Требования к фильтру	Либо стандартная фильтровальная сушилка, либо система реверсивного фильтрующего осушителя
Требования к газу	99,998 % Предварительно очищенный азот или газ аргон с давлением подачи не менее 1800 фунтов на квадратный дюйм
Вакуумные требования	8 миллиграмм или менее внутри вакуумной камеры

Термоэлектрический анализатор металлов и сплавов ТАМИС способен отличить более 40 различных марок стали и цветных металлов (рисунок 1.30). Чтобы получить достоверные результаты анализа, необходимо строго следовать процедуре анализа.



(a)

(б)

Рисунок 1.30 – Внешний вид устройства ТАМИС (а), тестирование металлов и сплавов с помощью устройства ТАМИС (б)

Калибровка и анализ выполняются тремя измерениями, при этом в каждом из них слегка меняют точку анализа, что повышает надежность анализа [68]. Технические характеристики устройства приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Технические характеристики термоэлектрического анализатора TAMIS.

Параметр	Значение
Напряжение питания	220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность, не более	5 Вт
Готовность к работе, не более	10 мин
Время проведения анализа одного образца, не более	1 мин
Достоверность результатов, не менее	97 %
Рабочий диапазон температуры	5-30 °С
Габаритные размеры	90×150×50 мм
Масса с блоком питания	0,8 кг

Прибор ТЭС-4 предназначен для контроля физических параметров металлов и сплавов термоэлектрическим методом и состоит из датчика и панели управления с индикатором. Принцип механического контакта электродов с продуктом лежит в основе приборов для неразрушающего контроля. Между электродами поддерживается постоянная разность температур. В этом случае можно использовать простую или дифференциальную схемы для контроля термоЭДС (рисунок 1.31).

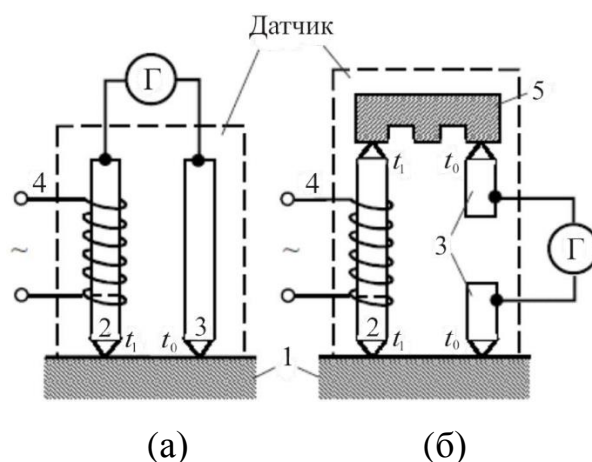


Рисунок 1.31 – Функциональная схема прибора ТЭС-4; (а) обычный датчик, (б) дифференциальный датчик. 1 – испытуемый образец; 2 – нагреваемый электрод; 3 – холодный электрод; 4 – нагреватель; 5 – эталонный образец; Г – индикатор

Конструкция дифференциального термоэлектрического датчика для сортировки мелких деталей показана на рисунке 1.32. Устройство TES-4 оснащено датчиком для измерения термоЭДС дифференциальным методом. Все восемь зажимных винтов соединены медным кольцом, из которого с помощью щетки удаляется дифференциальная термоЭДС. Ручка с клювом и фиксатором шарика позволяет быстро установить требуемый стандартный образец (СО) в плоскости движения горячего электрода. Горячий электрод вместе с нагревателем можно перемещать в вертикальном направлении на 3-5 мм, что позволяет надавливать его на тестируемый образец и стандартный образец с постоянной силой, что обеспечивает хороший прижим и повторяемость результатов контроля [39].

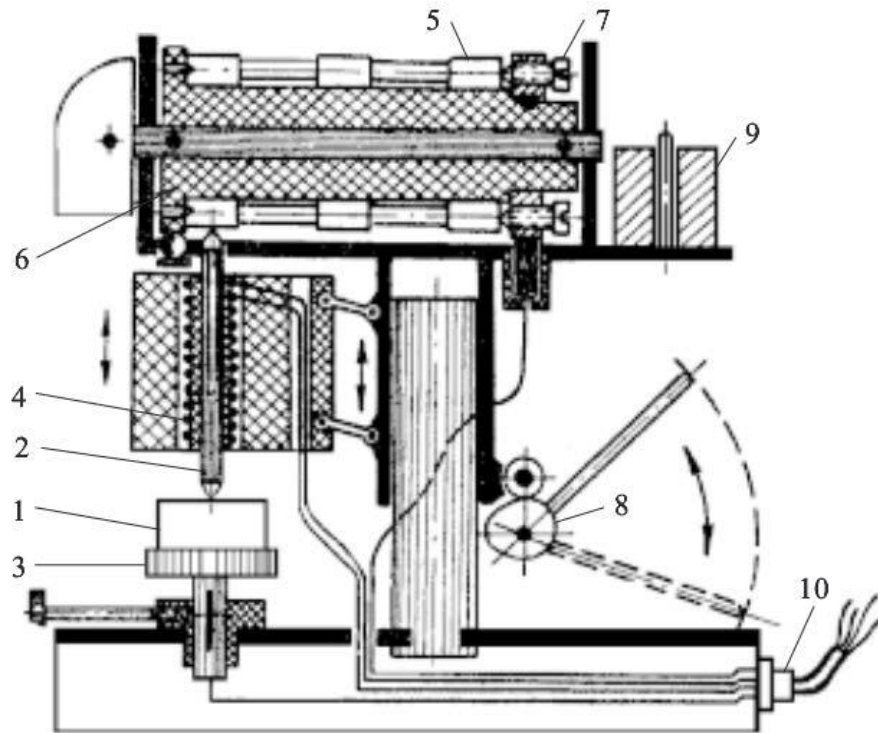


Рисунок 1.32 – Дифференциальный термоэлектрический датчик: 1 - испытуемый образец; 2 – нагреваемый электрод; 3 – подъемный стол с функцией холодного электрода; 4 – нагреватель; 5 – СО; 6 – барабан с кассетами для восьми СО; 7 – винт с функцией второго холодного электрода для крепления СО; 8 – эксцентрик; 9 – противовес; 10 – разъем для подключения датчика к панели управления термоэлектрического устройства

Термоэлектрический прибор Т-3СП предназначен для экспресс-сортировки металлов различного химического состава, определения наличие покрытий, отличающихся по химическому составу от основного материала (рисунок 1.33).



Рисунок 1.33 – Внешний вид прибора Т-3СП

Измерение термоЭДС, возникающего между объектами с разными температурами и химическим составом. Устройство может контролировать структуру чугуна, качество термообработки металлов. Устройство позволяет быстро контролировать химический состав металлов по сравнению со стандартом. При использовании трибоэлектрического преобразователя устройство работает по методу трибоэлектродвижущей силы, которое возникает при трении различных металлов по отношению к химическому составу друг друга. В этом режиме устройство может контролировать степень гидрирования титановых сплавов [88].

Технические характеристики прибора:

- чувствительность, мкВ, не хуже – 10;
- температура наконечника, °С (стабилизирована) – 80;
- материал наконечника - сменный;
- время установления рабочего режима, мин —5;
- время непрерывной работы, час – 8;
- питание, В - 220 ± 10 ;
- потребляемая мощность, Вт. не более – 5;
- масса прибора, кг – 0,4;
- габаритные размеры (без преобразователя), мм – $190 \times 105 \times 60$;
- материал наконечника вибрирующего преобразователя – ВТ-20 (сменный);
- температура окружающего воздуха, °С – +10...+50.

Термоэлектрический сортировщик металлов и сплавов - ТЕ-3000 предназначен для сортировки металлов и сплавов (рисунок 1.34). Принципы работы основан на использовании эффекта Зеебека. Горячий электрод входит в контакт с испытываемым металлом; образуется схема термопары, на выходе которой создается термоЭДС. Ее значение зависит от типа металла, который может быть детектирован. Это свойство является индивидуальной характеристикой большинства металлов. В промышленном контроле качества используют это как метод идентификации металлических сплавов [105].

Прибор «Термотест» предназначен для контроля металлов и сплавов дифференциальным термоэлектрическим методом. В устройстве использован принципиально новый способ измерения дифференциальной термоЭДС, что позволяет уменьшить погрешность контроля. Блок-схема прибора «Термотест» показана на рисунке 1.34.

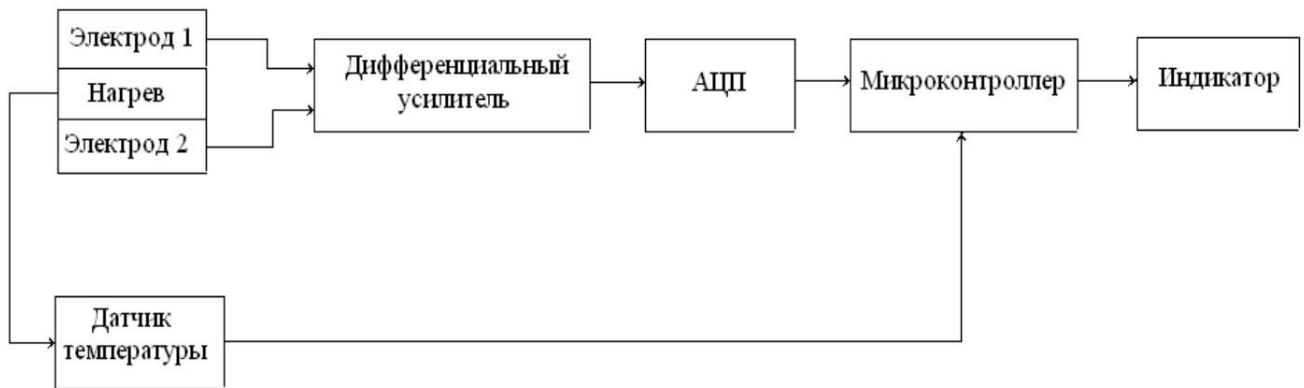


Рисунок 1.34 – Структурная схема прибора «Термотест»

Блок-схема устройства «Термотест» состоит из двух горячих электродов, которые нагреваются одним нагревателем. Горячие электроды подключены к дифференциальному усилителю, выход которого подключен к АЦП. Цифровой код от АЦП поступает на микроконтроллер. Для контроля температуры контролируемого образца используется датчик температуры, который подключен ко второму входу микроконтроллера. Данные, обработанные микроконтроллером, отображаются на дисплее.

В зависимости от производственных задач устройство может использоваться

для:

- входного контроля металлов на соответствие эталону;
- неразрушающей сортировки готовых изделий;
- неразрушающего контроля качества проведенной термобработки;
- определения наличия слоев цементации и их глубины;

Основные недостатки прибора: высокая погрешность и плохая повторяемость результатов контроля, наличие переходного нестабильного электрического сопротивления контактов измерительных электродов с образцом при ручном контроле; наличие «дребезга контактов»; большое время выхода на режим измерения. Сравнение характеристик термоэлектрических измерительных приборов приведено в таблица 1.7.

Таблица 1.7 – Сравнение характеристик термоэлектрических измерительных приборов.

Прибор	Достоинства	Недостатки
SETARAM SeebeckPro Seebeck Coefficient Analyzer	Температурный диапазон. Точность температуры. Точность измерения коэффициента Зеебека	Ограниченный размер измеренных образцов. Требуется атмосфера для измерения
NETZSCH SBA 458	Настройка измерения для различных образцов геометрии испытуемых образцов и гибкость в размерах образцов. Проверка качества для измерения измерения Seebeck до и во время измерения. Точность измерения коэффициента Зеебека	Относительно ограниченный диапазон температур. Требуется атмосфера для измерения
ULVAC ZEM-3	Компьютерное управление. Призма и цилиндрические образцы. Построение графика V-I измерения может быть проведено, чтобы судить, находятся ли провода в тесном контакте с установленным образцом. Простота измерений образцов от металлов до монокристаллов до проводов до тонких пленок. Количество измерений, которые автоматически усредняются до 128	Требуется атмосфера для измерения. Требуется охлаждающая вода
MMR Seebeck System	Относительно ограниченный диапазон температур. Возможность измерения крошечного образца	Ограниченный размер тестируемых образцов. Требуется атмосфера для измерения. Нет очень высокой температуры
SR-3 Linseis Seebeck	Одновременное измерение Зеебека и	Статический метод измерения Зеебека.

Coefficient & Electric Resistivity Unit	удельного сопротивления автоматические процедуры измерения. Различные возможные геометрии тестируемых образцов. Диапазон температур. Проверка качества для измерения Seebeck до и во время измерения. Точность измерения коэффициента Зеебека	Громоздкий дизайн. Требуется охлаждающая вода. Требуется атмосфера для измерения
Термоэлектрический анализатор металлов и сплавов ТАМИС	Малое энергопотребление, компактные, надежные результаты, широкий спектр приложений	Неудобный интерфейс, небольшая база металлов, с большим количеством деталей, которые вам нужно перекалибровать каждые 5 частей, небольшой диапазон рабочих температур
Прибор ТЭС-4 с дифференциальным датчиком.	Дифференциальный датчик, повторяемость управления, измерительная система с постоянным зажимом.	Большие габариты и вес, многоэлектродная измерительная система.
Термоэлектрический прибор Т-3СП	Малое энергопотребление, сменный наконечник.	Низкий диапазон рабочих температур, низкая чувствительность.
Термоэлектрический сортировщик металлов и сплавов - ТЕ-3000.	Быстрое управление, простота в использовании	Небольшая база металлов
Термотест	Позволяет точно определить место возникновения пластической деформации	Низкая точность и плохая повторяемость результатов измерения, в результате чего снижается достоверность контроля изделий из металла; нестабильное электрическое сопротивление контактов измерительных электродов с образцом при ручном контроле; наличие «дребезга контактов»

1.10 Постановка задачи

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. Факторы, влияющие на результаты

измерений, упоминаются в работах [65, 96, 97]. Для того чтобы учесть эти факторы, необходимо исследовать степень их влияния на результат контроля и выработать меры, уменьшающие их влияние. В частности для уменьшения влияния неоднородности по химическому и фазовому составу на результат контроля применяют электроды не с точечным контактом, а с линейным или плоскостным. Однако 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 (рисунок 1.35).

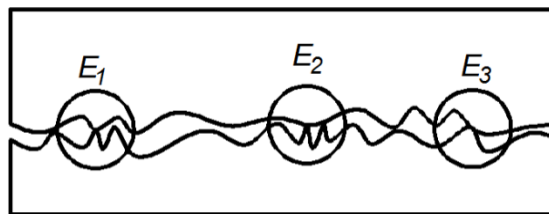


Рисунок 1.35 – Схема многоточечного контакта

При этом измеряется эквивалентная термоЭДС по поверхности контакта, механизм расчета которой еще не изучен до конца. Это связано с тем, что различные типы термопар имеют разные термоэлектрические характеристики: величину ЭДС, внутреннее сопротивление, мощность, а также переходное сопротивление контактов. Одним из подходов к изучению этого механизма является замена гетерогенной поверхности на различные типы термопар, соединенные параллельно (рисунок 1.36) [98, 99, 100].

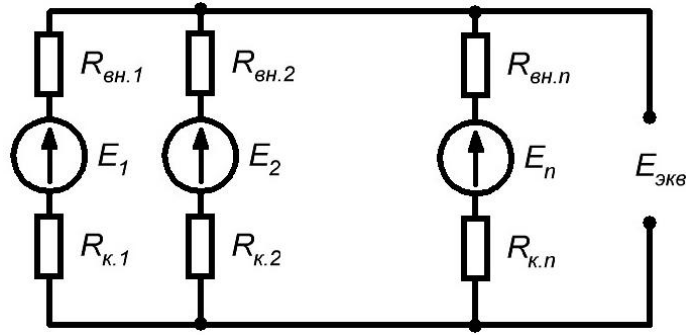


Рисунок 1.36 – Эквивалентная электрическая схема при контроле с многоточечным контактом, $R_{вн.1}, R_{вн.2}, \dots, R_{вн.n}$ - внутренние сопротивления, E_1, E_2, \dots, E_n - источники ЭДС, $R_{к.1}, R_{к.2}, \dots, R_{к.n}$ - контактные сопротивления, $E_{эКВ}$ – эквивалентный источник ЭДС

Для изучения термоэлектрических характеристик подключенных параллельно термопар, имеющих собственную ЭДС, внутреннего и контактного сопротивления и общего напряжения нагрузки, сначала необходимо определить электрические характеристики отдельных термопар.

ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ существующих приборов показал, что устройства термоэлектрического контроля имеют недостатки, которые не позволяют надежно проводить контроль металлов и сплавов из-за наличия неоднородности и шероховатости испытываемой поверхности, нестабильного электрического и теплового контакта электродов с образцом. Поэтому необходимо создать модель, описывающую процессы термоэлектрического контроля, и на основе предлагаемой модели провести исследования влияния вышеуказанных факторов на надежность контроля и предложить методы снижения их влияния на достоверность контроля. Следующая глава будет посвящена разработке модели и изучению дестабилизирующих факторов.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ

Проведенный обзор показал необходимость использования электродов особой конструкции, которая обеспечивает получение эквивалентной характеристики термоЭДС от поверхности контролируемого изделия. При такой конструкции электрода эквивалентная схема электродной части будет содержать несколько источников термоЭДС, соединенных параллельно и подключенных к общей нагрузке (рисунок 1.46). Для определения характеристик эквивалентного источника необходимо разработать модель и провести исследования. Этому посвящена вторая глава диссертации.

2.1 Методика расчета эквивалентного источника

Эквивалентные схемы для расчета характеристик эквивалентного источника термоЭДС при параллельном соединении двух источников термоЭДС представлены на рисунке 2.1. На рисунке 2.1.а показана эквивалентная схема для двух параллельно подключенных источников термоЭДС, на рисунке 2.1.б и на рисунке 2.1.в показаны эквивалентные схемы для расчета тока от первого и второго источников термоЭДС соответственно.

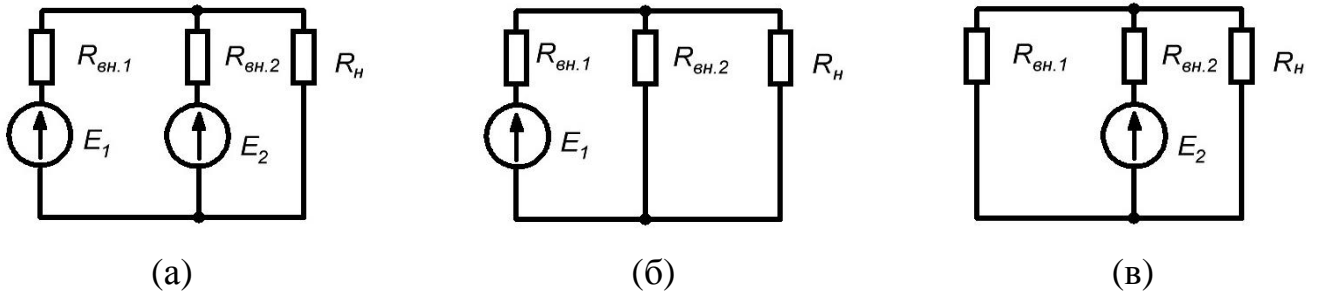


Рисунок 2.1 – Эквивалентная схема замещения источника термоЭДС, (а) параллельное соединение двух источников термоЭДС, (б) эквивалентная схема для расчета тока от первого источника термоЭДС, (в) эквивалентная схема для расчета тока от второго источника термоЭДС

Расчет тока для двух соединенных параллельно источников термоЭДС можно осуществить методом наложения. Ток в цепи от первого источника ЭДС (рисунок 2.1.б) можно найти из выражения:

$$I_1 = \frac{E_1}{R_{\text{вн.1}} + \frac{R_{\text{вн.2}} \cdot R_H}{R_{\text{вн.2}} + R_H}}, \quad (2.1)$$

где I_1 – ток первого источника термоЭДС;

E_1 – ЭДС первого источника;

$R_{\text{вн.1}}$ – внутреннее сопротивление первого источника ЭДС;

$R_{\text{вн.2}}$ – внутреннее сопротивление второго источника ЭДС;

R_H – сопротивление нагрузки.

Ток в цепи от второго источника ЭДС (рисунок 2.1.в) можно найти из выражения:

$$I_2 = \frac{E_2}{R_{\text{вн.2}} + \frac{R_{\text{вн.1}} \cdot R_H}{R_{\text{вн.1}} + R_H}}, \quad (2.2)$$

где I_2 – ток второго источника термоЭДС;

E_1 – ЭДС второго источника.

Результирующий ток I_p определяется как сумма токов от каждого источника:

$$I_p = I_1 + I_2. \quad (2.3)$$

Напряжение эквивалентного источника определяется током, протекающим через его внутреннее сопротивление:

$$E_{\text{экв}} = I_p \cdot R_{\text{вн}}, \quad (2.4)$$

где $R_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление эквивалентного источника термоЭДС;

I_p – ток эквивалентного источника термоЭДС.

Внутреннее сопротивление эквивалентного термоэлектрического источника представляет собой параллельное соединение внутренних сопротивлений каждого источника:

$$R_{\text{вн}} = \frac{R_{\text{вн.1}} \cdot R_{\text{вн.2}}}{R_{\text{вн.1}} + R_{\text{вн.2}}}. \quad (2.5)$$

Используя эту методику можно рассчитать ток и внутреннее сопротивление эквивалентного источника при любом количестве параллельно соединенных источников ЭДС.

2.2 Разработка модели

При разработке модели за основу была взята схема, содержащая несколько источников термоЭДС соединенных параллельно и подключенных к общей

нагрузке (рисунок 2.2). 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.

