

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Солдатов Андрей Алексеевич

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

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

Диссертация
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор физ.-мат. наук,
профессор Суржиков А.П.

Томск – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ.....	19
1.1 Термоэлектрический метод контроля пластической деформации металлов.	22
1.2 Термоэлектрический метод контроля теплового сопротивления двух соприкасающихся поверхностей	31
1.3 Термоэлектрический метод контроля контактного соединения.....	38
1.4 Термоэлектрический метод контроля качества токарной обработки и сварки металлов	42
1.5 Термоэлектрический метод контроля степени наводораживания металлов .	48
1.6 Термоэлектрический метод контроля в медицине	52
1.7 Приборы термоэлектрического контроля.....	55
1.7.1 Структуроскоп термоэлектрический МЕТЭК-М.....	55
1.7.2 Термоэлектрический прибор Т-3СП.....	56
1.7.3 Термоэлектрический дефектоскоп-толщиномер ТЭС-364М	58
1.7.4 Определитель металлов термоэлектрический ОМЕТ	59
1.7.5 Приборы для измерения коэффициента Зеебека и электрического сопротивления	60
ВЫВОДЫ.....	63
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭДС	65
2.1 Исследование электрических характеристик источника термоЭДС	65
2.2 Исследование электрических характеристик эквивалентного источника термоЭДС при многоконтактном соединении.....	73
ВЫВОДЫ.....	101

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ	102
3.1 Исследование электрических характеристик термопар с нулевой деформацией	104
3.2 Исследование электрических характеристик термопар с деформацией 17 %	111
3.3 Исследование электрических характеристик термопар с деформацией 33 %	119
3.4 Влияние степени пластической деформации на величину термоЭДС и внутреннее сопротивление	126
ВЫВОДЫ	130
ГЛАВА 4. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КОНТАКТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	132
4.1 Контроль контактного сопротивления. Теоретический анализ	136
4.2 Экспериментальные исследования	148
4.3 Алгоритм детектирования неисправного контактного соединения в сети электрообеспечения	151
ВЫВОДЫ	158
ГЛАВА 5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВУХ СОПРИКАСАЮЩИХСЯ ПРОВОДЯЩИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	160
5.1 Теоретические основы применения термоэлектрического метода контроля теплового сопротивления двух соприкасающихся проводящих металлических поверхностей	162
5.2 Влияние теплового сопротивления на температуру корпуса тепловыделяющего электронного компонента и радиатора охлаждения	168

5.3 Исследование характеристик источника термоЭДС при изменении теплового сопротивления	171
5.4 Экспериментальные исследования	177
ВЫВОДЫ.....	182
ГЛАВА 6. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	184
6.1 Прибор термоэлектрического контроля с дифференциальным датчиком...	184
6.2 Прибор термоэлектрического контроля «ТЕРМОТЕСТ-2»	193
6.3 Прибор термоэлектрического контроля «Thermo Fitness Testing»	200
6.4 Прибор термоэлектрического контроля «ТЕРМОТЕСТ-4»	204
ВЫВОДЫ.....	212
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	214
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	217
Приложение А (справочное) Акты внедрения	248

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования

С открытием эффекта Зеебека термоэлектрический метод стал применяться для неразрушающего контроля проводящих металлов и сплавов [1-28].

Долгое время его применение ограничивалось экспресс-контролем металлов и сплавов. По величине термоЭДС детектировалась марка стали либо структурное состояние, либо химический состав из-за влияния этих характеристик на величину термоЭДС [29, 30].

Область применения термоэлектричества в неразрушающем контроле активно развивается. Многие коллективы как в России, так и за рубежом проводят исследования по улучшению характеристик приборов термоэлектрического контроля, по изучению термоэлектрических характеристик металлов и сплавов.

Большую работу проделали ученые из Белорусской академии наук Лухвич А.А., Шарандо В.И. и Каролик А.С. Они исследовали термоэлектрические характеристики благородных и переходных металлов. Им удалось математически описать величину термоЭДС используя в качестве отправной точки электронную структуру металла. Для оценки влияния примесей на термоЭДС они использовали энергетический спектр электронов, описав его с помощью поверхности Ферми.

Ученые из Волгоградского государственного технического университета Корндорф С.Ф. и Нестерович Ю.И. исследовали термоэлектрические характеристики металлов прошедших термическую обработку. На основе этих исследований был предложен термоэлектрический способ контроля твердости. При практической реализации этого способа выявился его основной недостаток, заключающийся в низкой повторяемости результатов контроля при многократных измерениях, что было вызвано использованием горячего электрода с точечным контактом и при неизбежной неоднородности поверхности изделия по химическому составу и невозможности обеспечения повторного попадания горячего электрода в тоже место поверхности образца при ручном контроле приводило к изменению показаний прибора.

Другим недостатком приборов термоэлектрического контроля является зависимость показаний от усилия прижима электродов к контролируемому изделию. Это явление отмечается в работах Лухвича А.А, Нестеровича Ю.И. [31], Hu J. and Nagy P. Влияние многоциклового нагружения на термоЭДС металлов исследовала группа ученых из Орловского государственного технического университета под руководством Тупикина Д.А.

В начале 21 века сфера применения термоэлектрического контроля существенно расширилась [32-37]. Была показана возможность и перспективность применения термоэлектрического метода для контроля пластической деформации металлов и сплавов. В работах Акулова была показана зависимость плотности дислокаций от величины деформации, дислокации напрямую влияют на величину термоЭДС. Однако многие металлы и сплавы имеют немонотонную зависимость величины термоЭДС от степени пластической деформации. Это ограничивает использование приборов термоэлектрического контроля для определения степени пластической деформации.

Ученые из Волгоградского государственного технического университета С.Ф.Корндорф, Е.Е.Мельник, Плотников А.Л., Сергеев А.С. и Тихонова Ж.С. исследовали режимы токарной обработки металлов с помощью термоэлектрического метода. С появлением технологии сварки трением с перемешиванием, которая позволяет получить сварное соединение с более высокими механическими характеристиками, возникла необходимость контроля процесса сварки, при этом критически важно соблюдать стабильный технологический режим для получения качественного сварного соединения. Для этих целей использовали термоду, образованную сварным инструментом и свариваемыми металлами. Такие исследования были проведены Ana Magalhães, Jeroen De Backer и Gunnar Bolmsjö.

Термоэлектрический метод успешно применяется и для контроля степени наводораживания титанового сплава. Такие исследования были проведены Лидером А.М., Ларионовым В.В. и Суртановым М.С.

Ученые из научно- производственного центра «Полюс» М.С. Васильев И.М. и Деменьев А.А, а также группа ученых из национального исследовательского Томского политехнического университета Солдатов А.А. и Костина М.А. применили термоэлектрический метод [38-40] для контроля теплового сопротивления между силовым полупроводниковым прибором и радиатором охлаждения, которые широко применяются в радиоэлектронике. Такой подход позволил контролировать тепловое сопротивление после установки силового полупроводникового прибора на радиатор охлаждения, т.е. уже в собранном виде. Однако такой контроль позволял определять только тепловое сопротивление и не давал ответ на главный вопрос о причине возникновения большого теплового сопротивления.

Контроль контактного сопротивления в сети электроснабжения термоэлектрическим методом был предложен и исследован группой ученых из национального исследовательского Томского политехнического университета. В своих работах Солдатов Д.А и Костина М.А. исследовали изменение термоЭДС контактной пары из разнородных металлов при протекании тока нагрузки через эту контактную пару. Был предложен способ выделения сигнала термоЭДС в сети переменного тока. Было проведено лабораторное обоснование термоэлектрического метода для контроля контактного сопротивления с целью предупреждения возгорания изоляции подводящих проводов. Однако предложенный подход требует установки приборов термоэлектрического контроля на каждое контактное соединение, что является экономически нецелесообразным.

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

Объект исследования – термоэлектрический эффект.

Предмет исследования – методы и аппаратура неразрушающего термоэлектрического контроля.

В соответствии с этим, целью работы является разработка методов и аппаратуры термоэлектрического контроля металлов и сплавов с разным структурным состоянием, а также контроля теплового и контактного сопротивления при соединении двух металлов.

Достижение поставленных целей потребовало решения следующих основных задач:

1. Разработать модель для исследования электрических характеристик эквивалентного источника термоЭДС, полученного за счет параллельного соединения нескольких источников термоЭДС, и определить его внутреннее сопротивление.

2. Исследовать электрические характеристики источника термоЭДС, образованного пластически деформированными металлами и сплавами. Определить влияние пластической деформации на внутреннее сопротивление и внешнюю характеристику источника термоЭДС.

3. Исследовать влияние границы соприкосновения двух плоских поверхностей на внутреннее сопротивление эквивалентного источника термоЭДС, полученного за счет параллельного соединения нескольких источников термоЭДС.

4. Разработать метод детектирования оптимального количества термоинтерфейса в зазоре между двумя соприкасающимися поверхностями для получения минимального теплового сопротивления между ними.

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

Научная новизна работы.

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

- При контроле структурного состояния и дефектов в металлах и сплавах с близкими значениями термоЭДС предложено использовать внутреннее сопротивление источника термоЭДС, образованного двумя разнородными металлами.
- Предложена методика контроля внутреннего сопротивления источника термоЭДС, основанная на учете контактного сопротивления и сопротивления подводящих проводов. Расчет внутреннего сопротивления источника термоЭДС производится путем умножения сопротивления нагрузки на дробь, числитель которой определяется путем вычитания величины термоЭДС при наличии нагрузки и напряжения на контактном сопротивлении и сопротивлении подводящих проводов из величины термоЭДС при отсутствии нагрузки, а знаменатель равен разности величины термоЭДС при наличии нагрузки и напряжения на контактном сопротивлении и сопротивлении подводящих проводов.
- Возможность контроля структурного состояния и дефектов в металлах и сплавах с близкими значениями термоЭДС с использованием внутреннего сопротивления источника термоЭДС основана на отсутствии влияния сопротивления нагрузки и разницы температур между горячим и холодным спаями источника термоЭДС на его внутреннее сопротивление.
- Контроль степени пластической деформации с использованием внутреннего сопротивления источника термоЭДС основана на влиянии пластической деформации на внутреннее сопротивление источника термоЭДС, образованного пластически деформированным металлом или сплавом.
- Внутреннее сопротивление эквивалентного источника термоЭДС, образованного параллельным соединением нескольких источников термоЭДС, равно параллельному соединению внутренних сопротивлений этих источников термоЭДС.
- Предложен метод определения оптимального количества теплопроводящей пасты в зазоре двух соприкасающихся поверхностей для получения минимального теплового сопротивления между ними, основанный на

использовании внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС, образованного параллельным соединением нескольких источников термоЭДС.

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

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

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

Практическая значимость и внедрение результатов работы.

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

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

Автор выносит на защиту следующие основные положения:

1. Для контроля металлов и сплавов с близкими значениями термоЭДС в качестве дополнительного информативного параметра следует использовать внутреннее сопротивление источника термоЭДС, которое является его уникальной характеристикой.
2. Отличительной особенностью внутреннего сопротивления источника термоЭДС, используемого при контроле металлов и сплавов с близкими значениями термоЭДС в качестве дополнительного информативного параметра, является его независимость от температуры горячего и холодного спаев, поэтому отпадает необходимость стабилизации разности температур между горячим и холодным спаями.
3. При дефектоскопии металлов и сплавов на основе внутреннего сопротивления источника термоЭДС необходимо использовать нагрузочное сопротивление в диапазоне от 10 до 100 Ом и учитывать контактное сопротивление и сопротивление подводящих проводов. В этом случае погрешности определения внутреннего сопротивления не превышает 10 %.
4. При контроле пластически деформированных металлов и сплавов изменяется не только величина термоЭДС, но и внутреннее сопротивление источника термоЭДС, образованного пластически деформированным металлом. Контроль степени пластической деформации необходимо проводить, используя отношение термоЭДС к внутреннему сопротивлению. При этом получается монотонная зависимость этого отношения от степени пластической деформации.
5. Для контроля оптимального количества теплопроводящей пасты в зазоре двух соприкасающихся поверхностей для получения минимального теплового сопротивления между ними следует использовать зависимость внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС от толщины слоя термопасты.
6. Для детектирования большого контактного сопротивления в сети электроснабжения из некоторого множества контактных соединений, выбранных для контроля, необходимо использовать данные о включенной электроустановке,

токе через эту электроустановку, величине термоЭДС до и после включения электроустановки.

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

Апробация работы.

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

1. VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития термоэлектрического приборостроения», г. Махачкала, 2023.
2. XX Международная школа-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Инноватика-2024», г. Томск, 2024.
3. XVII Международная школа-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Инноватика-2021», г. Томск, 2021.
4. III Международный форум «Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции», г. Томск, 2020.
5. International Conference «Actual Trends in Radiophysics», 2020.
6. 5th International Workshop on Innovations in Information and Communication Science and Technology, Malang, Indonesia, 2020.
7. Всероссийская научно-методическая конференция «Современные технологии, экономика и образование», 2019.
8. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2019, г. Томск.
9. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2018.
10. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2017, г. Томск.
11. MATEC Web of Conferences. – 2017

12. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016, г. Томск.
13. 6th International Conference on Key Engineering Materials, ICKEM 2016, г.Томск
14. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015.
15. XVIII международная научно-практическая конференция «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность», «SibTest-2013», г. Иркутск, 2013.
16. XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ-2012», г. Томск, 2012.
17. XVII международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии СТТ-2011», г. Томск, 2011.
18. Международная конференция «SibTest-2011», г. Горно-Алтайск, 2011.
19. Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Методы и средства неразрушающего контроля», г. Томск, 2011.
20. XIII международная конференция «Materials, Methods and Tehnologies», Болгария, 2011.

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

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и приложения. Объем диссертации составляет 256 страниц, 129 рисунков и 17 таблиц. Обзор литературных данных содержит 269 наименований.

Содержание диссертации изложено следующим образом.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи, определены объект и предмет исследования, представлены

научная новизна работы и ее практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, показана апробация работы на конференциях различного уровня.

В первой главе проведен обзор областей использования термоэлектрического метода. Показана возможность и перспективность применения термоэлектрического метода для контроля пластической деформации металлов и сплавов. В работах Акулова была показана зависимость плотности дислокаций от величины пластической деформации, а как известно дислокации напрямую влияют на величину термоЭДС. Также показана возможность контроля теплового сопротивления между силовым полупроводниковым прибором и радиатором охлаждения, которые широко применяются в радиоэлектронике. Такой подход позволил контролировать тепловое сопротивление после установки силового полупроводникового прибора на радиатор охлаждения, т.е. уже в собранном виде. Радиаторы охлаждения широко используются для охлаждения электронных компонентов, работающих с высокой нагрузкой, что позволяет увеличить срок службы таких электронных компонентов. В открытой печати опубликованы работы отечественных авторов применению термоэлектрического метода для контроля теплового сопротивления конструкции корпус силового тепловыделяющего электронного компонента - радиатор охлаждения в собранном виде. Получена зависимость термоЭДС от теплового сопротивления. Контроль контактного сопротивления в сети электроснабжения был осуществлен термоэлектрическим методом. Ток нагрузки нагревает контактную пару и при различии коэффициентов Зеебека у этой пары возникает термоЭДС. Однако предложенный подход требует установки приборов термоэлектрического контроля на каждое контактное соединение, что является экономически нецелесообразным. Не менее интересной сферой применения термоэлектрического контроля является контроль качества токарной обработки и сварки металлов. При токарной обработке режущая кромка резца нагревается, и возникает разница температур между режущей кромкой и торцом резца, закрепленного на станке. Для выполнения условия Зеебека необходим второй проводник. Его роль выполняет

обрабатываемая деталь, которая имеет температуру патрона токарного станка и температуру режущей кромки резца в месте их контакта. Таким способом контролировали температуру режущей кромки резца для увеличения срока его службы. С внедрением технологии сварки трением с перемешиванием, которая позволяет получить сварное соединение с более высокими механическими характеристиками, возникла необходимость контроля процесса сварки, при этом критически важно соблюдать стабильный технологический режим для получения качественного сварного соединения. Для этих целей использовали термопару, образованную сварным инструментом и свариваемыми металлами. При таком подходе время реакции термопары на изменение температуры существенно сокращается, кроме того, увеличивается точность измерения температуры, т.к. термопара расположена в самом сварном соединении. Термоэлектрический метод успешно применяется и для контроля степени наводораживания титанового сплава.

Исследованы приборы термоэлектрического контроля с прямым и дифференциальным методами измерения термоэлектродвижущей силы. Показаны их преимущества и недостатки.

Во второй главе приведены результаты исследований электрических характеристик источников термоЭДС. Исследованы характеристики эквивалентного источника термоЭДС, образованного параллельным соединением нескольких источников термоЭДС. Показана неизменность внутреннего сопротивления при изменении температуры горячего спая и сопротивления нагрузки. Показана возможность использования внутреннего сопротивления источника термоЭДС в качестве информативной характеристики при неразрушающем контроле металлов и сплавов термоэлектрическим методом. При параллельном соединении нескольких источников термоЭДС внутреннее сопротивление эквивалентного источника будет равно параллельному соединению внутренних сопротивлений каждого источника.

В третьей главе приведены результаты исследований электрических характеристик источников термоЭДС, образованных пластически деформированных металлов и сплавов. Выявлено изменение внутреннего

сопротивления источника термоЭДС при изменении степени пластической деформации. Показана возможность использования внутреннего сопротивления для детектирования мест пластической деформации. Выявлена разнонаправленная зависимость внутреннего сопротивления от степени пластической деформации для разных металлов. Однако совместно с величиной термоЭДС внутреннее сопротивление позволяет однозначно определять степень пластической деформации.

В четвертой главе проведены теоретические исследования термоэлектрического контроля контактного сопротивления, получаемого при соединении двух проводников. Предложен способ выявления контактного соединения с высоким сопротивлением из группы контролируемых контактных соединений с использованием одного прибора термоэлектрического контроля.

В пятой главе представлены результаты теоретических исследований по контролю теплового сопротивления двух соприкасающихся проводящих металлических поверхностей термоэлектрическим методом. Такой контроль необходим при монтаже тепловыделяющего электронного компонента на радиатор охлаждения. Показана зависимость величины термоЭДС от теплового сопротивления. Предложено использовать внутреннее сопротивление источника термоЭДС, образованного двумя соприкасающимися поверхностями, в качестве информативного параметра для контроля слоя теплопроводящей пасты в зазоре корпуса тепловыделяющего электронного компонента и радиатора охлаждения.

В шестой главе представлены результаты практической реализации проведенных исследований. Приведены описания и технические характеристики приборов термоэлектрического контроля, внедренных в реальный сектор экономики.

Выводы по работе делаются в конце каждой главы.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается непротиворечивостью полученных в исследовательской части работы результатов

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

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

Автором непосредственно проведено:

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

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

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

ГЛАВА 1. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Термоэлектрический эффект — это явление, при котором возникает электрический ток в замкнутом контуре из двух различных проводников, если один из их соединений нагревается, а другой охлаждается.

Первые упоминания о термоэлектрических явлениях относятся к 1794 году, когда итальянский ученый Алессандро Вольта проводил эксперименты с препарированной лягушкой. Вольта использовал лягушачьи лапки и различные металлы для создания электрического контакта. Вольта пришел к выводу, что электрические явления, наблюдаемые в мышцах лягушки, могут быть объяснены не только внутренними свойствами живых организмов, но и внешними факторами, такими как разница в потенциале между двумя металлами.

В 1821 году немецкий физик Томас Зеебек впервые описал эффект, который сейчас известен как термоэлектрический эффект. Он обнаружил, что если два разных металла соединить и нагреть одно из соединений, то в цепи возникает электрический ток (рисунок 1.1). Это открытие стало основой для дальнейших исследований в области термоэлектричества.

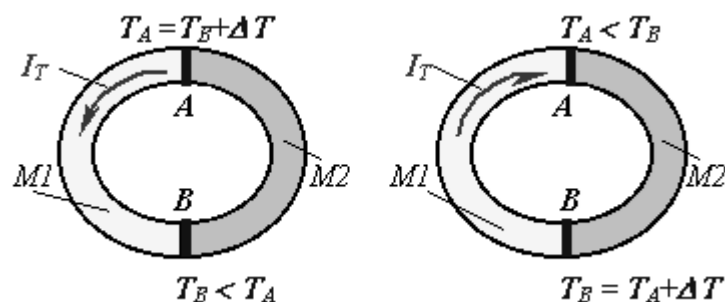


Рисунок 1.1 – Возникновение термоЭДС в паре металлов

Величина термоЭДС (термоэлектродвижущей силы), возникающей в паре металлов при градиенте температуры, пропорциональна градиенту температуры и материалам проводников:

$$E = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T, \quad (1.1)$$

где E – термоЭДС, возникающее между точками с разной температурой;

α_1 – коэффициент Зеебека первого металла (мкВ/К);

α_2 – коэффициент Зеебека второго металла (мкВ/К);

ΔT – разность температур между точками.

Если температура в одной точке выше, чем в другой, то ΔT будет положительным. Если температура в одной точке ниже, чем в другой, то ΔT будет отрицательным.

Коэффициент Зеебека для материалов вычисляют по формуле Мотта, например, в графене (вырожденный газ) равен:

$$S = -\frac{k_B}{e} \int \sigma(E) \frac{E - E_F}{k_B T} \frac{\partial f(E)}{\partial E} = -\frac{\pi^2 k_B}{3e} k_B T \left[\frac{d \ln(\sigma_E)}{dE} \right]_{E=E_F}, \quad (1.2)$$

где σ – удельная электропроводность;

k_B – постоянная Больцмана;

e – заряд электрона;

E – энергия;

E_F – энергия Ферми;

T – абсолютная температура;

$f(E)$ – функция Ферми – Дирака.

Французский физик Жан Пельтье в 1834 году открыл обратный эффект, который заключается в том, что при протекании электрического тока через соединение двух различных проводников происходит теплообмен: одно соединение нагревается, а другое охлаждается.

Эффект Пельтье описывается уравнением:

$$Q = \Pi_{AB} I t = (\Pi_B - \Pi_A) I t, \quad (1.3)$$

где Q – количество тепла;

I – ток, протекающий через соединение за время t ;

Π – коэффициент Пельтье, который можно найти по формуле [41]:

$$\Pi = \alpha_{12}T = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot T, \quad (1.4)$$

где T – абсолютная температура в Кельвинах.

В 1851 году английский физик Уильям Томпсон (позже лорд Кельвин) описал третий термоэлектрический эффект, который заключается в том, что в однородном проводнике, по которому протекает ток, происходит изменение температуры в зависимости от направления тока и температуры проводника:

$$Q_T = \tau \cdot \Delta T \cdot I \cdot t, \quad (1.5)$$

где Q – количество теплоты, выделяющееся или поглощающееся в проводнике за время t ;

τ – коэффициент Томпсона для данного материала (характеризует, насколько сильно материал реагирует на температурный градиент);

I – сила тока, протекающего через проводник;

T_1 и T_2 – температуры двух концов проводника (где $T_1 > T_2$).

Взаимосвязь коэффициента Томсона с коэффициентами термоЭДС и Пельтье осуществляется по следующему соотношению, называемому первым термодинамическим соотношением Томсона [42]:

$$\tau_{ik} = \frac{\partial \Pi_{ki}}{\partial T} - \alpha_{ik}. \quad (1.6)$$

С начала XX века начались исследования по созданию и улучшению термоэлектрических материалов. Ученые начали разрабатывать сплавы и полупроводники, которые демонстрировали высокую эффективность термоэлектрических преобразований.

На сегодняшний день приборы термоэлектрического контроля применяются при:

- входном контроле металлопроката;
- сортировке готовых изделий по маркам сталей и сплавов;
- определении глубины обезуглероженного слоя;
- определении глубины цементации;
- контроле качества термической обработки;

- контроле пластической деформации;
- контроле теплового сопротивления термоинтерфейса;
- контроле контактного соединения в электрической сети 230 В.

Рассмотрим применение термоэлектрического метода неразрушающего контроля в различных областях [43-44].

1.1 Термоэлектрический метод контроля пластической деформации металлов

При производстве изделий невозможно обеспечить строгую идентичность свойств материала, поэтому при производстве осуществляют контроль технологических процессов, путем выборочного контроля изделий.

Множество методов контроля структурных свойств изделий из металлов и сплавов являются разрушающими. Такие методы применимы только при массовом производстве большого количества изделий и на проверку качества выбирается только часть изделий или когда необходимо провести техническую экспертизу изделия.

После разрушающих испытаний изделие подлежит утилизации, что экономически невыгодно. На сегодняшний день существуют различные методы неразрушающего контроля, после которых изделие допускается для дальнейшей эксплуатации.

Дефекты продукции определяются как отклонения от требований, установленных нормативной документацией (ГОСТ 17102-71) [45]. Оценка дефектов является относительной, так как то, что может быть приемлемым для одного изделия, может быть недопустимым для другого. Например, некоторое количество газовых или шлаковых пор в сварном соединении может считаться допустимым, если эти дефекты не представляют опасности для прочности соединения. Дефекты могут быть явными или скрытыми, а также критическими, значительными или малозначительными [46]. Классификация дефектов по их

местоположению на поверхностные, подповерхностные и внутренние помогает определить метод контроля качества продукции. При необходимости обнаружения внутренних дефектов в металлах могут быть выбраны радиационный или акустический методы контроля. Однако, если требуется обнаружить поверхностные дефекты, то выбор методов контроля значительно расширяется, и можно использовать капиллярный, вихрековый, термоэлектрический и магнитный методы.

Процесс изменения как формы, так и размеров металла называется деформацией. Деформация может происходить при растяжении, сжатии или кручении металла, за счет приложенной внешней силы, при этом деформации подвергается весь объем металла. При работе оборудования, механизмов или станков стараются выбирать такие режимы, при которых деформация не возникает, что увеличивает срок их службы и уменьшает количество брака. При деформации сжатия расстояния между атомами уменьшается, а при растяжении – увеличивается. Изменение расстояния между атомами в кристаллической решетке приводит к изменению силы межатомного взаимодействия. Внешняя сила может быть приложена под некоторым углом к кристаллической решетке, и соответственно напряжение в металле может быть нормальным или касательным. После окончания воздействия внешней силы форма и размеры металла могут либо вернуться к исходным значениям, либо остаться в измененном состоянии.

Деформации подразделяют на упругие и пластические. Упругая деформация – это процесс, при котором материал деформируется под воздействием нагрузки, но после удаления нагрузки возвращается к своей исходной форме и размерам. При упругой деформации после снятия нагрузки размеры и форма возвращаются в исходное состояние, структура металла не изменяется.

При пластической деформации после снятия нагрузки размеры и форма не возвращаются в исходное состояние, изменения становятся необратимыми. Этот процесс наблюдается и для металлов с повышенной твердостью, если прикладывать нагрузки, превышающие предельные. Чтобы этого не случилось необходимо знать предел упругости и не превышать его при воздействии внешней

силы. Металлы, лучше всего деформирующиеся, имеют кубическую кристаллическую решетку [47-48].

Основными механизмами пластической деформации являются:

- скольжение;
- двойникование;
- межзеренное перемещение.

Скольжение возникает при перемещении кристаллических структур друг относительно друга без изменения их внутренней структуры. Процесс скольжения происходит вдоль плоскостей, называемых плоскостями скольжения, и вдоль направлений скольжения (рисунок 1.2, *а*), нарушается симметрия кристаллической решетки. Под действием напряжения атомы перемещаются вдоль плоскости скольжения. Механизм скольжения особенно характерен для кристаллических материалов, таких как металлы и некоторые керамические материалы.

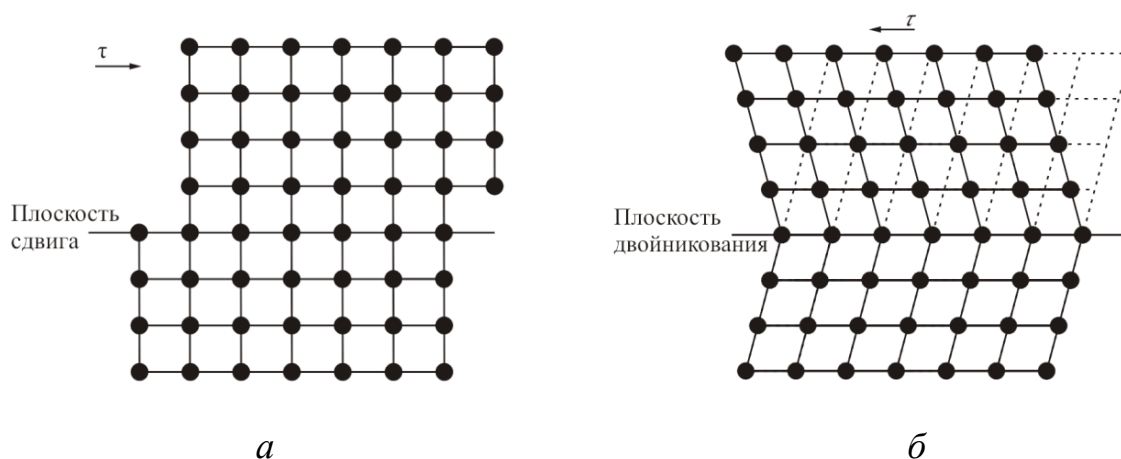


Рисунок 1.2 – Механизмы пластической деформации металла под действием напряжения сдвига τ : а – скольжение, б – двойникование

Двойникование возникает при наличии дислокаций в кристаллической решетке и играет решающую роль в изменении формы и размеров материала под воздействием внешних нагрузок. Двойники – это плоскости, которые разделяют два противоположных друг другу участка кристаллической решетки, обладающие симметрией по отношению друг к другу. Двойникование может происходить по различным плоскостям и в различных направлениях в кристалле (рисунок 1.2, б).