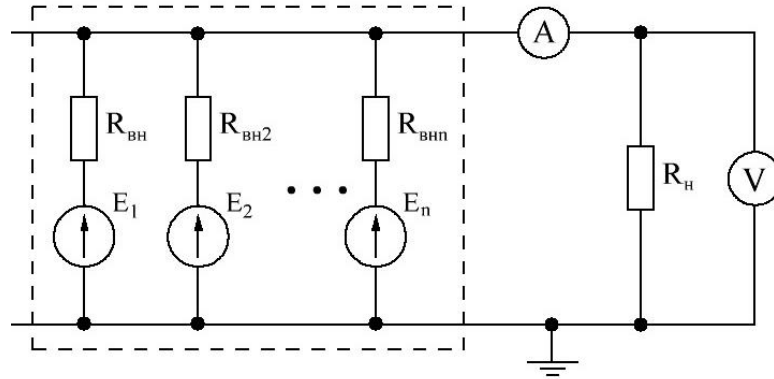


Рисунок 2.2 – Эквивалентная схема при многоточечном контакте испытуемого образца с электродом, E_1, E_2, \dots, E_n – источники ЭДС, $R_{вн1}, R_{вн2}, \dots, R_{внn}$ – внутренние сопротивления источников термоЭДС

Алгоритм модели реализует вычисление токов от каждого источника термоЭДС на основе метода суперпозиции (для однотипных источников) [101]:

$$I = \frac{E}{R_{вн} + \left[(n-1) \cdot \frac{1}{R_{вн}} + \frac{1}{R_{н}} \right]^{-1}}, \quad (2.6)$$

где n – количество источников термоЭДС;

I – ток источника термоЭДС;

E – ЭДС источника;

$R_{вн}$ – внутреннее сопротивление источника;

$R_{н}$ – сопротивление нагрузки.

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

$$I_1 = \frac{E_1}{R_{\text{вн.1}} + \left[(n_1 - 1) \cdot \frac{1}{R_{\text{вн.1}}} + n_2 \cdot \frac{1}{R_{\text{вн.2}}} + \frac{1}{R_H} \right]^{-1}}, \quad (2.7)$$

$$I_2 = \frac{E_2}{R_{\text{вн.2}} + \left[n_1 \cdot \frac{1}{R_{\text{вн.1}}} + (n_2 - 1) \cdot \frac{1}{R_{\text{вн.2}}} + \frac{1}{R_H} \right]^{-1}}, \quad (2.8)$$

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;

$R_{\text{вн.1}}, R_{\text{вн.2}}$ – внутренние сопротивления источников первого и второго типа соответственно;

R_H – сопротивление нагрузки.

Соответственно, ток, протекающий через нагрузку $I_{\text{нi}}$, от каждого типа источников:

$$I_{\text{н1}} = \frac{E_1 - (I_1 \cdot R_{\text{вн.1}})}{R_H}, \quad (2.9)$$

$$I_{\text{н2}} = \frac{E_2 - (I_2 \cdot R_{\text{вн.2}})}{R_H}. \quad (2.10)$$

Ток, протекающий в нагрузке, является суммой всех $I_{\text{нi}}$:

$$I_H = \sum_1^{n_1} I_{\text{н1}} + \sum_1^{n_2} I_{\text{н2}}. \quad (2.11)$$

Напряжение на нагрузке равно:

$$V_n = I_n \cdot R_n. \quad (2.12)$$

2.2.1 Интерфейс программного обеспечения

Разработанная программа обеспечивает возможность определения термоЭДС металлов и сплавов. 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. Программа осуществляет расчет и отображение различных характеристик, которые можно использовать для анализа.

Интерфейс, который показан на рисунке 2.3 – 2,7, включает в себя пять вкладок различных функциональных заданий. Вкладка «Read» предназначена для запуска файла из базы данных (рисунок 2.3.а). В базе данных содержатся экспериментальные данные источников термоЭДС (токи и внутренние сопротивления для 11 значений сопротивления нагрузки и трех различных температур, 100 °С, 200 °С, 300 °С). В поле «Temp Database» указывается временный файл базы данных для временного хранения текущих данных, которые используются в процессе расчета эквивалентного источника термоЭДС.

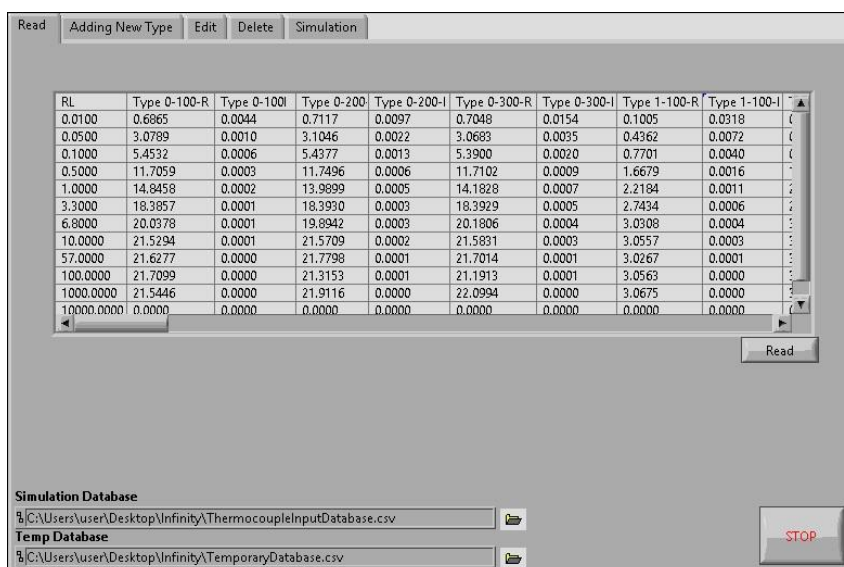


Рисунок 2.3 – Интерфейс программы; вкладка «Read»

Вкладка «Adding New Type» служит для добавления данных нового источника термоЭДС (рисунок 2.4).

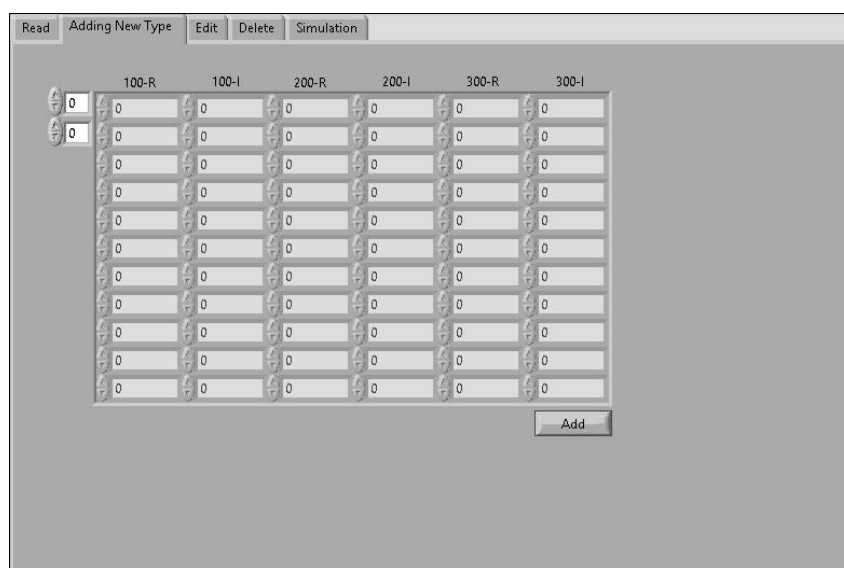


Рисунок 2.4 – Интерфейс программы; вкладка «Adding New Type»

Вкладка «Edit» предназначена для редактирования исходных значений в базе данных в случае обнаружения ошибки (рисунок 2.5).

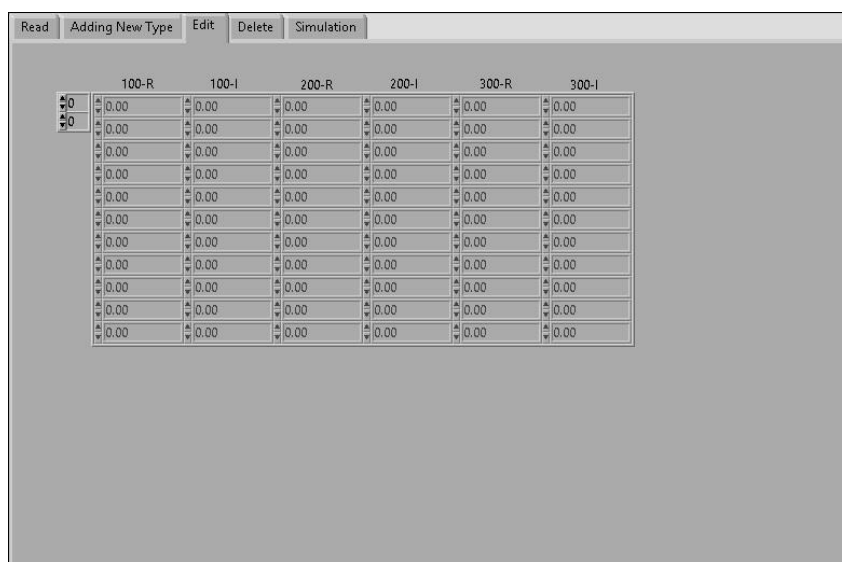


Рисунок 2.5. Интерфейс программы; вкладка «Edit»

Вкладка «Delete» предназначена для удаления последних 6 столбцов недавно добавленных входных данных источника термоЭДС (рисунок 2.6).

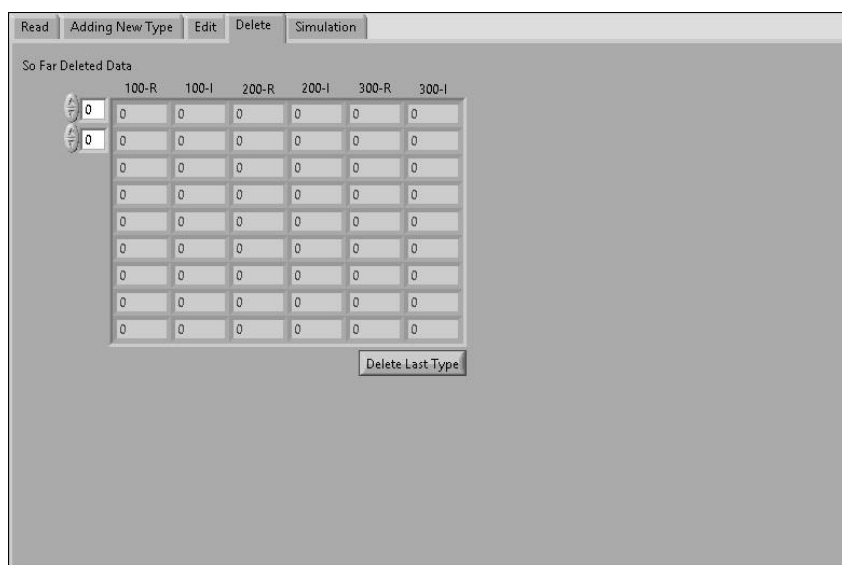


Рисунок 2.6 – Интерфейс программы; вкладка «Delete»

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.

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» (рисунок 2.7). Кнопка «Add» служит для добавления к предыдущим вычислениям новых данных. Кнопка «Simulate» служит для запуска процесса моделирования. Результат моделирования сохраняется во временном файле, который указывается на вкладке «Read». Поле «Report» отображает количество термопар было использовано в расчетах.

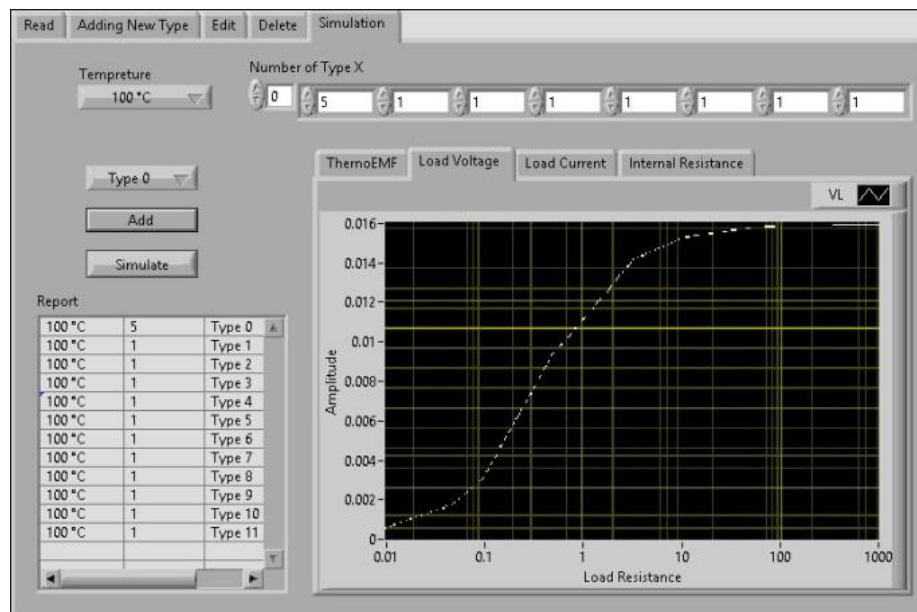


Рисунок 2.7 – Интерфейс программы; вкладка «Simulate»

2.3 Экспериментальное исследование характеристик термоэлектрических источников ЭДС

Для верификации модели необходим набор экспериментальных данных, отражающих электрические характеристики типовых источников термоЭДС и их комбинации. Экспериментальные исследования проводились на специально изготовленной установке, которая будет описана в третьей главе диссертации, включающая термокамеру, в которую помещают исследуемый источник

термоЭДС, вольтметр, варьруемую нагрузку и персональный компьютер для управления всеми составными частями этой установки [102, 103]. В качестве экспериментальных источников термоЭДС были выбраны термопары: хромель-алюмель и нихром-константан.

ТермоЭДС измерялась для разных значений сопротивления нагрузки, в то время как температура термопары поддерживалась постоянной. Зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки для хромель-алюмелевой термопары показана на рисунке 2.8.а. На рисунке 2.8.б показана та же зависимость для нихром-константановой термопары. Задавая различную температуру в термокамере, мы получаем семейство характеристик для источника термоЭДС.

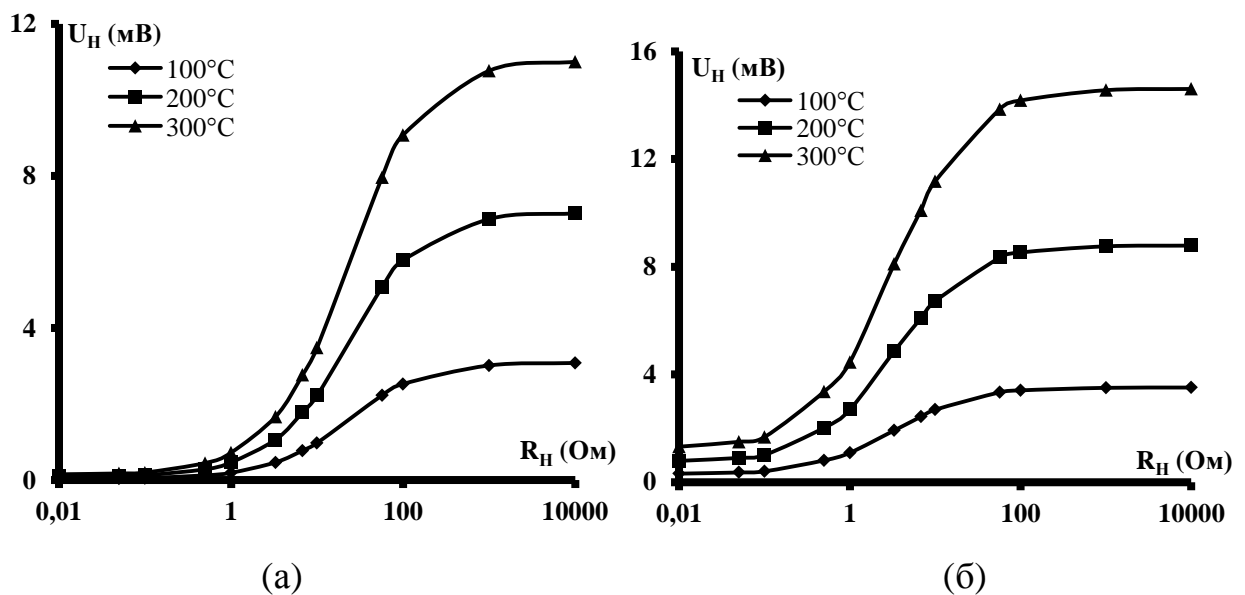


Рисунок 2.8 – Зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки для температур 100, 200 и 300 °С, (а) термопара хромель-алюмель, (б) термопара нихром-константан

Из рисунка 2.8 видно, что в режиме короткого замыкания значение термоЭДС минимально для обеих термопар. С увеличением сопротивления нагрузки значение термоЭДС увеличивается, приближаясь к режиму холостого

хода. Следует отметить, что при сопротивлении нагрузки более 100 Ом отклонение от режима холостого хода не превышает 10 %.

Используя полученные данные были рассчитаны внутренние сопротивления двух источников термоЭДС для различных значений сопротивления нагрузки. В соответствии с рисунком 2.2 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:

$$R_{вн} = R_n \cdot \left(\frac{U_{xx} - U_n}{U_n} \right), \quad (2.13)$$

где R_n – сопротивление нагрузки;

U_n – 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 рисунке 2.9.а для термопары хром-алюмель и на рисунке 2.9.б для термопары нихром-константан. Анализ рисунка 2.9 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.

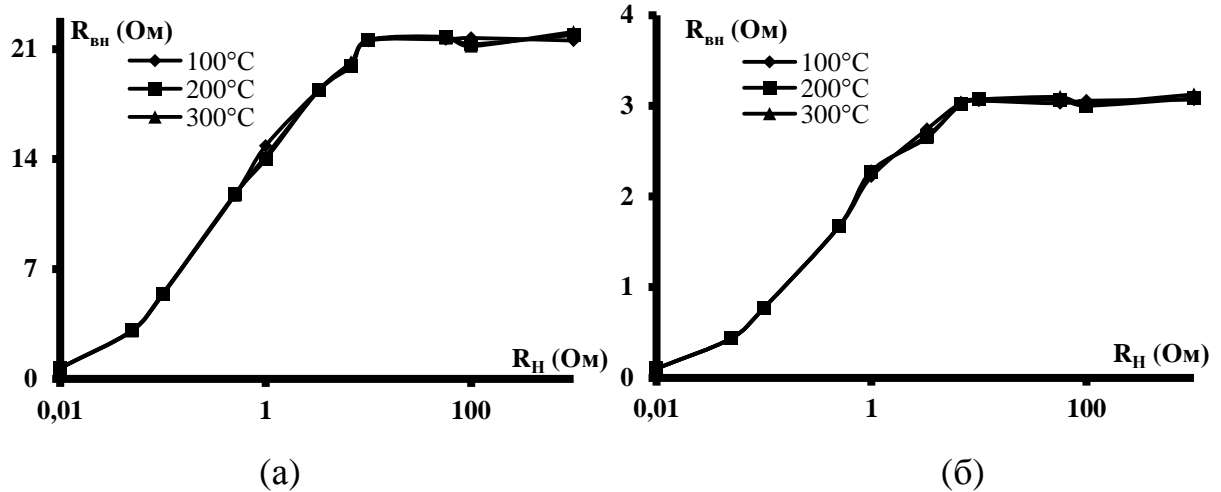


Рисунок 2.9 – Зависимость внутреннего сопротивления источника термоЭДС от сопротивления нагрузки для температур 100, 200 и 300 °С, (а) термопара хромель-алюмель, (б) термопара нихром-константан

Кроме того был произведен расчет зависимости внутреннего сопротивления от тока:

$$R_{вн} = \frac{U_{xx} - U_H}{I}, \quad (2.14)$$

где I – ток в цепи;

U_{xx} – напряжение холостого хода;

U_H – напряжение, измеренное вольтметром на нагрузке.

Полученная зависимость показана на рисунке 2.10. На рисунке 2.10.а – для термопары хромель-алюмель и на рисунке 2.10.б – для термопары нихром-константан.

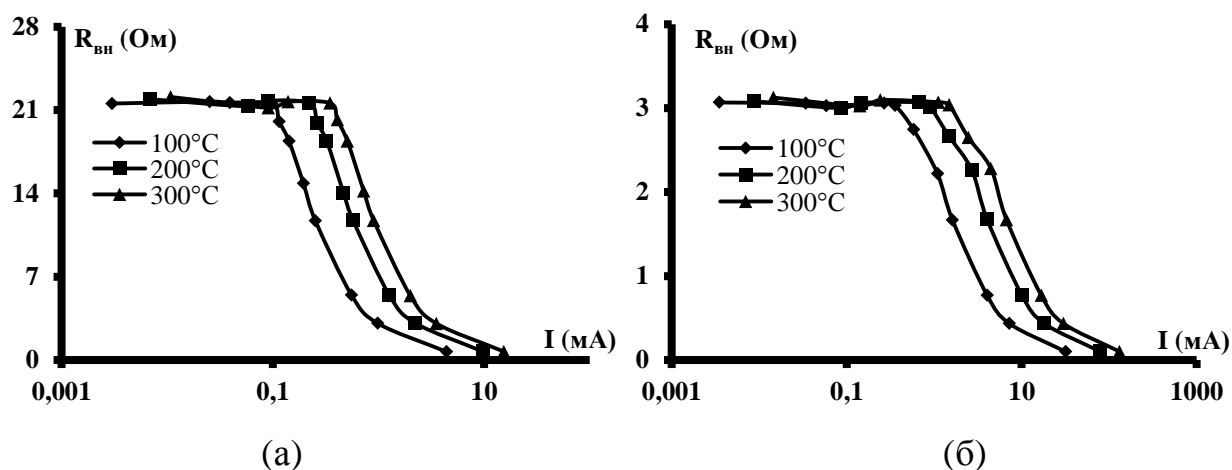


Рисунок 2.10 – Зависимость внутреннего сопротивления от тока для температур 100, 200 и 300 °С, (а) термопара хромель-алюмель, (б) термопара нихром-константан

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

Одной из важнейших характеристик источника термоЭДС является мощность выделяемая на нагрузке, которая рассчитывается следующим образом:

$$P = I^2 \cdot R_n = \left(\frac{U_n}{R_n} \right)^2 \cdot R_n = \frac{U_n^2}{R_n}. \quad \dots\dots(2.14)$$

Пример зависимости мощности, выделяемой на нагрузке, от сопротивления нагрузки приведен на рисунке 2.11 для двух типов источников термоЭДС.

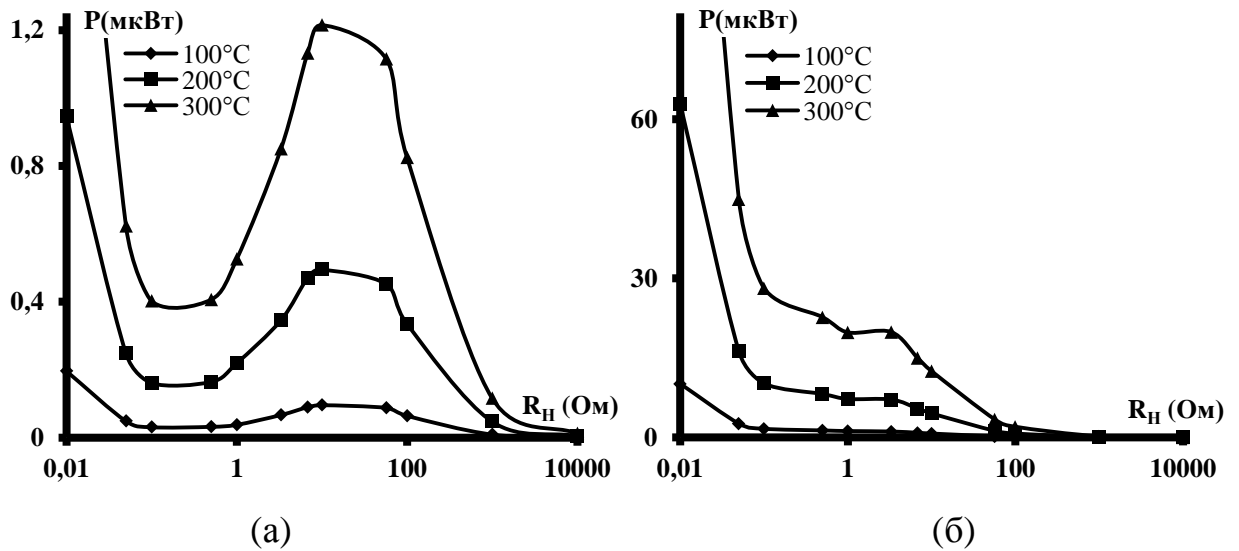


Рисунок 2.11 – Зависимость мощности, выделяемой на нагрузке, от сопротивления нагрузки для температур 100 , 200 и 300 $^\circ\text{C}$, (а) термопара хромель-алюмель, (б) термопара нихром-константан

Из рисунка 2.11 можно сделать вывод, что при равном внутреннем сопротивлении источника термоЭДС и сопротивлении нагрузки наблюдается небольшой пик мощности. Другой важной характеристикой источника термоЭДС является его вольт-амперная характеристика, которая показана на рисунке 2.12 для обеих термопар. Расчет вольт-амперных характеристик проводился в соответствии с выражением:

$$E_{\text{ЭДС}} = I \cdot R_{\text{вн}}, \quad (2.15)$$

где I – ток в цепи;

$R_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление источника термоЭДС;

$E_{\text{ЭДС}}$ – напряжение источника термоЭДС.

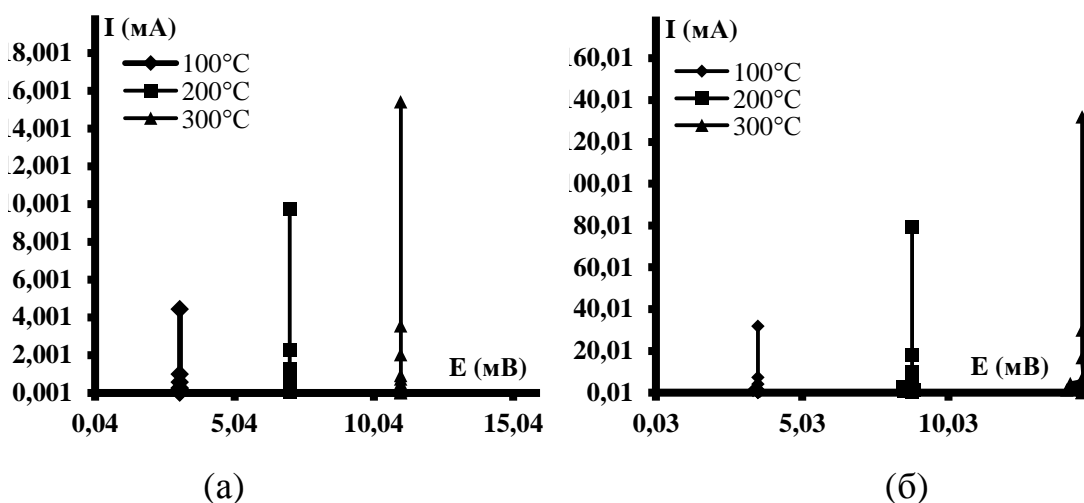


Рисунок 2.12 – Вольт-амперные характеристики для температур 100, 200 и 300 °С, (а) термопара хромель-алюмель, (б) термопара нихром-константан

Затем были проведены исследования электрических характеристик нескольких соединенных параллельно термопар: хромель-алюмель и нихром-константан. На рисунке 2.13 показаны зависимости напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки, при этом на рисунке 2.13.а показаны характеристики двух соединенных параллельно термопар: хромель-алюмель и нихром-константан, а на рисунке 2.13.б показаны характеристики трех соединенных вместе термопар, две из которых нихром-константан и одна хромель-алюмель.

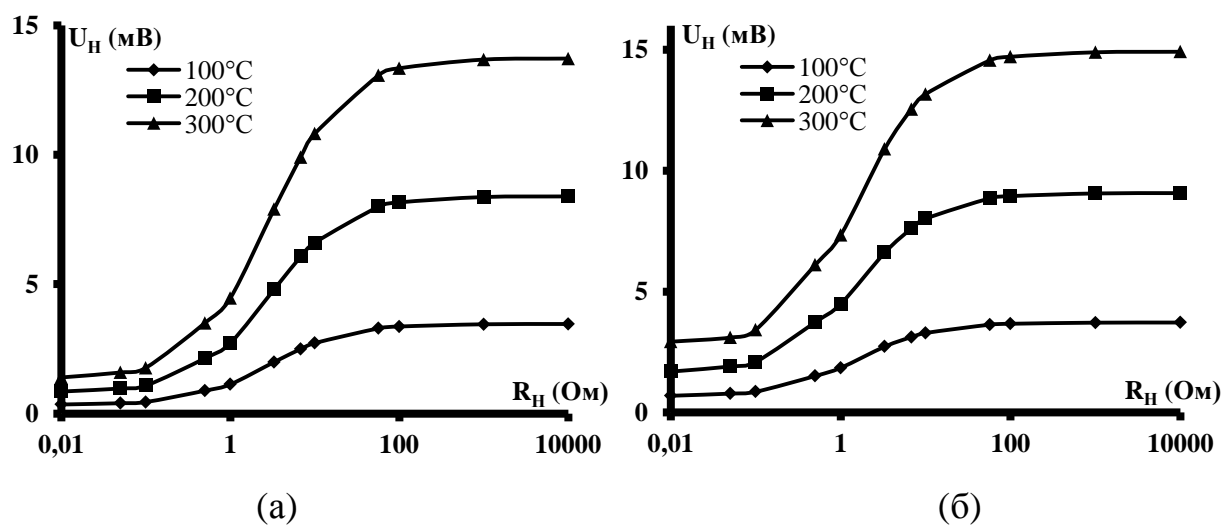


Рисунок 2.13 – Зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки для температур 100, 200 и 300 °С, (а) параллельное соединение термопар

хромель-алюмель и нихром-константан, (б) параллельное соединение двух термопар хромель-алюмель и одной термопары нихром-константан

Величина эквивалентной термоЭДС является сложной функцией отдельных источников термоЭДС, соединенных вместе. Причем для двух термопар, соединенных параллельно, выполняется условие:

$$E_{ТХА} < E_{ЭКВ} < E_{ТНК}, \quad (2.16)$$

Где $E_{ТХА}$ – ЭДС термопары хромель-алюмель, $E_{ТНК}$ – ЭДС термопары нихром-константан, $E_{ЭКВ}$ – эквивалентная ЭДС термопар хромель-алюмель и нихром-константан, соединенных параллельно.

Для трех термопар это условие не выполняется:

$$E_{ТХА} < E_{ТНК} < E_{ЭКВ}, \quad (2.17)$$

где $E_{ЭКВ}$ – эквивалентная ЭДС двух термопар нихром-константан и одной термопары хромель-алюмель, соединенных параллельно.

Для сравнения на рисунке 2.14 приведены зависимости напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки для термопары хромель-алюмель и нихром константан, а также эквивалентной ЭДС при их параллельном соединении. Характеристики приведены для температуры горячего спая 300 °С. Из рисунка 2.14 видно, что ЭДС эквивалентного источника немного отличается от ЭДС термопары хромель-алюмель.

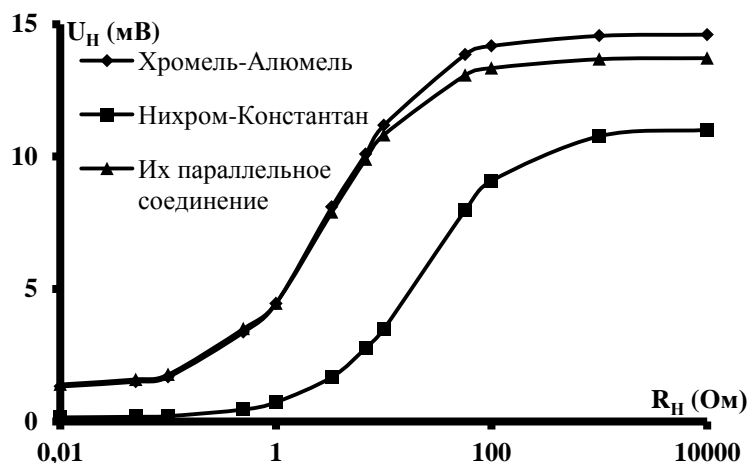


Рисунок 2.14 – Зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки для различных источников термоЭДС

Зависимость внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС при параллельном соединении хромель-алюмелевой термопары и нихром-константановой термопары от сопротивления нагрузки показана на рисунке 2.15.а. На рисунке 2.15.б приведена эта же зависимость для параллельного соединения двух термопар нихром-константан и одной хромель-алюмелевой термопары. Расчет внутреннего сопротивления проводился с использованием выражения (2.14). Анализ рисунка 2.15 позволяет сделать вывод, что внутреннее сопротивление эквивалентного источника термоЭДС определяется параллельным соединением внутренних сопротивлений каждого источника термоЭДС и не зависит от температуры горячего спая.

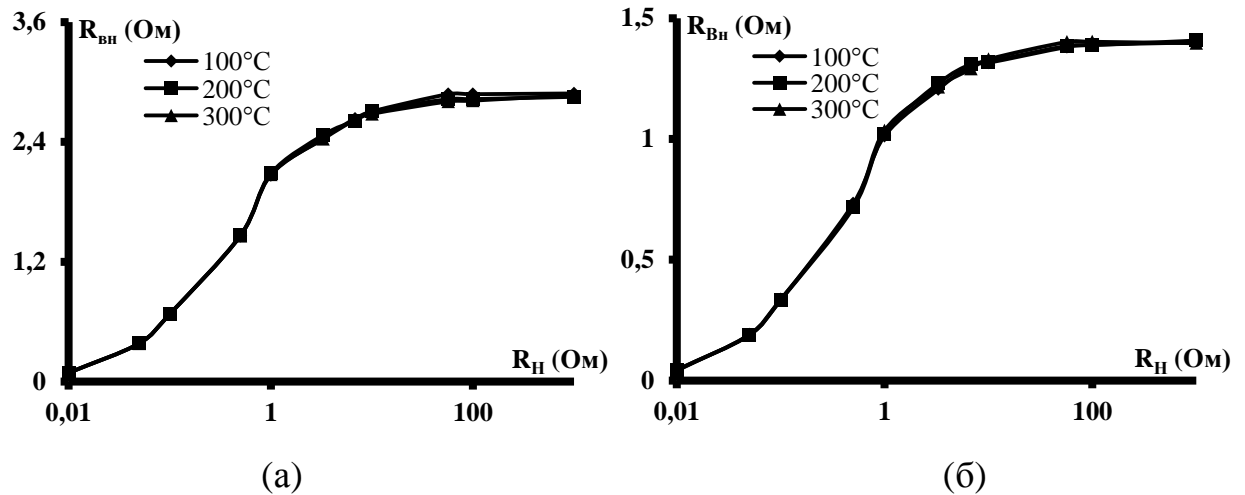


Рисунок 2.15 – Зависимость внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС от сопротивления нагрузки для температур 100, 200 и 300 °С, (а) параллельное соединение термопар хромель-алюмель и нихром-константан, (б) параллельное соединение двух термопар хромель-алюмель и одной термопары нихром-константан

Вольт-амперная характеристика эквивалентной термоЭДС показана на рисунке 2.16. Для параллельного соединения термопары хром-алюмель и термопары нихром-константан характеристика показана на рисунке 2.16.а, а на рисунке 2.16.б для параллельного соединения двух термопар нихром-константан и одной термопары хромель-алюмель. Расчет вольт-амперной характеристики проводился в соответствии с выражением (2.15), используя данные из рисунка 2.13 и рисунка 2.14.

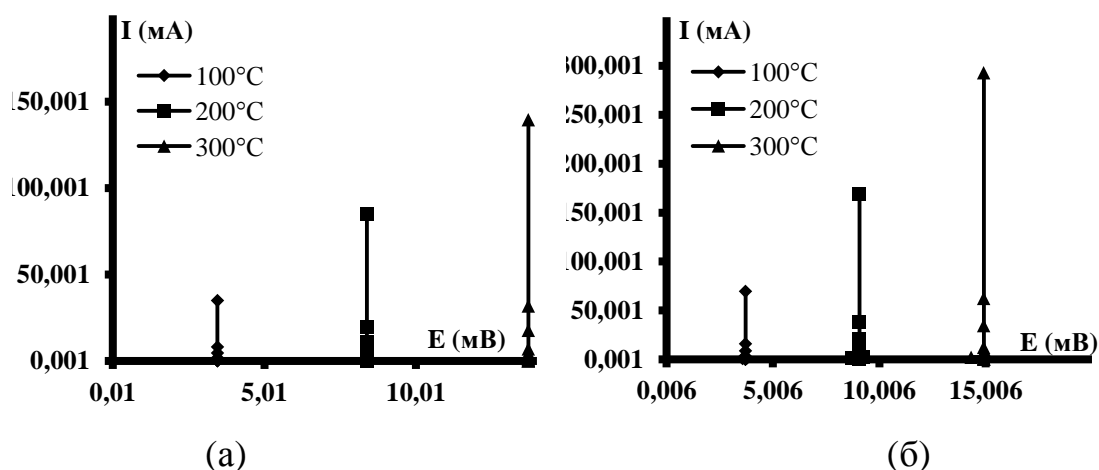


Рисунок 2.16 – Вольт-амперная характеристика эквивалентного источника для температур 100, 200 и 300 °С, (а) параллельное соединение термопар хромель-алюмель и нихром-константан, (б) параллельное соединение двух термопар нихром-константан и одной термопары хромель-алюмель

Из графиков вольтамперных характеристики рисунок 2.12 и рисунок 2.16 можно сделать вывод, что термоЭДС « E » не зависит от сопротивления нагрузки « R_H », и это объясняет, что каждый источник термоЭДС имеет свои индивидуальные характеристики, такие как ЭДС и внутреннее сопротивление.

С использованием полученных экспериментальных данных на основе полинома Ньютона были получены аналитические выражения, описывающие характеристики источников термоЭДС. Полином Ньютона был взят, поскольку он имеет рекурсивный характер. Интерполяция разделенных разностей Ньютона имеет преимущество перед другими методами, такими как, например, полином Лагранжа, потому что может быть добавлено больше точек для повышения точности расчетов, без повторного выполнения всей задачи, и можно использовать результаты предыдущих расчетов. При использовании обычной формулы Лагранжа решение задачи с разным количеством точек потребует повторного решения всей задачи. Для интерполяционного полинома Ньютона существует компактный и эффективный алгоритм для объединения членов при нахождении коэффициентов полинома [104, 105]. 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 менее 10 %.

Ограничения:

Большая часть экспериментальных данных получена в диапазоне 0,01-100 Ом сопротивления нагрузки, как показано на рисунке 2.14, и только набор из трех экспериментальных данных имеет расширенный диапазон (100, 1000, 10000 Ом). Это означает, что согласно собранным данным парабола находится в первом очень узком диапазоне, а устойчивая стабильность результатов - во втором самом широком диапазоне. Этот случай представляет сложную ситуацию для различных методов интерполяции. Поэтому кривую лучше разделить на кусочную функцию, описываемую в двух диапазонах, как показано в выражении (2.18) и на рисунке 2.17, где показаны результирующие кривые.

$$\begin{aligned}
 U(t) = & (-4.534653465346539 \times 10^{-13} * t^2 - \\
 & 3.682006600660062 \times 10^{-10} * t - \\
 & 1.641254125412495 \times \\
 & 10^{-9})R_H^4 + (1.7696369636963718 \times 10^{-10} * t^2 + \\
 & 1.4294481848184835 \times 10^{-7} * t + \\
 & 6.638217821781987 \times 10^{-7})R_H^3 + \\
 & (-2.4945544554455594 \times 10^{-8} * t^2 - \\
 & 2.021789438943892 \times 10^{-5} * t - \\
 & 9.164933993399682 \times 10^{-5})R_H^2 + \\
 & (1.5189768976897642 \times 10^{-6} * t^2 + \\
 & 1.2558448844884502 \times 10^{-3} * t + \\
 & 4.853613861385941 \times 10^{-3})R_H + \\
 & (4.158415841584214 \times 10^{-6} * t^2 +
 \end{aligned}
 \quad \begin{array}{l}
 0 < R_H \\
 < 100
 \end{array} \quad (2.18)$$

$$\left. \begin{aligned}
 & 3.1807920792079125 \times 10^{-3} * t + \\
 & \quad 0.01850495049505074) \\
 & (-4.372277227722796 \times 10^{-24} * t^2 - \\
 & 3.662394719471963 \times 10^{-21} * t + \\
 & \quad 1.3163300330033616 \times \\
 & 10^{-20}) \mathbf{R}_H^4 + (6.700081848184831 \times 10^{-19} * t^2 + \\
 & \quad 5.567274275907592 \times 10^{-16} * t + \\
 & \quad 2.180907089109012 \times 10^{-15}) \mathbf{R}_H^3 + \\
 & (-1.8562006600660381 \times 10^{-14} * t^2 - \\
 & \quad 3.308877803300326 \times 10^{-11} * t + \\
 & \quad 6.935457372937243 \times 10^{-10}) \mathbf{R}_H^2 + \\
 & (1.6972894349676193 \times 10^{-10} * t^2 + \\
 & \quad 5.794716270468018 \times 10^{-7} * t - \\
 & \quad 1.8121509655254695 \times 10^{-5}) \mathbf{R}_H + \\
 & (3.8201033838323926 \times 10^{-5} * t^2 + \\
 & \quad 0.03265347227762538 * t + \\
 & \quad 0.08887452025925313)
 \end{aligned} \right\} \begin{aligned}
 & 100 \leq R_H \\
 & \leq 10000
 \end{aligned}$$

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

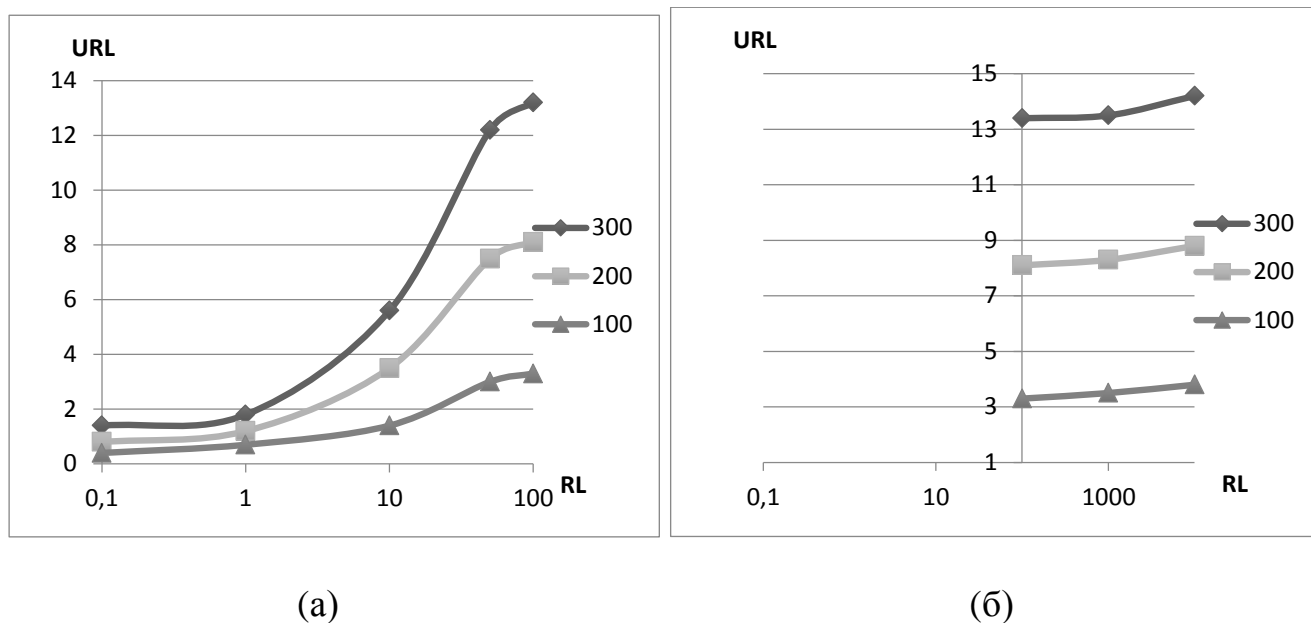


Рис.2.17. Зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки для параллельного соединения термопар хромель-алюмель и нихром-константан для температур 100, 200 и 300 °С; (а) первый диапазон кусочной функции $U(t)$, (б) второй диапазон кусочной функции $U(t)$

Полученные характеристики отличаются от экспериментальных с заданной точностью 6 %

2.4 Верификация модели

Верификация модели выполняется путем сравнения результатов расчета напряжения на нагрузке «VL» для разного количества термопар с экспериментальными результатами. Для проверки программы были использованы три различных типа термопар в качестве источников термоЭДС. Во-первых, каждый тип был опробован в отдельности, так что его характеристики могут быть известны для дальнейшего теоретического моделирования с помощью модели программного обеспечения, поскольку их характеристики термоЭДС и внутреннего сопротивления служат входными данными для программы. После этого были проведены эксперименты с различными источниками термоЭДС в различных комбинациях. На рисунке 2.18 показаны экспериментальные и

расчетные зависимости каждого из источников при постоянной температуре 170 °С с различными значениями сопротивления нагрузки.