Механизм двойникования включает в себя движение и перетаскивание дислокаций через плоскость двойника, что приводит к изменению ориентации кристаллической решетки и образованию новых участков материала с иной структурой. Двойникование может происходить как при низких температурах, так и при высоких температурах. При низких температурах двойники могут образовываться под воздействием внешних напряжений, обусловленных, например, деформацией при механической обработке материала. При нагревании до высоких температур могут образовываться двойники за счет термического растяжения или циклирования.

Для поликристаллических материалов дополнительно может происходить межзеренное перемещение, изменяющее форму зерен [49].

Межзеренное перемещение происходит в результате скольжения атомов или молекул одного кристаллического зерна относительно другого. Этот процесс возникает под воздействием приложенной к материалу внешней силы, в процессе межзеренного перемещения происходит диффузия атомов через границы зерен. Это происходит благодаря разнице в энергии межзеренных и межатомных связей. В результате диффузии атомы переходят из одного зерна в другое, что вызывает пластическую деформацию материала (рисунок 1.3) [50].

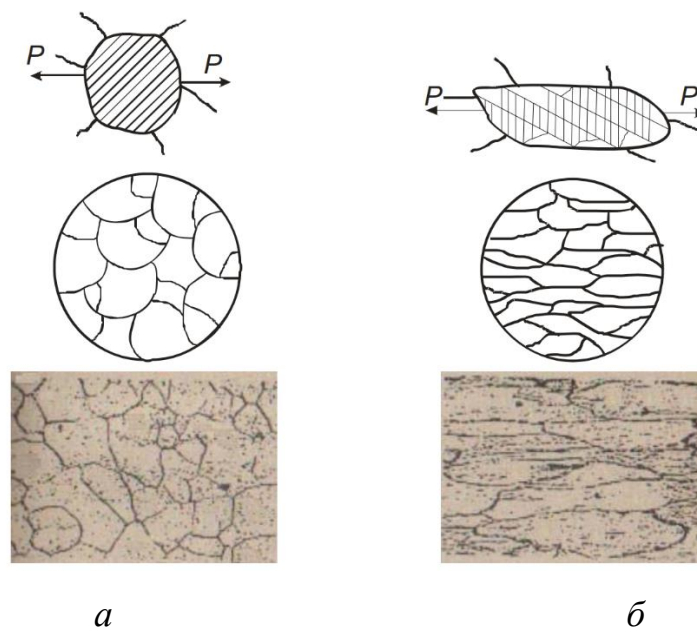


Рисунок 1.3 – Изменение формы зерен в металле под действием пластической деформации: *а* – до деформации, *б* – после деформации

Пластическая деформация оказывает значительное влияние на свойства металлов. Чрезмерная пластическая деформация приводит к ослаблению металла из-за возникновения дефектов и микротрещин, которые снижают его прочность. Пластическая деформация также снижает вязкость металла, делая его более хрупким и склонным к разрушению. Пластическая деформация может создать благоприятные условия для коррозионного растрескивания под напряжением, что приводит к преждевременному разрушению металла. Кроме того, пластическая деформация может изменить кристаллическую структуру металла, привести к образованию новых зерен или увеличить размер существующих.

Величину деформации определяют степенью пластической деформации ε (рисунок 1.4)

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0} \cdot 100\%, \quad (1.7)$$

где h_0 – размер образца до деформации;

h – размер образца после деформации.

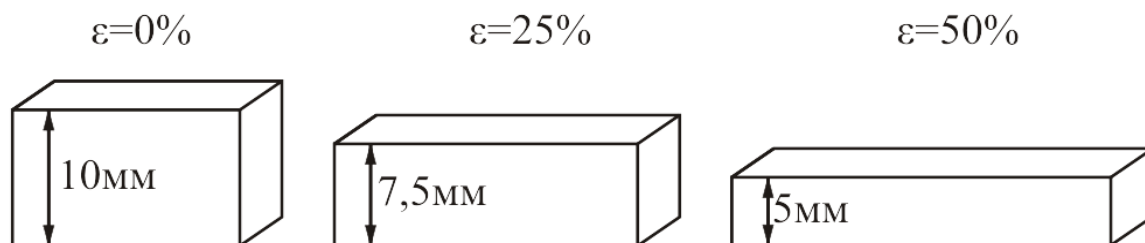


Рисунок 1.4 – Образцы с различной степенью пластической деформации

Влияние степени пластической деформации ε на механические свойства металла (рисунок 1.5):

1. Прочность σ увеличивается с увеличением степени пластической деформации, это происходит из-за увеличения плотности дислокаций, что препятствует движению других дислокаций.

2. Предел текучести также увеличивается с увеличением степени пластической деформации, это связано с тем, что для начала пластической деформации требуется преодолеть все большее количество дислокаций.

3. Пластичность δ уменьшается с увеличением степени пластической деформации из-за снижения подвижности дислокаций.

5. Ударная вязкость KCV уменьшается с увеличением степени пластической деформации. Снижение связано с уменьшением пластичности.

6. Твердость HRC увеличивается с увеличением степени пластической деформации.

7. Коррозионная стойкость снижается из-за увеличения плотности дислокаций и дефектов, которые могут служить путями для коррозии.

8. Долговечность снижается, т.к. скопления дислокаций и дефектов могут стать местами концентрации напряжений, что приводит к преждевременным отказам [49].

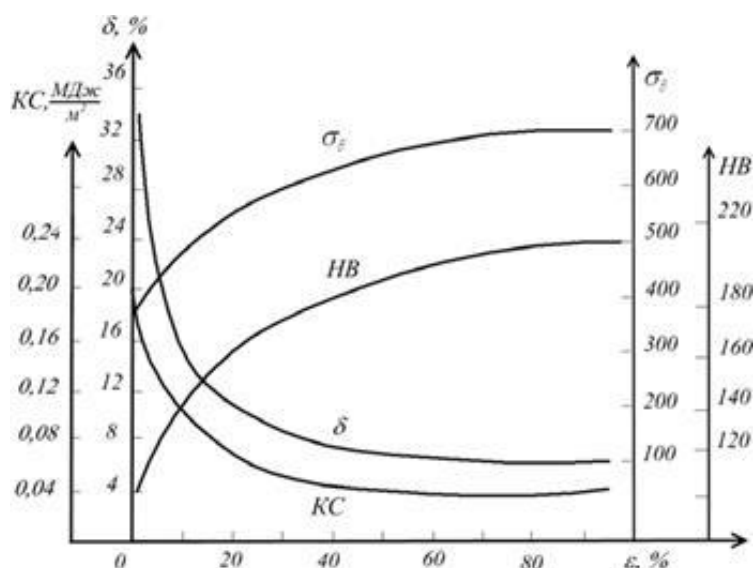


Рисунок 1.5 – Влияние степени пластической деформации на механические свойства металла

Пластическая деформация приводит к изменению механических и физических характеристик металлов. Исследованию физических характеристик металлов, подвергшихся пластической деформации, посвящены работы [51-52].

Рассмотрим классификацию дефектов по объемным размерам:

– -точечные (вакансии, примесные атомы, межузельные атомы), имеющие малый объемный размер (не более нескольких атомных диаметров в каждом направлении).

– Линейные дефекты. В одном измерении значительно превышают размеры элементарной ячейки, а в двух других - небольшие размеры, близкие к атомным. К линейным дефектам относят дислокации и дисклинации.

– Поверхностные дефекты. Такие дефекты имеют малый размер только в одном измерении. К поверхностным дефектам относят границы зерен, границы двойников и межфазные границы.

– Объемные дефекты (пустоты, включения, трещины), имеющие размеры значительно больше атомного диаметра во всех трех измерениях.

Дефекты в кристаллической решетке металлов возникают в трех случаях:

– при закалке металла его сначала нагревают до высокой температуры, а затем быстро остужают, при этом могут образовываться вакансии и их комплексы. Равновесная концентрация дефектов n зависит от температуры T следующим образом [53]:

$$n = Ce^{-\frac{E}{k_B T}}, \quad (1.8)$$

где E – энергия образования дефекта;

C – концентрация зарождающихся точечных дефектов;

k_B – постоянная Больцмана.

– при облучение материала частицами или электромагнитным излучением, которое может привести к образованию дефектов в кристаллической решетке, таких как вакансии, межузельные атомы.

– при пластической деформации, при которой возникают все виды дефектов от точечных до объемных. Деформация позволяет изменять кристаллическую структуру металла путем изменения скорости и величины деформации. Дополнительным фактором может служить температура. Эти изменения приводят к изменению физических и эксплуатационных характеристик [49]

Как уже упоминалось ранее, пластическая деформация металлов происходит в несколько стадий. Первая стадия характеризуется небольшой деформацией без значительного упрочнения - скольжение дислокаций происходит в плоскостях скольжения. Во второй стадии деформация увеличивается, и материал начинает упрочняться – происходит скольжение дислокаций в двух и более плоскостях. Напряжение в металле в этой стадии увеличивается. Увеличение продолжается до тех пор, пока скольжение не начинает переходить с одной плоскости в другую. Дислокации перестраиваются, образуя новые границы зерен и уменьшая плотность дислокаций. После достижения определенной степени деформации металл может начать терять прочность из-за образования дефектов, микротрещин и других повреждений внутри материала. Наконец, при достижении критической степени деформации металл может разрушиться, что приведет к окончательному отказу материала.

Одним из методов контроля пластической деформации является термоэлектрический метод.

Рассмотрим зависимость плотности дислокаций N от величины деформации ε , сформулированной Акуловым [54]:

$$\frac{dN}{d\varepsilon} = \beta_0 + \alpha_0 N + \gamma_0 N^2, \quad (1.9)$$

где β_0 , α_0 , γ_0 – постоянные, пропорциональные соответственно вероятности спонтанного рождения дислокаций, вероятности рождения дислокаций при их взаимодействии и вероятности гибели дислокаций [55].

Проинтегрируем обе части уравнения (1.9):

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{\beta_0 + \alpha_0 N + \gamma_0 N^2} = \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} d\varepsilon, \quad (1.10)$$

где N_0 – начальная плотность дислокаций, которой соответствует некоторая условная деформация ε_0 :

$$\varepsilon - \varepsilon_0 = \frac{1}{\sqrt{4\beta_0\gamma_0 + \alpha_0^2}} \ln \frac{-2\gamma_0 N + \alpha_0 - \sqrt{4\beta_0\gamma_0 + \alpha_0^2}}{-2\gamma_0 N + \alpha_0 + \sqrt{4\beta_0\gamma_0 + \alpha_0^2}} \cdot \frac{2\gamma_0 N + \alpha_0 + \sqrt{4\beta_0\gamma_0 + \alpha_0^2}}{2\gamma_0 N + \alpha_0 - \sqrt{4\beta_0\gamma_0 + \alpha_0^2}}. \quad (1.11)$$

Перепишем выражение (1.11) в следующем виде:

$$e^{(\varepsilon - \varepsilon_0)k} = \frac{-2\gamma_0 N + K_1}{-2\gamma_0 N + K_2} \cdot K_3, \quad (1.12)$$

где

$$\begin{aligned} K &= \sqrt{4\beta_0\gamma_0 + \alpha_0^2}; \\ K_1 &= \alpha_0 - \sqrt{4\beta_0\gamma_0 + \alpha_0^2}; \\ K_2 &= \alpha_0 + \sqrt{4\beta_0\gamma_0 + \alpha_0^2}; \\ K_3 &= \frac{2\gamma_0 N + K_1}{2\gamma_0 N + K_2}. \end{aligned} \quad (1.13)$$

Уравнения (1.10) – (1.12) являются общими, но для металлов с малой энергией дефектов упаковки (например, медь, золото, серебро), вероятностью спонтанного рождения дислокаций β_0 можно пренебречь [56]. Тогда уравнение (1.10) примет вид:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{\alpha_0 N - \gamma_0 N^2} = \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} d\varepsilon. \quad (1.14)$$

После интегрирования получим:

$$N = \frac{N_m}{1 + \alpha_1 e^{-\alpha_0(\varepsilon - \varepsilon_0)}}, \quad (1.15)$$

где $N_m = \alpha/\gamma$; $\alpha_1 = \frac{N_m}{N_0} - 1$. При $\varepsilon = \varepsilon_0$ выражение (1.15) примет вид:

$$N = \frac{N_m}{1 + \alpha_1} = N_0. \quad (1.16)$$

При пластической деформации изменение термоЭДС определяется изменением плотности дислокаций:

$$\Delta E = \omega \cdot (N - N_0), \quad (1.17)$$

где ω – коэффициент пропорциональности.

Подставим в (1.17) выражения (1.15) и (1.16) [3]:

$$\Delta E = \frac{N_m \omega \cdot [1 - e^{-\alpha_0(\varepsilon - \varepsilon_0)}] \cdot \alpha_1}{[1 + \alpha_1 e^{-\alpha_0(\varepsilon - \varepsilon_0)}] \cdot (1 + \alpha_1)}. \quad (1.18)$$

Полученное выражение описывает зависимость термоЭДС от наличия деформации в металле, но в этом выражении не учитывается влияние температуры испытуемого образца на изменение термоЭДС за счет пластической деформации.

1.2 Термоэлектрический метод контроля теплового сопротивления двух соприкасающихся поверхностей

Нормальный тепловой режим тепловыделяющих электронных компонентов обеспечивается путем их установки на радиатор охлаждения. Их перегрев приводит к изменению их электрических и тепловых характеристик, что сказывается на производительности. Также повышенная температура значительно сокращает срок службы полупроводниковых приборов из-за повреждений, появляющихся при перегреве микросхем, транзисторов, диодов и т.д. Вследствие чего ухудшается качество работы, функциональность и точность прибора. Перегрев часто сопровождается увеличением энергопотребления и появляется риск возгорания или взрыва прибора [57, 58]. Для предотвращения перегрева полупроводниковых приборов используют радиаторы, тепловые трубки, вентиляторы или другие системы охлаждения для эффективного отвода тепла.

Одним из наиболее тепловыделяющих электронных компонентов являются процессоры персональных компьютеров. Например, процессор Intel Core i9-11900KF при полной загрузке ядер потребляет 125 Вт. При площади поверхности корпуса 14 см² он не способен рассеивать такую мощность без специальной системы охлаждения [59]. Рекомендуемая производителем система охлаждения PCG 2019A состоит из радиатора, тепловых трубок, основания и вентилятора. Процессор крепится к радиатору через медные тепловые трубки (рис.1.6) [60]. Медное основание радиатора прижимной скобой крепиться непосредственно к крышке процессора.



Рисунок 1.6 – Радиатор с системой охлаждения

Если допустить ошибку при монтаже, системы охлаждения могут неплотно прилегать к крышке процессора и, соответственно, не смогут обеспечивать достаточный уровень охлаждения. Это может привести к падению производительности CPU и постоянной его работе на повышенных температурах, что плохо сказывается на его ресурсе. Поэтому между радиатором и процессором используют теплопроводящую пасту (термоинтерфейс), задачей которой является улучшение теплопередачи между двумя поверхностями. Таким образом, тепловая схема "радиатор-термоинтерфейс-корпус" обеспечивает эффективный отвод тепла от электронных компонентов к окружающей среде, что позволяет предотвращать перегрев и обеспечивать нормальную работу устройств [61-67].

Доля теплового сопротивления, обеспечиваемого термоинтерфейсом в общем тепловом сопротивлении R_{thcs} тепловой схемы прибора, находится в диапазоне от 20 % до 65 %.

Тепловое сопротивление между корпусом и радиатором в значительной степени зависит от толщины слоя термоинтерфейса (рисунок 1.7) [68-70]. Обычно, чем тоньше слой термоинтерфейса, тем лучше будет теплопроводность между корпусом и радиатором. Толстый слой термоинтерфейса может создавать

дополнительное тепловое сопротивление, что приведет к более высокой температуре работы компонентов. Однако слишком тонкий слой термоинтерфейса также может привести к проблемам. Если слой слишком тонкий, то не все микронеровности заполнятся термоинтерфейсом и останутся пузырьки воздуха, что приведет к ухудшению теплоотвода. Обычно рекомендуется выбирать оптимальную толщину с учетом материалов радиатора и корпуса, а также особенностей конструкции [71-75]. В каждом конкретном случае рекомендуется обращаться к рекомендациям производителя процессоров по выбору радиатора и нанесению теплопроводящего компаунда [76].

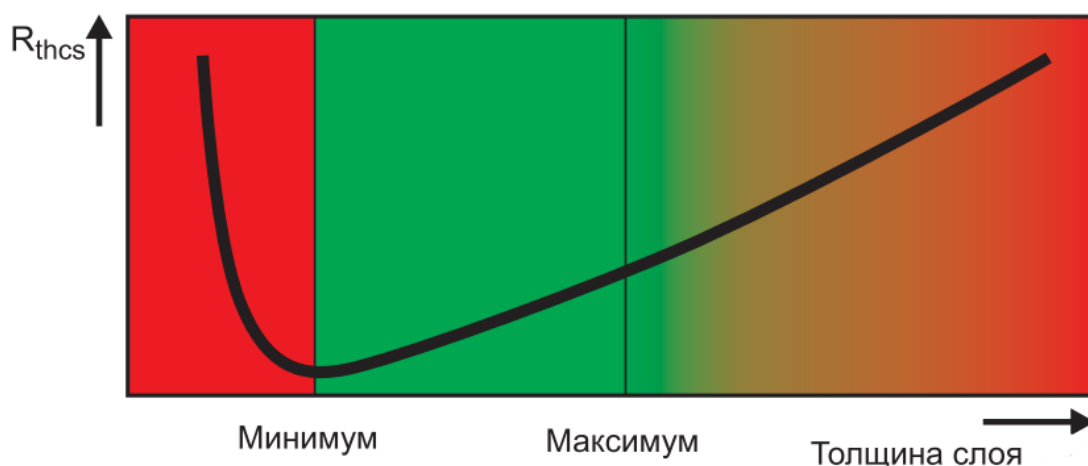


Рисунок 1.7 – Зависимость теплового сопротивления корпус-радиатор от толщины слоя термоинтерфейса

При выборе термопасты для нанесения на поверхность процессора необходимо учитывать следующие параметры:

1. Теплопроводность. Чем выше коэффициент теплопроводности у термопасты, тем эффективнее она будет передавать тепло от процессора к радиатору.
2. Вязкость. Термопаста должна иметь оптимальную вязкость, чтобы обеспечить легкое и равномерное нанесение. Если компаунд слишком густой, его трудно распределить тонким слоем и заполнить все микротрещины и неровности. С другой стороны, если компаунд слишком жидкий, он может неравномерно

распределиться или вытечь. Идеальная вязкость считается в пределах 160–450 Па/с (паскаль-секунда), что позволяет образовывать прочное соединение с поверхностью процессора. Если поверхность процессора гладкая, может потребоваться термопаста с более высокой адгезией.

В смартфонах производители сами выбирают, каким образом будет осуществляться отвод тепла от процессора и других компонентов (модем, оперативная память и т.д.). В большинстве смартфонов система охлаждения представляет собой тепловую медную трубку, припаянную к медной пластине, которая крепится через термопасту к процессору (рисунок 1.8). Задача такой конструкции - перенести тепло из более горячей точки смартфона в более холодную [77-79].

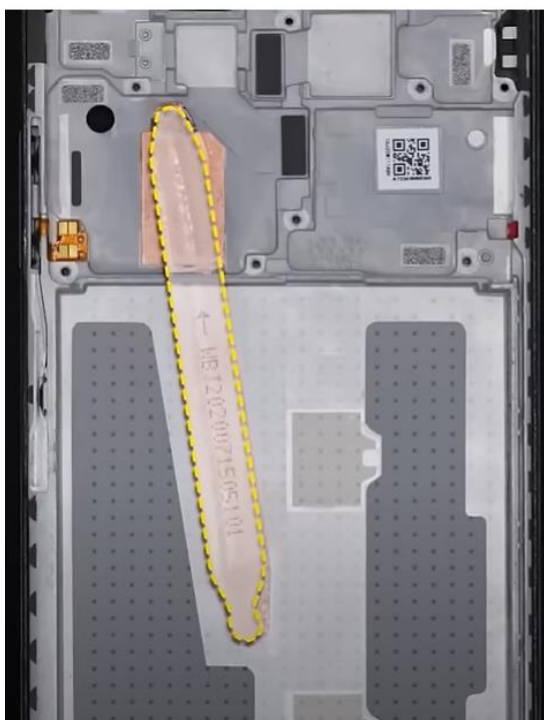


Рисунок 1.8 – Медная пластина для отвода тепла от процессора в смартфоне

Выбор и нанесение компаунда на теплоотводящую поверхность осуществляется самим производителем, который может допустить ошибки в процессе нанесения. Контроль качества нанесения и теплофизических параметров термоинтерфеса осуществляется производителем на выборочных элементах. Контроль проводится либо вручную [80]: специалисты визуально оценивают

равномерность и плотность нанесения термоинтерфейса на поверхность процессора, либо косвенными методами [81-82]: такими как механический толщиномер [69, 76], взвешивание на прецизионных весах [68], использование трафарета [83] с передаточной схемой [84-87], стандартный метод контроля теплового сопротивления [88-90], модуляционный метод [91-94], тепловизоры и инфракрасная термография [82], термоэлектрический метод неразрушающего контроля [60]. Среди рассмотренных способов только термоэлектрический метод способен контролировать тепловое сопротивление системы корпус тепловыделяющего элемента-термоинтерфейс-радиатор охлаждения после сборки системы.

Тепловое сопротивление (R_{th}) определяется как отношение разности температуры корпуса полупроводникового прибора и температуры радиатора, к тепловому потоку между этими элементами: [95-97]:

$$R_{th} = \Delta T / P, \quad (1.19)$$

где R_{th} – тепловое сопротивление ($^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$);

ΔT – разность температур ($^{\circ}\text{C}$);

P – тепловой поток между двумя элементами (Вт).

Для более точного определения теплового сопротивления учитываются также параметры, такие как толщина термоинтерфейсна, его теплопроводность и площадь контакта. Тепловое сопротивление может быть рассчитано по следующей формуле:

$$R_{th} = d / (k \cdot S), \quad (1.20)$$

где d – толщина термоинтерфейсного материала (м);

k – коэффициент теплопроводности материала ($\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$);

S – площадь контакта (м^2).

Чем ниже значение термического сопротивления, тем лучше материал или система охлаждения способна передавать тепло и охлаждать источник. Наименьшее тепловое сопротивление между радиатором охлаждения и тепловыделяющим электронным компонентом достигается при таком количестве термоинтерфейса, при котором заполняются все воздушные полости между

радиатором охлаждения и тепловыделяющим электронным компонентом без образования излишков (рисунок 1.19).

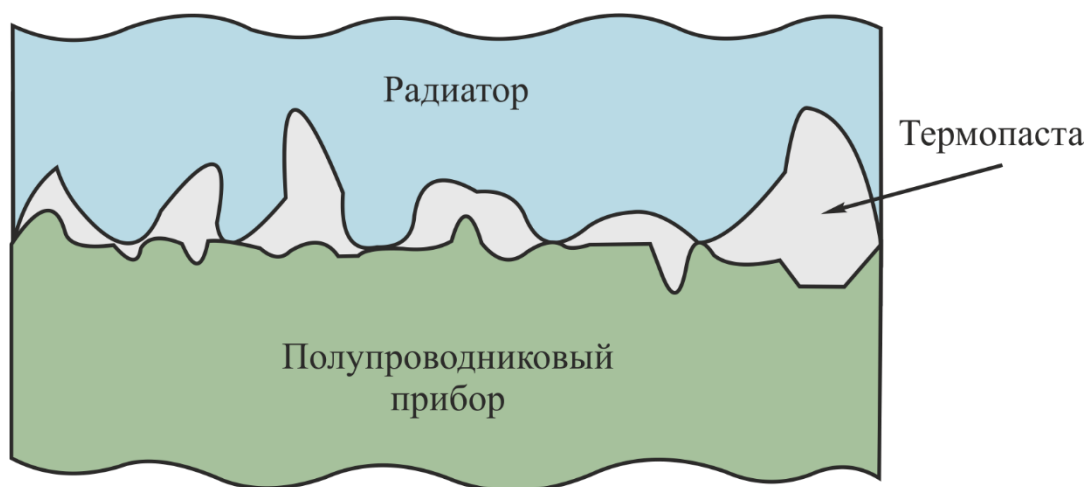


Рисунок 1.9 – Пример заполнения воздушных полостей на границе радиатора охлаждения с тепловыделяющим электронным компонентом

При соединении двух металлов с разным химическим составом из-за разности носителей заряда на внешнем уровне, и при наличии разности температур холодного и горячего спаев в замкнутом контуре возникает термоЭДС [98-102]. Т.к. корпуса полупроводниковых приборов и радиаторов покрыты или изготовлены из токопроводящих материалов, то в местах соприкосновений появится термоЭДС [55, 103-104]. Согласно модели Больцмана термоЭДС является функцией отношения концентрации частиц в двух металлах и их температуры:

$$E = (T_2 - T_1) \frac{k}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}, \quad (1.21)$$

где $\alpha = \frac{k}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}$ – коэффициент Зеебека,

T_2 – температура радиатора;

T_1 – температура корпуса прибора;

n_2 – концентрация носителей материала радиатора;

n_1 – концентрация носителей материала корпуса.

Из формулы (1.21) выразим ΔT и подставив в формулу (1.19), получим:

$$R_{th} = \frac{E}{\alpha \cdot P}. \quad (1.22)$$

Тепловой поток мощности P можно найти из закона Фурье [105]:

$$P = K \cdot S \cdot \Delta T, \quad (1.23)$$

где K – коэффициент теплопередачи материала;

S – площадь соприкасаемых поверхностей прибора и радиатора.

Коэффициент теплопередачи K зависит от нескольких факторов, которые определяют, насколько эффективно конструкция пропускает тепло:

- материалы с высокой теплопроводностью (например, металлы) передают тепло более эффективно, чем материалы с низкой теплопроводностью (например, древесина, пенопласт);

- более толстые материалы имеют большее термическое сопротивление, снижая коэффициент теплопередачи. Увеличение толщины слоя материала снижает теплопередачу;

- многослойные конструкции, обладают более высоким общим термическим сопротивлением, чем однослойные, следовательно, у них коэффициент теплопередачи ниже. Воздушные зазоры между слоями также влияют на термическое сопротивление.

Коэффициент передачи для однослойной плоской стенки [106]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{h}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (1.24)$$

где h – толщина термоинтерфейса;

λ – коэффициент теплопроводности термоинтерфейса.

$\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи от радиатора к термоинтерфейсу;

$\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи от термоинтерфейса к корпусу полупроводникового прибора [60].

Коэффициент передачи для многослойной конструкции [107]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (1.25)$$

Подставим формулу (1.23) и коэффициент теплопередачи K в формулу (1.22), получим:

$$R_{th} = \frac{E \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{h}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}{\alpha \cdot S \cdot \Delta T}. \quad (1.26)$$

Тепловое сопротивление нескольких соединённых тел с разной теплопроводностью с учётом формулы (1.25) определяется как:

$$R_{th} = \frac{E \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}{\alpha \cdot S \cdot \Delta T} \quad (1.27)$$

Полученные формулы отображают взаимосвязь теплового сопротивления между радиатором охлаждения и тепловыделяющим электронным компонентом, и толщиной термоинтерфейса, величиной термоЭДС, удельной теплопроводности термоинтерфейса, материалов радиатора и тепловыделяющего электронного компонента и разницей температуры на границе соприкосновения [108].

1.3 Термoeлектрический метод контроля контактного соединения

Системы электроснабжения в России представляют собой сложную и разветвлённую инфраструктуру, обеспечивающую электроэнергией как население, так и промышленность. Электрическая энергия передаётся по высоковольтным линиям электропередачи (ЛЭП) на большие расстояния, что приводит к необходимости использования соединений. Для соединения проводов друг с другом используют клеммные колодки, зажимы болтового типа, скрутку, гильзы и муфты – такие соединения относятся к разъёмным. Для более прочного соединения используют неразъёмные соединения, такие как сварка, опрессовка, пайка, клеевые соединения. Окисление, загрязнение или механический износ контактных

поверхностей может увеличить переходное сопротивление. Недостаточное затягивание болтового соединения также приводит к увеличению переходного сопротивления, из-за малой площади соприкосновения проводников (рисунок 1.10, а). Переходное сопротивление определяется по формуле:

$$R_n = \frac{k_n}{0,102 \cdot F^n}, \quad (1.28)$$

где k_n – коэффициент, зависящий от материалов и условий;

F – сила прижатия контактов;

n – показатель степени, показывающий число точек соприкосновения (для точечного – $n = 0,5$; для линейного – $n = 0,5 \dots 0,7$; для плоскостного – $n = 0,7 \dots 1$).

Это уравнение показывает, что переходное сопротивление обратно пропорционально некоторой степени силы прижатия. Чем больше сила прижатия, тем меньше переходное сопротивление (рисунок 1.10, б). На рисунке 1.10, в показана зависимость переходного сопротивления от силы прижатия.

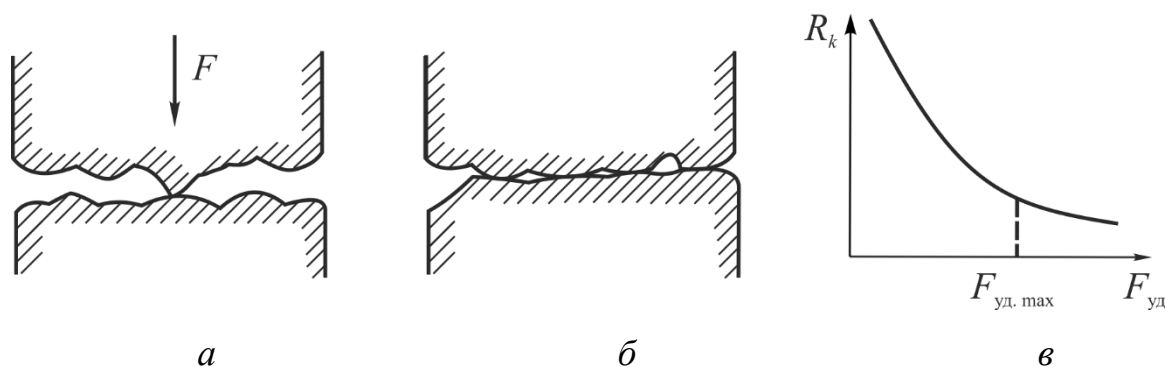


Рисунок 1.10 – Места соприкосновения двух проводников в зависимость от усилия прижима (а) и (б), зависимость переходного сопротивления от усилия прижатия (в)

Если переходное сопротивление становится достаточно высоким (более 0,05 Ом), это может привести к значительному нагреву контактов при прохождении тока от одного проводника к другому и, как следствие, к воспламенению (рисунок 1.11) [109, 110].



Рисунок 1.11 –Последствия воспламенения из-за большого переходного сопротивления при соединении проводников методом скрутки

Согласно анализу ВНИИПО МЧС России, за 2023 год вследствие пожаров на объектах жилого сектора погибло 7100 человек, причинен огромный материальный урон, который можно восполнить в отличие от жизни человека. Наиболее часто пожары происходили по причинам, связанным с нарушением правил устройства и эксплуатации электрооборудования, всего зафиксировано 60877 случая, при которых погибло 2251 и пострадало 9558 человек [111]. С каждым годом увеличивается количество пожаров от неисправности электрооборудования, только в жилом секторе, в 2019 году произошло 49638 пожаров, а в 2021 году количество пожаров уже составило 57390. Обнаружить большое переходное сопротивление (БПС) контактов можно с помощью мультиметра [112], микроомметра или контактомера. Но измерение сопротивления приведенными устройствами проводится вручную и при этом необходимо иметь доступ к самому контакту. Для того чтобы обнаружить БПС вовремя, электротехническому персоналу необходимо проводить контроль соединений контактов ежедневно в каждом помещении, что на сегодняшний день не представляется возможным из-за отсутствия такого количества персонала. В работе [113] было предложено использовать термоэлектрический метод для обнаружения места контактов электрической сети с высоким контактным переходным сопротивлением ($>0,05$ Ом). При протекании электрического тока в месте контакта проводников выделится тепло по закону Джоуля-Ленца [114, 115]:

$$dQ = P \cdot dt = I^2 \cdot R \cdot dt, \quad (1.29)$$

где dQ – количество выделившегося тепла;

P – мощность потерь, переходящих в тепло;

I – сила тока, протекающая через проводник за время t ;

R – величина контактного сопротивления.

Часть тепла Q_1 пойдет на нагрев проводника, а другая часть тепла Q_2 будет отводиться с поверхности проводника в окружающую среду:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2, \quad (1.30)$$

$$dQ_1 = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad (1.31)$$

$$dQ_2 = K \cdot S \cdot (T - T_0) \cdot dt, \quad (1.32)$$

где m – вес контакта;

c – удельная теплоемкость материала контакта;

T – температура контакта;

T_0 – температура окружающей среды;

K – общий коэффициент теплоотдачи, учитывающий все ее виды;

S – поверхность охлаждения контакта.

Подстав в формулу (1.30) формулы (1.29), (1.31), (1.32), получим:

$$I^2 \cdot R \cdot dt = m \cdot c \cdot \Delta T + K \cdot S \cdot \Delta T \cdot dt. \quad (1.33)$$

Выразим из формулы (1.33) величину контактного сопротивления:

$$R = \frac{\Delta T(m \cdot c + K \cdot S \cdot dt)}{I_{изм}^2 \cdot dt}. \quad (1.34)$$

Полученное значение R используется для расчета изменения температуры при номинальном токе через контактное сопротивление:

$$\Delta T = \frac{R \cdot I_{ном}^2 \cdot dt}{m \cdot c + K \cdot S \cdot dt}. \quad (1.35)$$

Выделяющееся тепло на контактном сопротивлении будет разогревать контакт, и в соответствии с эффектом Зеебека в цепи появится термоЭДС в виде постоянной составляющей напряжения. Его значение будет пропорционально разности температур разогретого контакта и окружающей средой. Измеряя эту

постоянную составляющую напряжения в сети электроснабжения, можно судить о состоянии контактного соединения в действующей сети переменного тока, т.е. без отключения потребителей [116].

Предложенный подход можно использовать для предупреждения возгорания элементов сети электроснабжения и тем самым обеспечить защиту людей, жилых и производственных помещений от воздействия пожара, что позволит сохранить не только материальные ресурсы, но и жизнь и здоровье граждан [113].

1.4 Термоэлектрический метод контроля качества токарной обработки и сварки металлов

Многие современные материалы, такие как алюминиевые сплавы, титан и некоторые высокопрочные стали, трудно свариваются традиционными методами (например, дуговой сваркой) из-за их склонности к образованию трещин, пор и других дефектов. В 1991 году Технологическим институтом сварки в Великобритании была разработана новая технология соединения металлических деталей без расплавления материала, получившая название - сварка трением с перемешиванием (Friction Stir Welding, FSW) [117-122]. С тех пор новая технология нашла широкое применение в различных отраслях, включая авиастроение, автомобилестроение и судостроение. Сварка трением с перемешиванием обладала рядом преимуществ перед другими методами сварки:

1. FSW происходит при температуре ниже точки плавления материала, что минимизирует термическое воздействие на сварные соединения и снижает риск термического повреждения.

2. Высокая прочность шва, т.к. сварка трением способствует образованию более однородной структуры металла.

3. Поскольку в процессе FSW нет расплавленного металла, снижается вероятность образования трещин, пор и других дефектов, которые могут возникать при дуговой сварке.

4. Низкая деформация свариваемых изделий.

5. FSW может использоваться для сварки различных алюминиевых сплавов и других трудно свариваемых материалов.

6. Улучшенная коррозионная стойкость, поскольку процесс происходит без расплавления, уменьшается вероятность окисления металла в зоне сварки.

7. Автоматизация процесса. Процесс FSW хорошо подходит для автоматизации, что позволит исключить влияние человеческого фактора.

Процесс сварки трением с перемешиванием показан на рисунке 1.12 и заключается в следующем: сварочный инструмент, который состоит из стержня с конусообразным концом, начинает вращаться, и далее этот инструмент помещается в контакт с соединяемыми деталями. Когда инструмент вращается и перемещается вдоль шва, трение между инструментом и материалом создает тепло. Это тепло нагревает металл до пластичного состояния, но не до температуры плавления. Возникающее в результате неравномерное рассеивание тепла вдоль компонентов во время сварки влияет на рабочую температуру и, следовательно, на качество сварного шва. Затем сварочный инструмент перемещается вдоль шва, перемешивая пластичный металл и создавая соединение между деталями [123-129]. В процессе перемешивания происходит выравнивание микроструктуры и улучшение механических свойств соединения. После завершения перемещения инструмента соединение охлаждается, что приводит к образованию прочного сварного шва.

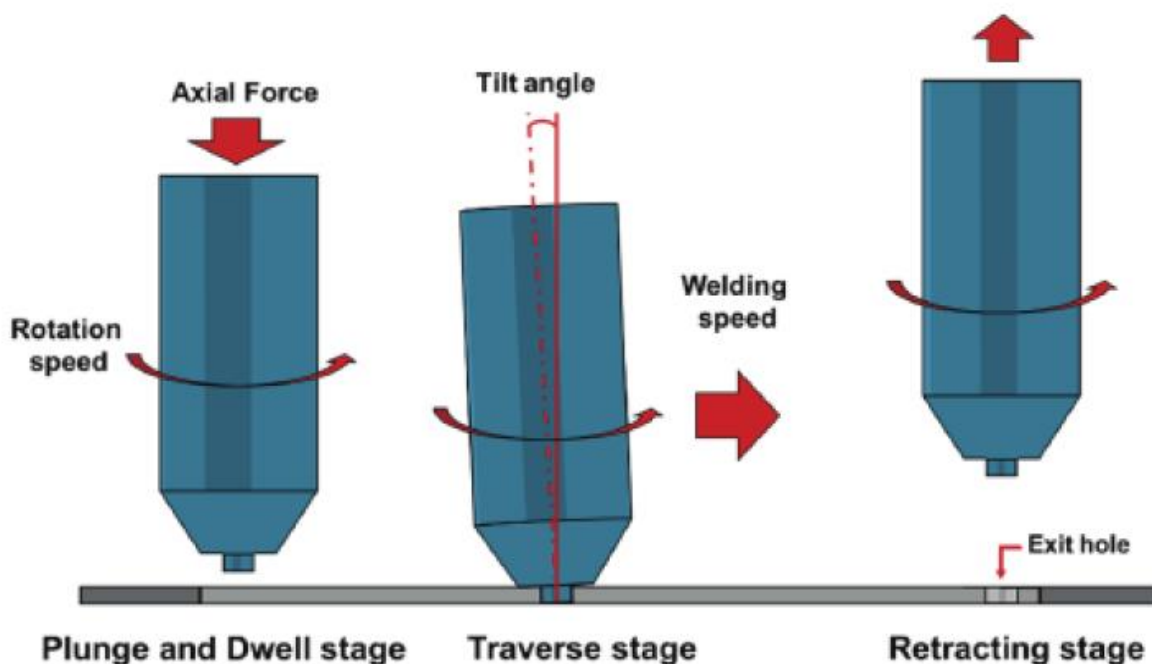


Рисунок 1.12 – Схема процесса сварки трением с перемешиванием, включая различные стадии сварки и основные параметры сварки [118]

Ключевой проблемой, которую необходимо учитывать при сварке трением с перемешиванием, является регулировка усилия нажатия на сварочный инструмент для предотвращения перегрева материала свариваемых деталей. Если происходит перегрев, повышение температуры делает материал мягче, до почти жидкого состояния; он становится менее устойчивым к приложенному высокому усилию нажатия, и, как следствие, сварочный инструмент будет погружаться в него всё глубже и глубже (рисунок 1.13). Такой процесс сварки необходимо прерывать, чтобы избежать дальнейшего повреждения свариваемых деталей, опорной планки и самого оборудования [130-132].



Рисунок 1.13 – Результат приложенного высокого усилия нажатия на свариваемые детали

Чтобы избежать такой проблемы, необходимо контролировать температуру в зоне сварки, но её измерение является сложной задачей. Сильная деформация материала в зоне перемешивания делает эту область недоступной для многих методов измерения температуры.

Встраивание термопар в заготовку для измерения температуры во время сварки трением с перемешиванием было одним из наиболее распространенных методов, встречающихся в литературе (рисунок 1.14) [123, 133-136].

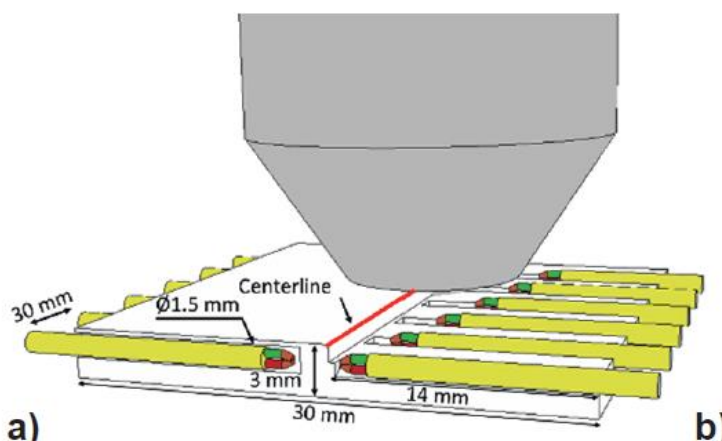


Рисунок 1.14 – Термопары, встроенные в заготовку [118]

При таком размещении термопары можно повредить или сместить её расположение при прохождении инструмента, что в свою очередь повлияет на точность измерения температуры. Такой метод нельзя использовать для контроля сварных швов на производстве, поскольку термопары нельзя снять, не повредив

свариваемую деталь. Другой метод измерения температуры основан на встраивании термопары в сам сварочный инструмент [43]. Термопару обычно вставляют через просверленное отверстие в инструменте и располагают как можно ближе к границе раздела инструмент - заготовка, т.е. на небольшом расстоянии от поверхности инструмента (рисунок 1.15).

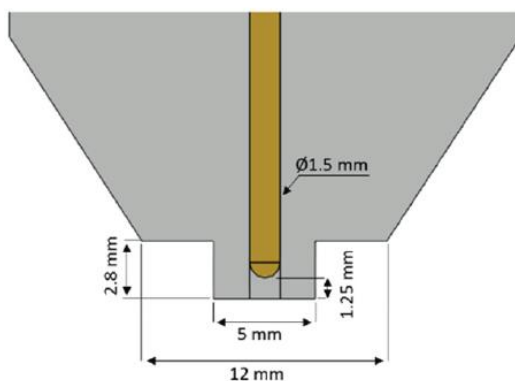


Рисунок 1.15 – Расположение термопары, встроенной в инструменты [118]

Как и в предыдущем методе, использование термопары вблизи границы раздела инструмент - заготовка также увеличивает риск выхода термопары из строя. Результаты измерений будут сильно зависеть от расположения термопары на инструменте, т.к. распределение температуры вдоль поверхности раздела инструмент - заготовка значительно различается [137]. Из-за небольшой площади инструмента просверливание отверстия без повреждения самого инструмента и встраивания в него термопары займёт много времени. А в случае выхода из строя термопары, её замена может привести к простоям производства.

В следующем методе было предложено использовать инструмент и обрабатываемую деталь в качестве компонентов термопары [138]. Принцип измерения температуры с помощью термопары, образованной инструментом и деталью (Tool-Workpiece Thermocouple, TWT), показан на рисунке 1.16.

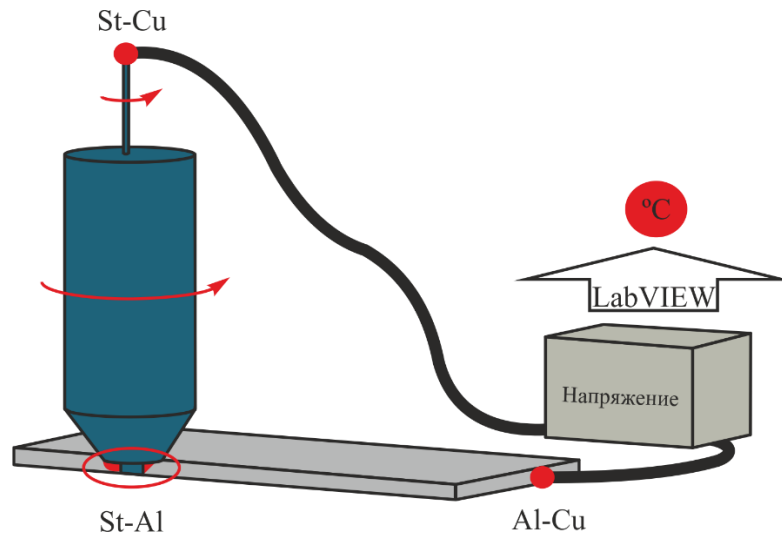


Рисунок 1.16 – Схема измерения температуры термопарой, образованной инструментом и обрабатываемой деталью [43]

Метод TWT имеет тот же принцип работы, что и термопара, где материал инструмента, обычно сталь (St) и алюминиевая заготовка (Al), используются в качестве двух разных проводников, необходимых для измерения, в качестве удлинительных проводов до вольтметра используются медные провода [130]. "Горячим" спаем выступает граница раздела сварных швов между алюминиевой заготовкой и стальным инструментом, а "холодным" спаем – соединения медного провода с инструментом и обрабатываемой деталью.

Величину термоЭДС можно определить из выражения:

$$\Delta V = \int_{Ref}^{WP} S_{Cu}(T)dt + \int_{WP}^{Weld} S_{Al}(T)dt + \int_{Weld}^{Tool} S_{QRO}(T)dt + \int_{Tool}^{Ref} S_{Cu}(T)dt. \quad (1.36)$$

где S_{Cu} , S_{Al} , S_{QRO} – коэффициенты Зеебека для трех используемых материалов.

Вычислим интеграл формулы (1.36), получим:

$$\Delta V = S_{Cu}(T_{WP} - T_{Ref}) + S_{Al}(T_{Weld} - T_{WP}) + S_{QRO}(T_{Tool} - T_{Weld}) + S_{Cu}(T_{Ref} - T_{Tool}), \quad (1.37)$$

где T_{wp} – температура детали;

T_{ref} – эталонная температура.

T_{weld} температура в зоне сварки

T_{tool} – температура инструмента

Если холодные концы поддерживать при одной и той же известной эталонной температуре, измеренное напряжение будет соответствовать разнице температур между горячим и холодным концами [139]:

$$\Delta V = S_{Al}(T_{Weld} - T_{Ref}) + S_{QRO}(T_{Ref} - T_{Weld}). \quad (1.38)$$

Сила термоэлектрического сигнала зависит от разницы между термоэлектрическими коэффициентами инструмента и обрабатываемой детали. Для простоты используют обозначение $S_{TWT} = S_{Al} - S_{QRO}$. Таким образом, уравнение (1.38) примет вид:

$$\Delta V = S_{TWT}(T_{Weld} - T_{Ref}). \quad (1.39)$$

По мере распространения тепла из зоны сварки точки соединения пластины и инструмента будут нагреваться неравномерно. Обе точки будут индуцировать другую термопару с медным проводом, влияя на измеряемое напряжение, что необходимо учитывать в уравнении (1.39). Из уравнения (1.39) выразим температуру на горячем конце, получим [140]:

$$T_{Weld} = T_{Ref} + \frac{\Delta V}{S_{TWT}} - S_{CuAl}(T_{WP} - T_{Ref}) + S_{QROCu}(T_{Tool} - T_{Ref}). \quad (1.40)$$

В отличие от встроенных термопар, описанных ранее, метод TWT не требует отверстия в инструменте, что делает его более привлекательным для промышленного контроля температуры благодаря его простой настройке и низкой стоимости внедрения [138]. Этот метод обеспечивает быстрые и репрезентативные данные о температуре, что делает его пригодным для управления процессом с обратной связью [141].

1.5 Термоэлектрический метод контроля степени наводораживания металлов

Титан и его сплавы имеют широкое применения благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая прочность, легкость, коррозионная стойкость и биосовместимость. Титан используется в производстве деталей автомобилей и компонентов самолетов и ракет, таких как лопатки турбин, корпуса, где важны прочность и легкость. Благодаря своей биосовместимости, титан

используется для производства различных медицинских имплантатов, включая суставные протезы, зубные имплантаты и другие хирургические инструменты. В нефтегазовой отрасли и в ядерной энергетике для производства компонентов используют также титан из-за его долговечности и устойчивости к коррозии. Водород, как самый легкий и распространенный элемент в мире, играет значительную роль в металлургии и материаловедении. Накопление водорода в металлических материалах, известное как наводороживание, может оказать глубокое влияние на их физические и механические свойства. Этот процесс может происходить по нескольким причинам:

1. Водород может проникать в металлическую решетку через дефекты кристаллической структуры, такие как дислокации и поры. Процесс диффузии водорода в металлах зависит от температуры, давления и структуры материала. При повышении температуры скорость диффузии увеличивается, что приводит к более быстрому накоплению водорода.

2. Водород может реагировать с некоторыми металлами, образуя гидриды. Эти соединения имеют различные кристаллические структуры и свойства, отличные от исходного металла. Например, титан образует стабильные гидриды (TiH_2 и TiH), которые существенно изменяют его механические свойства.

Негативными последствиями наводороживания являются увеличение хрупкости металлов и образование трещин, что приводит к снижению прочности и увеличению вероятности разрушения при механических нагрузках. При взаимодействии водорода с другими элементами в сплаве ухудшается коррозионная стойкость металла.

Одним из методов, позволяющих исследовать и количественно оценить степень наводороживания, является термоэлектрический метод. Данный метод основан на измерении термоЭДС, возникающей в результате диффузии водорода в металлическую решетку. В работах [142-144] авторы исследуют зависимость термоЭДС от концентрации водорода и его распределения в титане. Были изготовлены образцы технически чистого титанового сплава, которые подвергались контролируемым условиям наводороживания (например, в среде с

высокой концентрацией водорода или при воздействии электролита) [145]. Одну часть пластины нагревали, а вторую оставляли холодной. При наличии температурного градиента в металле возникает термоЭДС. Водород, проникая в структуру металла, изменяет его электрохимические и физические свойства, включая электропроводность и теплопроводность. Эти изменения приводят к изменению величины термоЭДС, что позволяет использовать этот параметр для оценки степени наводороживания. Электросопротивление, отнесенное к единице плотности дислокаций, можно рассчитать по формуле:

$$\Delta\rho_d / N_d = \frac{3\pi^2\hbar Q}{e^2 k_F^2}, \quad (1.41)$$

где Q — транспортное сечение рассеяния электронов на дефекте;

k_F — волновой вектор на поверхности Ферми;

ρ — удельное сопротивление металла;

e — заряд электрона [146].

ТермоЭДС измерялось с помощью термоэлектрического прибора Т-ЗСП, показанного на рисунке 1.17 с усиленным прижатием электродов к образцу.



Рисунок 1.17 – Внешний вид термоэлектрического прибора Т-ЗСП

Изменение величины термоЭДС сравнивают с эталонными значениями для данного металла без водорода. Увеличение или уменьшение термоЭДС относительно эталона указывает на присутствие водорода в металле. Чем больше

изменение термоЭДС, тем выше концентрация водорода. ТермоЭДС вычисляется по формуле:

$$E = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T. \quad (1.42)$$

Приращение абсолютного коэффициента термоЭДС равно:

$$\Delta S = S_0 \frac{\Delta \rho_d}{\rho} \left(\frac{\Delta x}{x} - 1 \right), \quad (1.43)$$

где

$$\rho = \rho_0 + \Delta \rho_d;$$

$$x = -\frac{k_F}{2} \left(\frac{d \ln}{dk} \rho_0 \right)_{k=k_F};$$

$$\Delta x = -\frac{k_F}{2} \left(\frac{d \ln}{dk} \Delta \rho_d \right)_{k=k_F} = -\frac{k_F}{2Q} \left(\frac{dQ}{dk} \right)_{k=k_F} - 1.$$

Подставим формулу (1.41) в формулу (1.43), получим изменение величины термоЭДС:

$$\frac{\Delta S}{S_0} = \frac{3\pi^2 \hbar Q}{e^2 k_F^2 \rho} \left(\frac{\Delta x}{x} - 1 \right) \quad (1.44)$$

По полученным значениям авторы построили зависимость термоЭДС от концентрации водорода в титане (рисунок 1.18). На рисунке 1.18 виден перегиб зависимости ЭДС от концентрации водорода в титане, обусловленный переходом титана из одного структурного состояния в другое. Дальнейшее увеличение концентрации водорода не изменяет ЭДС. Скачок ЭДС авторы объясняют образованием химического соединения водорода с титаном.

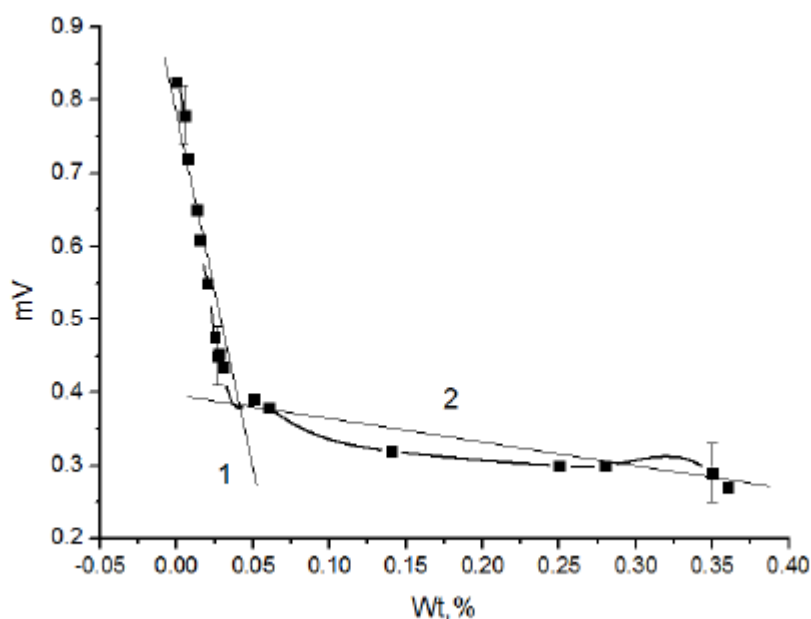


Рисунок 1.18 – Зависимость термоЭДС от концентрации водорода в металле

Исследование показало эффективность метода измерения термоЭДС для определения неоднородностей в распределении водорода в титане. Кроме того, было обнаружено, что наибольшие изменения термоЭДС происходят в областях с высокой концентрацией водорода, что указывает на возможность использования этого метода для выявления зон повышенной склонности к водородному охрупчиванию.

1.6 Термоэлектрический метод контроля в медицине

Термоэлектрический метод нашел широкое применение не только в промышленности, но и в медицине, и представляет собой перспективное направление, использующее термоэлектрические эффекты для диагностики и лечения различных заболеваний [147-149].

Здоровый зуб обладает определенной температурой, которая отличается от температуры окружающей среды. При наличии воспалительных процессов в пульпе или периодонте (тканях вокруг зуба) температура зуба может изменяться – повышаться при воспалении или понижаться при некрозе (отмирании) пульпы. При

воздействии холода или тепла здоровый зуб будет реагировать определенным образом. Патологические процессы в пульпе или околозубных тканях изменять эту реакцию. В работах [150, 151] авторы предложили использовать термоэлектрический метод для температурной диагностики состояния зубов человека.

Термоэлектрические ДНК-биосенсоры на платформе Lab-on-a-chip представляют собой инновационное решение для безметкового обнаружения нуклеиновых кислот (рисунок 1.19) [152]. Они обладают высоким потенциалом для применения в различных областях медицины благодаря своей чувствительности, скорости и простоте использования.

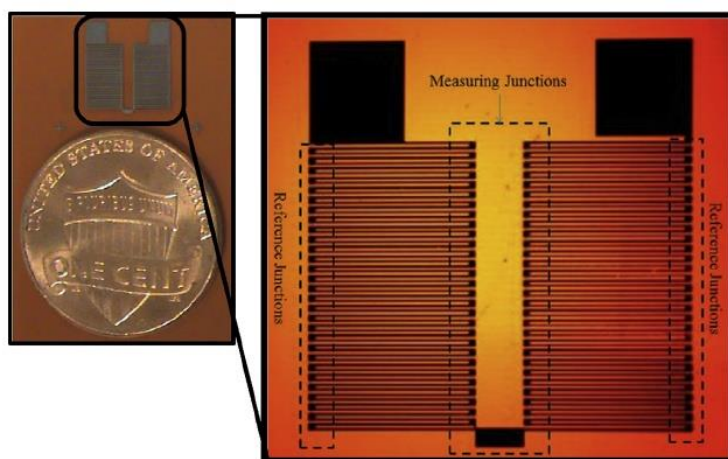


Рисунок 1.19 – Тонкопленочная термобатарея из сурьмы/висмута, изготовленная на полиамидной подложке

В основе работы биосенсора лежит специфическое связывание целевой ДНК с зондовой ДНК, которая прикреплена к поверхности сенсора. Когда целевая ДНК связывается с зондом, происходит изменение температуры или теплопроводности в определенной области сенсора. Обнаружение тепла выполняется в микрожидкостном биосенсоре со встроенным тонкопленочным термоэлементом сурьмы-висмута (Sb/Bi). Термоэлемент состоит из 60 последовательно соединённых термопар, которые преобразуют тепловую энергию в электрическую. Выходное напряжение пропорционально локальной разнице температур между

измерительным и опорным спаями. Чувствительность термоэлемента определяется коэффициентом Зеебека, который представляет собой величину индуцированного термоэлектрического напряжения в ответ на разность температур. Одним из главных преимуществ такого подхода является отсутствие необходимости в метках (например, флуоресцентных или радиоактивных). Это упрощает процесс и снижает затраты на реагенты.

Термоэлектрический метод нашел применение в диагностике воспалительных процессов в организме человека. Воспаление, как правило, сопровождается усилением кровотока и метаболизма в пораженной области, что приводит к локальному повышению температуры. Авторами [137] был разработан прибор, который содержит термоэлектрический датчик с термостатированной открытой поверхностью, благодаря которой исключается зависимость показаний термоэлектрического датчика от температуры окружающей среды. Устройство преобразует тепловой поток и температуру тела человека с помощью термоэлектрического датчика в эквивалентные электрические сигналы, которые отображаются на цифровом дисплее электронного блока управления. Измерения выполняются в реальном времени, что позволяет быстро оценить состояние пациента и выявить воспалительные процессы. Конструкция термоэлектрического датчика температуры и теплового потока показана на рисунке 1.20.