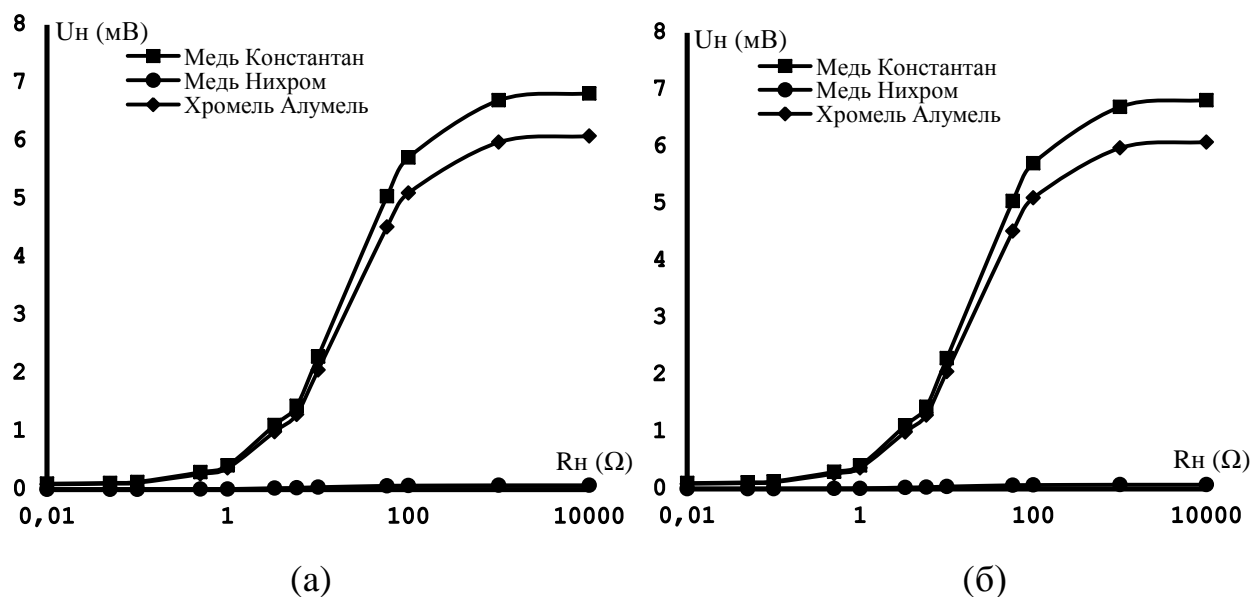


Рисунок 2.18 – Напряжение на нагрузке для каждого источника термоЭДС, (а) экспериментальные результаты, (б) результаты моделирования.

Исследование влияния источника термоЭДС медь-константан при соединении источников термоЭДС в различных комбинациях (медь-константан: медь-нихром: хромель-алюмель) приведено на рисунке 2.19. Линия № 1 соответствует комбинации 4:4:4, линия № 2 соответствует комбинации 1:4:4, а линия № 3 соответствует комбинации 0:4:4 соответственно.

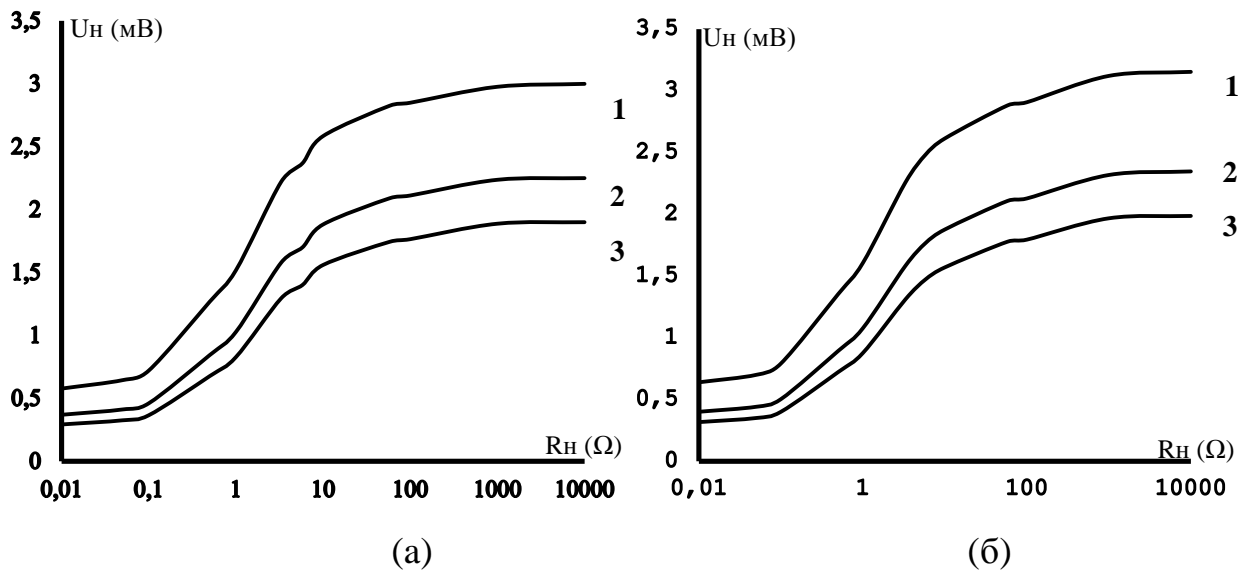


Рисунок 2.19 – Зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки для различных комбинаций термопар, (а) экспериментальные результаты, (б) результаты моделирования, линия № 1 соответствует комбинации 4:4:4, линия № 2 соответствует комбинации 1:4:4, линия № 3 соответствует комбинации 0:4:4 (медь-константан: медь-нихром: хромель-алюмель)

Исследование влияния источника термоЭДС хромель-алюмель при соединении источников термоЭДС в различных комбинациях (медь-константан: медь-нихром: хромель-алюмель) приведено на рисунке 2.20. Линия № 1 соответствует комбинации 4:4:4, линия № 2 соответствует комбинации 4:4:1, а линия № 3 соответствует комбинации 4:4:0 соответственно.

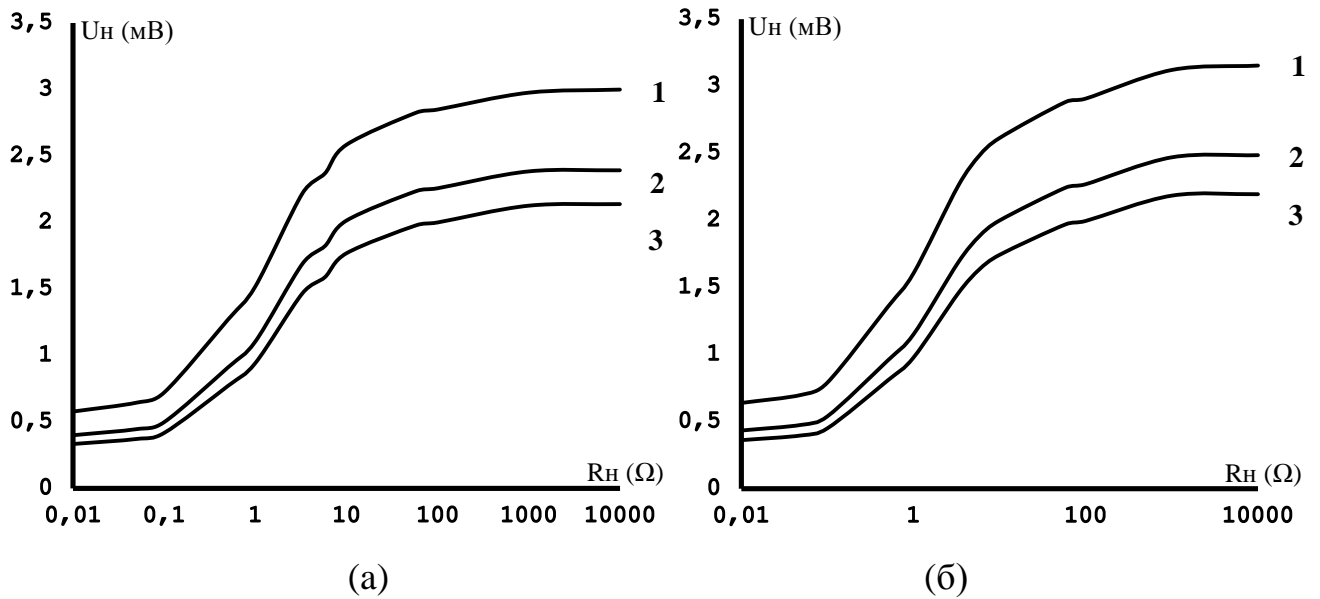


Рисунок 2. 20 – Зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки для различных комбинаций термопар, (а) экспериментальные результаты, (б) результаты моделирования, линия № 1 – комбинация 4:4:4, линия № 2 – комбинация 4:4:1, линия № 3 – комбинация 4:4:0 (медь-константан: медь-нихром: хромель-алюмель)

Исследование влияния источника термоЭДС медь-нихром при соединении источников термоЭДС в различных комбинациях (медь-константан: медь-нихром: хромель-алюмель) приведено на рисунке 2.21. Линия № 1 соответствует комбинации 4:0:4, линия № 2 соответствует комбинации 4:1:4, а линия № 3 соответствует комбинации 4:4:4 соответственно.

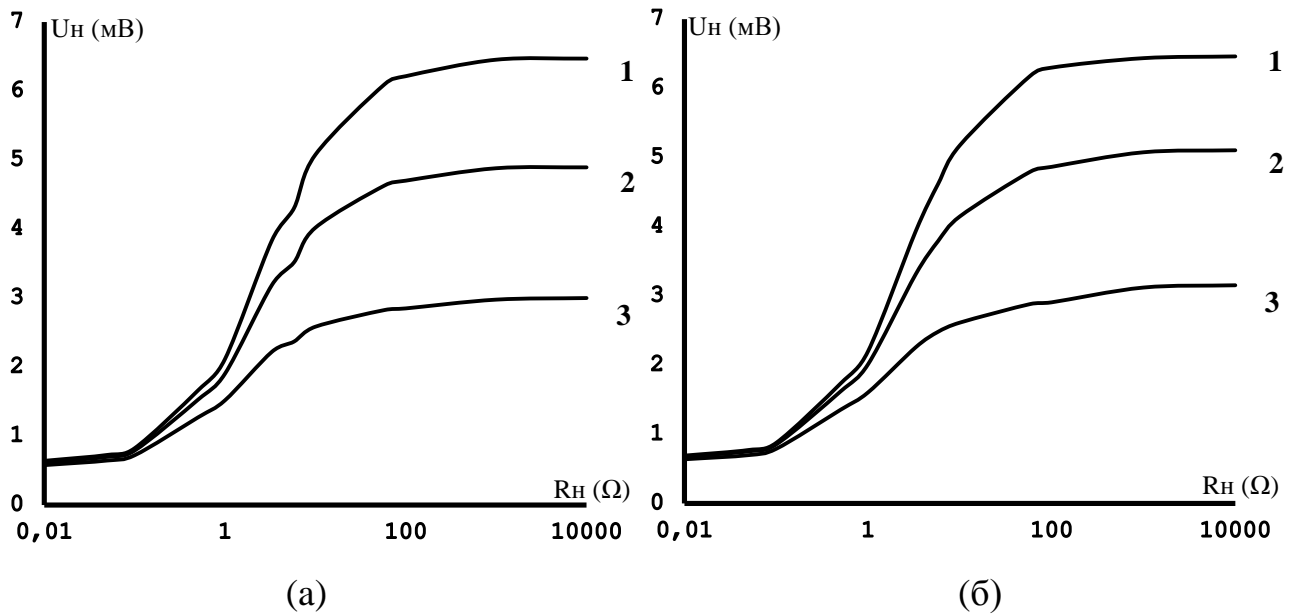


Рисунок 2.21 – Зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки для различных комбинаций термопар, (а) экспериментальные результаты, (б) результаты моделирования, линия № 1 – комбинация 4:4:4, линия № 2 – комбинация 4:4:1, линия № 3 – комбинация 4:4:0 (медь-константан: медь-нихром: хромель-алюмель)

Как видно из рисунков 2.18 – 2.21 модель адекватно рассчитывает характеристики эквивалентного источника термоЭДС и она может быть использована для проведения дальнейшего теоретического анализа.

2.5 Теоретические исследования характеристики эквивалентного источника при многоточечном контакте

Моделирование теоретических случаев важно для изучения возможных тенденций, которые могут возникнуть из-за различных характеристик термоэлектрических источников на поверхности тестируемого объекта при многоточечном контакте электродов с тестируемым изделием. Анализ были подвергнуты ранее исследованные источники (медь-нихром, хромель-алюмель и медь-константан), из которых были синтезированы 10 новых источников с измененными нагрузочными характеристиками. Каждый последующий источник

отличался от предыдущего на 10 %. Такое распределение характерно для изделий подвергшихся пластической деформации.

На рисунке 2.22 показаны экспериментальные характеристики отдельных термоэлектрических источников: медь-нихром (рисунок 2.22.а), хромель-алюмель (рисунок 2.22.б) и медь-константан (рисунок 2.22.в).

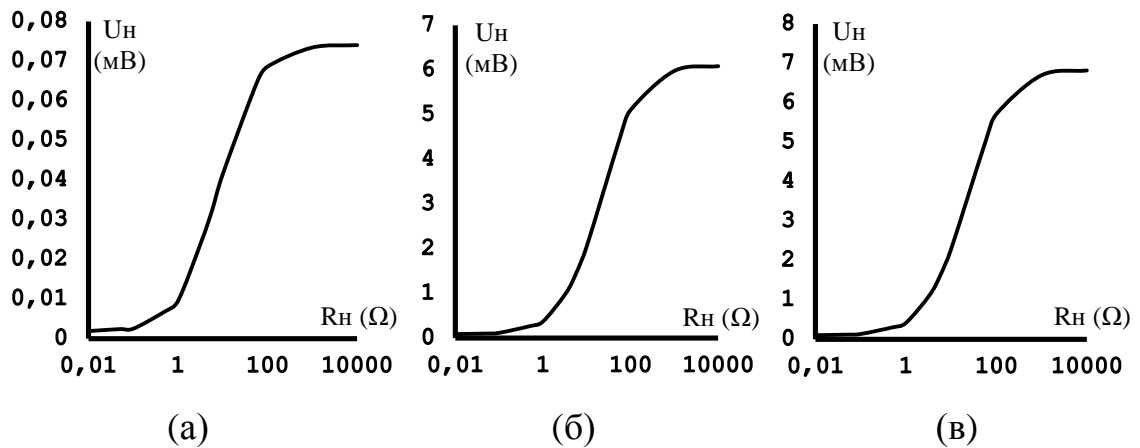


Рисунок 2.22 – Экспериментальные характеристики термоэлектрического источника, (а) медь-нихром, (б) хромель-алюмель и (в) медь-константан

Результаты расчета напряжения на нагрузке при параллельном соединении 11 однотипных источников термоЭДС медь-нихром, хромель-алюмель и медь-константан приведены на рисунке 2.23. Характер зависимостей изменяется только при низких сопротивлениях нагрузки, что обусловлено увеличением тока эквивалентного источника и уменьшением его внутреннего сопротивления.

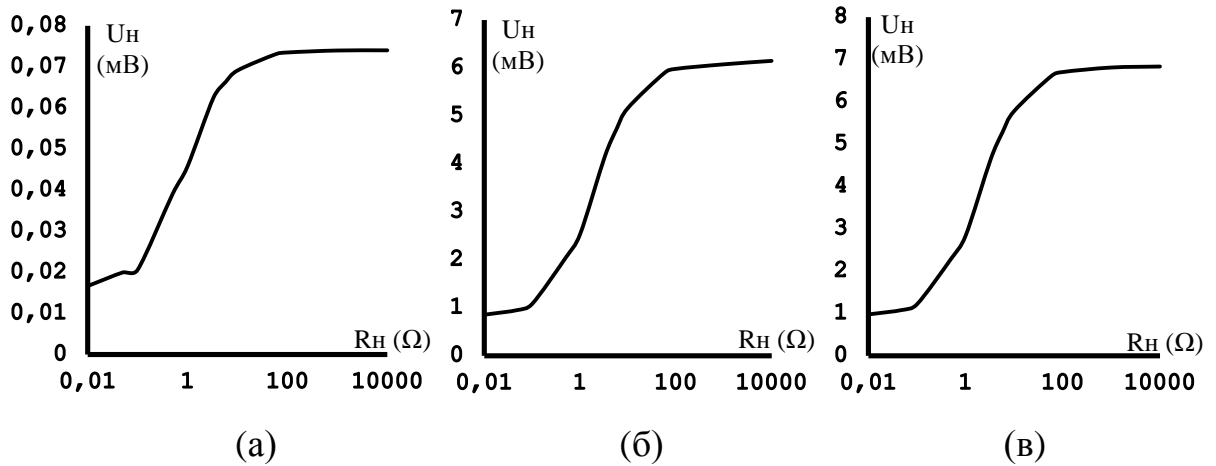


Рисунок 2.23 – Теоретические характеристики 11 термоэлектрических источников одного типов, (а) медь-нихром, (б) хромель-алюмель и (в) медь-константан

При легировании железа в структуре сплава появляются карбиды (рисунок 2.24), 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. Величина карбидной фазы может варьироваться от 5 до 30 процентов площади поверхности образца, в зависимости от степени легирования.

Карбиды в легированной стали

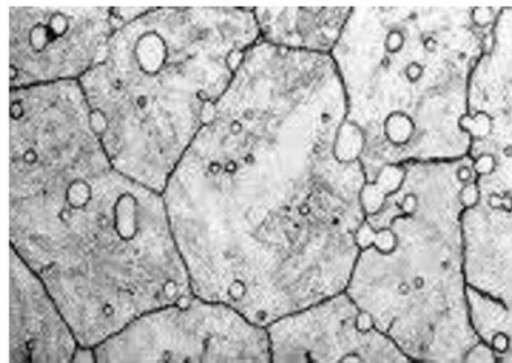


Рисунок 2.24 – Карбиды в легированной стали

Анализ возможных комбинаций двух типов источников термоЭДС при термоэлектрическом контроле проведем с помощью модели. На рисунке 2.25 представлены результаты моделирования эквивалентного источника при параллельном соединении источников образованных термопарами хромель-алюмель и нихром-костантан 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).