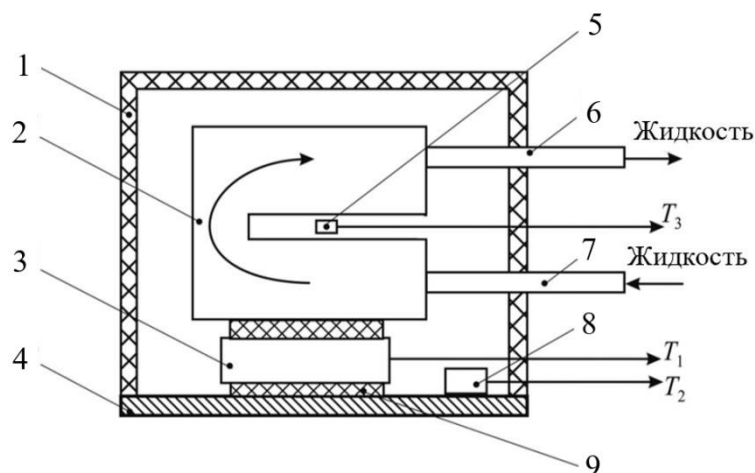


Рисунок 1.20 – Конструкция термоэлектрического датчика температуры и теплового потока: 1 — эбонитовая изоляционная оболочка; 2 — медный

жидкостный радиатор ($15 \times 15 \times 6$ mm); 3 — термоэлектрический сенсор ($10 \times 10 \times 2,4$ mm); 4 — медное основание датчика (thickness 0,3 mm); 5 — датчик температуры медного радиатора T3; 6, 7 — впускной и выпускной патрубки ($\varnothing 4$ mm); 8 — датчик температуры медной основы T2; 9 — слой теплопроводящей пасты

1.7 Приборы термоэлектрического контроля

Термоэлектрическим методом контроля можно проводить экспресс контроль на любых стадиях производства продукта, что является его несомненным преимуществом. Контроль термоэлектрических характеристик металлов и сплавов может осуществляться только с помощью специальных приборов и устройств. Для этого на рынок выпускается целая линейка различных термоэлектрических приборов [49].

1.7.1 Структуроскоп термоэлектрический МЕТЭК-М

Структуроскоп термоэлектрический МЕТЭК-М – это специализированный прибор, предназначенный для сортировки металлов или сплавов по маркам, определения процентного содержания компонента в сплаве, определения режимов термообработки и определения структурной неоднородности [153].

Прибор основывается на измерении термоэлектрической силы (ЭДС), возникающей в образце при его нагреве. В приборе МЕТЭК-М модернизировано ПО, и на экран выводится не значение термоЭДС, а марка сплава или металла. Также пользователь имеет возможность расширить базу данных термоЭДС в соответствии с добавляемыми марками металлов и сплавов. Внешний вид прибора представлен на рисунке 1.21.



Рисунок 1.21 – Внешний вид прибора МЕТЭК-М

Технические характеристики прибора приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Технические характеристики прибора МЕТЭК-М

Параметр	Значение
Готовность к работе, не более	2 мин
Время анализа одного образца, не более	6 с
Локальность контролируемого участка	0,5 мм
Диапазон температуры горячего электрода,	40 °С – 90 °С
Материал электрода	Коррозионностойкий вольфрам
Экран	LCD TFT цветной 2,8"
Напряжение питания от сети переменного тока	220 В 50 Гц
Потребляемая мощность, не более	7,5 Вт
Встроенный аккумулятор	1800 мАч
Время непрерывной работы от аккумулятора, не менее	2 ч
Габаритные размеры	130×66×24 мм
Масса без блока питания	0,25 кг

1.7.2 Термoeлектрический прибор Т-ЗСП

Прибор предназначен для оперативной разбраковки металлов, имеющих различный химический состав, определения наличия покрытий, отличающихся по химическому составу от основного материала.

Работа прибора основана на методе измерения термоЭДС, возникающей между объектами, имеющими различную температуру и химический состав. Внешний вид прибора представлен на рисунке 1.22.



Рисунок 1.22 – Внешний вид прибора Т-3СП

Технические характеристики прибора приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Технические характеристики прибора Т-3СП

Параметр	Значение
Чувствительность, не хуже	10 мкВ
Температура наконечника	80 °С
Время установления рабочего режима	5 мин
Время непрерывной работы	8 ч
Напряжение питания от сети переменного тока	220 В 50 Гц
Потребляемая мощность, не более	5 Вт
Масса прибора	0,4 кг
Габаритные размеры (без преобразователя)	190x105x60 мм
Материал наконечника вибрирующего преобразователя	ВТ-20 (сменный)
Температура окружающего воздуха	10 °С – 50 °С

Прибор используется для контроля структуры чугуна, качества термической обработки металлов, если имеется корреляционная связь между значениями контролируемых параметров и показаниями прибора. Прибор позволяет оперативно контролировать химический состав металлов путем сравнения с эталоном.

При комплектации трибоэлектрическим преобразователем прибор работает по методу трибоЭДС, возникающей при трении различных по химическому составу металлов между собой [154]. В этом режиме прибор может быть эффективно использован для определения степени наводораживания титановых сплавов.

1.7.3 Термоэлектрический дефектоскоп-толщиномер ТЭС-364М

Принцип работы ТЭС-364М основан на термоэлектрическом методе неразрушающего контроля. К поверхности контролируемого объекта прикладывается термоэлектрический преобразователь (датчик), который создает локальный нагрев или охлаждение. Распределение температуры в материале зависит от его теплофизических свойств и наличия дефектов. Датчик регистрирует температурную реакцию материала. Прибор измеряет величину термоЭДС, и на основе сравнения с эталонами, с учетом погрешности, прибор выдаёт результат, который может указывать на марку материала, наличие упрочнённого слоя, толщину гальванического и химического слоя и т.д. Внешний вид прибора представлен на рисунке 1.23.



Рисунок 1.23 – Внешний вид прибора ТЭС-364М

Технические характеристики прибора приведены в таблице 1.3 [155].

Таблица 1.3 – Технические характеристики прибора ТЭС-364М

Параметр	Значение
Диапазон контроля толщины покрытий и упрочняющих слоев	0-50 мкм
Температура наконечника	100 °С
Время подготовки к работе, не более	3 мин
Количество запоминаемых характеристик	100
Напряжение питания от сети переменного тока	220 В 50 Гц
Габаритные размеры электронного блока	165 x 85 x 50 мм
Масса прибора	0,6 кг
Температура окружающего воздуха	-15 °С – 35 °С

1.7.4 Определитель металлов термоэлектрический ОМЕТ

Определитель марки металлов ОМЕТ – это портативный прибор, предназначенный для быстрой идентификации марок металлов и сплавов, его внешний вид показан на рисунке 1.24 [156].



Рисунок 1.24 – Определитель марки металлов ОМЕТ

Измерение термо-ЭДС происходит в момент контакта нагретого наконечника прибора с поверхностью металла по отношению к меди. Значение термоЭДС зависит от химического состава сплава, как мы уже обсуждали ранее. Полученные значения сравниваются с базой данных термоЭДС различных известных сплавов

относительно меди, хранящейся в памяти прибора. На дисплей прибора выводится наиболее вероятная марка металла, и результат последнего измерения автоматически сохраняется в память прибора. Технические характеристики прибора ОМЕТ приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Технические характеристики прибора ОМЕТ

Параметр	Значение
Диапазон определения величины термоЭДС	0...±1111 мкВ
Время одного измерения, не более	1 с
Время установления рабочего режима	2 мин
Разность температур «холодного» и «горячего» электрода в установившемся режиме работы	(50±1) °С
Масса прибора	1 кг
Габаритные размеры (без преобразователя)	170x100x50 мм
Температура окружающего воздуха	0 °С – 40 °С

1.7.5 Приборы для измерения коэффициента Зеебека и электрического сопротивления

На термоэлектрическом эффекте также основаны приборы для измерения коэффициента Зеебека и электрического сопротивления металла или сплава. Измерения в таких приборах проводятся непосредственно внутри печи, где устанавливается температура, до которой будет нагрет исследуемый образец. Образец, цилиндрической или призматической формы размещают вертикально между двумя электродами (рисунок 1.25). К нижнему электроду прикреплен нагреватель для создания градиента температуры [157]. Справа от образца находятся две контактирующие термопары, которые измеряют градиент температуры, T_1 и T_2 , а также термоЭДС. По полученным значениям высчитывается значение коэффициента Зеебека по формуле:

$$S=E/\Delta T. \quad (1.45)$$

Для определения удельного электрического сопротивления или электропроводности образцов используется четырехточечный метод, который позволяет исключить влияние контактного сопротивления. Вместо того, чтобы

измерять сопротивление напрямую, этот метод разделяет измерение тока и напряжения.

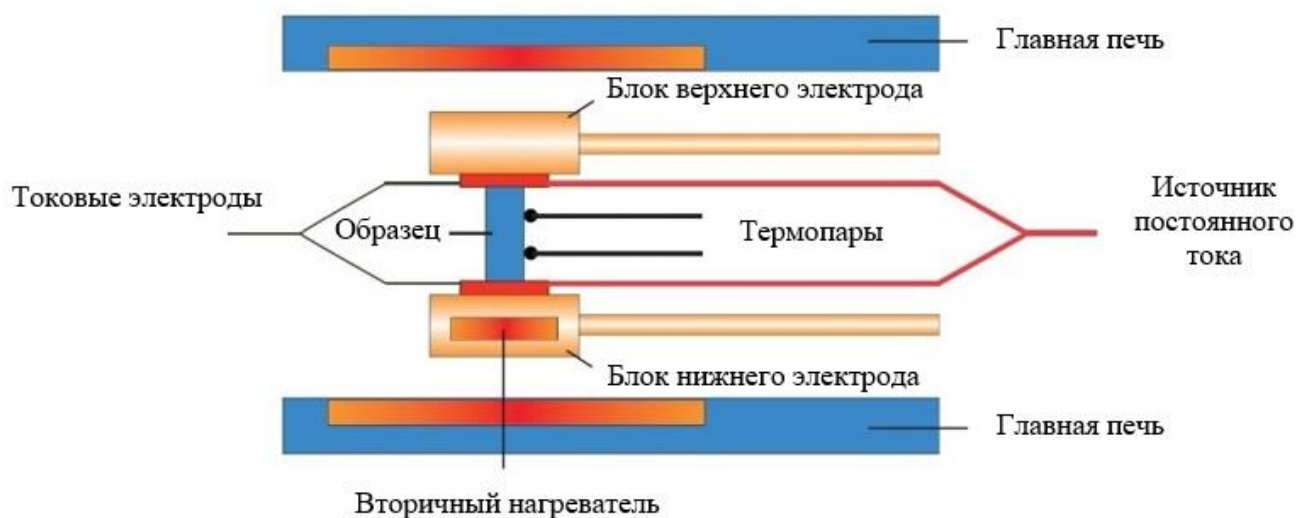


Рисунок 1.25 – Схема измерения характеристик контролируемого образца

Через токовые электроды пропускается известный электрический ток (I), а результирующее напряжение (V) измеряется проводами термопары. По полученным значениям рассчитывают удельное сопротивление по следующей формуле:

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{L}, \quad (1.46)$$

где L – расстояние между проводами термопары, A – площадь поперечного сечения образца.

К таким приборам относятся:

- SETARAM SeebeckPro (рисунок 1.26, а) [158];
- Linseis (рисунок 1.26, б) [159];
- NETZSCH SBA 458 Nemesis (рисунок 1.26, в) [160];
- ULVAC ZEM-3 (рисунок 1.26, г) [161, 162].

*a**б**в**г*

Рисунок 1.26 – Внешний вид прибора: *a* – SETARAM SeebeckPro, *б* – SR-3 Linseis, *в* – NETZSCH SBA 458 Nemesis, *г* – ULVAC ZEM-3

Технические характеристики систем приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Технические характеристики приборов для измерения коэффициента Зеебека и электрического сопротивления

Параметр	SETARAM SeebeckPro	SR-3 Linseis	NETZSCH SBA 458 Nemesis	ULVAC ZEM-3
Диапазон температур	от -100°C до 500°C ; комнатная температура до 800°C или 1150°C	от -100°C до 500°C ; комнатная температура до $800/1100/1500^{\circ}\text{C}$	Температура в помещении до 800°C Температура в помещении до 1100°C	От -80 до 100°C
Размер образца	$\varnothing 2 - 4$ мм; длина 6 – 22 мм	$\varnothing 2 - 4$ мм, длина 6 – 23 мм	$\varnothing 12,7 - 25,4$ мм длина 12,7 – 25,4 мм; ширина 2,0 – 25,4 мм Толщина: 100 нм – 3 мм	2 – 4 мм или $\varnothing 6 - 22$ мм

Атмосфера	Инертный газ, СО, вакуум	Инертный газ, СО, вакуум	Инертный газ, СО	Газ гелия низкого давления
Диапазон измерения: коэффициента Зеебека, проводимости	0,5 мкВ/°С – 25 В/°С; 0,00025 – 150000 См/см	1 – 5000 мкВ/К 0,01–2×10 ⁵ См/см	10 – 2000 μV/°С 0,05 – 150000 См/см	Нет данных
Погрешность измерения	Коэффициент Зеебека – 7 %; проводимость – 7 %	Коэффициент Зеебека – 7 %; проводимость – 10 %	Коэффициент Зеебека – 7 %; проводимость – 5 %	Нет данных

ВЫВОДЫ

Термоэлектрический метод, основанный на измерении термоэлектрического напряжения, возникающего при температурном градиенте в материале, представляет собой перспективный подход для неразрушающего контроля. Он обладает рядом преимуществ, включая чувствительность к микроструктурным изменениям, простоту реализации и возможность исследования электропроводящих материалов. Термоэлектрическое приборостроение является одной из быстро развивающихся отраслей, что указывает на растущий интерес и потребность в таких устройствах как в России, так и за рубежом. Однако сфера применения термоэлектрического контроля может быть существенно расширена и включать такие направления как контроль состояния контактного соединения, контроль теплового сопротивления двух соприкасающихся поверхностей. Первое направление позволит своевременно обнаруживать большое переходное сопротивление контактов и сигнализировать о возможном возникновении пожароопасной ситуации в сети электроснабжения. Такие системы могут найти широкое применение в системах умный дом. Второе направление позволит детектировать высокое тепловое сопротивление двух контактирующих поверхностей. Такой контроль очень актуален в радиоэлектронной промышленности для обеспечения нормального теплового режима функционирования силовых полупроводниковых элементов: мощных

транзисторов и диодов, интегральных микросхем высокой интеграции и т.п. Однако осталось еще много нерешенных вопросов в этих направлениях, а также в области контроля пластически деформированных материалов.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭДС

При конструировании электронного блока термоэлектрического дефектоскопа важно грамотно согласовать характеристики источника термоЭДС и входных цепей усилителя сигналов термоЭДС. Использование электродов с точечным контактом приводит к появлению разброса показаний при многократных измерениях из-за неоднородности поверхности контролируемого образца по химическому и фазовому составу. Усреднение термоЭДС по некоторой площади позволит исключить ошибки точечного измерения. Такое усреднение возможно с использованием электродов с плоской поверхностью контакта. Однако любая поверхность имеет свою шероховатость, обусловленную технологией обработки, следовательно, при соприкосновении двух плоских поверхностей контакт будет осуществлен только в местах выступов на шероховатых поверхностях. Каждая точка контакта будет представлять собой отдельный источник термоЭДС. Эти многочисленные источники термоЭДС создадут эквивалентный источник термоЭДС за счет их параллельного соединения (рисунок 2.7). Исследованию характеристик эквивалентного источника термоЭДС посвящена вторая глава диссертации. Основные результаты опубликованы в работах автора [99, 163-176].

2.1 Исследование электрических характеристик источника термоЭДС

К электрическим характеристикам источника термоЭДС относятся внешняя и вольт-амперная характеристики, внутреннее сопротивление и мощность. Каждый источник термоЭДС обладает своими, индивидуальными характеристиками, с помощью которых можно проводить дефектоскопию металлов и сплавов. В качестве исходных данных при определении электрических характеристик источника термоЭДС было взята внешняя характеристика, которую получали на экспериментальной установке. Экспериментальная установка состоит из

термокамеры, в которую помещался источник термоЭДС, вольтметра, набора переключаемых нагрузочных резисторов, блока управления термокамерой и ПК для получения данных с вольтметра [168, 169, 171, 175]. Эта установка позволяет получить семейство внешних характеристик (зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки) источника термоЭДС путем изменения температуры горячего спая, помещенного в термокамеру, за счет изменения температуры в термокамере. При этом температура холодного спая, расположенного снаружи термокамеры, поддерживалась постоянной. Исследовались два источника термоЭДС из термопар хромель-алюмель и нихром-константан, горячий спай которых помещался в термокамеру, а холодный находился снаружи в боксе, который помещался в резервуаре с тающим льдом, что обеспечивало температуру холодного спая ноль градусов Цельсия. Температура горячего спая стабилизировалась, и к термопарам подключали сопротивления разного номинала в диапазоне от 0,01 до 10 кОм. Каждый раз фиксировалась термоЭДС вольтметром, подключенным к нагрузке. В результате было получено семейство внешних характеристик, указанных источников термоЭДС, показанных на рисунке 2.1. При исследовании были выбраны три температуры нагрева термопар 100 °С, 200 °С и 300 °С, с учетом того, что температура измерительных электродов в серийных приборах термоэлектрического контроля находится в диапазоне от 100 °С до 300 °С. Температура холодного спая поддерживалась равной ноль градусов Цельсия путем его размещения в резервуаре с тающим льдом. Доверительный интервал полученных зависимостей не превысил 5,5 %.

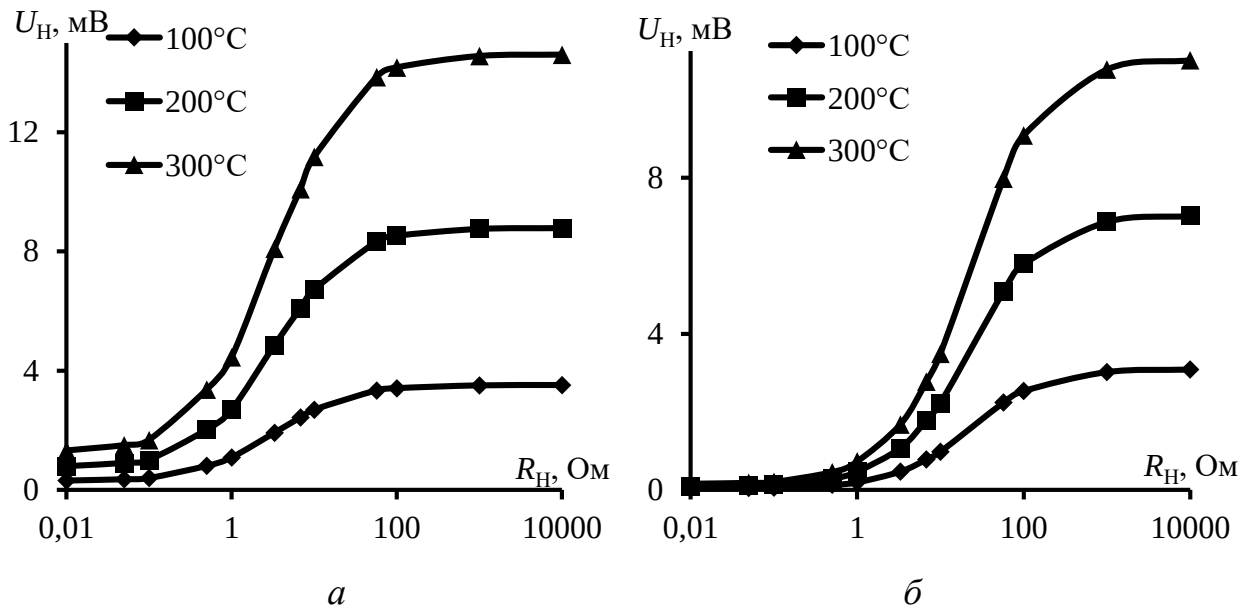


Рисунок 2.1 – Семейство внешних характеристик источников термоЭДС при разности температур горячего и холодного спаев 100 °С, 200 °С и 300 °С, *а* – хромель-алюмель, *б* – нихром-константан

Можно отметить, что характеристики обоих источников похожи друг на друга. На каждой характеристике можно выделить три характерных области: первая - от 0,01 до 0,1 Ом, вторая - до 60 Ом и третья – больше 100 Ом. Первая область характеризуется небольшой величиной напряжения на нагрузке, которое практически не увеличивается в этой области. Вторая область характеризуется практически линейным увеличением напряжения на нагрузке. В третьей области напряжение на нагрузке максимально и практически не изменяется.

С увеличением разности температур между холодным и горячим спаями каждого источника термоЭДС возрастает напряжение на нагрузке во всем диапазоне изменения сопротивления нагрузки, однако характер изменения остается постоянным.

Еще одной электрической характеристикой источника ЭДС является его внутреннее сопротивление, которое характеризует качество этого источника. В идеальных источниках напряжения внутреннее сопротивление равно нулю, а в идеальных источниках тока оно бесконечно. В реальных источниках оно отличается от идеального и, кроме того, может изменяться под действием внешних

(различная нагрузка, различный ток) и внутренних (температурный нагрев или охлаждение, качество электролита, деформация пластин и т.д.) условий. Исследования внутреннего сопротивления можно провести косвенным способом используя внешние характеристики. Эквивалентная электрическая схема термоэлектрического датчика приведена на рисунке 2.2.

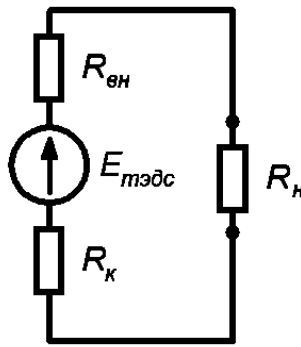


Рисунок 2.2 – Эквивалентная электрическая схема термоэлектрического датчика

Для замкнутого контура (рисунок 2.2) можно записать:

$$E_{тэдс}(t) = U_{R_n}(R_n, t) + U_{R_k} + U_{R_{вн}}(R_{вн}, t) \quad (2.1)$$

где $E_{тэдс}(t)$ – термоэлектродвижущая сила;

$U_{R_n}(R_n, t)$ – напряжение на сопротивлении R_n ;

U_{R_k} – напряжение на сопротивлении R_k ;

$U_{R_{вн}}(R_{вн}, t)$ – напряжение на сопротивлении $R_{вн}$.

Напряжение на сопротивлении R_k равно:

$$U_{R_k} = R_k \cdot I \quad (2.2)$$

где R_k – контактное сопротивление; I – ток в контуре (рисунок 2.2) [157].

В идеальном случае считают переходное сопротивление контакта равном нулю, однако в реальных условиях его необходимо учитывать, чтобы вычислить внутреннее сопротивление с минимальной ошибкой. Аналогично находится падение напряжения на $R_{вн}$:

$$U_{R_{вн}} = R_{вн} \cdot I \quad (2.3)$$

где $R_{вн}$ – внутреннее сопротивление источника ЭДС.

Ток в контуре находится из выражения:

$$I = \frac{U_{R_n}}{R_n} \quad (2.4)$$

При отсутствии тока в контуре, т.е. если $R_n = \infty$, можно записать:

$$E_{m\partial c}(t) = U_{xx}(R_n, t) \quad (2.5)$$

С учетом уравнений 2.1-2.5 выражение для $R_{вн}$ примет вид:

$$R_{вн} = R_n \cdot \left(\frac{E_{m\partial c}(t) - U_{R_n}(R_n, t) - U_{R_k}}{U_{R_n}(R_n, t) - U_{R_k}} \right) \quad (2.6)$$

где $U_{R_n}(R_n, t)$ – падение напряжения на сопротивлении R_n ;

U_{R_k} – падение напряжения на сопротивлении R_k ;

$E_{m\partial c}(t)$ – ЭДС источника.

Контактное сопротивление контролировали отдельно с помощью косвенного метода на переменном токе. Способ контроля контактного сопротивления будет описан в главе 6. Используя методику расчета внутреннего сопротивления, представленную выше, были рассчитаны внутренние сопротивления термопар хромель-алюмели (рисунок 2.3, а) и нихром-константан (рисунок 2.3, б).

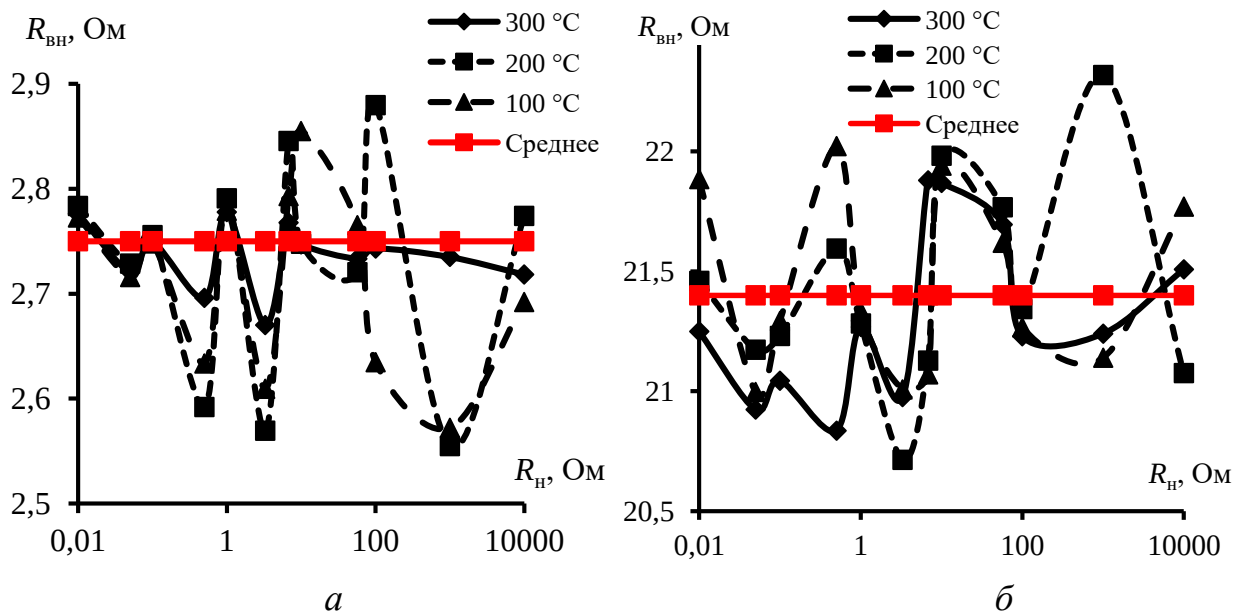


Рисунок 2.3 – Внутреннее сопротивление источников термоЭДС, красная линия – среднее значение, а – источник ЭДС хромель-алюмель, б - источник ЭДС нихром-константан

По результатам исследования были получены совершенно новые результаты. Выявлено, что внутреннее сопротивление источника термоЭДС является постоянной величиной и не зависит от сопротивления нагрузки, что не подтверждает результаты, полученные в работе [157], в которой была показана линейная зависимость внутреннего сопротивления источника термоЭДС от нагрузки в области маленьких значений сопротивления нагрузки от 0,01 до 10 Ом. Такая зависимость была получена из-за того, что автор не учел контактное сопротивление и сопротивление подводящих проводов.

На рисунке 2.3 не показан доверительный интервал, чтобы не ухудшать наглядность рисунка. Экспериментальные результаты получены путем усреднения при многократных измерениях, при этом доверительный интервал составил 7,3 % для характеристики, представленной на рисунке 2.3, *а* и 4,1 % для характеристики, представленной на рисунке 2.3, *б*.

Одной из важнейших характеристик является мощность источника ЭДС. Типовое выражение для нахождения мощности в нагрузке:

$$P(R_n, t) = \frac{U_{R_n}^2(R_n, t)}{R_n}, \quad (2.7)$$

где $U_{R_n}(R_n, t)$ – напряжение на сопротивлении R_n .

Однако источник термоЭДС нагружен не только на сопротивление нагрузки, но и на контактное сопротивление. Поэтому мощность, отдаваемую источником термоЭДС, необходимо рассчитывать с учетом контактного сопротивления:

$$P(R_n, t) = \frac{U_{R_n}^2(R_n, t) + U_{R_k}^2}{R_n}, \quad (2.8)$$

где U_{R_k} – напряжение на контактном сопротивлении.

Результаты расчета мощности на нагрузке, рассчитанной по формуле (2.8), для трех разностей температур между горячим и холодным спаями 100 °С, 200 °С и 300 °С приведены на рисунке 2.4. На рисунке 2.4, *а* приведен график изменения мощности на нагрузке, получаемой от источника термоЭДС из сплавов хромеля и алюмеля, а на рисунке 2.4, *б* - из сплавов нихрома и константана.