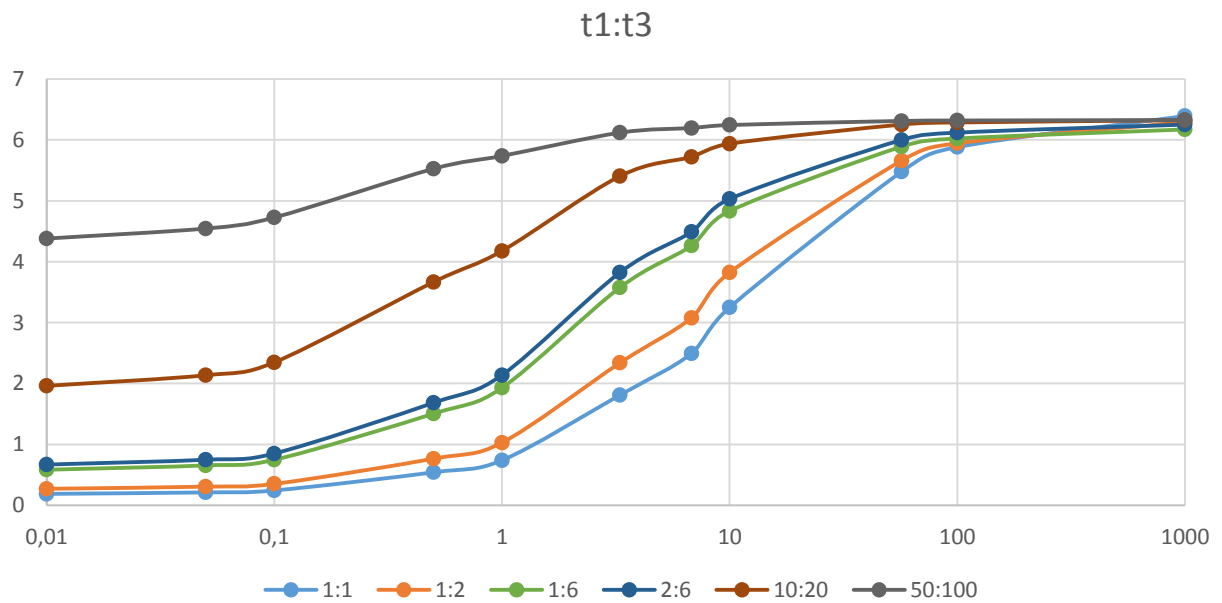


Рисунок 2.25 – Зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки для эквивалентного источника, полученного параллельным соединением двух типов термопар хромель-алюмель и нихром-костантан, (1:1, 1:2, 1:6, 2:6, 10:20, 50:100 для линий 1, 2, 3, 4, 5 и 6 соответственно)

Анализ рисунка 2.25 показывает, что при нагрузке 100 и более Ом отклонение эквивалентной термоЭДС составляет не более 11 % для любого соотношения параллельно подключенных термопар хромель-алюмель и нихром-костантан. Для 10 % отклонения – необходимо получить не менее трех источников термоЭДС.

Величина термоЭДС отдельных источников может варьироваться в широких пределах, что приведет к изменению характеристики эквивалентного источника.

На рисунке 2.26 приведены характеристики эквивалентного источника, полученные в результате моделирования, для двух типов источников термоЭДС, отличающихся на 25 %.

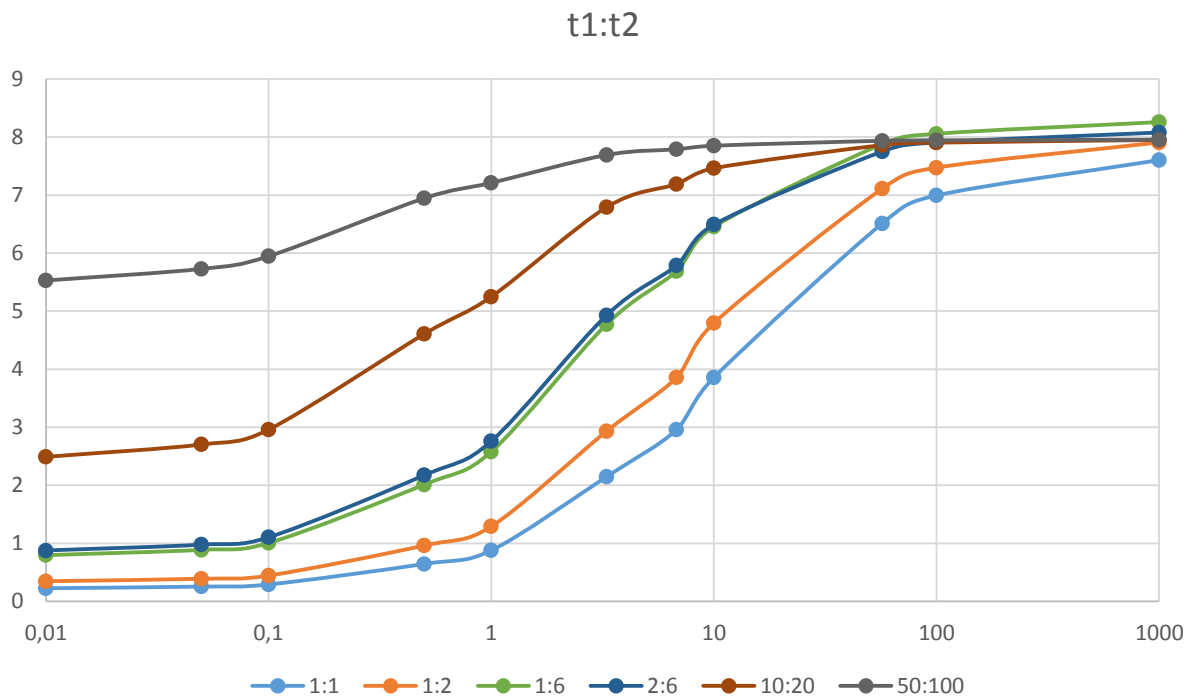


Рисунок 2.26 – Зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки для эквивалентного источника, полученного параллельным соединением двух типов источников термоЭДС, отличающихся на 25 %, (количество соединенных источников ЭДС для линий 1, 2, 3, 4, 5 и 6 - 1:1, 1:2, 1:6, 2:6, 10:20, 50:100 соответственно)

Анализ рисунка 2.26 показывает, что при нагрузке более 100 Ом отклонение эквивалентной термоЭДС составляет не более 12 % для любого соотношения параллельно подключенных двух типов источников термоЭДС. Для 10 % отклонения – необходимо получить не менее трех источников термоЭДС.

На рисунке 2.27 приведены характеристики эквивалентного источника, полученные в результате моделирования, для двух типов источников термоЭДС, отличающихся на 50 и 100 %.

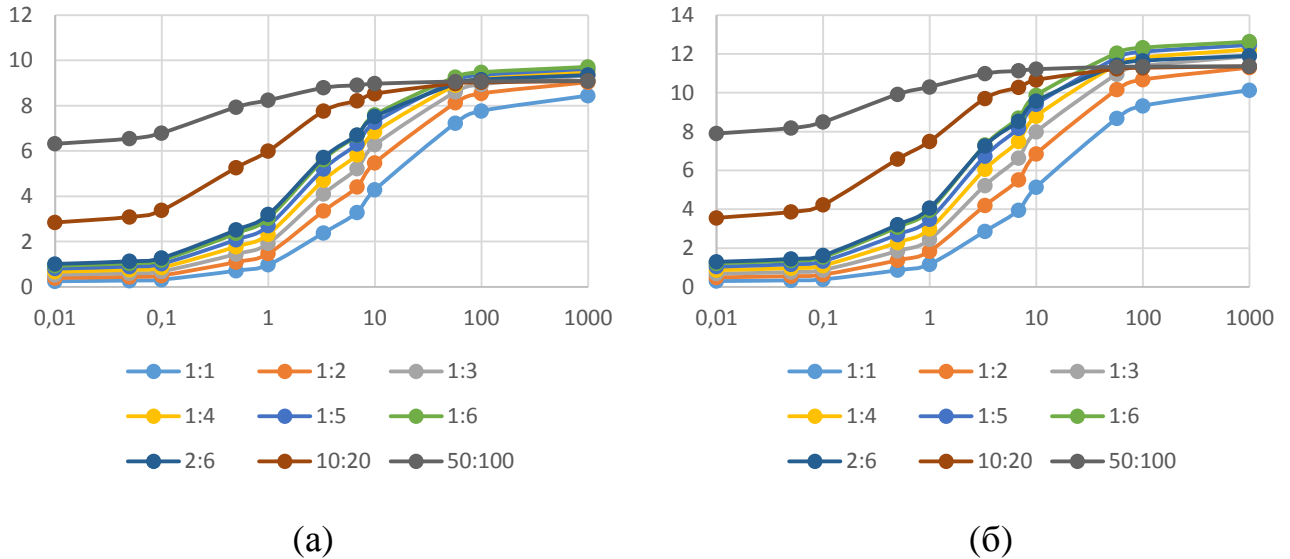


Рисунок 2.27 – Зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки для эквивалентного источника, полученного параллельным соединением двух типов источников термоЭДС, отличающихся на 50% (а) и 100% (б), (количество соединенных источников ЭДС для линий 1, 2, 3, 4, 5 и 6 - 1:1, 1:2, 1:6, 2:6, 10:20, 50:100 соответственно)

Анализ рисунка 2.27 показывает, что при нагрузке более 100 Ом отклонение эквивалентной термоЭДС составляет не более 6 % (рисунок 2.27.а) и не более 20 % (рисунок 2.27.б) для любого соотношения параллельно подключенных двух типов источников термоЭДС. Для 3 параллельно подключенных двух типов источников термоЭДС отклонение эквивалентной термоЭДС составляет не более 7 % при нагрузке более 100 Ом.

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

контроля. Проведенное исследование показало также одинаковый характер напряжения на нагрузке для разных типов источников термоЭДС.

ВЫВОДЫ

Исследования, проведенные во второй главе, позволяют сделать следующие выводы:

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 математическая модель для расчета эквивалентного источника при параллельном соединении разного количества разнотипных источников термоЭДС.

4. Проведены теоретические и экспериментальные исследования электрических характеристик эквивалентного источника термоЭДС при параллельном соединении разного количества разнотипных источников термоЭДС.

ГЛАВА 3 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования термоэлектрических свойств металлов и сплавов, используемых в геодезических скважинах в Томском политехническом университете, был создан аппаратно-программный комплекс. В состав комплекса входят: термокамера, позволяющая поддерживать температуру в диапазоне от 25 до 400 °С, с точность ± 1 °С; прецизионный вольтметр, измеряющий постоянное напряжение в диапазоне 10^{-6} В; магазин сопротивлений, для исследования зависимостей постоянного напряжения ТермоЭДС при различных сопротивлений нагрузки; персональный компьютер с разработанным программным обеспечением позволяющим управлять термокамерой и в режиме реального времени отслеживать ее состояние, а также отображать напряжение термоЭДС. Основное содержание третьей главы опубликовано в работах автора [107-114].

Для исследования термоэлектрических характеристик металлов применяемых в геодезии были подготовлены образцы в виде брусков размером 20x20x10 из легированной марки стали 40Х и стали 35ХГСА. Высокая концентрация хрома повышает коррозионную стойкость.

Разработанная установка позволяет исследовать зависимость напряжения термоэлектродвижущей силы от сопротивления нагрузки при различных температурах 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

3.1 Экспериментальная установка для исследования

Для выбора оптимального химического состава электродов приборов термоэлектрического контроля, которые широко используются в неразрушающем экспресс-контроле [115-120], необходимо исследовать их характеристики:

зависимость напряжения термоэлектродвижущей силы от температуры нагрева электродов и сопротивления нагрузки. Как правило, для этого используют термокамеру, прецизионный вольтметр и магазин сопротивлений. Однако, проведение экспериментальных исследований с использованием объектов с большой постоянной времени установления исследуемых параметров требует значительных затрат времени, как например, процесс установления температуры в термокамере. Поэтому целесообразно автоматизировать этот процесс и возложить «рутинную работу» на компьютер. Кроме того компьютер способен практически в один и тот же момент времени производить «съем» информации с нескольких датчиков с сохранением этой информации в базе данных для последующего анализа. Для решения этой задачи была разработана экспериментальная установка [121], которая измеряет термоЭДС электродов при различных температурах и при различных значениях сопротивления нагрузки. Изменение сопротивления нагрузки необходимо для определения внутреннего сопротивления источника термоЭДС и степени влияния контактного сопротивления электродов с контролируемым объектом на результат измерения [122-126]. 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 рисунке 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 рисунке 3.1. 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 °С. 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 °С. 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.

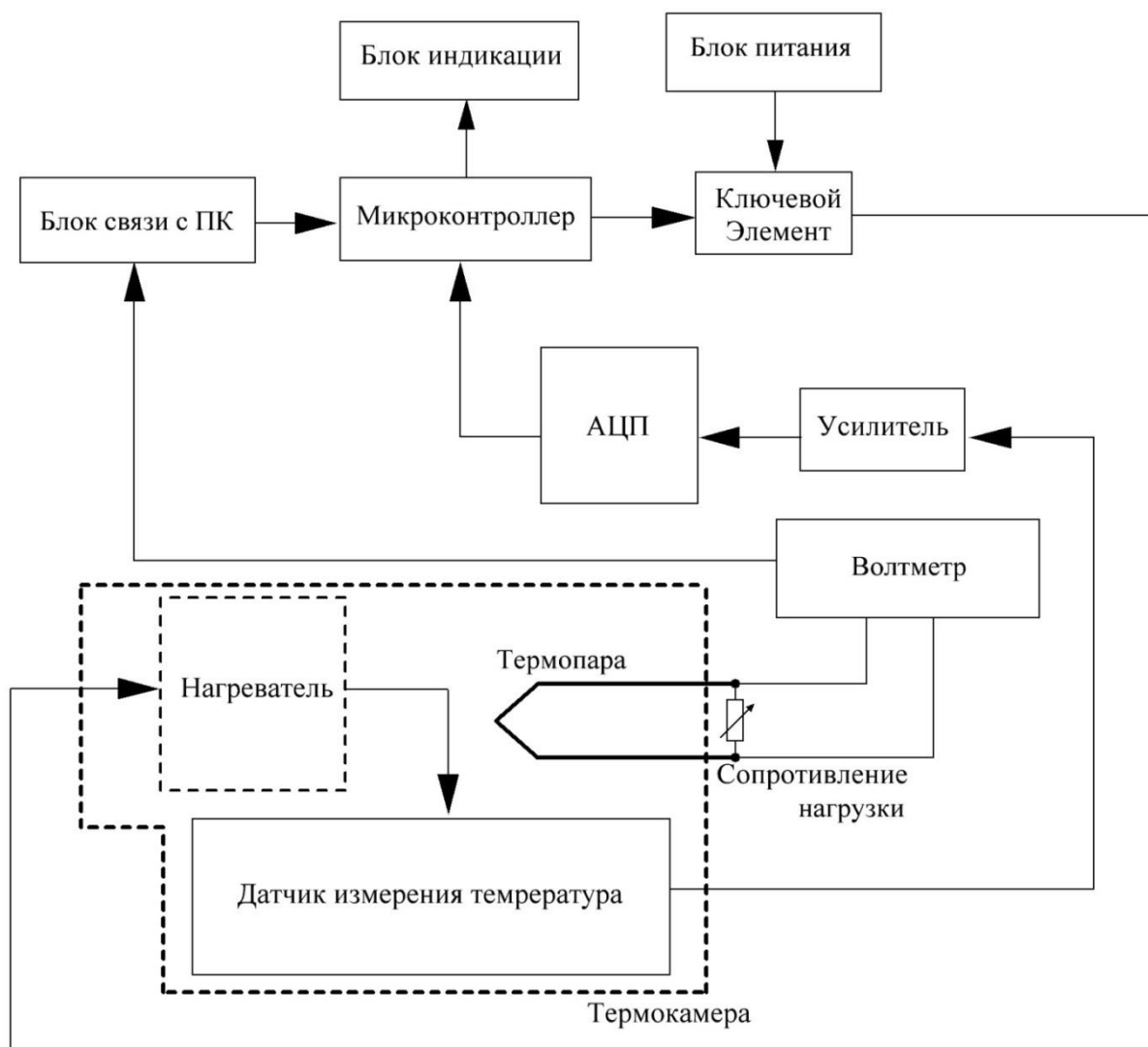


Рисунок 3.1 – Структурная схема экспериментальной установки

Измерение напряжения на нагрузке проводилось с помощью мультиметра Rigol DM3068 [127]. Выбранный мультиметр позволяет с высокой точностью измерять термоЭДС металлов в режиме реального времени. Основное преимущество этого мультиметра состоит в том, что им можно управлять с помощью программного обеспечения PC UltraSensor, которое устанавливается на персональный компьютер и выводит переднюю панель мультиметра с цифровым дисплеем на рабочий стол ПК. Программное обеспечение PC UltraSensor было интегрировано в готовую систему управления тепловой камерой. Полученные данные сохраняются на жестком диске в виде файла.

3.1.1 Блок управления термокамерой

Блок управления тепловой камерой состоит из микроконтроллера, ключевого элемента, датчика температуры, усилителя и аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Считывание данных с датчика температуры, расположенного в термокамере, происходит с частотой 100 Гц и по результатам анализа этих данных микроконтроллер вырабатывает управляющее воздействие для ключевого элемента. Микроконтроллер соединен с персональным компьютером, на котором записывается сценарий эксперимента.

После подачи сигнала нагрева с персонального компьютера на систему управления термокамерой, микроконтроллер формирует сигнал управления ключевого элемента с максимальной длительностью. Начало формирования этого сигнала привязано к нулю сетевого напряжения и изменение его длительности происходит с частотой 100 Гц, в момент перехода сетевого напряжения через ноль. Для управления нагревателем используется принцип ПИД-регулирования [13]. Закон ПИД-управления выглядит как сумма входящих в состав ПИД-регулятора управляющих компонент:

$$U_{\text{ПИД}} = U_p(t) + U_i(t) + U_d(t), \quad (3.1)$$

где $U_p(t)$ – пропорциональная составляющая закона управления, $U_i(t)$ – интегральная составляющая закона управления, $U_d(t)$ – дифференциальная составляющая закона управления..

Для определения всех составляющих ПИД-регулятора используются данные с термодатчика. В процессе установления заданной температуры наблюдается небольшое перерегулирование с затухающими колебаниями, максимальная величина перерегулирования не превышает 7 %. Однако считывание данных с прецизионного вольтметра производится только при достижении величины перерегулирования 0,5 % и менее. Алгоритм считывания данных с вольтметра предусматривает фиксацию данных при достижении заданной температуры во

время ее увеличения, т.е. при положительном значении производной температуры от времени, и при ее уменьшении, т.е. при отрицательном значении производной температуры от времени. Такая процедура осуществляется многократно, после чего определяется среднее значение, которое записывается в базу данных. Измерение термоЭДС производится для разных значений сопротивления нагрузки, при этом микроконтроллер последовательно переключает герконовые реле, подключая разные сопротивления нагрузки. Пример полученных данных, для температуры в термокамере 200 °С, показан на рисунке 3.2 устанавливая различные значения температуры в термокамере, получаем семейство характеристик для источника термоЭДС.

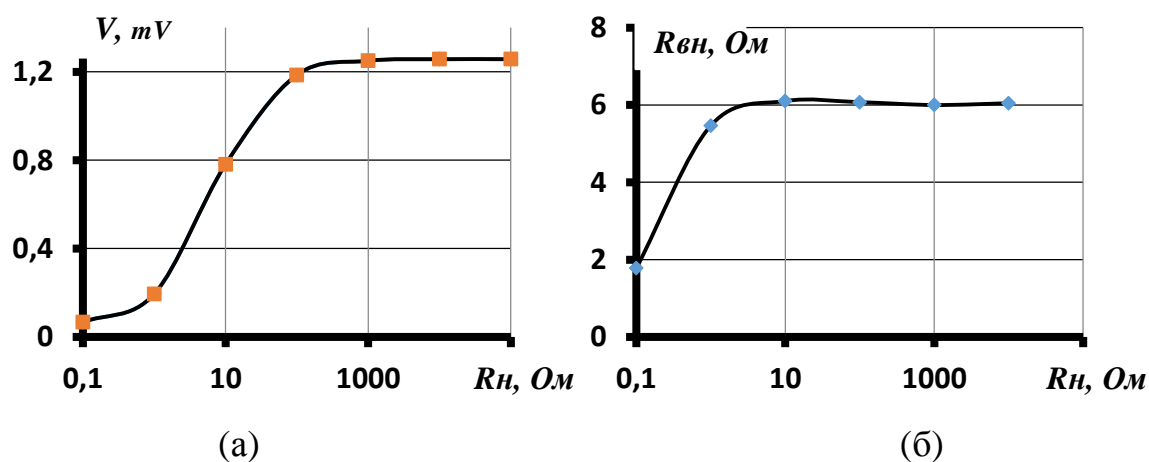


Рисунок 3.2 – Зависимость напряжения на нагрузке (а) и внутреннего сопротивления источника термоЭДС (б) от сопротивления нагрузки

Используя полученные данные, рассчитывается внутреннее сопротивление источника термоЭДС:

$$R_{вн} = R_n \cdot \left(\frac{U_{xx} - U_{R_n}}{U_{R_n}} \right), \quad (3.2)$$

где R_n – сопротивление нагрузки, U_{R_n} – напряжение на нагрузке, измеренное вольтметром, U_{xx} – напряжение холостого хода.

Пример зависимости внутреннего сопротивления источника термоЭДС от сопротивления нагрузки приведен на рисунке 3.2.б. Кроме внутреннего сопротивления производится расчет зависимости внутреннего сопротивления от тока:

$$R_{вн} = \frac{U_{xx} - U_{R_n}}{I}, \quad (3.3)$$

и мощности, выделяемой на нагрузке:

$$P = I^2 \cdot R_n = \left(\frac{U_{R_n}}{R_n} \right) \cdot R_n, \quad (3.4)$$

где I – ток в цепи.

Пример зависимости внутреннего сопротивления от тока приведен на рисунке 3.3, а зависимость мощности, выделяемой на нагрузке, от сопротивления нагрузки на рисунке 3.4.