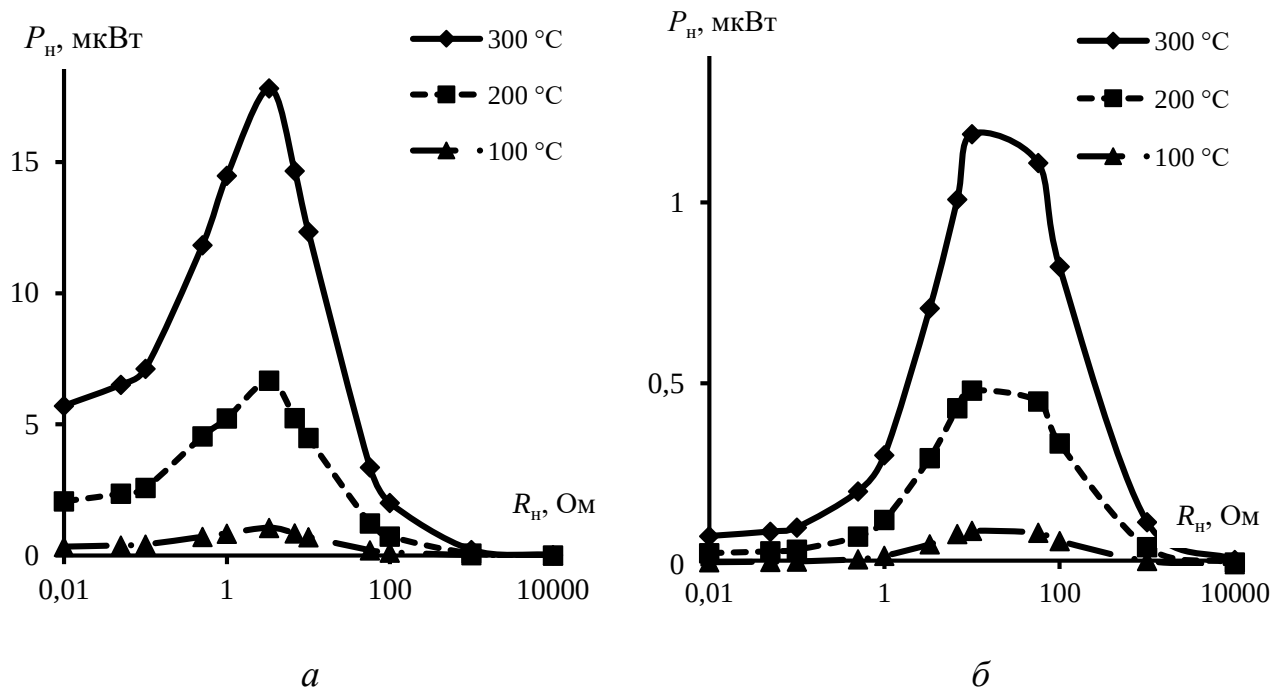


Рисунок 2.4 – Зависимость мощности на нагрузке от сопротивления нагрузки, сплошная линия соответствует разности температур горячего и холодного спаев источника термоЭДС 300 °С, пунктирная линия соответствует разности температур горячего и холодного спаев термоЭДС 200 °С, штрих - пунктирная линия соответствует разности температур горячего и холодного спаев термоЭДС 100 °С, *а* – характеристика, полученная от источника термоЭДС, образованного термопарой хромель-алюмель, *б* - характеристика, полученная от источника термоЭДС, образованного термопарой нихром-константан

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 2.4, *а*, позволяет сделать вывод, что для источника термоЭДС, образованного термопарой хромель-алюмель пик мощности наблюдается при сопротивлении нагрузки 22 Ом. С учетом того, что внутреннее сопротивление термопары хромель-алюмель составляет $(21,4 \pm 0,7)$ Ом, то в этой точке наблюдается согласованный режим. Для источника термоЭДС, образованного термопарой нихром-константан пик мощности наблюдается при сопротивлении нагрузки 3 Ом. С учетом того, что внутреннее сопротивление термопары хромель-алюмель составляет $(2,75 \pm 0,2)$ Ома, то в этой точке также наблюдается согласованный режим, при этом мощность делится пополам между нагрузкой и внутренним сопротивлением. Однако необходимо учитывать, что

коэффициент полезного действия источника ЭДС в этом случае равен 0,5. В работе [157] из-за отсутствия учета контактного сопротивления и сопротивления подводящих проводов была получена ошибочная зависимость мощности, выделяемой на нагрузке, от сопротивления нагрузки с двумя максимумами мощности, что невозможно объяснить с физической точки зрения.

Для источника термоЭДС важной является вольт-амперная характеристика, которая отражает зависимость напряжения на выходе источника ЭДС от тока нагрузки, для которого справедливо выражение:

$$U_{\text{вых}}(R_n, R_{\text{вн}}, t) = E(t)_{\text{тэдс}} - I_n(R_n, t) \cdot R_{\text{вн}}, \quad (2.9)$$

где $I_n(R_n, t)$ – ток в контуре (рис.2.2);

$E(t)$ – напряжение источника ЭДС.

Результаты расчета вольт-амперной характеристики источника термоЭДС, проведенные в соответствии с формулой (2.9), приведены на рисунке 2.5. Рисунок 2.5, а отображает вольт-амперные характеристики термопары хромель-алюмель. Вольт-амперные характеристики рассчитаны для трех разностей температур горячего и холодного спаев термопар: 100 °С, 200 °С и 300 °С. Рисунок 2.5, б отображает вольт-амперные характеристики термопары нихром-константан.

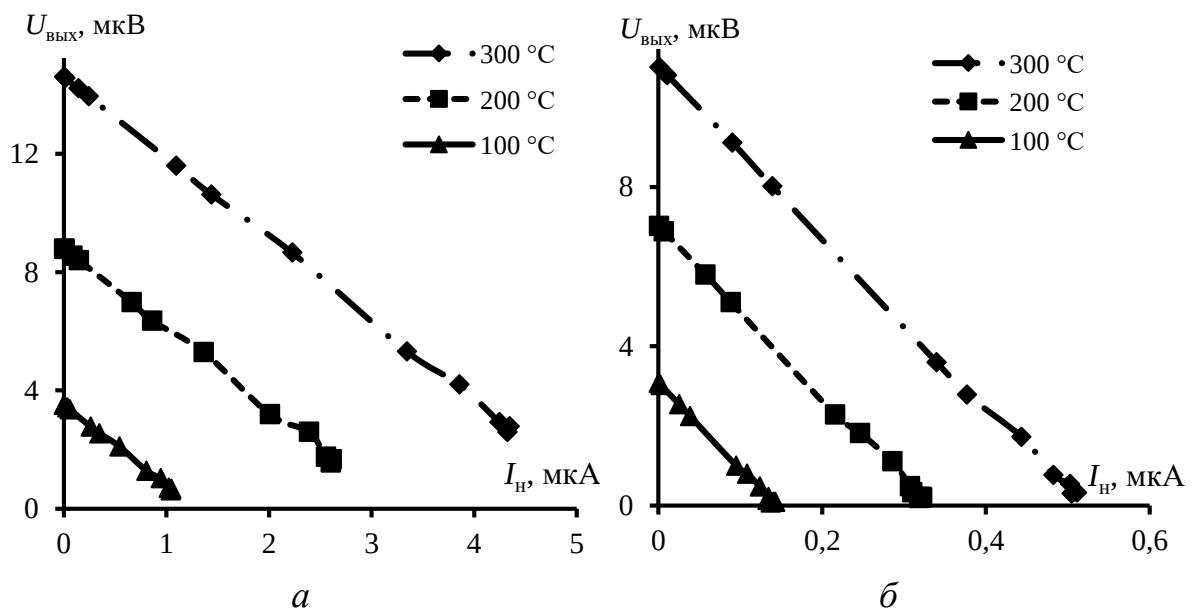


Рисунок 2.5 – Вольт-амперные характеристики термопар хромель-алюмель и нихром-константан, штрих-пунктирная линия соответствует разности температур

горячего и холодного спаев термопар 300 °С, пунктирная линия соответствует разностей температур горячего и холодного спаев термопар 200 °С, сплошная линия соответствует разности температур горячего и холодного спаев термопар 100 °С, a – характеристики термопары хромель-алюмель, b – характеристики термопары нихром-константан

Линейные вольт-амперные характеристики обоих источников ЭДС свидетельствуют о независимости внутреннего сопротивления от сопротивления нагрузки. Повышение температуры приводит к возрастанию напряжения и тока источника термоЭДС, и соответственно повышается мощность, что и отражено на рисунке 2.4.

2.2 Исследование электрических характеристик эквивалентного источника термоЭДС при многоконтактном соединении

Одним из недостатков приборов термоэлектрического контроля является применение электродов с острым наконечником. При этом получается точечный контакт электрода с исследуемой поверхностью. Но из-за неоднородности поверхности сплавов по химическому и фазовому составу повторяемость измерений термоЭДС с точечным контактом невысока, т.к. попасть электродом в одно и ту же точку практически невозможно. Разброс может достигать 40 %. Наиболее перспективным решением этой проблемы автор считает использование плоской поверхности электрода. При этом в зону контакта одновременно будут попадать разные области с химическим и фазовым составом. При повторных измерениях область контроля будет другой, с другим количеством источников термоЭДС, как по типу, так и по количеству каждого типа. Необходимо определить влияние разных типов источников термоЭДС и их количество на результирующую ЭДС [176-177]. Следует учесть, что из-за шероховатости поверхности, как измерительного электрода, так и тестируемого изделия, в зоне их соприкосновения образуется некоторое множество контактов. Каждый контакт будет образовывать отдельный источник термоЭДС (рисунок 2.6). Электрические характеристики этих

источников будут отличаться, и при параллельном соединении они образуют эквивалентный источник ЭДС.

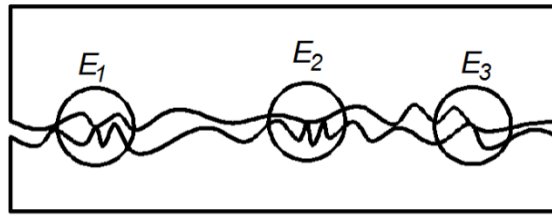


Рисунок 2.6. – Возникновение многоточечного контакта

Количество термоэлектрических источников будет зависеть от размеров контактной поверхности измерительного электрода, шероховатости обеих поверхностей, неоднородности и фазового состава поверхности. На рисунке 2.7. приведена фотография поверхности образца из стали ШХ15, на которой карбиды отображаются в виде светлых включений [178].

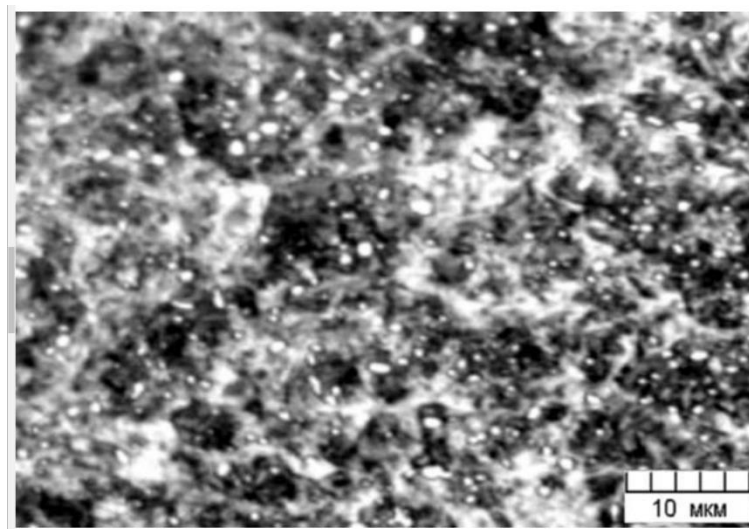


Рисунок 2.7 – Фотография поверхности образца из стали ШХ15 (карбиды отображаются в виде светлых включений)

Схему многоконтактного соединения электрода и испытуемого образца можно представить в виде нескольких источников ЭДС, соединенных параллельно, каждый из которых в общем случае может иметь свои характеристики: ЭДС (E_i) и внутреннее сопротивление ($R_{вн.i}$), (рисунок 2.8) [179-180]. В точке контакта также

возникнет контактное сопротивление ($R_{к.i}$), которое будет подключено последовательно с внутренним сопротивлением источника термоЭДС.

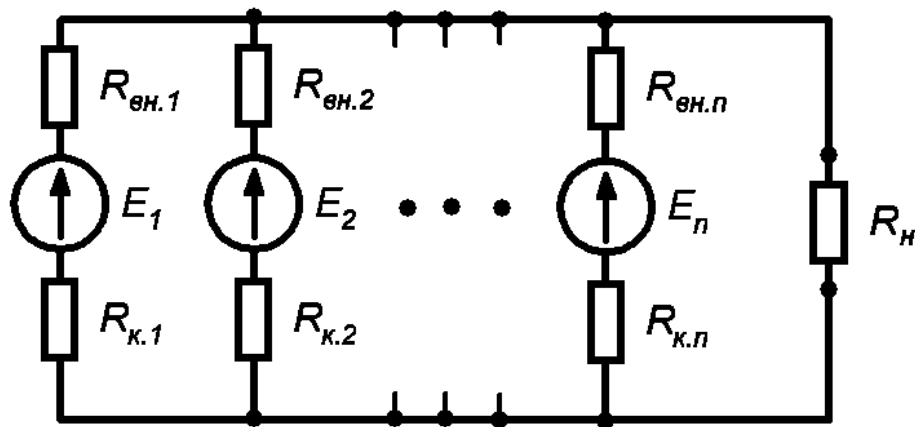


Рисунок 2.8 – Принципиальная электрическая схема термоэлектрического датчика, отображающая многоточечный контакт измерительного электрода с тестируемым изделием

Принципиальную электрическую схему термоэлектрического датчика, отображающую многоточечный контакт измерительного электрода с тестируемым изделием, можно представить в виде эквивалентной схемы с одним источником термоЭДС с параметрами: $E_{эkv}$, $R_{вн.эkv}$ и $R_{к.эkv}$ (рисунок 2.9).

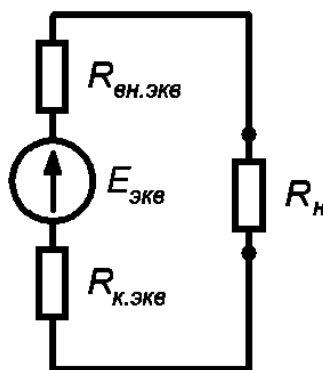


Рисунок 2.9 – Эквивалентная схема термоэлектрического датчика

Для определения характеристик эквивалентного источника термоЭДС можно использовать несколько широко известных методов: метод эквивалентного

генератора, который основан на теореме Тевенена [181], метод суперпозиции (метод наложения) [182], метод эквивалентного источника напряжения [183]. Наиболее наглядным и простым среди вышеперечисленных методов является метод наложения. Следует заметить, что метод наложения применим только для линейных электрических цепей, к которым относится и схема многоконтактного соединения электрода и испытуемого образца. При анализе схемы этим методом последовательно заменяют каждый источник термоЭДС, кроме одного, короткозамкнутой цепью (рисунок 2.10), рассчитывают эквивалентное сопротивление, используя широко известные соотношения для параллельного и последовательного соединения резисторов [184] и по известному сопротивлению и ЭДС в соответствии с законом Ома рассчитывают ток в нагрузке от этого источника. Такую процедуру необходимо провести для каждого источника ЭДС, а результирующий ток в нагрузке будет определяться суммой токов от всех источников.

Для примера на рисунок 2.10, *а* показана схема, у которой все источники, кроме первого, заменены короткозамкнутой цепью. А на рисунке 2.10, *б* показана схема, у которой все источники, кроме второго, заменены короткозамкнутой цепью.

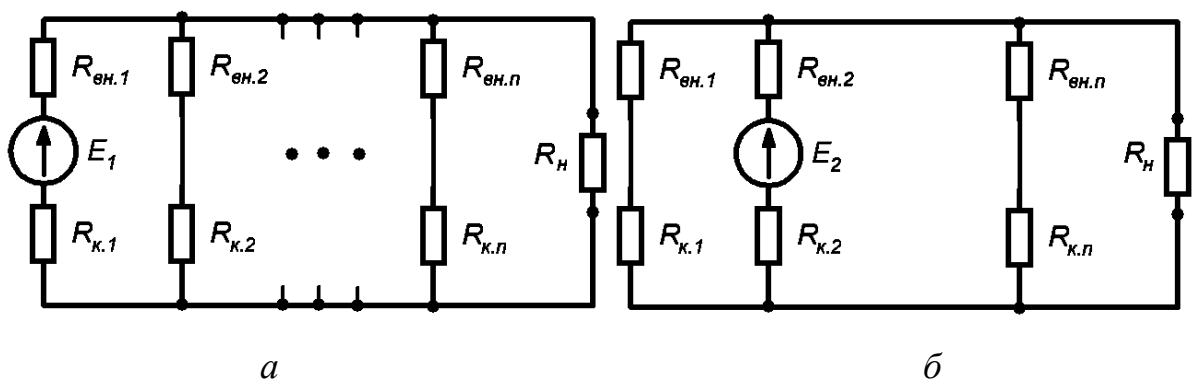


Рисунок 2.10 – Схема замещения для расчета тока нагрузки от первого (*а*) и второго (*б*) источников термоЭДС соответственно

Первый источник ЭДС (рисунок 2.10, *а*) выдает ток в нагрузку в соответствии с формулой:

$$I_1(R_n, t) = \frac{E_1(t)}{(R_{\text{вн.1}} + R_{\kappa.1}) + R_{\text{э.1}}}, \quad (2.10)$$

где $E_1(t)$ – ЭДС первого источника;

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

$R_{\kappa.1}$ – контактное сопротивление первого источника ЭДС;

R_n – сопротивление нагрузки.

Эквивалентное сопротивление $R_{\text{э.1}}$ рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{э.1}} = \frac{1}{\frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_{\text{вн.2}} + R_{\kappa.2}} + \frac{1}{R_{\text{вн.3}} + R_{\kappa.3}} + \dots + \frac{1}{R_{\text{вн.}i} + R_{\kappa.i}}} = \frac{1}{\frac{1}{R_n} + \sum_{i=2}^n \frac{1}{R_{\text{вн.}i} + R_{\kappa.i}}}$$

Второй источник термоЭДС (рисунок 2.10, б) выдает ток в нагрузку в соответствии с формулой:

$$I_2(R_n, t) = \frac{E_2(t)}{(R_{\text{вн.2}} + R_{\kappa.2}) + R_{\text{э.2}}}, \quad (2.11)$$

где $E_2(t)$ – ЭДС второго источника.

Эквивалентное сопротивление $R_{\text{э.2}}$ рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{э.2}} = \frac{1}{\frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_{\text{вн.1}} + R_{\kappa.1}} + \frac{1}{R_{\text{вн.3}} + R_{\kappa.3}} + \dots + \frac{1}{R_{\text{вн.}i} + R_{\kappa.i}}} = \frac{1}{\frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_{\text{вн.1}} + R_{\kappa.1}} + \sum_{i=3}^n \frac{1}{R_{\text{вн.}i} + R_{\kappa.i}}}$$

Каждый следующий источник ЭДС также будет выдавать ток в нагрузку.

Обобщая, можно записать:

$$I_k(R_n, t) = \frac{E_k(t)}{(R_{\text{вн.}k} + R_{\kappa.k}) + R_{\text{э.}k}}. \quad (2.12)$$

Эквивалентное сопротивление $R_{\text{э.}k}$ будет рассчитываться по формуле:

$$R_{\text{э.}k} = \frac{1}{\frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_{\text{вн.1}} + R_{\kappa.1}} + \frac{1}{R_{\text{вн.2}} + R_{\kappa.2}} + \dots + \frac{1}{R_{\text{вн.}(k-1)} + R_{\kappa.(k-1)}} + \frac{1}{R_{\text{вн.}(k+1)} + R_{\kappa.(k+1)}} + \dots + \frac{1}{R_{\text{вн.}i} + R_{\kappa.i}}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{R_n} + \sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{R_{\text{вн.}i} + R_{\kappa.i}} + \sum_{i=k+1}^n \frac{1}{R_{\text{вн.}i} + R_{\kappa.i}}}$$

Ток эквивалентного источника $I_{\text{экв}}(R_H, t)$ равен току в нагрузке $I_H(R_H, t)$:

$$I_{\text{экв}}(R_H, t) = I_H(R_H, t) = \sum_{i=1}^n I_i(R_H, t) . \quad (2.13)$$

Напряжение на нагрузке можно найти из закона Ома:

$$U_H(R_H, t) = I_H(R_H, t) \cdot R_H . \quad (2.14)$$

Предложенная методика позволяет рассчитать внутреннее сопротивление, мощность, ток в нагрузке и вольт-амперную характеристику эквивалентного источника. С использованием этой методики были исследованы внутреннее сопротивление, мощность, ток в нагрузке и вольт-амперная характеристика эквивалентных источников термоЭДС, получаемых параллельным соединением нескольких термопар одного типа. В качестве исходных данных были взяты характеристики двух источников на основе соединения сплавов хромеля с алюмелем и нихрома с константаном. Расчет внешней характеристики проводился путем определения тока от каждого источника в зависимости от нагрузки по формуле (2.12). ТермоЭДС каждого источника соответствовала разности температур горячего и холодного спаев 300 °С. Ток каждого источника суммировался, и результирующий ток умножался на сопротивление нагрузки, тем самым получая напряжение на нагрузке. Полученные результаты отражены на рисунке 2.11. На рисунке 2.11, *а* показаны семейство внешних характеристик источника на основе соединения сплавов хромеля с алюмелем, а на рисунке 2.11, *б* - на основе соединения сплавов нихрома с константаном.

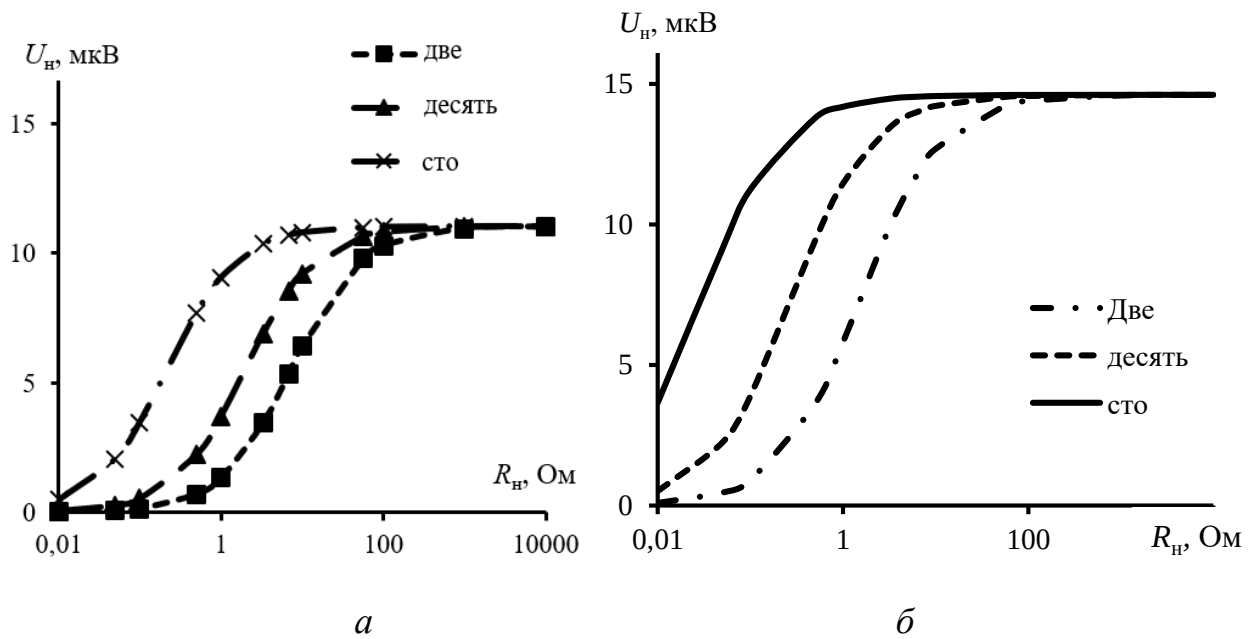


Рисунок 2.11 – Семейство внешних характеристик эквивалентных источников термоЭДС при разности температур горячего и холодного спаев термопары 300 °С, *а* – для источника на основе соединения сплавов хромеля с алюмелем, *б* – для источника на основе соединения сплавов нихрома с константаном

Анализируя полученное семейство внешних характеристик эквивалентных источников термоЭДС, можно сделать заключение, что одно и то же напряжение на нагрузке достигается при меньшем сопротивлении нагрузки с увеличением количества источников ЭДС. Такая тенденция справедлива в диапазоне нагрузок от 0,05 до 100 Ом. При сопротивлении нагрузки свыше 100 Ом напряжение на нагрузке максимально и не зависит от количества источников термоЭДС.

Анализ изменения мощности эквивалентного источника термоЭДС при параллельном соединении нескольких термопар проведем в соответствии с выражением 2.2. При расчете мощности, выделяемой на нагрузке, были использованы данные, представленные на графиках 2.10, при температуре горячего спая 300 °С, холодного спая – 0 °С [176]. Кроме того, было учтено влияние контактного сопротивления и сопротивления соединительных проводов. Результаты расчета в графическом виде представлены на рисунке 2.12. На рисунке 2.12, *а* показано семейство характеристик мощности, отдаваемой в нагрузку эквивалентными источниками ЭДС, содержащими разное количество источников

термоЭДС. Коричневым цветом показана характеристика двух термопар, черным цветом - десять термопар. Красным цветом – сто термопар. На рисунке 2.12, б показано семейство характеристик мощности, отдаваемой в нагрузку эквивалентными источниками ЭДС, содержащими два (коричневый цвет), десять (черный цвет) и сто (красный цвет) термопар нихром-константан.

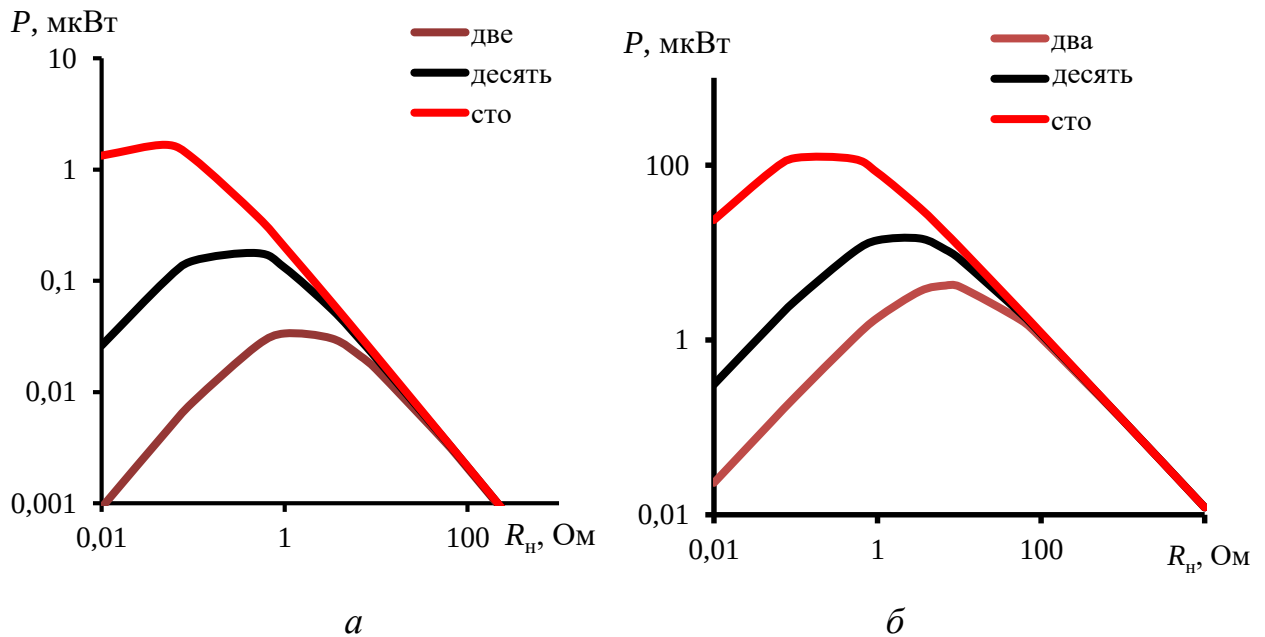


Рисунок 2.12 – Семейство характеристик мощности, отдаваемой в нагрузку источником термоЭДС, от сопротивления нагрузки при разности температур между горячим и холодным спаями $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, *а* – для источника на основе соединения сплавов хромеля с алюмелем, *б* – для источника на основе соединения сплавов нихрома с константаном

Из рисунка 2.12, *а* видно, что с увеличением количества параллельно соединенных термопар увеличивается мощность, отдаваемая в нагрузку. Пиковое значение мощности, отдаваемой в нагрузку, смещается в область меньших значений сопротивления нагрузки при увеличении количества параллельно соединенных термопар. Для двух термопар пик мощности соответствует сопротивлению нагрузки 1 Ом. Для десяти – 0,5 Ом и 0,05 Ома - для ста. Аналогичная тенденция наблюдается и для эквивалентного источника термоЭДС, состоящего из нескольких параллельно соединенных термопар нихром-константан

(рисунок 2.12, б). Согласованный режим, при котором мощность в нагрузке максимальна, получился при $R_n = 10$ Ом для эквивалентного источника ЭДС из двух термопар, $R_n = 3,3$ Ом - для 10 термопар и $R_n = 0,1$ Ом - для 100 термопар нихром-константан. Уменьшение внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС связано с параллельным соединением термопар, которое для двух термопар можно определить из формулы:

$$R_{\text{вн.2}} = \frac{R_{\text{вн.1}} \cdot R_{\text{вн.1}}}{R_{\text{вн.1}} + R_{\text{вн.1}}} = \frac{R_{\text{вн.1}}}{2}, \quad (2.16)$$

где $R_{\text{вн.1}}$ – внутреннее сопротивление одной термопары.

Для десяти термопар внутренне сопротивление можно определить из формулы:

$$R_{\text{вн.10}} = \frac{R_{\text{вн.1}}}{10}. \quad (2.17)$$

Для ста термопар:

$$R_{\text{вн.100}} = \frac{R_{\text{вн.1}}}{100}. \quad (2.18)$$

С учетом того, что внутреннее сопротивление одной термопары хромель-алюмель составляет 2,75 Ом, то расчетное значение внутреннего сопротивления эквивалентного источника ЭДС, содержащего две термопары, составит 1,375 Ом (режим максимальной мощности, отдаваемой в нагрузку, достигается при сопротивлении нагрузки 1 Ом). Расчетное значение внутреннего сопротивления эквивалентного источника ЭДС, содержащего десять термопар, составит 0,275 Ом (режим максимальной мощности, отдаваемой в нагрузку, достигается при сопротивлении нагрузки 0,5 Ом). Расчетное значение внутреннего сопротивления эквивалентного источника ЭДС, содержащего сто термопар, составит 0,0275 Ом (режим максимальной мощности, отдаваемой в нагрузку, достигается при сопротивлении нагрузки 0,05 Ом).

Внутреннее сопротивление одной термопары нихром-константан составляет 21,4 Ом. Расчетное значение внутреннего сопротивления эквивалентного источника ЭДС, содержащего две термопары, составит 10,7 Ом (режим

согласованной нагрузки достигается при $R_H = 10 \text{ Ом}$). Из десяти термопар - $2,14 \text{ Ом}$ (режим согласованной нагрузки при $R_H = 3,3 \text{ Ом}$). Из ста термопар - $0,214 \text{ Ом}$ (режим согласованной нагрузки при $R_H = 0,1 \dots 0,5 \text{ Ом}$).

Интересен случай параллельного соединения разных типов термопар с разными характеристиками в один эквивалентный источник. Для этих исследований вместе соединяли термопары хромель-алюмель и нихром-константан в двух вариантах. Первый - параллельное соединение одной термопары хромель-алюмель и одной термопары нихром-константан. Второй - параллельное соединение двух термопар хромель-алюмель и одной термопары нихром-константан. Полученные результаты в графическом виде показаны на рис. 2.13. Рисунок 2.13, *а* демонстрирует семейство внешних характеристик первого эквивалентного источника термоЭДС. На рисунке 2.13, *б* показано семейство внешних характеристик второго эквивалентного источника термоЭДС.

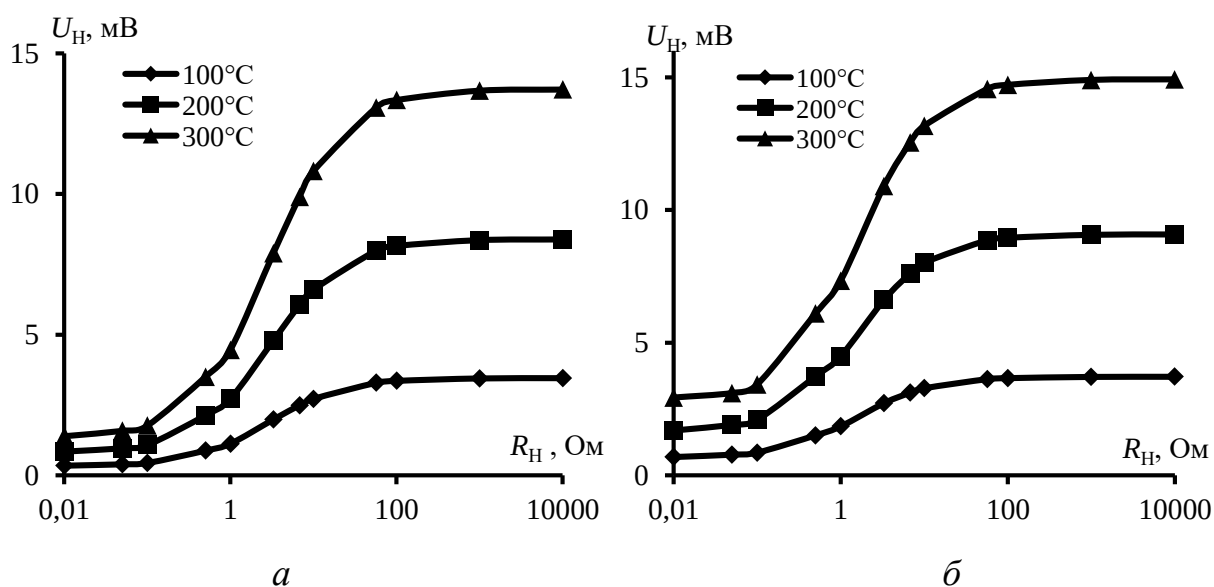


Рисунок 2.13 – Семейство внешних характеристик первого и второго эквивалентных источников термоЭДС, для трех разностей температур между горячим и холодным спаями 100°C , 200°C и 300°C , *а* – первый эквивалентный источник, *б* – второй эквивалентный источник

Как видно из рисунка 2.13 внешние характеристики обоих эквивалентных источников термоЭДС имеют схожий характер изменения напряжения на нагрузке

при изменении сопротивления нагрузки. Максимальные значения на обеих характеристиках совпадают. Оценим отличия внешних характеристик первого и второго эквивалентных источников термоЭДС. Для этого рассчитаем разность напряжения на нагрузке:

$$\Delta U_{n(3-2)}(R_n, t) = U_{n3}(R_n, t) - U_{n2}(R_n, t), \quad (2.19)$$

где $U_{n3}(R_n, t)$ – внешняя характеристика второго эквивалентного источника термоЭДС, $U_{n2}(R_n, t)$ – внешняя характеристика первого источника термоЭДС.

Результаты расчета разностного напряжения на нагрузке в соответствии с формулой (2.19) для трех значений разности температур горячего и холодного спаев 100 °С, 200 °С и 300 °С представлены на рисунке 2.14. Сплошная линия соответствует разности температур горячего и холодного спаев 300 °С, штрихпунктирная линия соответствует разности температур горячего и холодного спаев 200 °С, пунктирная линия – 100 °С.

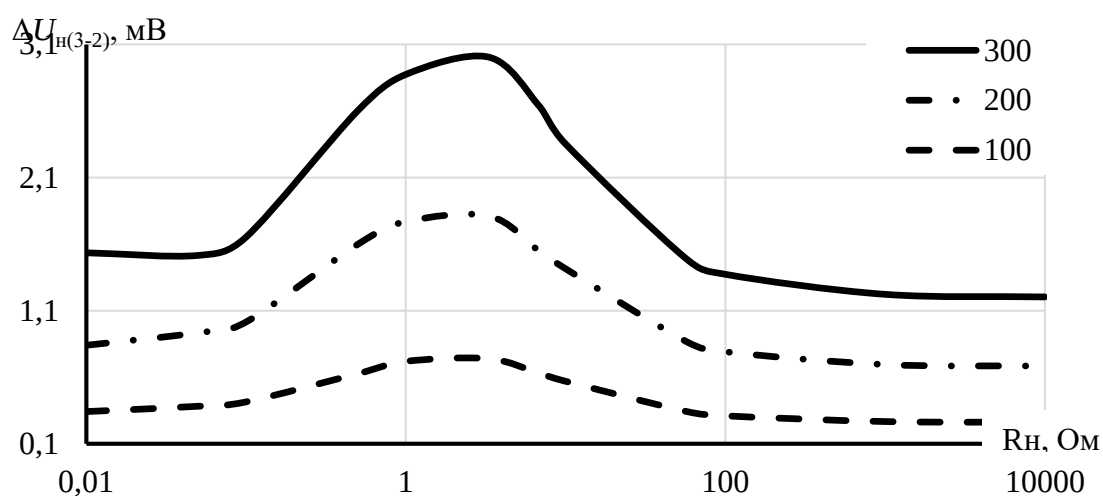


Рисунок 2.14 – Разностное напряжение второго и первого эквивалентных источников ЭДС на нагрузке для трех значений разности температур между горячим и холодным спаями

Как видно из рисунка 2.14 разностное напряжение на нагрузке не эквивалентно характеристике одиночного источника термоЭДС хромель-алюмель (рисунок 2.1, а), хотя первый эквивалентный источник отличается от второго всего одним источником: термопарой хромель-алюмель. Таким образом, значительно

большее (почти в 8 раз) внутреннее сопротивление термопары нихром-константан практически не оказало влияние на величину результирующей термоЭДС. Максимальное отличие составило 3 мВ для температуры 300 °С в режиме согласованной нагрузки. Зависимость внутреннего сопротивления первого эквивалентного источника термоЭДС от сопротивления нагрузки показана на рисунке 2.15, *а*. На рисунке 2.15, *б* приведена зависимость для второго эквивалентного источника термоЭДС. Исследования были проведены для трех значений разности температур горячего и холодного спаев: 100 °С (сплошная линия), 200 °С (штрихпунктирная линия) и 300 °С (пунктирная линия). Для расчета внутреннего сопротивления использовалась методика, изложенная выше и данные из внешней характеристики.

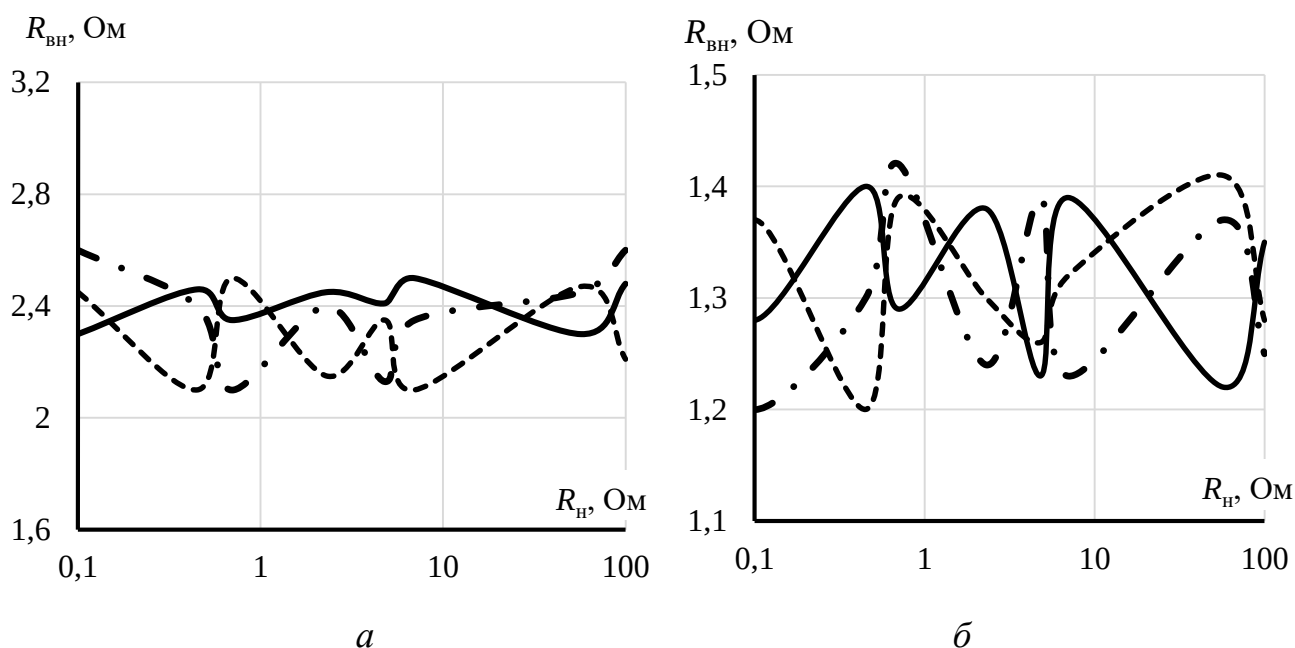


Рисунок 2.15 – Зависимость внутреннего сопротивления эквивалентных источников термоЭДС от сопротивления нагрузки, *а* – первый, *б* – второй, сплошная линия - температура 100 °С, штрихпунктирная линия - температура 200 °С, пунктирная линия - температура 300 °С

Как видно из рисунка 2.15.а внутреннее сопротивление первого эквивалентного источника термоЭДС равно $(2,35 \pm 0,25)$ Ом. Отклонение не превышает 10,7 %. Расчетное значение равно:

$$R_{\text{вн.экв}} = \frac{R_{\text{вн.ХА}} \cdot R_{\text{вн.НХ}}}{R_{\text{вн.ХА}} + R_{\text{вн.НХ}}} = \frac{2,75 \cdot 21,4}{2,75 + 21,4} = 2,44 \text{ Ом} \quad (2.20)$$

где $R_{\text{вн.ХА}}$ – внутреннее сопротивление термопары хромель-алюмель, $R_{\text{вн.НХ}}$ – внутреннее сопротивление термопары нихром-константан.

Внутреннее сопротивление второго источника равно $(1,35 \pm 0,06)$ Ом (рисунок 2.15.б). Отклонение не превышает 5 %. Расчетное значение равно:

$$R_{\text{вн.экв}} = \frac{(R_{\text{вн.ХА}})^2 \cdot R_{\text{вн.НХ}}}{2R_{\text{вн.ХА}} + R_{\text{вн.НХ}}} = \frac{(2,75)^2 \cdot 21,4}{2 \cdot 2,75 + 21,4} = 1,375 \text{ Ом} \quad (2.21)$$

Таким образом, расчетные значения внутреннего сопротивления двух эквивалентных источников термоЭДС совпадают со значениями, полученными экспериментальным путем. Различие не превысило 4,5 % для первого источника термоЭДС и 2 % для второго источника, что подтверждает правильность предложенного подхода к анализу электрических характеристик эквивалентного источника.

Следующий этап верификации модели - использование трех разных типов источников термоЭДС, соединенных параллельно в разных вариациях. В качестве трех разных типов источников были специально изготовлены термопары: медь-константан, хромель-алюмель и медь-нихром. Внешние характеристики отмеченных термопар представлены на рисунке 2.16. Разность температур горячего и холодного спаев составила 170 °С.

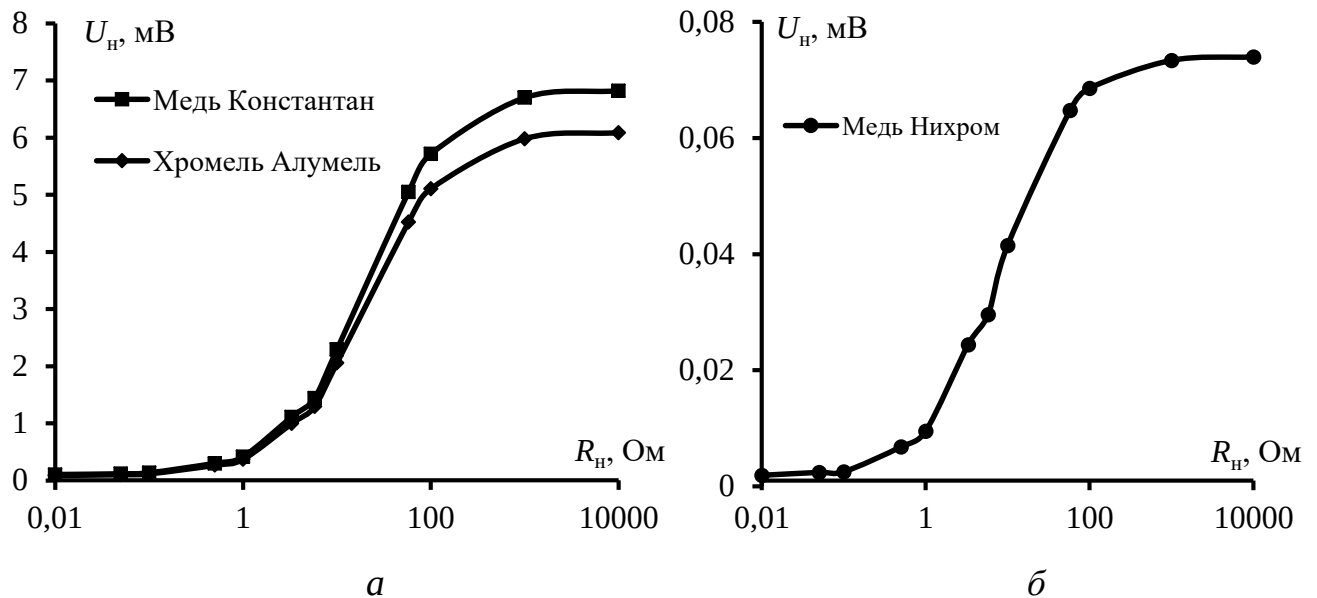


Рисунок 2.16 – Экспериментальная внешняя характеристика трех источников термоЭДС при разности температур между горячим и холодным спаями 170 °С, *а*- медь-константан и хромель-алюмель, *б* – медь-нихром

Как видно из рисунка 2.16, *а* внешние характеристики для двух источников термоЭДС медь-константан и хромель-алюмель очень близки. Отличие не превышает 11 % во всем диапазоне изменения сопротивления нагрузки. Характеристика термопары медь-нихром отличается от рассмотренных выше практически на два порядка (рисунок 2.15, *б*). На рисунок 2.16 приведены усредненные зависимости по результатам многократных измерений. Доверительный интервал не превысил 7 % для термопар медь-константан и хромель-алюмель и 10 % для термопары медь-нихром. Для большей наглядности рисунков доверительный интервал не показан.

Определим внутреннее сопротивление рассмотренных выше источников, используя методику, изложенную выше и данные из внешних характеристик. Результаты показаны на рисунке 2.17. На рисунке 2.17, *а* показано изменение внутреннего сопротивления для термопары медь-константан, на рисунке 2.17, *б* – хромель-алюмель и на рисунке 2.17, *в* – медь-нихром.

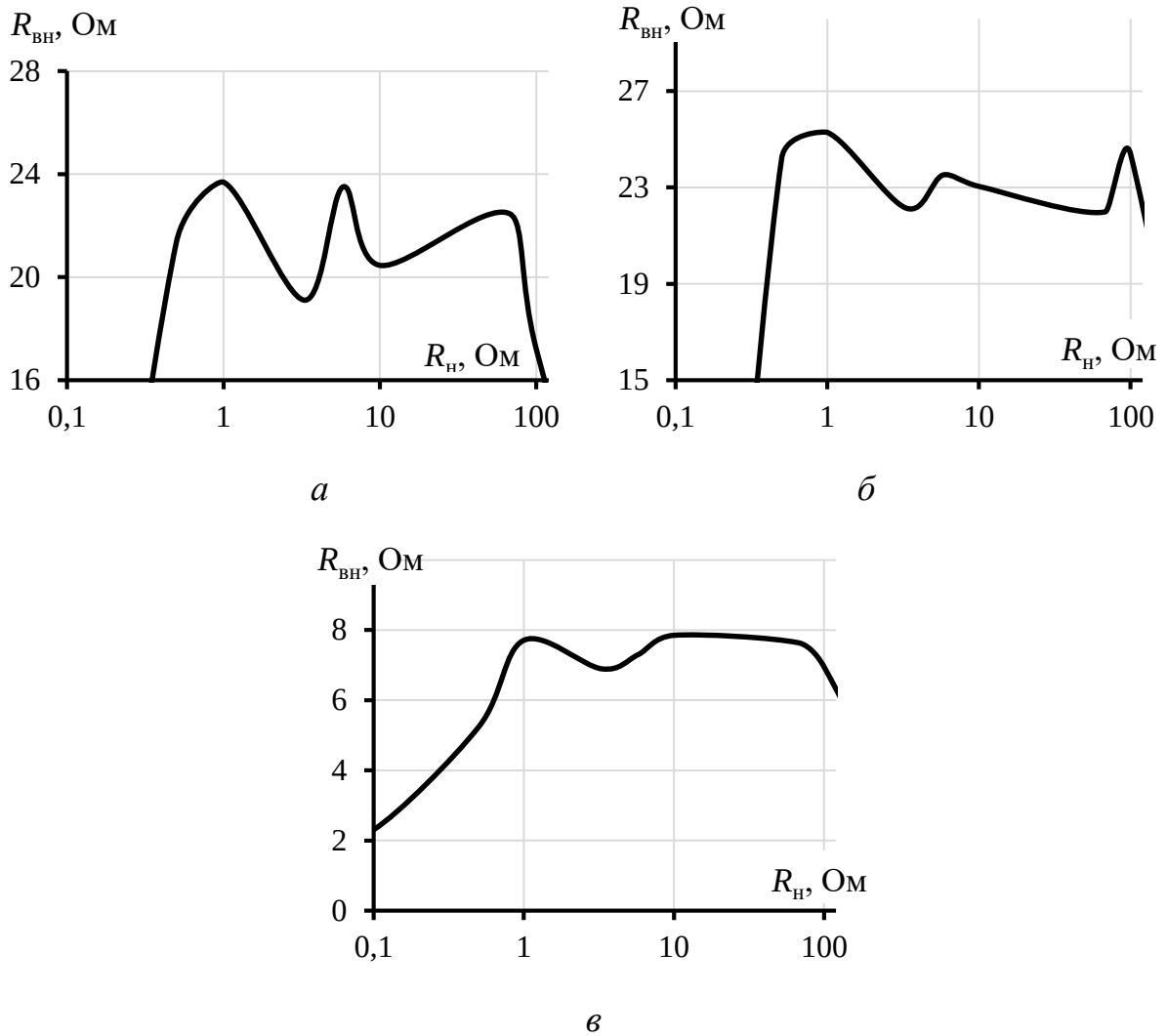


Рисунок 2.17 – Зависимость внутреннего сопротивления трех источников термоЭДС при разности температур между горячим и холодным спаями 170 °С от сопротивления нагрузки, *a* – медь-константан, *б* – хромель-алюмель, *в* – медь-нихром

Как видно из рисунка 2.17, внутреннее сопротивление источника термоЭДС, образованного термопарой медь-константан, составляет 21 Ом, хромель-алюмель – 23 Ом и медь-нихром – 8 Ом и не зависит от сопротивления нагрузки. Кроме того, следует учесть, что измерение внутреннего сопротивления нужно проводить в диапазоне сопротивления нагрузки от 1 до 100 Ом. За пределами этого диапазона влияние нестабильности величины термоЭДС приводит к большой погрешности расчета величины внутреннего сопротивления. Изменение величины термоЭДС на 1-2 % в этом диапазоне приводит к изменению расчетного значения внутреннего

сопротивления более чем на 20 %. Этот факт требует дополнительного исследования.

Каждый тип рассмотренных выше источников термоЭДС способен отдавать в нагрузку определенную мощность. Причем максимальная мощность в нагрузке будет в том случае, если сопротивление нагрузки и внутреннее сопротивление источника ЭДС совпадают. Расчет проводился в соответствии с выражением (2.8), и результаты представлены на рисунке 2.18. На рисунке 2.18, *а* приведены зависимости мощности для термопар медь-константан (сплошная линия) и хромель-алюмель (пунктирная линия). На рисунке 2.18, *б* – для термопары медь-нихром.

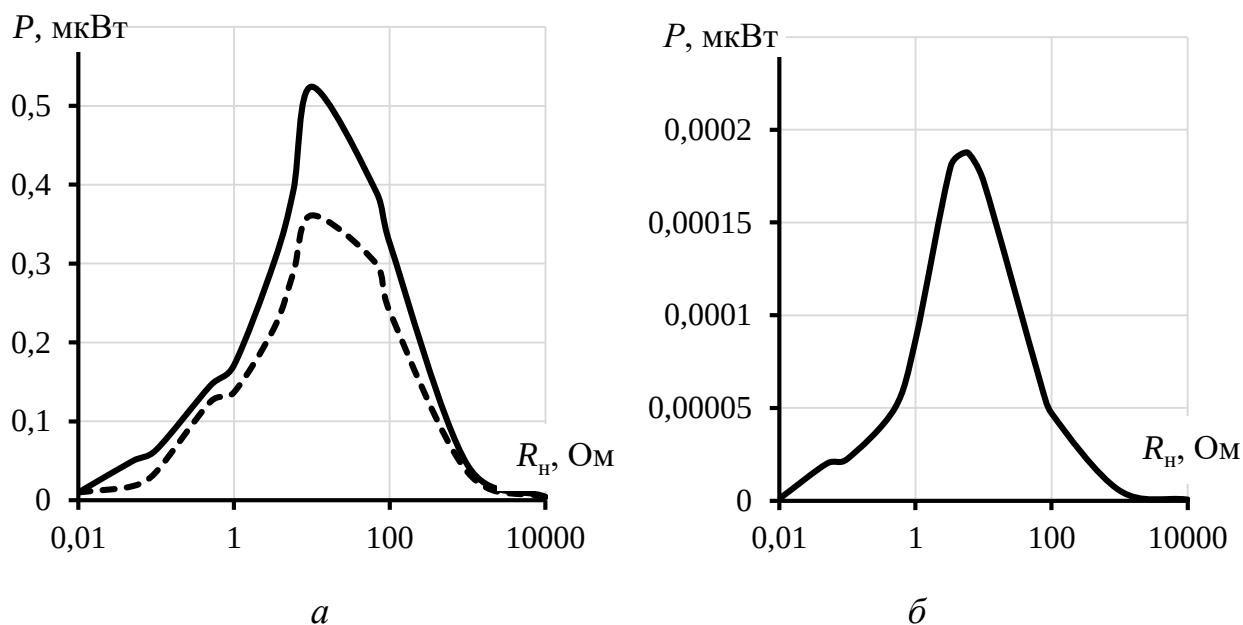


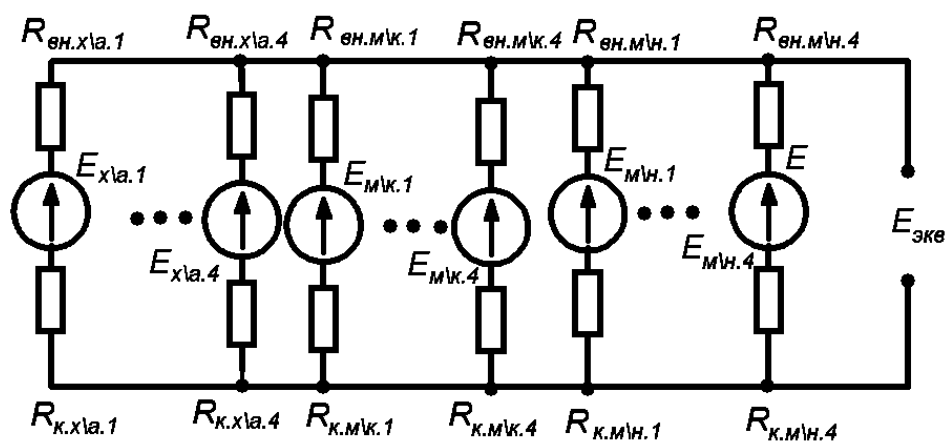
Рисунок 2.18 – Зависимость мощности, отдаваемой в нагрузку, трех типов источников ЭДС от сопротивления нагрузки, *а* – для термопар медь-константан (сплошная линия) и хромель-алюмель (пунктирная линия), *б* – для термопары медь-нихром

Режим согласованной нагрузки для термопар медь-константан и хромель-алюмель находится в диапазоне сопротивления нагрузки от 10 до 50 Ом, что соответствует расчетным значениям (21 и 23 Ом). Режим согласованной нагрузки

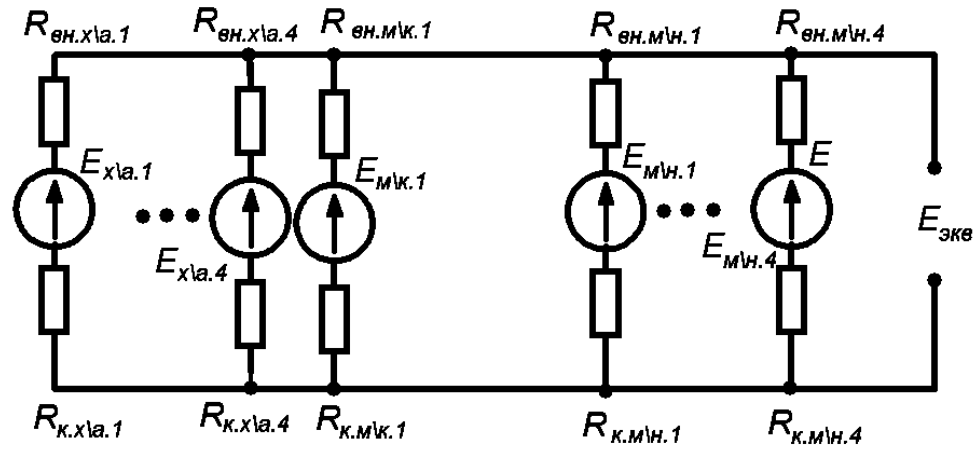
для термопары медь-нихром находится в диапазоне сопротивления нагрузки от 5 до 10 Ом, что соответствует расчетным значениям (8 Ом).

При контроле металлов и сплавов с использованием электродов с плоской контактной поверхностью в зону контакта могут попадать разные источники термоЭС из-за неоднородности поверхности по химическому и фазовому составу. При этом возможны случаи, когда в зоне контакта может оказаться три типа источников с их разным количеством. Для изучения таких случаев были взяты исследованные выше термопары в качестве источников термоЭДС. Было рассмотрено два варианта использования трех типов источников термоЭДС. Первый вариант - исследовалось влияние термопары медь-константант. Второй вариант - исследовалось влияние термопары хромель-алюмель.