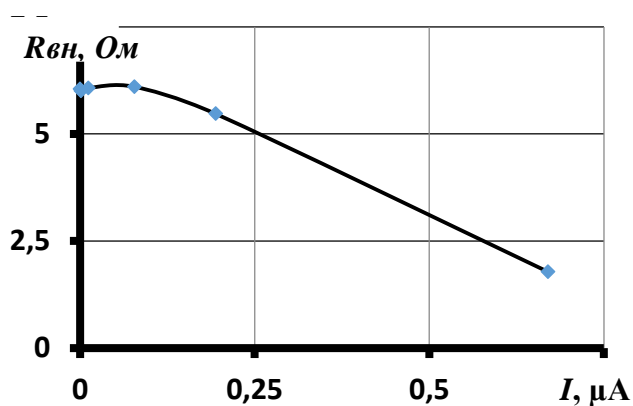


Рисунок 3.3 – Зависимости внутреннего сопротивления от тока

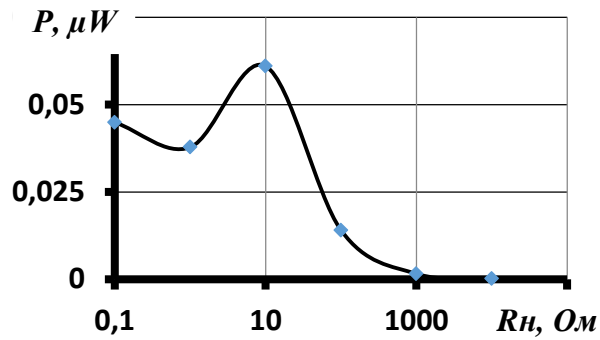


Рисунок 3.4 – Зависимость мощности, выделяемой на нагрузке, от сопротивления нагрузки

Полученные зависимости сохраняются в виде файла на компьютере в формате *.txt и могут быть интегрированы в любую программу, способную работать с текстовым форматом данных, например, Microsoft Excel.

Многопозиционный переключатель сопротивлений

Многопозиционный переключатель (S1-S8) позволяет изменять сопротивление нагрузки в диапазоне от 0,1 Ом до 1 Мом (рисунок 3.5). Переключатель реализован на герконовых реле типа EDR101A0500, которые управляются сигналами микроконтроллера.

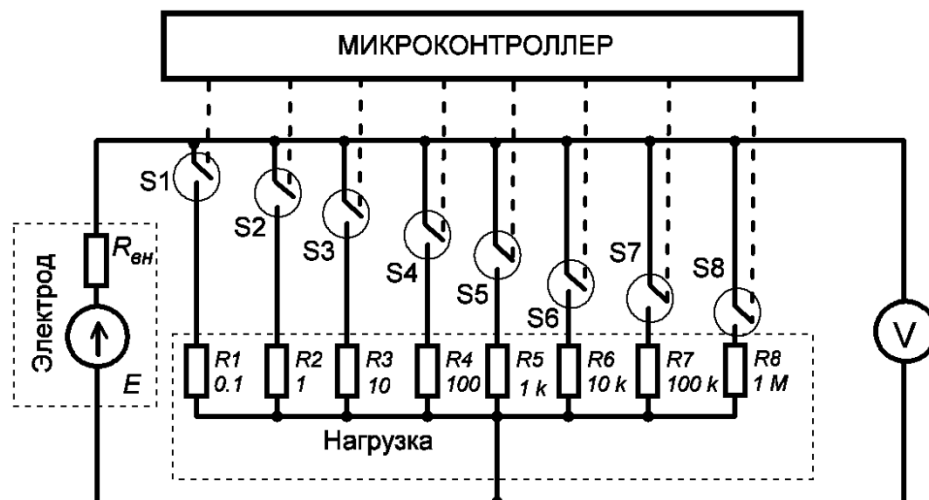


Рисунок 3.5 – Функциональная схема блока измерения термоЭДС

Реле герконовое EDR101A0500:

Напряжение срабатывания, не более, В	3.75
Номинальное рабочее напряжение, В	5
Максимальное рабочее напряжение, В	16
Максимальное коммутируемое постоянное напряжение, В	100
Максимальный коммутируемый постоянный ток, А	1
Время срабатывания, мс	1
Время отпускания, мс	0.5

Интерфейс программного обеспечения системы управления термокамерой.

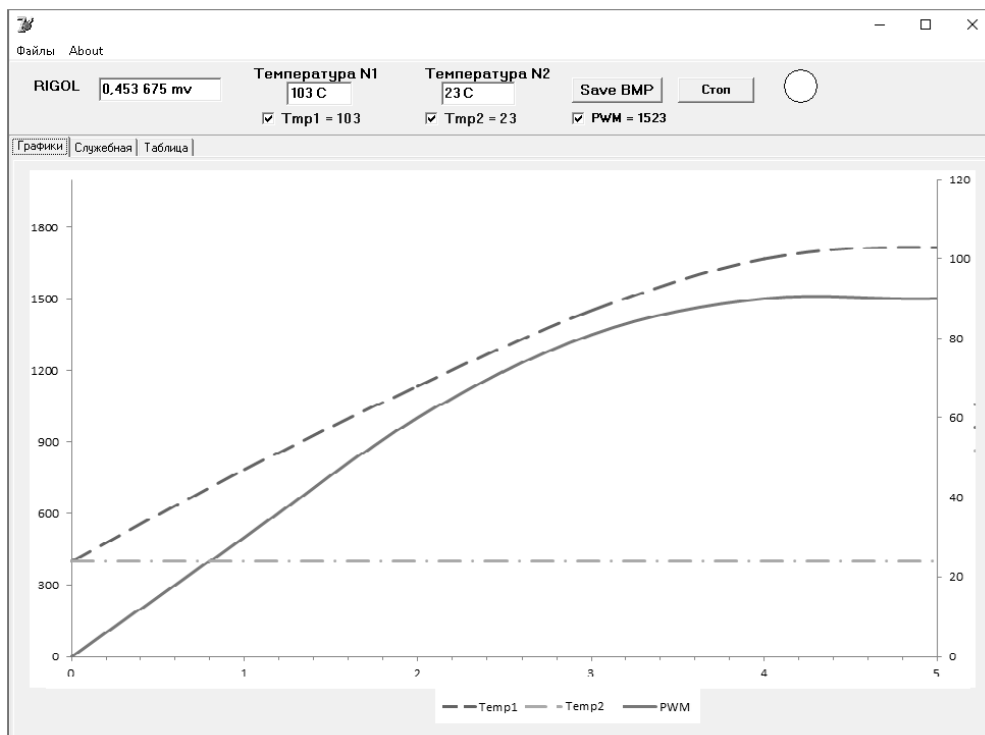
Интерфейс управления термокамерой состоит из нескольких функциональных закладок. На рисунке 3.6.а представлена первая закладка, которая используется для визуального контроля процесса изменения температуры в термокамере, температуры окружающей среды и величины управляющего воздействия, поступающего на 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" отображается текущее значения напряжения, измеренное вольтметром на нагрузке. В окне "Температура №1" отображается текущее значение температуры в термокамере. В окне "Температура №2" отображается текущее значение температуры окружающей среды. Программное обеспечение позволяет отключить отображение любого графика. Для этого достаточно убрать значок «v» у соответствующих данных: "Температура №1", "Температура №2" или "PWM". Однако данные в файл все равно будут записываться.

На рисунке 3.6.б представлена закладка "Служебная", которая предназначена для связи с управляющим микроконтроллером системы управления термокамерой. В поле "Передача" выводится код команды, отправляемой по последовательному интерфейсу USB в управляющий микроконтроллер системы управления термокамерой. В поле "Прием" выводятся

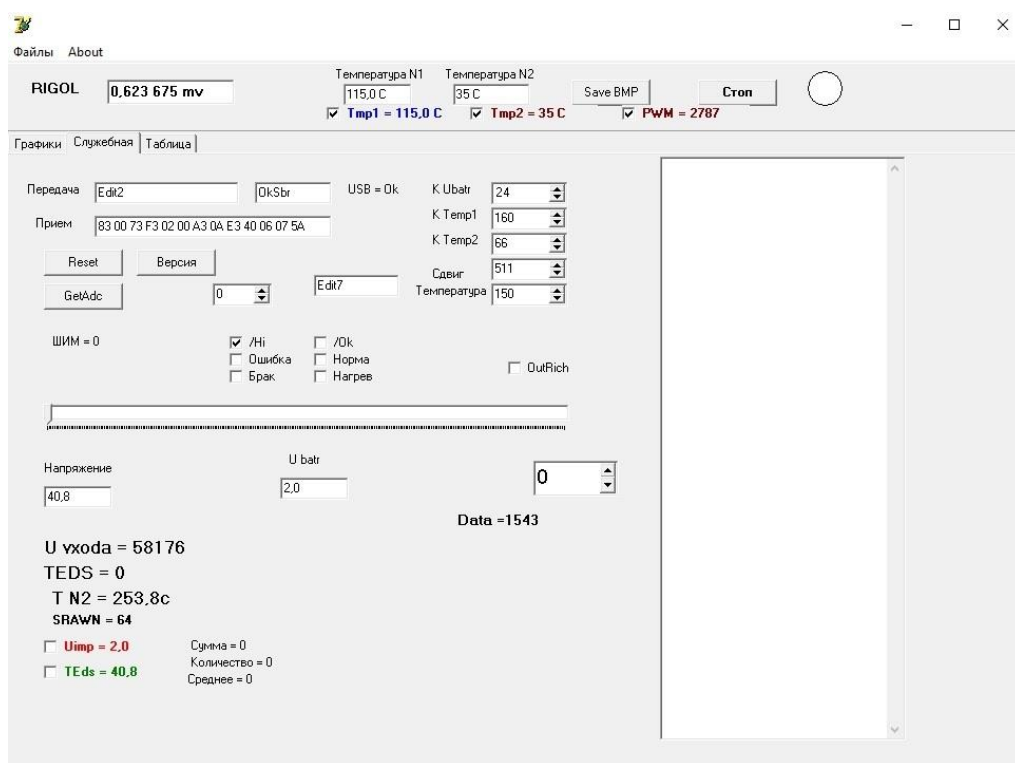
ответы, поступающие от микроконтроллера. В поле “OkSbr”, расположенного правее поля “Edit2”, выводятся дешифрованные текстовые сообщения, принятые по интерфейсу связи USB от управляющего микроконтроллера.

Команды интерфейса связи можно разделить условно на 3 типа: информационные, текстовые и управляющие. Информационные команды служат для передачи данных, которые записываются в энергонезависимую память, например, для записи констант или коэффициентов, используемых для расчетов. Совокупность команд составляет интерфейс связи.

Текстовые команды используются для передачи информации с последующей минимальной обработкой, например, номер версии ПО, записанного в управляющий микроконтроллер и т.д. Управляющие команды служат для передачи управляющих кодов непосредственно в исполнительные устройства, например, длительность управляющего воздействия загружается в регистры таймера, отвечающего за формирование сигнала широтно-импульсной модуляции.



(a)



(б)

Рисунок 3.6 – Интерфейс оператора: (а) закладка визуального контроля процесса изменения температуры в термокамере; (б) закладка служебных команд

Коэффициент “К Ubatr” используется для калибровки схемы, измеряющей напряжение питания термокамеры. Коэффициент “К Temp1” используется для калибровки схемы, измеряющей температуру в термокамере, который идентифицируется синим цветом на рисунке 3.6.а. Коэффициент “К Temp2”, используется для калибровки схемы, измеряющей температуру окружающей среды, который идентифицируется коричневым цветом. Окно “Температура” используется для задания температуры термостабилизации в термокамере. Закладка “Служебная” используется для отработки отдельных команд интерфейса связи.

3.2 Термоэлектрический дефектоскоп «Thermo Fitness Testing»

Для контроля марки поставляемых заготовок был разработан и изготовлен термоэлектрический дефектоскоп «Thermo Fitness Testing», в котором применен

дифференциальный метод с оригинальным датчиком, способным обеспечить одинаковый температурный режим в точках контакта, как для эталона, так и для образца.

Функциональная схема дифференциального датчика для контроля термоЭДС приведена на рисунке 3.7. Горячий электрод 2, нагретый до температуры T_2 нагревателем 3, контактирует одновременно с эталоном Э и испытуемым образцом X. Если химический состав и структурное состояние эталона и испытуемого изделия одинаково, то термоЭДС контактов эталон\горячий электрод и испытуемое изделие\горячий электрод будут равны по абсолютной величине противоположны по знаку. Тогда эквивалентная термоЭДС будет равна нулю [128].

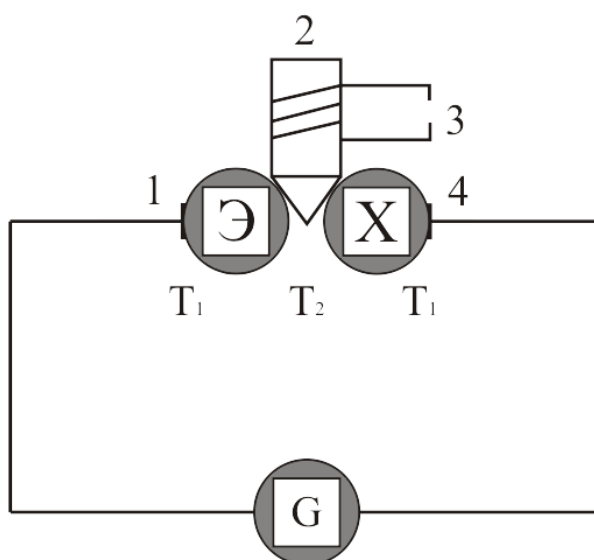


Рисунок 3.7 – Принцип измерения дифференциальной термоЭДС одним горячим электродом

Если химический состав либо структурное состояние поверхности эталона и контролируемого изделия отличаются, то величина термоЭДС контактов эталон\горячий электрод и испытуемое изделие\горячий электрод не будет одинакова по величине. Следовательно, суммарная термоЭДС не будет равна нулю, и в цепи появится ток. Следует заметить, что термоЭДС не зависит от

размеров эталона и контролируемого изделия [129]. Фотография прибора «Thermo Fitness Testing» приведена на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 – Термоэлектрический дефектоскоп «Thermo Fitness Testing»

На передней панели прибора расположены кнопки управления, индикаторы режима работы прибора и дисплей для отображения термоЭДС. Кнопка «Mode» позволяет выбрать один из режимов работы прибора: «Measure», «Calibration», «Temperature» или «Threshold». Установленный режим сигнализируют индикаторы, находящиеся над кнопкой «Mode». В режиме «Measure» кнопками «+» или «-» можно установить требуемую чувствительность прибора. В режиме «1» коэффициент усиления равен 1, в режиме «2» - 2, в режиме «3» - 4. Для запоминания выбранного коэффициента усиления необходимо одновременно нажать кнопки «Enter» и «Mode». В режиме «Temperature» происходит отображение текущей температуры датчика. В режиме «Calibration» производится калибровка прибора. Методика калибровки представлена в разделе 6. В режиме «Threshold» осуществляется изменение величины порогового значения, при котором контрольный образец считается бракованным, что сигнализирует индикатор «No accepted». Индикация работы терморегулирующего устройства датчика осуществляется индикатором «Ready for operation».

При контроле изделий создается хороший электрический и тепловой контакт горячего электрода с контролируемым изделием, при этом уменьшается температура горячего электрода за счет теплопередачи. Изменение температуры приводит к уменьшению термоЭДС [96]:

$$\Delta E = \frac{\pi^2 \cdot k_B^2 \cdot \Delta T}{3 \cdot e} \cdot \left[\frac{1}{N_d} \cdot \frac{\partial N_d}{\partial \varepsilon} - \frac{1}{F} \cdot \frac{\partial F}{\partial E} \right]_{\varepsilon = \varepsilon_F}, \quad (3.5)$$

где k_B – постоянная Больцмана, T – температура, в градусах Кельвина, e – заряд электрона, ε – энергия электрона, N_d – плотность электронных состояний в d -зоне, F – площадь поверхности Ферми, E – энергия Ферми.

За счет применения дифференциального метода контроля повышается достоверность результатов контроля, при этом результирующая термоЭДС есть разность двух термоЭДС:

$$\Delta E_1 - \Delta E_2 = \frac{\pi^2 \cdot k_B^2 \cdot \Delta T}{3 \cdot e} \cdot \left[\frac{1}{N_d^1} \cdot \frac{\partial N_d^1}{\partial \varepsilon^1} - \frac{1}{F^1} \cdot \frac{\partial F^1}{\partial E} \right]_{\varepsilon^1 = \varepsilon_F^1} - \frac{\pi^2 \cdot k_B^2 \cdot \Delta T}{3 \cdot e} \cdot \left[\frac{1}{N_d^2} \cdot \frac{\partial N_d^2}{\partial \varepsilon^2} - \frac{1}{F^2} \cdot \frac{\partial F^2}{\partial E} \right]_{\varepsilon^2 = \varepsilon_F^2}, \quad (3.6)$$

где: ΔE_1 - изменение термоЭДС пары первый горячий электрод\испытуемое изделие, ΔE_2 - изменение термоЭДС пары второй горячий электрод\эталонное изделие.

Уравновешивание температуры двух горячих электродов осуществляется общей системой терморегулирования датчика, содержащего два горячих электрода [130].

Многие авторы, в том числе зарубежные, указывают на влияние переходного сопротивления контактов на результат контроля и в качестве метода устранения его влияния используют фиксированное усилие прижима электродов к контролируемому образцу. Однако для портативных приборов этот метод не подходит в силу больших габаритов системы прижима. Для повышения точности контроля термоЭДС в приборе осуществлена система контроля электрического контакта горячих электродов с контролируемым изделием. Контроль величины суммарного переходного сопротивления контактов R_k осуществляется оригинальным способом, реализация которого выполнена с помощью структурной схемы, приведенной на рисунке 3.9. Контроль величины контактного сопротивления проводится косвенным методом с помощью переменного тока, которое можно детектировать из общего напряжения на контактном сопротивлении. Для формирования тока постоянной амплитуды I_m используется генератор синусоидального тока, выходной ток которого не зависит от сопротивления нагрузки. Протекающий ток создает падение напряжения на суммарном сопротивлении контактов R_k :

$$U_k = I_m \cdot R_k, \quad (3.7)$$

где R_k – суммарное сопротивление контактов, I_m – ток, протекающий через контактное сопротивление.

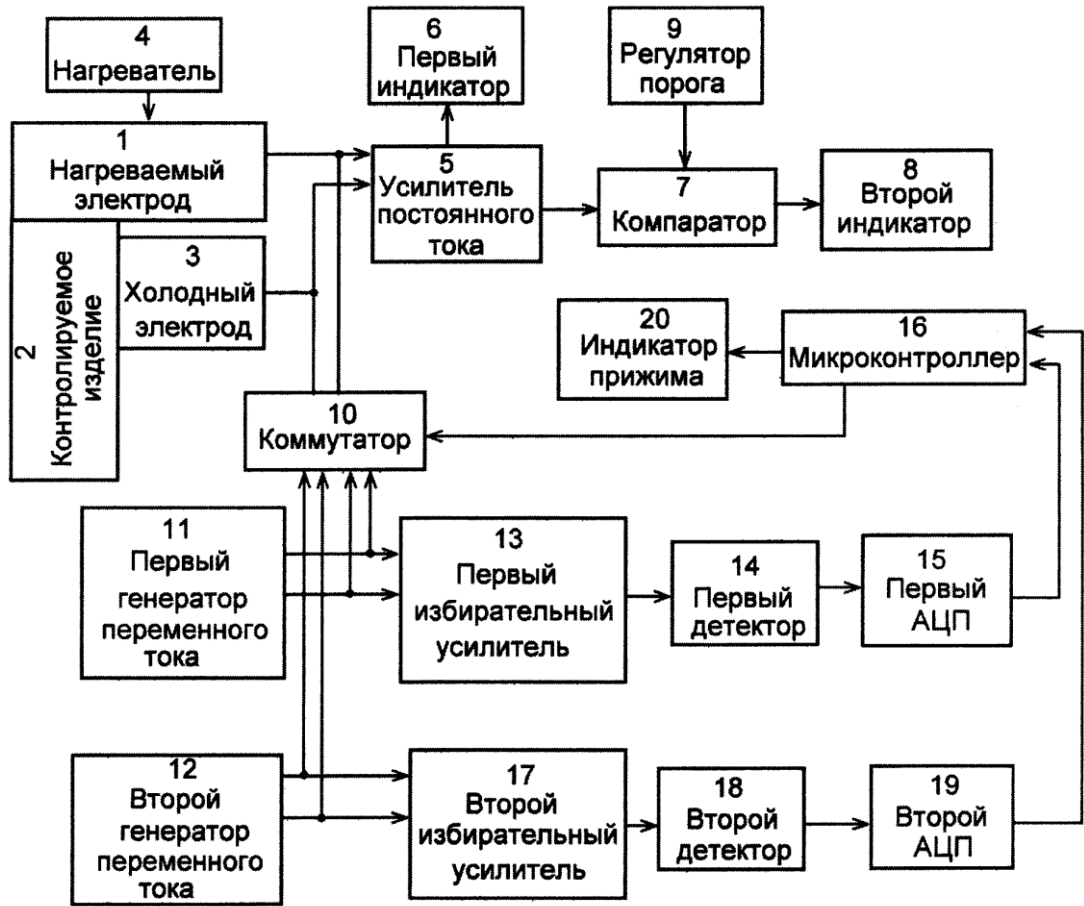


Рисунок 3.9 – Структурная схема блока контроля переходного сопротивления контактов

Для увеличения надежности измерения величины контактного сопротивления в приборе «Thermo Fitness Testing», реализовано два генератора тока на разных частотах, повышающих надежность измерения сопротивления контактов при исследовании, первый горячий электрод – контрольный образец – эталон – второй горячий электрод. Генераторы подключены к коммутатору, для разделения воздействующих импульсов. Каждый генератор подключен к своему компаратору, определяющего наличие контакта, по порогу срабатывания. Так же генераторы подключены к своим усилителям переменного тока и аналого-цифровым преобразователям, для детектирования сигналов.