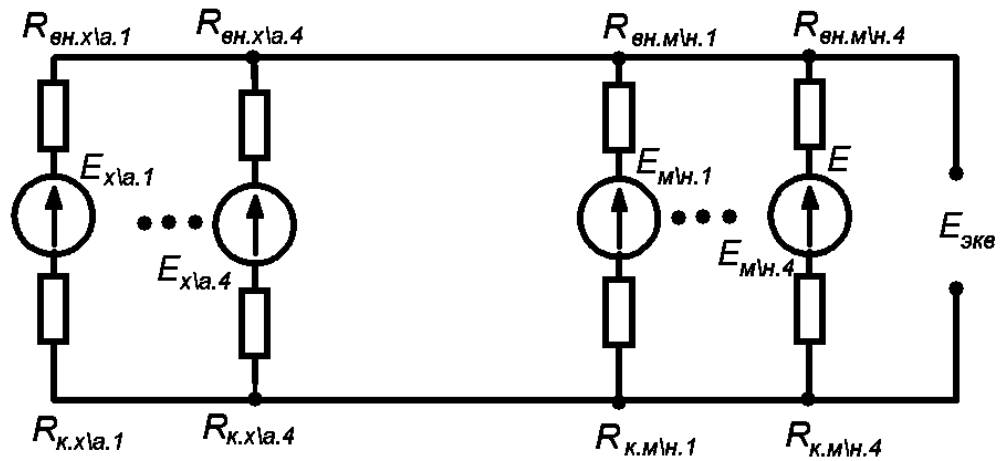
В первом варианте были исследованы три эквивалентных источника: первый включал по четыре термопары медь-константан, медь-нихром и хромель-алюмель, соединенных параллельно (рис.2.19, а). Второй эквивалентный источник включал термопары медь-нихром и хромель-алюмель по четыре штуки и одну термопару медь-константан (рис.2.19, б). Третий эквивалентный источник включал термопары медь-нихром и хромель-алюмель по четыре штуки каждой, соединенных параллельно (рис.2.19, в).



а



б



в

Рисунок 2.19 – Схемы подключения трех типов источников термоЭДС,
а – первый вариант, *б* – второй вариант, *в* – третий вариант

Полученные результаты по расчету внешних характеристик, отмеченных выше схем, представлены на рисунке 2.20, *а*. Линия № 1 соответствует первому источнику, линия № 2 – второму, линия № 3 – третьему. На рисунке 2.20, *б* приведены экспериментальные результаты.

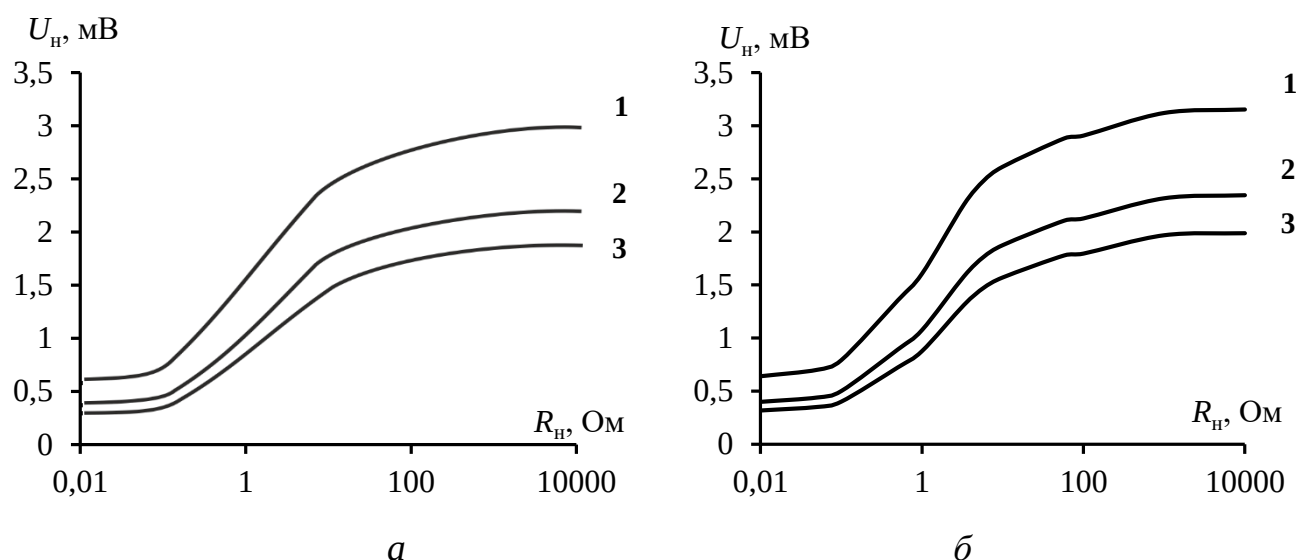


Рисунок 2.20 – Внешние характеристики трех эквивалентных источников термоЭДС при разности температур между горячим и холодным спаями $170\text{ }^{\circ}\text{C}$, от сопротивления нагрузки, линия № 1 соответствует первому эквивалентному источнику, линия № 2 соответствует второму эквивалентному источнику, линия № 3 соответствует третьему эквивалентному источнику, *a* – теоретический расчет, *б* – экспериментальные результаты

Как видно из рисунка 2.20 с увеличением количества термопар медь-константан напряжение на нагрузке увеличивается во всем диапазоне изменения сопротивления нагрузки. Экспериментальные результаты получены путем усреднения данных по результатам десяти измерений. Доверительный интервал не превысил $6,5\%$ от измеренного значения во всем диапазоне изменения сопротивления нагрузки. Следует отметить, что теоретические результаты, приведенные на рисунке 2.20, *a*, отличаются от экспериментальных, приведенных на рисунке 2.20.б, не более чем на 6% .

При параллельном соединении нескольких термопар изменяется и внутреннее сопротивление эквивалентного источника термоЭДС. Результаты экспериментального исследования внутреннего сопротивления этих источников термоЭДС приведены на рисунке 2.21.

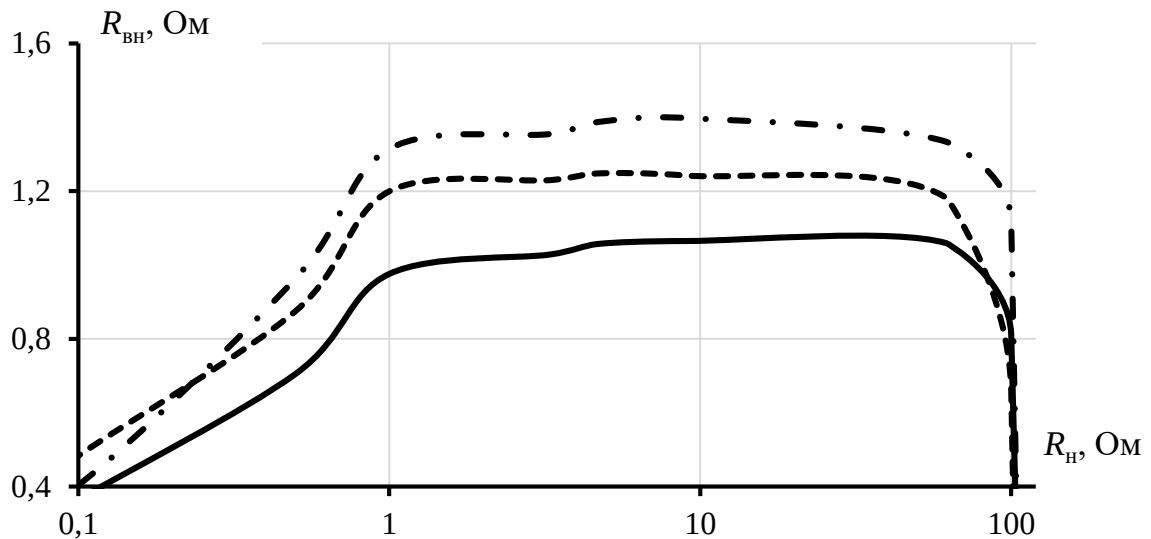


Рисунок 2.21 – Зависимость внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС для разности температур между горячим и холодным спаями 170 °С от сопротивления нагрузки, сплошная линия – первый эквивалентный источник, пунктирная линия – второй эквивалентный источник, штрих пунктирная линия – третий эквивалентный источник

Как видно из рисунка 2.21 внутреннее сопротивление третьего эквивалентного источника термоЭДС, полученного при параллельном соединении четырех термопар медь-нихром и четырех термопар хромель-алюмель, составило $(1,38 \pm 0,05)$ Ом. Расчетное значение составило 1,34:

$$R_{\text{вн.экв}} = \frac{\left(\frac{R_{\text{вн.ХА}}}{4}\right) \cdot \left(\frac{R_{\text{вн.МН}}}{4}\right)}{\left(\frac{R_{\text{вн.ХА}}}{4}\right) + \left(\frac{R_{\text{вн.МН}}}{4}\right)} = 1,34 \text{ Ом}, \quad (2.22)$$

где $R_{\text{вн.ХА}}$ – внутреннее сопротивление термопары хромель-алюмель, $R_{\text{вн.МН}}$ – внутреннее сопротивление термопары медь-нихром.

Внутреннее сопротивление второго эквивалентного источника термоЭДС составило $(1,22 \pm 0,05)$ Ом. Расчетное значение составило 1,26:

$$R_{\text{вн.экв}} = \frac{\left(\frac{R_{\text{вн.ХА}}}{4}\right) \cdot \left(\frac{R_{\text{вн.МН}}}{4}\right) \cdot R_{\text{вн.МК}}}{\left(\frac{R_{\text{вн.ХА}}}{4}\right) + \left(\frac{R_{\text{вн.МН}}}{4}\right) + R_{\text{вн.МК}}} = 1,26 \text{ Ом} \quad (2.23)$$

Используемые сокращения в формуле (2.23):

- ✓ вн - внутреннее сопротивление;
- ✓ ХА -хромель-алюмель;
- ✓ МК – медь-константан;
- ✓ МН – медь-нихром.

Внутреннее сопротивление первого эквивалентного источника термоЭДС из термопар медь-нихром, хромель-алюмель и медь-константан по четыре штуки каждый составило $(1,06 \pm 0,05)$ Ом. Расчетное значение составило 1,07:

$$R_{\text{вн.экв}} = \frac{\left(\frac{R_{\text{вн.ХА}}}{4}\right) \cdot \left(\frac{R_{\text{вн.МН}}}{4}\right) \cdot \left(\frac{R_{\text{вн.МК}}}{4}\right)}{\left(\frac{R_{\text{вн.ХА}}}{4}\right) + \left(\frac{R_{\text{вн.МН}}}{4}\right) + \left(\frac{R_{\text{вн.МК}}}{4}\right)} = 1,07 \text{ Ом} \quad (2.24)$$

Увеличение количества термопар медь-константан приводит к уменьшению внутреннего сопротивления эквивалентного источника ЭДС. Различие расчетных значений внутреннего сопротивления эквивалентных источников термоЭДС от экспериментальных не превысило 3,5 %.

Исследования мощности представленных выше эквивалентных источников проводилось в соответствии с выражением 2.7. Полученные результаты показаны на рисунке 2.22. Характеристика мощности для эквивалентного источника ЭДС, состоящего из четырех термопар медь-нихром, четырех термопар хромель-алюмель и четырех термопар медь-константан, показана сплошной линией. Характеристика мощности для эквивалентного источника ЭДС, состоящего из четырех термопар медь-нихром, четырех термопар хромель-алюмель и одной термопары медь-константан, показана пунктирной линией. Характеристика

мощности для эквивалентного источника ЭДС, состоящего из четырех термопар медь-нихром и четырех термопар хромель-алюмель, показана штрих-пунктирной линией.

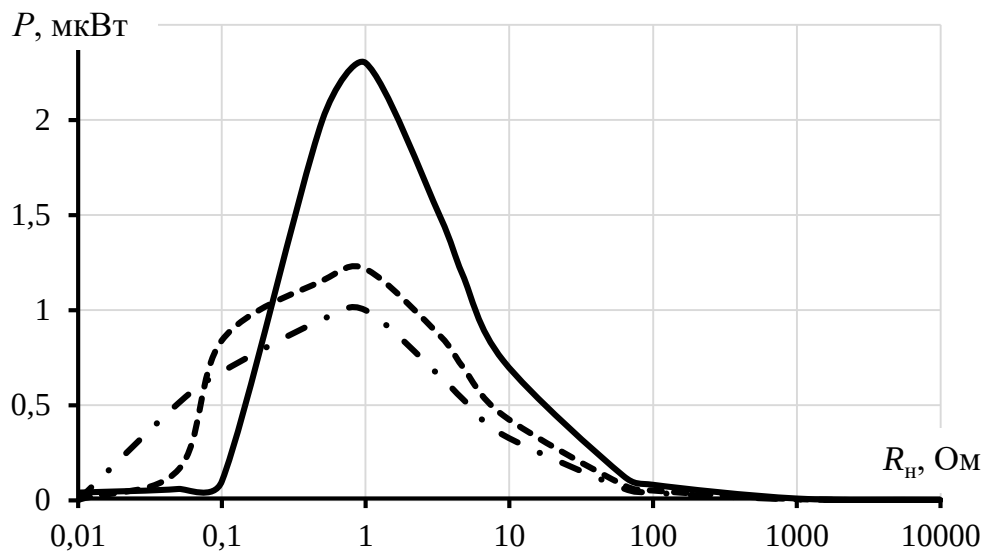


Рисунок 2.22 – Зависимость мощности, отдаваемой в нагрузку трех эквивалентных источников ЭДС от сопротивления нагрузки, сплошная линия – первый эквивалентный источник, пунктирная линия – второй эквивалентный источник, штрих-пунктирная линия – третий эквивалентный источник

Как видно из рисунка 2.22, максимальная мощность 2,3 мкВт соответствует третьему эквивалентному источнику термоЭДС при нагрузке 1 Ом. Максимальная мощность второго эквивалентного источника термоЭДС составляет 1,22 мкВт. Это почти в два раза меньше рассмотренного выше, эквивалентного источника термоЭДС. Мощность эквивалентного источника термоЭДС, состоящего из параллельного соединения четырех термопар медь-нихром и четырех термопар хромель-алюмель, составляет 1 мкВт. Уменьшение количества параллельно соединенных источников ЭДС, образованных термопарой медь-константан, приводит к уменьшению мощности, отдаваемой в нагрузку. Максимальная мощность, отдаваемая в нагрузку, получается при равном сопротивлении нагрузки и внутреннем сопротивлении источника ЭДС, которые равны примерно 1 Ом.

Для оценки влияния источника термоЭДС на основе термопары хромель-алюмель (второй вариант) на характеристики эквивалентного источника были исследованы три эквивалентных источника, в каждом из них было по четыре термопары медь-константан и медь-нихром. Дополнительно первый эквивалентный источник содержал четыре термопары хромель-алюмель, второй – одну термопару хромель-алюмель. В третьем термопара хромель-алюмель отсутствовала.

На рисунке 2.23 приведено семейство полученных внешних характеристик. Сплошной линией показана внешняя характеристика (кривая 1) первого эквивалентного источника, штрихпунктирной линией (кривая 2) – второго и пунктирной линией (кривая 3) – третьего. На рисунке 2.23, *а* показаны теоретические результаты, а на рисунке 2.23, *б* – экспериментальные. Экспериментальные результаты получены путем усреднения данных из десяти измерений. Доверительный интервал не превысил 6,5 % от измеренного значения во всем диапазоне изменения сопротивления нагрузки.

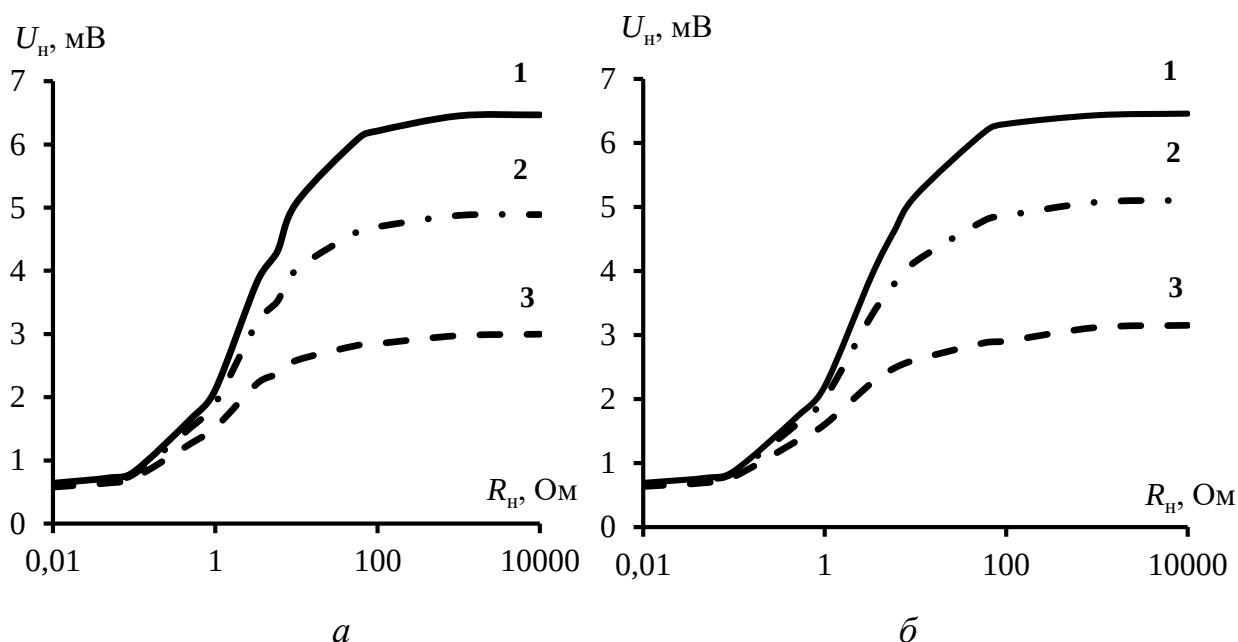


Рисунок 2.23 – Зависимость напряжения на нагрузке, создаваемая эквивалентным источником термоЭДС при разности температур между горячим и холодным спаями 170 °С, от сопротивления нагрузки, линия № 1 соответствует первому эквивалентному источнику, линия № 2 соответствует второму эквивалентному

источнику, линия № 3 соответствует третьему эквивалентному источнику, a – теоретический расчет, b – экспериментальные результаты

Как видно из рисунка 2.23 с увеличением количества термопар хромель-алюмель напряжение на нагрузке увеличивается во всем диапазоне изменения сопротивления нагрузки. Теоретические результаты отличаются от экспериментальных не более, чем на 5,5 %.

Также было исследовано влияние термопары хромель-алюмель на внутреннее сопротивление эквивалентного источника [176]. Первый эквивалентный источник содержал по четыре термопары каждого типа. Второй – четыре термопары медь-нихром, одну – хромель-алюмель и четыре – медь-константант. Третий – четыре термопары медь-нихром и четыре термопары медь-константант. Расчет проводился в соответствии с выражением (2.6). Результаты исследования внутреннего сопротивления этих источников термоЭДС приведены на рисунке 2.24.

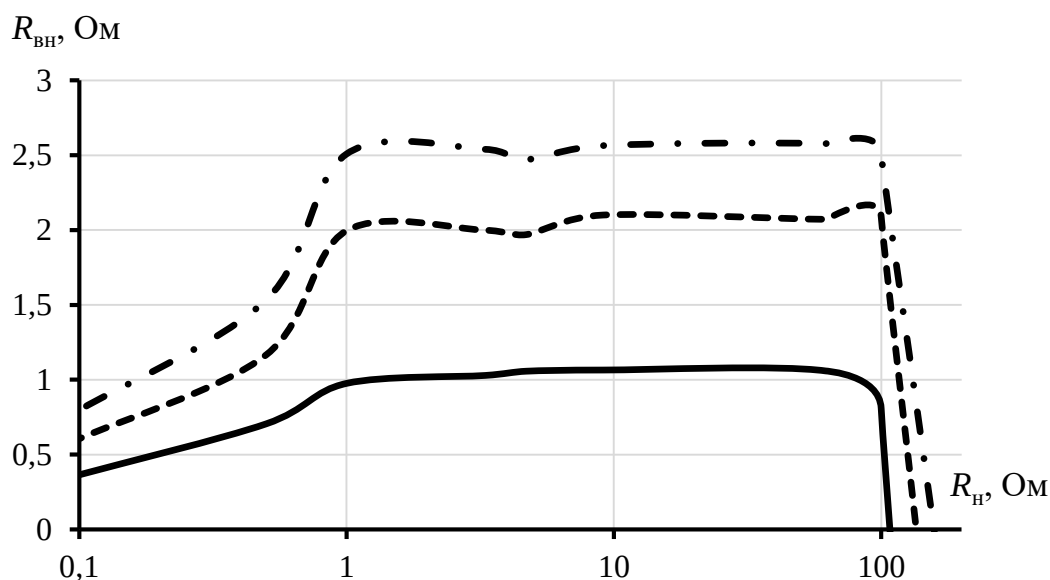


Рисунок 2.24 – Зависимость внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС для разности температур между горячим и холодным спаями 170 °С от сопротивления нагрузки, сплошная линия – первый

эквивалентный источник, пунктирная линия – второй эквивалентный источник,
штрих пунктирная линия – третий эквивалентный источник.

Как видно из рис. 2.24 внутреннее сопротивление первого эквивалентного источника термоЭДС, (сплошная линия), составило $(1,06 \pm 0,05)$ Ом. Расчетное значение составило 1,07:

$$R_{\text{вн.экв}} = \frac{\left(\frac{R_{\text{вн.ХА}}}{4}\right) \cdot \left(\frac{R_{\text{вн.МН}}}{4}\right) \cdot \left(\frac{R_{\text{вн.МК}}}{4}\right)}{\left(\frac{R_{\text{вн.ХА}}}{4}\right) + \left(\frac{R_{\text{вн.МН}}}{4}\right) + \left(\frac{R_{\text{вн.МК}}}{4}\right)} = 1,07 \text{ Ом} \quad (2.25)$$

Внутреннее сопротивление эквивалентного источника термоЭДС, полученного при параллельном соединении четырех термопар медь-нихром, одной – хромель-алюмель и четырех – медь-константан, составило $(2,07 \pm 0,05)$ Ом. Расчетное значение составило 2,043:

$$R_{\text{вн.экв}} = \frac{\left(\frac{R_{\text{вн.ХА}}}{4}\right) \cdot \left(\frac{R_{\text{вн.МН}}}{4}\right) \cdot R_{\text{вн.МК}}}{\left(\frac{R_{\text{вн.ХА}}}{4}\right) + \left(\frac{R_{\text{вн.МН}}}{4}\right) + R_{\text{вн.МК}}} = 2,043 \text{ Ом} \quad (2.26)$$

Внутреннее сопротивление эквивалентного источника термоЭДС, полученного при параллельном соединении четырех термопар медь-нихром, четырех термопар хмедь-константант, составило $(2,58 \pm 0,05)$ Ом. Расчетное значение составило 2,7:

$$R_{\text{вн.экв}} = \frac{\left(\frac{R_{\text{вн.ХА}}}{4}\right) \cdot \left(\frac{R_{\text{вн.МН}}}{4}\right)}{\left(\frac{R_{\text{вн.ХА}}}{4}\right) + \left(\frac{R_{\text{вн.МН}}}{4}\right)} = 2,7 \text{ Ом} \quad (2.27)$$

Различие расчетных значений внутреннего сопротивления эквивалентных источников термоЭДС от экспериментальных не превысило 4,6 %.

Влияние термопары медь-константан на мощность, отдаваемую в нагрузку, эквивалентными источниками, рассмотренными выше, представлено на рисунке 2.25. Характеристика мощности для эквивалентного источника ЭДС, состоящего из четырех термопар медь-нихром, четырех термопар хромель-алюмель и четырех термопар медь-константан, показана штрих-пунктирной линией. Характеристика мощности для эквивалентного источника ЭДС, состоящего из четырех термопар медь-константан, четырех термопар хромель-алюмель и одной термопары медь-нихром, показана пунктирной линией. Характеристика мощности для эквивалентного источника ЭДС, состоящего из четырех термопар медь-константан и четырех термопар хромель-алюмель, показана сплошной линией.

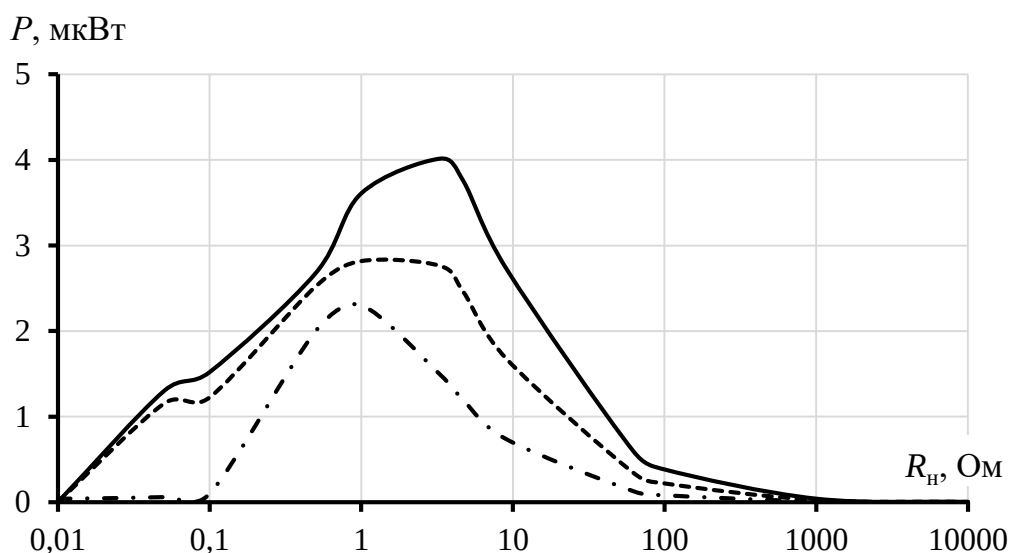


Рисунок 2.25 – Зависимость мощности, отдаваемой в нагрузку, трех эквивалентных источников ЭДС от сопротивления нагрузки, сплошная линия – первый эквивалентный источник, пунктирная линия – второй эквивалентный источник, штрих-пунктирная линия – третий эквивалентный источник

Как видно из рисунка 2.25, максимальная мощность 4 мкВт соответствует первому эквивалентному источнику термоЭДС при нагрузке 3,3 Ом (внутреннее сопротивление такого источника составляет 2,5 Ом). Мощность эквивалентного источника термоЭДС, состоящего из параллельного соединения четырех термопар медь-константан, четырех термопар медь-нихром и одной термопары хромель-

алюмель при нагрузках 1 Ом и 3,3 Ом, составляет 2,76 мкВт (внутреннее сопротивление такого источника составляет 2,0 Ом). Максимальная мощность в нагрузке от третьего эквивалентного источника термоЭДС Ом составила 2,23 мкВт при $R_n = 1$ Ом ($R_n = 1,07$ Ом).

Методика расчета характеристик эквивалентного источника, предложенная выше, позволяет с погрешностью не более 7 % рассчитывать характеристики и может быть использована для проведения дальнейшего теоретического анализа.

Количество контактных точек и, соответственно, количество источников термоЭДС будет зависеть от величины шероховатости и площади контактируемых поверхностей. При использовании датчика с плоской контактной поверхностью размером 5x0,2 мм количество источников термоЭДС будет варьироваться от нескольких десятком до нескольких сотен для широкого класса поверхностей после технологической обработки. Влияние количества разнотипных источников термоЭДС на характеристики эквивалентного источника термоЭДС было исследовано с помощью методики, рассмотренной выше. Для исследования были взяты термопары: хромель-алюмель и медь-константан. Из которых были синтезированы несколько новых источников с измененными внешними характеристиками. При этом в качестве исходных данных использовались данные внешней характеристики источников термоЭДС, представленные в совместных работах автора с коллегами [163, 164, 166, 170]. Каждый последующий источник отличался от предыдущего на 10 %. Такое распределение характерно для изделий, подвергшихся пластической деформации.

Результаты исследования внутреннего сопротивления эквивалентных источников термоЭДС, приведены на рисунке 2.26. Сплошной линией показана характеристика для эквивалентного источника, образованного параллельным соединением термопар:

- хромель-алюмель – 1 шт,
- нихром-константан – 6 шт,

при этом положительный электрод термопары хромель-алюмель соединялся с положительными электродами термопар нихром-константан. Отрицательные

электроды соединялись аналогичным образом. Пунктирной линией, показана характеристика для эквивалентного источника, образованного параллельным соединением термопар:

- хромель-алюмель – 10 шт,
- нихром-константан – 20 шт.

Штрихпунктирной линией показана характеристика для эквивалентного источника, образованного параллельным соединением термопар:

- хромель-алюмель – 50 шт,
- нихром-константан – 100 шт.