Для выделения напряжения U_k применен полосовой фильтр, с выхода которого напряжение поступает на усилитель, затем на выпрямитель и на

аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Двоичный код с АЦП используется микроконтроллером для вычисления суммарного сопротивления контактов:

$$R_k = \frac{U_k}{I_m}. \quad (3.8).$$

Компьютерная программа, для управления прибором «Thermo Fitness Testing», предназначена для ввода данных в персональный компьютер и отображения их на экране монитора в графическом виде. На рисунке 3.10 приведен пример контроля напряжения дифференциальной термоЭДС марок сталей 40Х и 35 ХГСА. Интерфейс оператора содержит две вкладки: «Графики» и «Служебная». Верхнее окно вкладки «Графики» предназначено для отображения контактного сопротивления (красная линия) и термоЭДС (зеленая линия) (рис.3.10).

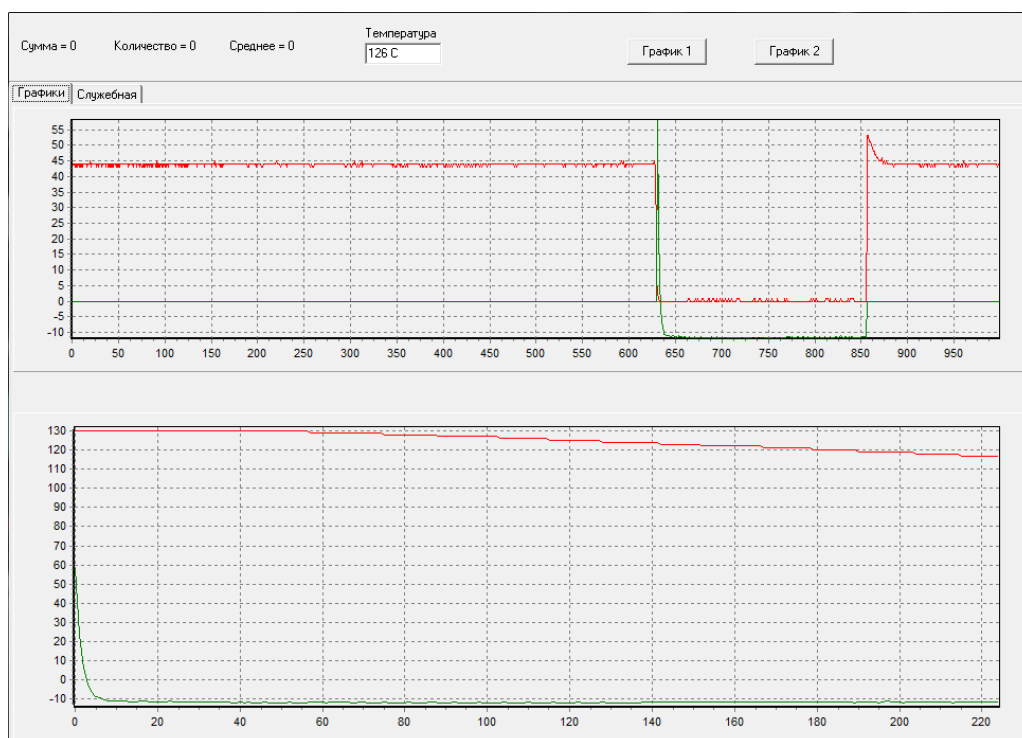


Рисунок 3.10 – Интерфейс оператора

В верхнем окне видно, что процесс измерения начался в момент времени 6,3 с. В этот момент сопротивление цепи, состоящей из первого горячего электрода, эталона, тестируемого изделия и второго горячего электрода уменьшилось до нуля, что сигнализирует о наличии хорошего контакта, и величина термоЭДС равна - 11 мкВ. После завершения процесса измерения (момент времени 8,6 с.) контакт исчез, сопротивление цепи, состоящей из первого горячего электрода, эталона, тестируемого изделия и второго горячего электрода, увеличилось, а термоЭДС стала равна нулю. Весь процесс измерения занял 2,3 с.

В нижнем окне показаны температура горячего электрода (красная линия) и термоЭДС (зеленая линия) только в процессе измерения, т.е. от 6,3 до 8,6 с.

3.3 Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на металлах применяемых при геодезии скважин, основными являются две марки стали: сталь 40Х и сталь 35ХГСА. Используемые в геодезии для улучшения коррозионной стойкости деталей сложной конфигурации, например: фланцы, кулачки, пальцы, валики, рычаги, оси, детали сварных конструкций и другие детали повышенной прочности работающие в условиях знакопеременных нагрузок.

Среди большого разнообразия материалов, применяемых в геодезии, наиболее широко распространена сталь, которая может выпускаться в самых широких вариациях исполнения легирования, при этом изменяются ее эксплуатационные качества. Например, для повышения коррозионной стойкости использую высокую концентрацию хрома. Широкое распространение получили стали 40Х и 35ХГСА. Они представлены легированной структурой, характеристики которых могут быть улучшены при проведении термической обработки и которая может выдерживать существенное воздействие влаги и некоторых химических веществ. Химический состав сталей 35ХГСА и 40Х приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Химический состав в % сталей 35ХГСА и 40Х

Химические элементы	Состав стали 35ХГСА в %	Состав стали 40Х в %
C	0,32 - 0,39	0,36 - 0,44
Si	1,1 - 1,4	0,17 - 0,37
Mn	0,8 - 1,1	0,5 - 0,8
Ni	до 0,3	до 0,3
S	до 0,025	до 0,035
P	до 0,025	до 0,035
Cr	1,1 - 1,4	0,8 - 1,1
Cu	до 0,3	до 0,3
Fe	~95	~97

Свойства стали 35ХГСА:

- Термообработка: Закалка и отпуск
- Твердость материала: НВ 10 -1 = 241 Мпа

Свойства стали 40Х:

- Термообработка: Закалка и отпуск
- Твердость материала: НВ 10 -1 = 217 Мпа

Физические и механические свойства стали

Среди механических свойств стали 40Х следует отметить высокую твердость и прочность, при этом сталь выдерживает большую нагрузку до разрушения. Сталь 40Х имеет следующие положительные качества:

- Достаточно высокая коррозионная стойкость, за счет добавок хрома.
- Высокая прочность.
- Низкий удельный вес (плотность равна 7820 кг/м³).

Модуль упругости и предел текучести варьируются в широком диапазоне за счет изменения температуры.

Термическая обработка

При термической обработке сталей, как правило, существенно повышаются эксплуатационные свойства изделий. Термическая обработка должна проводиться с учетом внутренней структуры. При этом закалка сталей 40Х и 35ХГСА должна

проводиться в масляной среде или с использованием полимерной жидкости, что исключит появление паровоздушной смеси, ухудшающей процесс охлаждения. Такая методика повышает качество поверхностного слоя изделия. После закалки для снятия внутренних напряжений проводится отпуск при температуре 500 °С при применении масляной ванны и 200 °С, при отпуске на воздухе.

Правильно проведенная термическая обработка обеспечивает твердость для стали 40Х – 217 НВ, а для стали 35ХГСА – 241 НВ.

В заключение отметим, что рассматриваемые стали довольно сложны в изготовлении, что приводит к существенному повышению себестоимости. Вот почему легированные сплавы применяются только при изготовлении изделий, работающих в тяжелых условиях.

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. При увеличении количества образцов значение термоЭДС не изменяется, т.е. идет усреднение значений результатов исследования. 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.

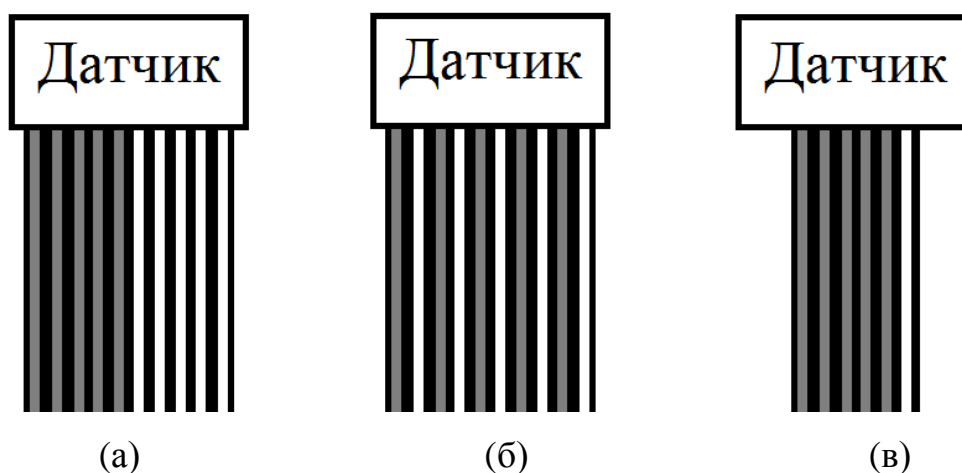


Рисунок 3.12 – Условное расположение образцов при исследовании эквивалентной ТЭДС, серым цветом показан материал А, черным цветом – зазор, белым цветом – материал Б

На основе эффекта Зеебека ТЭДС возникает только в разных проводниках при наличии градиента температур. На рисунке 3.12.а представлено измерение эквивалентной термоЭДС 10 образцов, в случае когда 5 образцов группы А идут друг за другом и 5 образцов из 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 22 мкВ. На рисунке 3.12.б показан пример поочередного расположения материалов А и Б. Получаем 5 источников термоЭДС А-Д и 5 источников термоЭДС Б-Д соединенных параллельно. Эквивалентная термоЭДС такая же, как и в случае на рисунке 3.12.а, и равна 22 мкВ. На рисунке 3.12.в измерению подвергли 5 образцов группы А и 1 образец из группы Б. Для этого случая эквивалентная термоЭДС равна 27 мкВ. Между материалами А-А или А-Б термопары не образуются, т.к. не выполняется второе условие эффекта Зеебека, температура в контактных точках одинаковая для всех материалов, т.е. нет разности температур

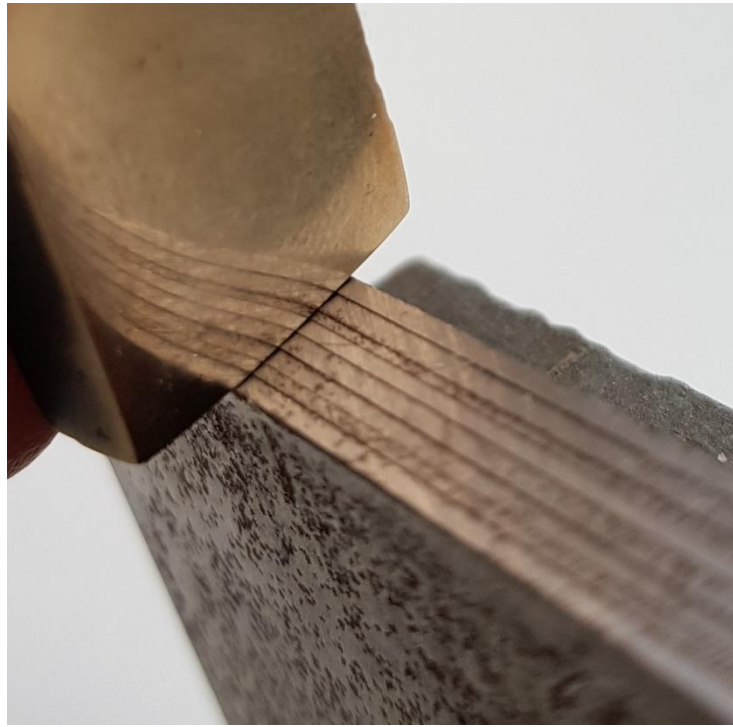


Рисунок 3.13 – Исследование стали 35ХГСА относительно бронзы

Исследования сталей проводилось дифференциальным методом относительно оловянной бронзы, как показано на рисунке 3.13. Бронза марки БрОФ6,5-0,15 состав: < 6 % олова; 0,15 % фосфора; 0,2 % никеля; остальное медь.

Результаты экспериментов подтвердили правильность проведенных теоретических исследований.

3.4 Основные технические характеристики прибора «Thermo Fitness Testing»

«Thermo Fitness Testing», прибор применяемый при контроле марок сталей применяемых в геодезии скважин. Прибор разработан в «Национальном исследовательском «Томском политехническом университете» в отделении электронной инженерии. Имеет следующие технические характеристики:

1. Напряжение питания - 220 В, 50 Гц.
2. Температура датчика – 130 °С.
3. Точность поддержания температуры не хуже ± 2 %.

4. Пределы уставки порога при разбраковке от 1 до 40 мкВ.
5. Пределы измерения термоЭДС:

на диапазоне	«1»	0 – 199 мкВ,
на диапазоне	«2»	0 – 398 мкВ,
на диапазоне	«4»	0 – 796 мкВ.
6. Время готовности прибора с момента включения не более 10 мин.
7. При готовности прибора к работе на экран выводиться « - - - ».
8. Включение сигнала «Норма» осуществляется при условии, если входная термоЭДС меньше установленного порога, в противном случае происходит включение сигнала «Брак».
9. Габаритные размеры 220×220×65 мм.
10. Вес, ~ 2кг.

ВЫВОДЫ

Для проведения экспериментальных исследований разработана автоматизированная установка, позволяющая проводить исследования электрических характеристик различных источников термоЭДС, в том числе и при параллельном соединении нескольких источников в одну цепь. Исследования, проведенные на экспериментальной установке, подтвердили результаты теоретических исследований, выполненных во второй главе. Для повышения достоверности контроля применена схема контроля переходного сопротивления контактов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации сформулированы и обоснованы основные принципы реализации термоэлектрического дефектоскопа на основе дифференциального датчика с многоточечным контактом. Разработана математическая модель для расчета эквивалентного источника, получаемого при параллельном соединении нескольких источников термоЭДС, с использованием метода наложения. Проведены теоретические исследования электрических характеристик эквивалентного источника термоЭДС при различных комбинациях индивидуальных источников термоЭДС. Показано, что для получения

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 термоЭДС 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.

4. Исследованы электрические характеристики различных источников термоЭДС и эквивалентного источника термоЭДС при параллельном соединении различных типов источников термоЭДС.

4. 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

5. Выявлено влияние сопротивления нагрузки на электрические характеристики термоэлектрического источника.

6. 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oleksiy, Liske & Roman, Yakymiv & Andrii, Melnychuk. (2012). Radiowave methods of non-destructive testing.
2. Kroening, Michael & Jentsch, Th & Maisl, M. & Reiter, H. (2019). Non-destructive Testing and Process Control Using X-ray Methods and Radioisotopes.
3. Harding, Geoffrey. (1992). Novel applications of X-rays in non-destructive testing. *NDT and E International*. 28. 5/1 - 5/3. 10.1016/0963-8695(95)91877-T.
4. Singh, Ramesh. (2012). Ultrasonic Testing. 10.1016/B978-0-12-391916-8.00026-1.
5. Mix, Paul. (2005). Ultrasonic Testing. 10.1002/0471719145.ch11.
6. Mao, Weiyang & Du, Yang & Liu, Chengcheng & Li, Boyi & Ta, Dean & Chen, Chao & Zhang, Rong. (2019). Ultrasonic Backscatter Technique for Assessing and Monitoring Neonatal Cancellous Bone Status In Vivo. *IEEE Access*. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2019.2949748.
7. Ferguson, Morgan & McPherson, Joseph & Sellers, Mark & Hoffmeister, Brent. (2013). Dual gate ultrasonic backscatter technique compared to x-ray microtomography parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 134. 4120. 10.1121/1.4831136.
8. Cuffe, John & Barshinger, James & Fan, Ying. (2013). Method for performing ultrasonic testing.
9. Han, L. & Song, W. & Yang, L.. (2014). Technology on ultrasonic testing of barrel. 36. 317-320.
10. Zhu, Ye & Liang, Yi & Wei, Shicheng & Wang, Yujiang & Wang, Bo. (2019). Ultrasonic testing system design for defect visualization of inhomogeneous multi-layered pipes. *SN Applied Sciences*. 1. 10.1007/s42452-019-1603-0.
11. Cheung, Terrence. (2009). *Ultrasonic Testing in Aircraft Structures*.

12. Gorgun, Emre & Karamis, Mehmet. (2019). Ultrasonic testing to measure the stress state of steel parts. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 33. 3231-3236. 10.1007/s12206-019-0618-1.
13. Fukumoto, Hiroshi & Mizutani, Hiroshi & Okamoto, Hisatake & Yoshimura, Sei-ichi. (1978). REMOTELY OPERATED ULTRASONIC TESTING SYSTEM..
14. Vinogradov, Sergey & Light, Glenn & Charles, Duffer. (2016). Non Destructive Magnetostrictive Testing With Unidirectional Guided Waves Generated By Ferromagnetic Strip Sensor.
15. Engelhardt, R. & Hewgley, W.. (1973). Thermal and infrared testing.
16. Mix, Paul. (2005). Thermal/Infrared Testing Method. 10.1002/0471719145.ch10.
17. Jewitt, David & Asmus, Daniel & Yang, Bin & Li, Jing. (2019). High-resolution Thermal Infrared Imaging of 3200 Phaethon. *The Astronomical Journal*. 157. 193. 10.3847/1538-3881/ab13a9.
18. Mathew, Teena & Manickavasagan, Annamalai. (2014). Thermal Infrared Imaging. *Imaging with Electromagnetic Spectrum: Applications in Food and Agriculture*. 147-173. 10.1007/978-3-642-54888-8_8.
19. Vavilov, Vladimir. (2009). Thermal/infrared nondestructive testing, NDT handbook series. *Spektrum*. 5. 1-467.
20. Carreon H. Thermoelectric detection of spherical tin inclusions in copper by magnetic sensing.—*Journal of Applied Physics*. 2000, Vol.88, Issue 11, pp. 6495. doi: 10.1063/1.1322591.
21. Carreon H. Thermoelectric Nondestructive Evaluation of Residual Stress in Shot-Peened Metals —*Research in Nondestructive Evaluation 2002*. Vol.14, Issue 2. pp. 59. doi: 10.1080/09349840209409705.
22. Nagy P.B. Non-destructive methods for materials' state awareness monitoring —*Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2010. Vol.52, Issue 2. pp. 61. doi: 10.1784/insi.2010.52.2.61.

23. Soldatov, A.A., Seleznev, A.I., Fiks, I.I., Soldatov, A.I., Kröning, Kh.M. Nondestructive proximate testing of plastic deformations by differential thermal EMF measurements —Russian Journal of Nondestructive Testing. 2012. Vol.48, Issue 3. pp. 184. doi: 10.1134/S1061830912030060.
24. Li J.F., Liu W.S., Zhao L.D., Zhou M. // Npg Asia Mater. 2010. Vol.2, Issue 4, pp. 152. doi: 10.1038/asiamat.2010.138.
25. M. Kikuchi, “Dental alloy sorting by the thermoelectric method,” European Journal of Dentistry, Vol.4, no.1, pp.66-70, 2010.
26. Sorting mixed metals by the thermoelectric effect 1976 Physics Education Vol.11, Issue 4, pp.290-292, <https://doi.org/10.1088/0031-9120/11/4/004>.
27. Stuart, C.M., the Seebeck effect as used for the nondestructive evaluation of metals, Journal Name: Int. Adv. Nondestr. Test.; (United States); Journal Volume: 9, (1983).
28. Stuart, C., "Thermoelectric Differences Used for Metal Sorting," Journal of Testing and Evaluation, Vol. 15, No. 4, 1987, pp. 224-230, <https://doi.org/10.1520/JTE11013J>. ISSN 0090-3973.
29. Hu J., Nagy P.B. (1999) On the Thermoelectric Effect of Interface Imperfections. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 18B, pp. 1487-1494, Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4791-4_191.
30. A. A. Lukhovich, V. I. Sharando, A. Karasik, “Structural dependence of thermoelectric properties and nondestructive testing,” Mn.: Science and Technology, pp. 192, 1990.
31. I. A. Kuznetsov, “Thermoelectric sensors for quality control of materials and products without destroying” Defectoscopy, Vol.1, pp. 5-12, 1973.
32. J.F. Li, W.S. Liu, L.D. Zhao, M. Zhou High-performance nanostructured thermoelectric materials Npg Asia Materials, Vol.2 (2010), pp. 152–158.
33. T. M. Ritzer, P. G. Lau and A. D. Bogard, "A critical evaluation of today's thermoelectric modules," Thermoelectrics, 1997. Proceedings ICT '97. XVI

International Conference on, Dresden, 1997, pp. 619-623. doi: 10.1109/ICT.1997.667606.

34. Buist, Richard J. "A new method for testing thermoelectric materials and devices." 11th International Conference on Thermoelectrics. 1992.

35. Bünyamin Ciylan, Sezayi Yılmaz, Design of a thermoelectric module test system using a novel test method, In International Journal of Thermal Sciences, Vol. 46, Issue 7, 2007, Pages 717-725, ISSN 1290-0729, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.10.008>.

36. K. Uchida, et. Al., Thermal spin pumping and magnon-phonon-mediated spin-Seebeck effect, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 111, 103903 (2012)

37. K. Uchida, et. Al., Observation of the spin Seebeck effect, Nature, Vol 455| 9 October 2008| doi:10.1038/nature07321

38. N. W. Ashcroft and N. D. Mermin, Solid State Physics (Saunders College, Philadelphia, 1976)

39. A.Y. FARAJI and A. AKBARZADEH Design of a Compact, Portable Test System for Thermoelectric Power Generator Modules Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 42, No. 7, 2013. DOI: 10.1007/s11664-012-2314-0

40. Gooch, Jan. (2011). Seebeck Effect. 10.1007/978-1-4419-6247-8_10421.

41. D.M. Rowe, Handbook of Thermoelectrics: Macro to Nano, CRC Press Dec 09, 2005.

42. Segall, A. E. "Solutions for the correction of temperature measurements based on beaded thermocouples." International Journal of Heat and Mass Transfer 44, no. 15 (2001): 2801-2808.

43. Yang Zhou, Donghua Yang, Liangliang Li, Fu Li, and Jing-Feng Li, Fast Seebeck coefficient measurement based on dynamic method. Review of Scientific Instruments 85, 054904 (2014); doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4876595>

44. Semiconductor devices – Semiconductor devices for energy harvesting and generation – Part 2: Thermo power based thermoelectric energy harvesting

45. J.P. Carmo, Joaquim Antunes, M.F. Silva, J.F. Ribeiro, L.M. Goncalves, J.H. Correia, Characterization of thermoelectric generators by measuring the load-

dependence behavior, In *Measurement*, Volume 44, Issue 10, 2011, Pages 2194-2199, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.07.015>.

46. Zu-Guo Shen, Shuang-Ying Wu, Lan Xiao, Gang Yin, Theoretical modeling of thermoelectric generator with particular emphasis on the effect of side surface heat transfer, In *Energy*, Volume 95, 2016, Pages 367-379, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.005>.

47. J.P. Carmo, J.F. Ribeiro, M.F. Silva, L.M. Goncalves, J.H. Correia, Thermoelectric generator and solid-state battery for stand-alone microsystems, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20 (8) (2010), pp. 1-8.

48. E. Vremera, L. Brunetti, L. Oberto, M. Sellone, Alternative procedures in realizing of the high frequency power standards with microcalorimeter and thermoelectric power sensors, *Measurement*, 42 (February) (2009), pp. 269-276.

49. J. Jiang, L. Chen, S. Bai, Q. Yao, Q. Wang, Thermo-electric properties of p-type crystals prepared via zone melting, *Journal of Crystal Growth*, 277 (2005), pp. 258-263

50. R. Venkatasubramanian, E. Siivola, T. Colpitts, B. O'Quinn, Thin-film thermo-electric devices with high room-temperature figures of merit, *Nature*, 413 (October) (2001), pp. 597-602.

51. L.W. da Silva, K. Massoud, Citrad Uher, Thermo-electric performance of films in the Antimony-tellurium and antimony-tellurium systems, *Journal of Applied Physics*, 97 (2005)

52. M.F. Silva, Thin-films for thermoelectric applications, MSc Thesis on, *Micro/Nanotechnologies*, University of Minho, November 2010.

53. M.Y. Kim, T.S. Oh, Thermoelectric characteristics of the thermopile sensors with variations of the width and the thickness of the electrodeposited bismuth-telluride and antimony-telluride thin films, *Materials Transactions*, 51 (2010), pp. 1909-1913.

54. J.P. Carmo, L.M. Goncalves, J.H. Correia, Improved p-Improved p- and n-type thin-film microstructures for thermoelectricity, *Electronic Letters*, 45 (July) (2009), pp. 803-805

55. J.P. Carmo, L.M. Goncalves, J.H. Correia, Thermoelectric microconverter for energy harvesting systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57 (March) (2010), pp. 861-867.
56. B. Poudel, Q. Hao, Y. Ma, Y. Lan, A. Minnich, B. Yu, X. Yan, D. Wang, A. Muto, D. Vashaee, X. Chen, J. Liu, M.S. Dresselhaus, G. Chen, Z. Ren, High-thermoelectric performance of nanostructured bismuth antimony telluride bulk alloys, *Science*, 320 (May) (2008), pp. 634-638.
57. H. Yousef, K. Hjort, M. Lindeberg, Vertical thermopiles embedded in a Polyimide-based flexible printed circuit board, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 16 (September) (2007), pp. 1341-1348.
58. E. Vremera, L. Brunetti, L. Oberto, M. Sellone, Alternative procedures in realizing of the high frequency power standards with microcalorimeter and thermoelectric power sensors, *Measurement*, 42 (February) (2009), pp. 269-276.
59. R. Venkatasubramanian, E. Siivola, T. Colpitts, B. O'Quinn, Thin-film thermo-electric devices with high room-temperature figures of merit, *Nature*, 413 (October) (2001), pp. 597-602.
60. Tritt, T. M., Kanatzidis, M. G., Lyon, H. B.Jr & Mahan, G. D. Thermoelectric materials—New directions and approaches. *Mater. Res. Soc. Proc.* 478, 73–84 (1997).
61. Wright, D. A. Thermoelectric properties of bismuth telluride and its alloys. *Nature* 181, 834 (1958).
62. Yim, W. M. & Amith, A. Bi-Sb alloys for magneto-thermoelectric and thermomagnetic cooling. *Solid State Electron.* 15, 1141–1165 (1972).
63. Goldsmid, Hiroshi. (2017). The Seebeck and Peltier effects. 10.1088/978-1-6817-4641-8ch1.
64. Gurevich, Yuri & Velázquez-Pérez, Jesús. (2014). Peltier Effect in Semiconductors. 10.1002/047134608X.W8206.
65. J. Hu and P.B. Nagy, On the role of interface imperfections in thermoelectric nondestructive materials characterization, *Appl. Phys. Lett.* 73 (1998) 467-469.

66. Helmut Werheit, Udo Kuhlmann, Bernhard Herstell and Walter Winkelbauer, Reliable measurement of Seebeck coefficient in semiconductors, *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 176, Number 1
67. Hicks, L. D. & Dresselhaus, M. D. Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit. *Phys. Rev. B* 47, 12727–12731 (1993).
68. O. Boffoué, A. Jacquot, A. Dauscher, B. Lenoir, M. Stölzer, Experimental setup for the measurement of the electrical resistivity and thermopower of thin films and bulk materials, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 76, (2005) 053907.
69. A T Burkov, A Heinrich, P P Konstantinov, T Nakama, K Yagasaki, Experimental set-up for thermopower and resistivity measurements at 100-1300 K, *Measurement Science and Technology*, Volume 12, pp 264, 2001
70. Jacquot A, König J and Böttner H 2006 Proc. 25th Int. Conf. Thermoelectrics ed P Rogl (Piscataway, NJ: IEEE, Catalog Nr. 06TH8931) p 184
71. P. H. Michael Böttger, E. Flage-Larsen, O. B. Karlsen, Terje G. Finstad, High temperature Seebeck coefficient and resistance measurement system for thermoelectric materials in the thin disk geometry, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 83, 025101 (2012)
72. Shiho Iwanaga, Eric S. Toberer, Aaron LaLonde, G. Jeffrey Snyder, A high temperature apparatus for measurement of the Seebeck coefficient, *Review of Scientific Instruments* 82, 063905 (2011); doi: 10.1063/1.3601358.
73. J.G. Gasser, Understanding the resistivity and absolute thermoelectrical power of disordered metals and alloys, *J.Phys. Condens. Matter* 20 (2008) 114103.
74. Bahk, Je-Hyeong & Favaloro, Tela & Shakouri, Ali. (2013). THIN FILM THERMOELECTRIC CHARACTERIZATION TECHNIQUES. 10.1615/AnnualRevHeatTransfer.v16.30. *Annual Review of Heat Transfer*, Edition: vol. 16, Chapter: 3, Publisher: Begell House Inc., Editors: Gang Chen, V. Prasad, Y. Jaluria, pp.51-99
75. J. M. O. Zide, J.-H. Bahk, R. Singh, M. Zebarjadi, G. Zeng, H. Lu, J. P. Feser, D. Xu, S. L. Singer, Z. X. Bian, A. Majumdar, J. E. Bowers, A. Shakouri, and A.

C. Gossard, “High efficiency semimetal/semiconductor nanocomposite thermoelectric materials,” *J. Appl. Phys.* 108, 123702 (2010).

76. J.-H. Bahk, G. Zeng, J. M. O. Zide, H. Lu, R. Singh, D. Liang, A. T. Ramu, P. Burke, Z. Bian, A. C. Gossard, A. Shakouri, and J. E. Bowers, “High temperature thermoelectric characterization of III-V semiconductor thin films by oxide bonding,” *J. Electron. Mater.* 39, 1125 (2010).

77. R. Singh, “Experimental characterization of thin film thermoelectric materials and film deposition via molecular beam epitaxy,” Ph.D thesis, UCSC (2008).

78. S.R. Sarath Kumar and S. Kasiviswanathan, “A hot probe setup for the measurement of the Seebeck coefficient of thin wires and thin films using integral method,” *Rev. Sci. Instrum.* 79, 02432 (2008).

79. R. Singh and A. Shakouri, “Thermostat for high temperature and transient characterization of thin film thermoelectric materials,” *Rev. Sci. Instrum.* 80, 025101 (2009).

80. C. Wood, D. Zoltan, G. Stapfer, “Measurement of Seebeck coefficient using a light pulse,” *Rev. Sci. Instrum.* 56, 719 (1985).

81. Simonet L. Effet des heterogeneites sur le Pouvoir Thermoelectrique de l’acier de cuve (in French). National Institute of Applied Sciences of Lyon.; 2006.

82. Martin J, Tritt T, Uher C. High temperature Seebeck coefficient metrology. *J Appl*

83. *Phys* 2010;108.

84. Polvani DA, Meng JF, Hasegawa M, Badding JV. Measurement of the thermoelectric power of very small samples at ambient and high pressures. *Rev Sci Instrum* 1999; 70(9):3586.

85. Boffoue O, Jacquot A, Dauscher A, Lenoir B. Experimental setup for the measurement of the electrical resistivity and thermopower of thin films and bulk materials. *Rev Sci Instrum* 2005;76.

86. Iwanaga S, Toberer ES, Lalonde A, Snyder GJ. A high temperature apparatus for measurement of the Seebeck coefficient A high temperature apparatus for measurement of the Seebeck coefficient. *Rev Sci Instrum* 2011;82.
87. Hu J, Nagy PB. On the role of interface imperfections in thermoelectric nondestructive materials characterization. *Appl Phys Lett* 1998;73(4).
88. Burkov AT, Heinrich A, Konstantinov PP, Nakama T, Yagasaki K. Experimental set-up for thermopower and resistivity measurements at 100 – 1300 K. *Meas Sci Technol* 2001;12.
89. de Boor J, Müller E. Data analysis for Seebeck coefficient measurements. *Rev Sci Instrum* 2013;84.
90. Powell RL, Hall WJ, Hyink CH, Sparks LL, Burns GW, et al. Thermocouple reference tables based on the IPTS-68, NBS monograph 125. National Bureau of Standards; 1974.
91. NIST. ITS-90 thermocouple database, web version 2.0. Retrieved June 30, 2017, from, https://srdata.nist.gov/its90/main/its90_main_page.html; 2017.
92. Pollock DD. Physical properties of materials for engineers. CRC Press; 1993.
93. J. de Boor and E. Muller, Data analysis for Seebeck coefficient measurements, *Review of Scientific Instruments* 84, 065102 (2013)
94. Nowicki, Michał & Lewandowska, Beata. (2019). Relative Seebeck coefficient differences used for metal sorting. *AIP Conference Proceedings*. 2131. 020033. 10.1063/1.5119486.
95. C. Stuart, “Thermoelectric differences used for metal sorting,” *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 15, no. 4, pp. 224-230, 1987.
96. Cho, Minjae & Park, Seongyun & Kwon, Eunsung & Jeong, Seongho & Park, Kyihwan. (2019). A waste metal sorting system using LIBS classification. 451-454. 10.1109/ISIE.2019.8781099.
97. X.C Xuan, K.C Ng, C Yap, H.T Chua, A general model for studying effects of interface layers on thermoelectric devices performance, In *International Journal of*

Heat and Mass Transfer, Vol.45, Issue 26, 2002, pp. 5159-5170, ISSN 0017-9310, [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00217-X](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00217-X).

98. Corcoran, Joseph & Raja, Santosh & Nagy, Peter. (2017). Improved thermoelectric power measurements using a four-point technique. *NDT & E International*. 94. 10.1016/j.ndteint.2017.12.002.

99. Abouellail A. A., Obach I.I., Soldatov A.A., Soldatov A.I. Surface inspection problems in thermoelectric testing, *MATEC Web of Conferences*. 2017, Vol. 102, pp. 01001. doi: 10.1051/mateconf/201710201001.

100. Paul E. M. *Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide*, Second Edition. John Wiley & Sons, 2005.

101. Abouellail A. A., Obach I.I., Soldatov A.A., Soldatov A.I. Surface inspection problems in thermoelectric testing, *MATEC Web of Conferences*. 2017, Vol. 102, pp. 01001. doi: 10.1051/mateconf/201710201001.

102. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭДС, Абуеллаиль А.А., Солдатов А.А., Сорокин П.В., Солдатов А.И., Хан В., *Дефектоскопия*. 2018. № 7. С. 54-60.

103. Zhang X., Zhao L.-D. Thermoelectric materials: Energy conversion between heat and electricity, *Journal of Materiomics*. 2015, Vol.1, Issue 2, pp. 92. doi: 10.1016/j.jmat.2015.01.001

104. A. I. Soldatov et al., "An experimental setup for studying electric characteristics of thermocouples," 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, 2017, pp. 1-4.

105. C. Boor, "Polynomial interpolation" in *A Practical Guide to Splines*, 1st ed., vol.27, Springer-Verlag New York, USA, 1978, pp. 3-11.

106. W. Werner, "Polynomial Interpolation: Lagrange versus Newton", *Mathematics of Computation*, Vol. 43, No. 167, pp. 205-217, Jul 1984.

107. Page 93 Look for Шариховатость

108. Пат.2495410 Российская Федерация. Устройство для неразрушающей разбраковки металлических изделий / А.А. Солдатов [и др.]; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 10.10.2013.

109. Солдатов А.А. Исследование термоэлектрических свойств металлов при помощи программно-аппаратного комплекса // Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность: сборник трудов III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т. – Томск, 27-31 Мая 2013. – Томск: ТПУ, 2013. – Т.1. – С. 155-159.

110. Солдатов А.А. Неразрушающей контроль качества поверхностного слоя металла [Электронный ресурс] / А.А. Солдатов // Современные техника и технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т. – Томск, 9-13 Апреля 2012. – Томск: ТПУ, 2012. – Т.1. – С. 257- 258. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)

111. Солдатов А. А. Экспериментальные исследования термо-ЭДС при пластической деформации металлов и сплавов / А.А. Солдатов // Инновации в неразрушающем контроле SibTest: сборник научных трудов I Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по Инновациям в неразрушающем контроле. – Горно-Алтайск, 2011. – с. 290-292.

112. Солдатов А.А. Неразрушающий контроль пластической деформации методом измерения дифференциальной термоЭДС / А.А. Солдатов [и др.]. // Дефектоскопия, 2012.– No.3.– с. 49-51.

113. Солдатов А.А. Исследование переходного процесса при экспресс-контроле металлов и сплавов методом термо-ЭДС / А. А. Солдатов, П. В. Сорокин, Д. А. Солдатов // Неразрушающий контроль: сборник научных трудов всероссийской молодежной школы-конференции, Томск, 2013. - с. 40- 46

114. Soldatov A.A. Control of the plastic deformation by thermo-electric method / A.A. Soldatov // Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Tehnologies, 2011. – Vol. 5. – No. 3. – p. 148-155.

115. Soldatov A.A. Nondestructive Proximate Testing of Plastic Deformations by Differential Thermal EMF Measurements/ A.A. Soldatov, [et al.] // Russian Journal of Nondestructive Testing . – 2012 – Vol. 48 – No. 3 – p. 184- 186.

116. L Stuart, C., Thermoelectric Differences Used for Metal Sorting //Journal of Testing and Evaluation, Vol. 15, No. 4, 1987, pp. 224-230, <https://doi.org/10.1520/JTE11013J>. ISSN 0090-3973.

117. Paul E. Mix., Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide, Second Edition // 27 Jan 2005. Print ISBN: 9780471420293. Online ISBN: 978-0-471-42029-3. DOI: 10.1002/0471719145.

118. Егоров Ю.П., Солдатов А.И., Цехановски С.А., Контроль металлов и сплавов методом дифференциальной термоэлектродвижущей силы // Механика и машиностроение (сб. трудов). Томск,- ТПУ,- 2000. С., стр. 145-149.

119. Елисеев В.С., Иванов А. С., Егоров Ю. П., Определение толщины цементованного слоя на стали 12Х2Н4А // X Юбилейная Международная научно-практическая конференция "Современные техника и технологии" Секция 6. Материаловедение, стр. 31-33.

120. Kikuchi M., Dental Alloy Sorting By the Thermoelectric Method // European Journal of Dentistry. 2010;4(1):66-70.

121. Солдатов А.И., Егоров Ю.П., Цехановски С.А., Неразрушающий экспресс-контроль металлов и сплавов прибором "ТЕРМОТЕСТ" // Обработка металлов №4 2002 стр.16-18.

122. A. I. Soldatov et al., "An experimental setup for studying electric characteristics of thermocouples," 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/SIBCON.2017.7998534

123. Солдатов А.А., Аппаратно-программный комплекс для контроля пластически деформированных металлов дифференциальным термоэлектрическим методом // дис. канд. техн. наук / А.А. Солдатов. – Томск: НИ ТПУ, 2014. – 155с.

124. Hu, Jiangtao & Nagy, Peter B., On the role of interface imperfections in thermoelectric nondestructive materials characterization // Applied Physics Letters, 73, 467-469 (1998), DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.121902>

125. J.F. Li, W.S. Liu, L.D. Zhao, M. Zhou High-performance nanostructured thermoelectric materials *Npg Asia Mater*, 2 (2010), pp. 152–158

126. Xiao Zhang, Li-Dong Zhao, Thermoelectric materials: Energy conversion between heat and electricity // *Journal of Materiomics*, Volume 1, Issue 2, June 2015, Pages 92-105, ISSN 2352-8478.

127. Rigol User's guide for Model DM3068 Digital Multimeter, DMM Series // Beijing, China: Rigol Technologies Inc. Oct. 2012.
http://www.batronix.com/pdf/Rigol/UserGuide/DM3068_UserGuide_EN.pdf

128. Солдатов А.А. Неразрушающий экспресс контроль металлов и сплавов методом дифференциальной термо-эдс [Электронный ресурс] / А.А. Солдатов, Е.А. Кривенок // *Современные техника и технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т. – Томск, 18-22 Апреля 2011. – Томск: ТПУ, 2011. – Т.1 – С. 208-209. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).*

129. Калимулин Р.М. Термоэлектрический метод обнаружения дефектов при пластической деформации металлических конструкций./ Р.М. Калимулин// *XV международная научно–практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии»: сборник трудов. – 2009. – Т.1. – с. 171-173.*

130. Варданян, Г.С. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности / Г.С. Варданян, В.И. Андреев, Н.М. Атаров – М.:АСВ, 1993. –573с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Утверждаю

Технический директор ОАО «ТЭМЗ»

А.А.Котельников

_____ 2018 г.



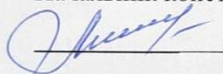
АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Абуеллаиль А.А.

Мы, нижеподписавшиеся, начальник конструкторской службы ОАО «ТЭМЗ» Г.И.Милехина, составили настоящий акт в том, что в ОАО «ТЭМЗ» внедрен прибор экспресс-контроля металлов и сплавов «ТЕРМОТЕСТ», в котором использованы результаты научных исследований по диссертационной работе Абуеллаиль А.А.: методика контроля металлов и сплавов, способ неразрушающего контроля качества поверхностного слоя металла, защищенный патентом РФ №2498281, устройство для неразрушающей разбраковки металлических изделий, обладающее лучшими техническими характеристиками по сравнению с аналогами, защищенное патентом РФ №2495410.

От ОАО «ТЭМЗ»

Начальник конструкторской службы

 Г.И.Милехина

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
 Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
 «National Research Tomsk Polytechnic University» (TPU)
 30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia
 Tel. +7-3822-606333, +7-3822-701779,
 Fax +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
 ОКРО (National Classification of Enterprises and Organizations):
 02069303,
 Company Number: 027000890168,
 VAT/KPP (Code of Reason for Registration)
 7018007264/701701001, BIC 046902001

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное
 учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский
 Томский политехнический университет» (ТПУ)
 Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия
 тел.: +7-3822-606333, +7-3822-701779,
 факс +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
 ОКРО 02069303, ОГРН 1027000890168,
 ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 046902001

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИШНКБ НИ ТПУ,

Д.А.Седнев

2020 г.

Акт

внедрения результатов диссертационной работы

Абуеллаиль Ахмед Али

Комиссия в составе: председатель: руководитель отделения электронной инженерии, к.т.н., Баранов П.Ф., члены комиссии: доцент отделения электронной инженерии, Сорокин П.В., доцент отделения электронной инженерии, к.т.н. Костина М.А. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Абуеллаиль Ахмед Али «ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СКВАЖИН», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, используются в учебном процессе отделения электронной инженерии инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности национального исследовательского Томского политехнического университета в методических материалах дисциплины: «Электронные промышленные устройства», а также при подготовке магистерских диссертаций и курсовых проектов студентами ТПУ.

Председатель комиссии

П.Ф.Баранов

Члены комиссии

П.В.Сорокин

М.А.Костина