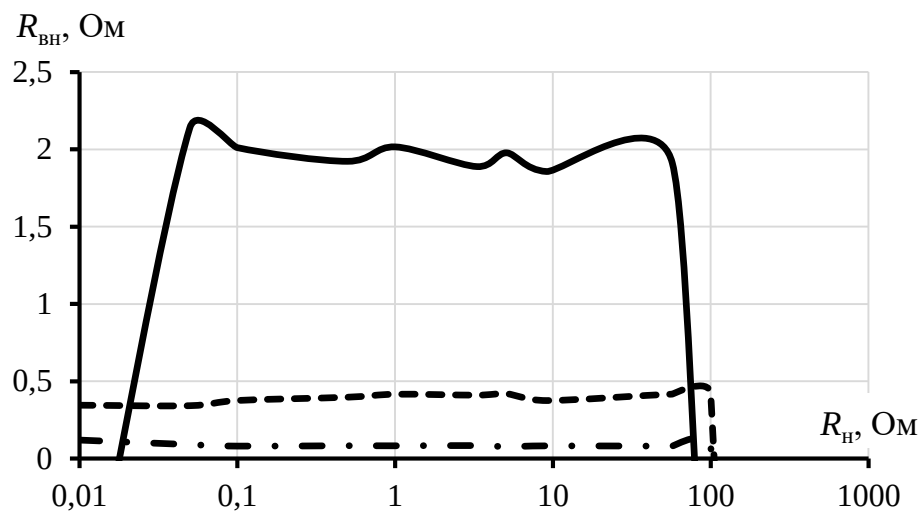


Рисунок 2.26 – Зависимость внутреннего сопротивления от сопротивления нагрузки для эквивалентного источника, полученного параллельным соединением двух типов термопар хромель-алюмель и нихром-константан, сплошная линия - хромель-алюмель 50 и нихром-константан 100, пунктирная линия - хромель-алюмель 10 и нихром-константан 20, штрихпунктирная линия - хромель-алюмель 1 и нихром-константан 6

Как видно из рисунка 2.26, с увеличением количества параллельно соединенных источников термоЭДС внутреннее сопротивление уменьшается. Для источника термоЭДС из одной термопары хромель-алюмель и шести термопар нихром-константан $R_{вн} = (2 \pm 0,15)$ Ом. Для источника термоЭДС из десяти термопар хромель-алюмель и двадцати термопар нихром-константан $R_{вн} = (0,4 \pm 0,05)$ Ом. Для

источника термоЭДС из пятидесяти термопар хромель-алюмель и ста термопар нихром-константан $R_{\text{вн}} = (0,82 \pm 0,01) \text{ Ом}$.

ВЫВОДЫ

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

1. Выявлено отсутствие зависимости внутреннего сопротивления от нагрузки и от разницы температур между горячим и холодным спаями источника термоЭДС, что позволяет использовать этот параметр при неразрушающем контроле металлов и сплавов. При этом отпадает необходимость в высокой стабилизации температурного режима горячего электрода термоэлектрического преобразователя.

2. Усовершенствована методика расчета электрических характеристик эквивалентного источника термоЭДС методом наложения, учитывающая влияние контактного сопротивления.

3. Выявлено, что контроль внутреннего сопротивления источника термоЭДС нужно проводить в диапазоне изменения сопротивления нагрузки от 1 до 100 Ом. В диапазоне изменения сопротивления нагрузки менее 1 Ом и выше 100 Ом влияние помех, наводок и электрических шумов приводит к большой погрешности расчета внутреннего сопротивления источника термоЭДС.

4. Показано, что внутреннее сопротивление источника термоЭДС является индивидуальной характеристикой, которую можно использовать для неразрушающего контроля металлов и сплавов.

5. Выявлено, что наибольшее влияние на электрические характеристики эквивалентного источника термоЭДС оказывает источник с меньшим внутренним сопротивлением.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Пластическая деформация металлов приводит к сокращению срока службы деталей или готового изделия. Своевременное обнаружение пластической деформации позволяет избежать серьезных аварий. Как правило, пластическая деформация возникает в объектах, работающих под высоким давлением, либо в объектах с переменной циклической нагрузкой, что характерно для трубопроводов высокого давления, пружин, рессор и т.д. Наличие пластической деформации приводит к изменению электрических свойств металла: проводимости и термоЭДС. Исследованию влияния пластической деформации на изменения электрических свойств металла посвящена третья глава, материал которой основан на публикациях автора [49, 166, 168, 169, 175, 176, 185-193].

Для исследования были выбраны широко распространенные термопары хромель-алюмель и хромель-капель. По шесть термопар каждого типа были подвергнуты деформации в размере 17 % и 33 % и по шесть термопар – в исходном состоянии, т.е. без пластической деформации (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Экспериментальные образцы термопар, левый – без деформации, средний – деформация 17 %, правый – деформация 33 %

Степень деформации определялась по стандартной методике как изменение размера образца при деформировании (рисунок 3.2)

$$X_{abc} = D_0 - D_1, \quad (3.1)$$

где D_0 – размер образца до деформации, D_1 – размер образца после деформации.

Относительная деформация определяется как отношение изменения размера деформированного образца относительно размера недеформированного образца к начальным размерам недеформированного изделия:

$$X = \frac{D_0 - D_1}{D_0} \cdot 100\%. \quad (3.2)$$

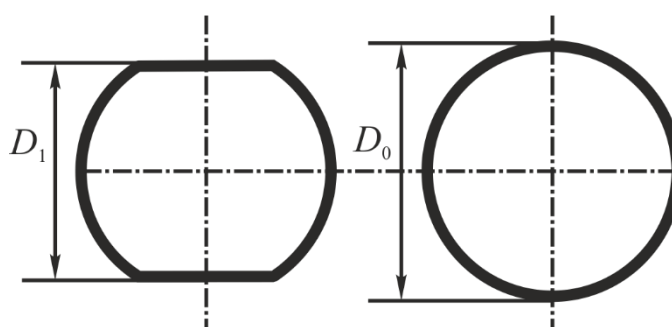


Рисунок 3.2 – Образец после деформации и до деформации

Экспериментальные исследования проводились на установке, которая состоит из термокамеры, куда помещались термопары, вольтметра, набора переключаемых нагрузочных резисторов и блока управления термокамерой с набором переключаемых нагрузочных резисторов, ПК для получения данных с вольтметра [169, 175]. Эта установка позволяет получить нагрузочные характеристики термопары (зависимость напряжения на нагрузке от величины нагрузки) для различных значений температуры. При исследовании использовались четыре температуры нагрева термопар 100 °С, 150 °С, 200 °С и 228 °С.

3.1 Исследование электрических характеристик термопар с нулевой деформацией

Для выявления влияния пластической деформации металлов на электрические характеристики источников термоЭДС, образованных этими металлами, вначале исследуем электрические характеристики источников термоЭДС, образованных недеформированными металлами. Полученные данные недеформированных образцов термопар хромель-капель в усредненном виде из десяти измерений термоЭДС при разных сопротивлениях нагрузки представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Средние значения из десяти измерений термоЭДС термопары хромель-капель

$R_n, \text{ Ом}$	Разница температуры между горячим и холодным спаями			
	100 °C	150 °C	200 °C	228 °C
0,5	3,14600±0,06	5,3973333±0,1	7,645333±0,15	9,05101±0,18
0,6	3,377333±0,06	5,7786667±0,11	8,186333±0,16	9,68202±0,19
0,7	3,530333±0,07	6,0456667±0,12	8,573333±0,17	10,15167±0,2
1,2	4,421333±0,08	7,5686667±0,15	10,73713±0,2	12,71601±0,25
1,6	4,658667±0,09	7,9796667±0,16	11,32433±0,22	13,40001±0,26
4,2	5,11500±0,1	8,7526667±0,17	12,427670,25	14,70833±0,29
5,6	5,181333±0,1	8,864000±0,17	12,58667±0,25	14,91002±0,3
10,6	5,270667±0,1	9,0126667±0,18	12,798001±0,25	15,16401±0,3
58	5,353667±0,1	9,148000±0,18	12,993001±0,26	15,39702±0,3
102	5,362000±0,1	9,1603333±0,18	13,00933±0,26	15,42503±0,31
1001	5,371667±0,1	9,1736667±0,18	13,03433±0,26	15,45067±0,31
10005	5,373333±0,1	9,1753333±0,18	13,03767±0,26	15,45501±0,31

Полученные данные, представленные в графическом виде, приведены на рисунке 3.3.

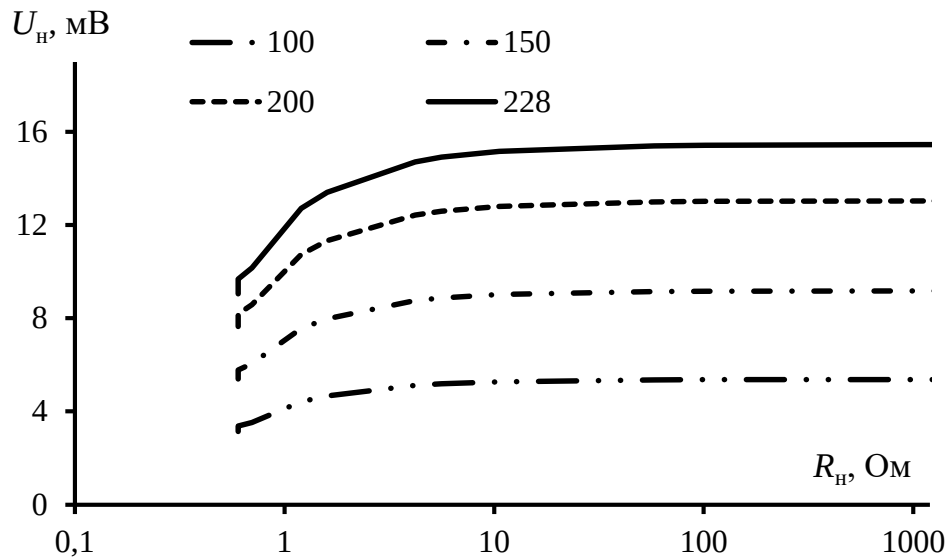


Рисунок 3.3 – Семейство нагрузочных характеристик термопары хромель-капель, для четырех разностей температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 228 °C, пунктирная линия – 200 °C, штрихпунктирная линия – 150 °C, штрихпунктирная с двумя точками – 100 °C

Анализ полученных данных показывает, что в диапазоне нагрузки от 0,5 до 10 Ом наблюдается практически линейная зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки для всех температур. Свыше 10 Ом изменения напряжения на нагрузке практически нет. С увеличением разности температур между горячим и холодным спаями происходит линейное увеличение напряжения на нагрузке.

По полученным данным можно рассчитать величину внутреннего сопротивления:

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

где R_n – сопротивление нагрузки;

U_{xx} – напряжение холостого хода на нагрузке;

U_{Rn} – напряжение на нагрузке;

U_{Rk} – напряжение на контактном сопротивлении.

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

сопротивления недеформированной термопары хромель-капель в соответствии с выражением (3.3) в графическом виде показан на рисунке 3.4.

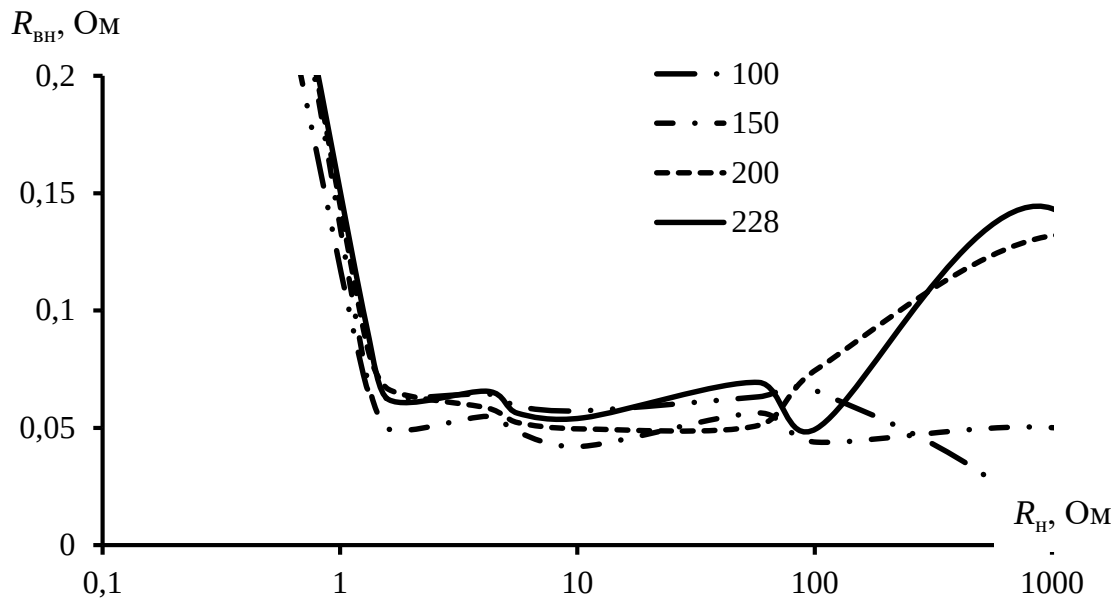


Рисунок 3.4 – Семейство характеристик внутреннего сопротивления термопары хромель-капель, для четырех разностей температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 228 °C, пунктирная линия – 200 °C, штрихпунктирная линия – 150 °C, штрихпунктирная с двумя точками – 100 °C

Из полученных данных можно сделать вывод, что внутреннее сопротивление не зависит от температуры и составляет $(0,06 \pm 0,01)$ Ом. При сопротивлении нагрузки менее 1 Ом и более 100 Ом внутреннее сопротивление определяется с большой погрешностью. Поэтому необходимо использовать данные из диапазона сопротивления нагрузки 1...100 Ом.

Используя данные из таблицы 3.1. можно рассчитать мощность на нагрузке:

$$P_{R_n} = U_{R_n} \cdot I = U_{R_n} \frac{U_{R_n}}{R_n}. \quad (3.4)$$

Результат расчета мощности на нагрузке недеформированной термопары хромель-капель в соответствии с выражением (3.4) в графическом виде показан на рисунке 3.5.

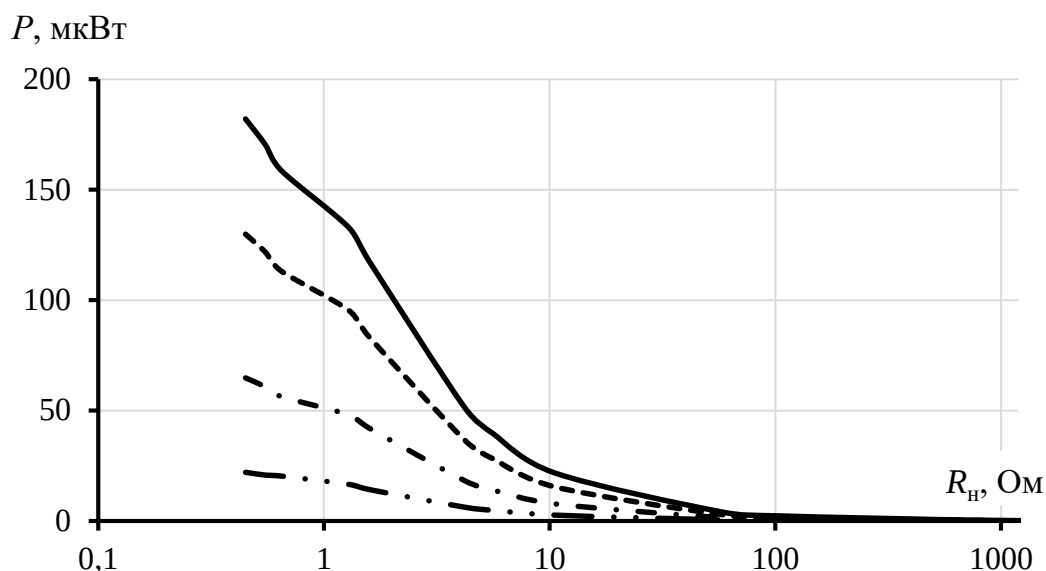


Рисунок 3.5 – Семейство характеристик мощности на нагрузке термопары хромель-капель, для четырех разностей температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 228 °C, пунктирная линия – 200 °C, штрихпунктирная линия – 150 °C, штрихпунктирная с двумя точками – 100 °C

По полученным результатам можно сделать вывод, что режим максимальной мощности, получаемый при согласованной нагрузке, т.е. при равенстве внутреннего сопротивления источника и сопротивления нагрузки, на графиках не отображается, т.к. в этом диапазоне не удалось получить данные.

Результаты исследования недеформированных образцов термопар хромель-алюмель в усредненном виде из десяти измерений термоЭДС при разных сопротивлениях нагрузки представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Средние значения из десяти измерений термоЭДС термопары хромель-алюмель

R_H , Ом	Разница температуры между горячим и холодным спаями			
	100 °C	150 °C	200 °C	228 °C
0,5	1,955333±0,04	3,164667±0,06	4,472±0,09	5,165667±0,10
0,6	2,108333±0,04	3,399333±0,07	4,793667±0,09	5,541±0,11
0,7	2,206±0,04	3,564±0,07	5,027667±0,10	5,814±0,11
1,2	2,795667±0,05	4,507333±0,09	6,365333±0,12	7,357667±0,14
1,6	2,957333±0,06	4,767333±0,09	6,732667±0,13	7,781±0,15
4,2	3,264±0,06	5,255667±0,10	7,425	8,581±0,17
5,6	3,304333±0,06	5,328333±0,10	7,523±0,15	8,699667±0,17
10,6	3,365667±0,07	5,426333±0,11	7,627667±0,15	8,854667±0,17
58	3,419667±0,07	5,516±0,11	7,760667±0,15	8,997333±0,18
102	3,426±0,07	5,527±0,11	7,797333±0,16	9,013667±0,18
1001	3,434±0,07	5,529±0,11	7,811667±0,16	9,025333±0,18
10005	3,434667±0,07	5,566±0,11	7,812667±0,16	9,027333±0,18

Полученные данные, представленные в графическом виде, приведены на рисунке 3.6 для более наглядного отображения.

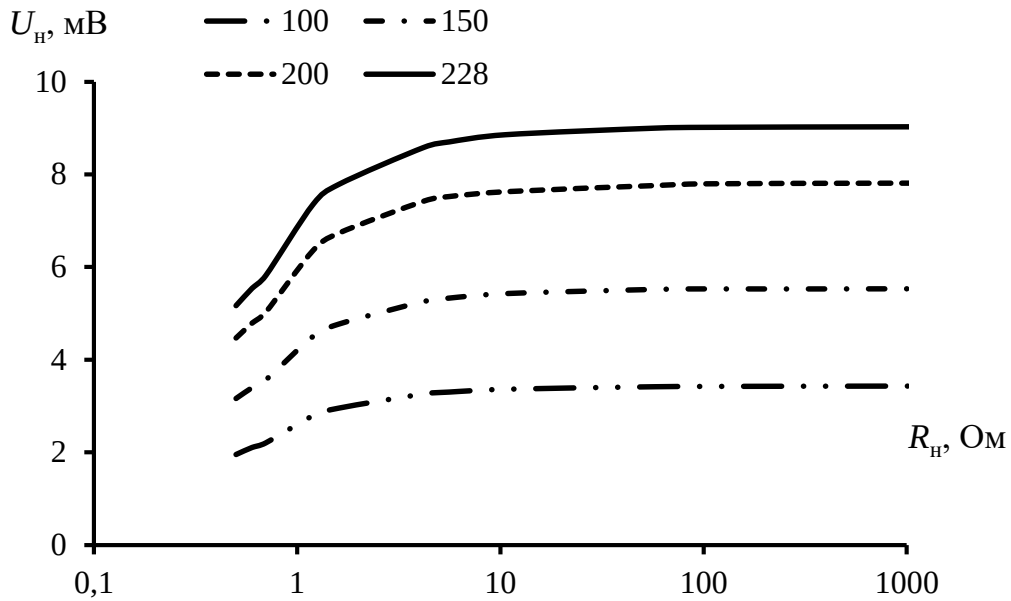


Рисунок 3.6 – Семейство нагрузочных характеристик термопары хромель-капель, для четырех разностей температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 228 °C, пунктирная линия – 200 °C, штрихпунктирная линия – 150 °C, штрихпунктирная с двумя точками – 100 °C

Анализ полученных данных показывает, что, как и для предыдущей термопары, в диапазоне нагрузки от 0,5 до 10 Ом наблюдается практически линейная зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки для всех температур. Свыше 10 Ом изменения напряжения на нагрузке практически нет. С увеличением разности температур между горячим и холодным спаями происходит линейное увеличение напряжения на нагрузке.

Используя данные таблицы 3.2, можно рассчитать величину внутреннего сопротивления по формуле (3.3). При расчете в качестве напряжения холостого хода было взято напряжение на нагрузке при сопротивлении нагрузки 10 кОм. Результат расчета внутреннего сопротивления недеформированной термопары хромель-алюмель в соответствии с выражением (3.3) в графическом виде показан на рисунке 3.7.

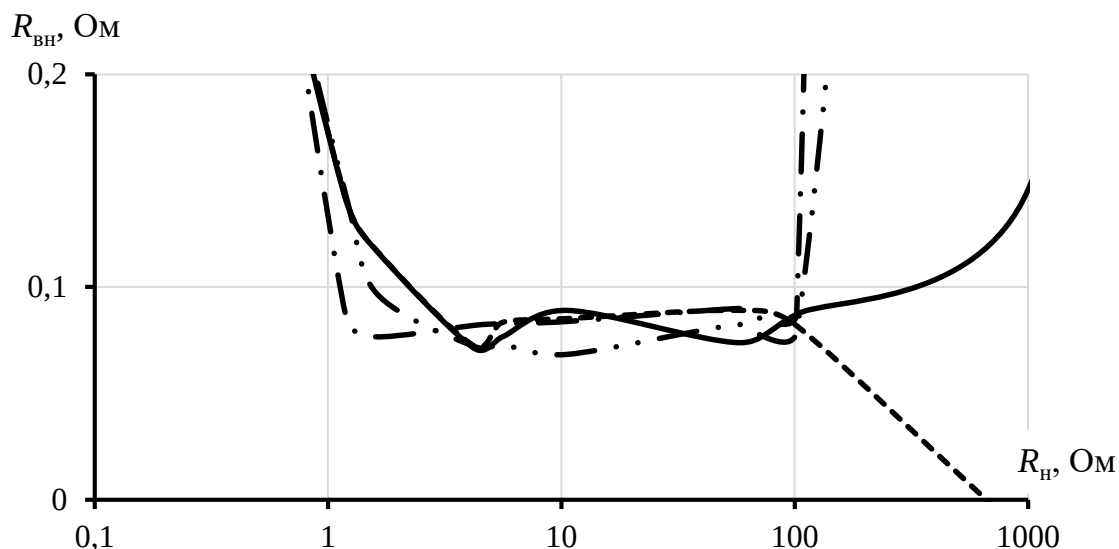


Рисунок 3.7 – Семейство характеристик внутреннего сопротивления термопары хромель-алюмель, для четырех разностей температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 228 °С, пунктирная линия – 200 °С, штрихпунктирная линия – 150 °С, штрихпунктирная с двумя точками – 100 °С

Из полученных данных можно сделать вывод, что внутреннее сопротивление не зависит от температуры и составляет $(0,08 \pm 0,01)$ Ом. При сопротивлении нагрузки менее 1 Ом и более 100 Ом внутреннее сопротивление также определяется с большой погрешностью. Поэтому необходимо использовать данные из диапазона сопротивления нагрузки 1...100 Ом.

Используя данные из таблицы 3.2, можно рассчитать мощность на нагрузке по формуле (3.4).

Результат расчета мощности на нагрузке недеформированной термопары хромель-капель в соответствии с выражением (3.4) в графическом виде показан на рисунке 3.8.

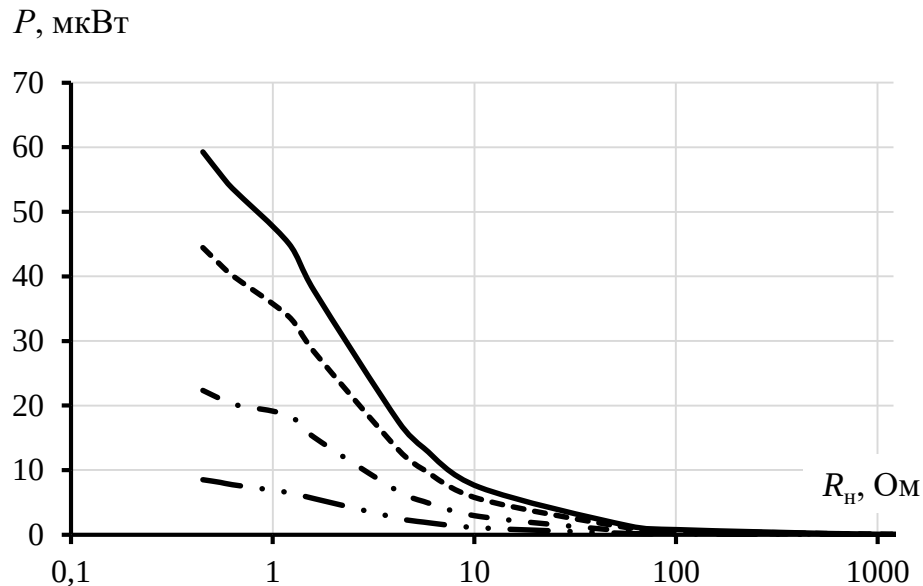


Рисунок 3.8 – Семейство характеристик мощности на нагрузке термопары хромель-алюмель, для четырех разностей температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 228 °C, пунктирная линия – 200 °C, штрихпунктирная линия – 150 °C, штрихпунктирная с двумя точками – 100 °C

По полученным результатам можно сделать вывод, что режим максимальной мощности, получаемый при согласованной нагрузке, т.е. при равенстве внутреннего сопротивления источника и сопротивления нагрузки, на графиках не отображается, т.к. в этом диапазоне не удалось получить данные.

3.2 Исследование электрических характеристик термопар с деформацией 17 %

Для выявления влияния пластической деформации металлов на электрические характеристики источников термоЭДС, образованных этими металлами, исследуем электрические характеристики источников термоЭДС, образованные деформированными металлами со степенью деформации 17 %. При исследовании использовались три температуры нагрева горячего спая термопар 100 °C, 150 °C и 200 °C. Холодный спай поддерживался при температуре 0 °C.

Полученные данные деформированных образцов термопар хромель-капель, со степенью деформации 17 %, в усредненном виде из десяти измерений термоЭДС при разных сопротивлениях нагрузки, представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Средние значения термоЭДС термопары хромель-капель со степенью деформации 17 %

R_n , Ом	Разница температуры между горячим и холодным спаями		
	100 °C	150 °C	200 °C
0,5	1,932±0,041	4,268±0,085	6,049±0,121
0,6	2,381±0,043	4,501±0,090	6,564±0,132
0,7	2,833±0,056	4,802±0,096	7,036±0,141
1,2	3,943±0,078	6,706±0,136	9,394±0,188
1,6	4,347±0,086	7,311±0,146	10,110±0,202
4,2	5,308±0,105	8,816±0,177	12,601±0,252
5,6	5,571±0,114	9,090±0,181	12,990±0,130
10,6	5,894±0,120	9,632±0,192	13,773±0,274
58	6,140±0,123	10,110±0,202	14,420±0,288
102	6,174±0,123	10,159±0,203	14,502±0,290
1001	6,209±0,124	10,220±0,204	14,580±0,296
10005	6,212±0,124	10,228±0,205	14,591±0,298

Полученные данные, представленные в графическом виде, приведены на рисунке 3.9.

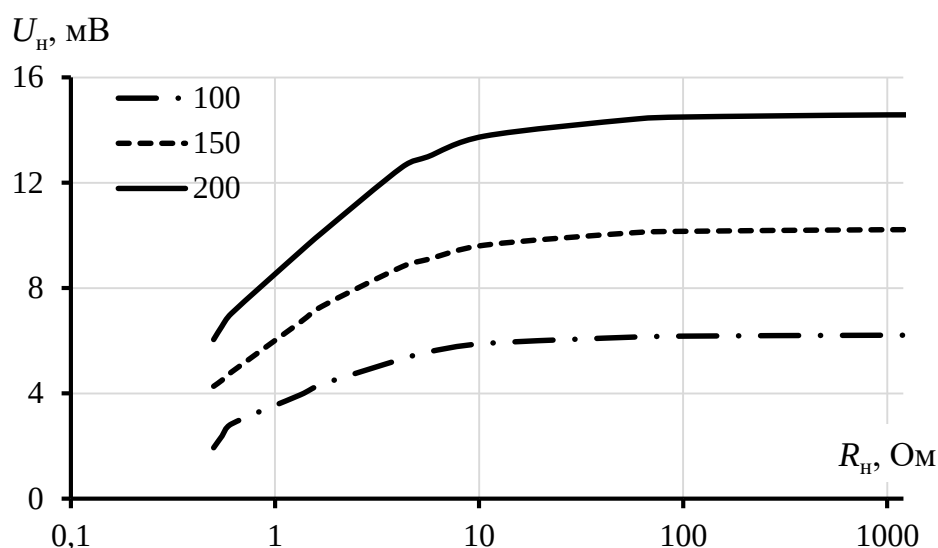


Рисунок 3.9 – Семейство нагрузочных характеристик пластически деформированной термопары хромель-капель со степенью деформации 17 %, для трех разностей температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 200 °С, пунктирная линия – 150 °С, штрихпунктирная линия – 100 °С

Анализ полученных данных показывает, что характер зависимости у источника термоЭДС, образованного пластически деформированными сплавами хромель-капель со степенью деформации 17 %, не изменился, изменились только абсолютные значения, а также произошло увеличение напряжения на нагрузке с 13,04 до 14,48 мВ в режиме холостого хода при разнице температур между горячим и холодным спаями 200 °С, т.е. увеличение составило 10 %. Для температуры 150 °С - увеличение с 9,18 до 10,22 мВ, что составило также 10 %. Для температуры 100 °С - увеличение с 5,37 до 6,21 мВ, что составило 13,5 %.

По полученным данным определили величину внутреннего сопротивления в соответствии с формулой (3.3). Результат расчета внутреннего сопротивления деформированной термопары хромель-капель в соответствии с выражением (3.3) в графическом виде показан на рисунке 3.10.

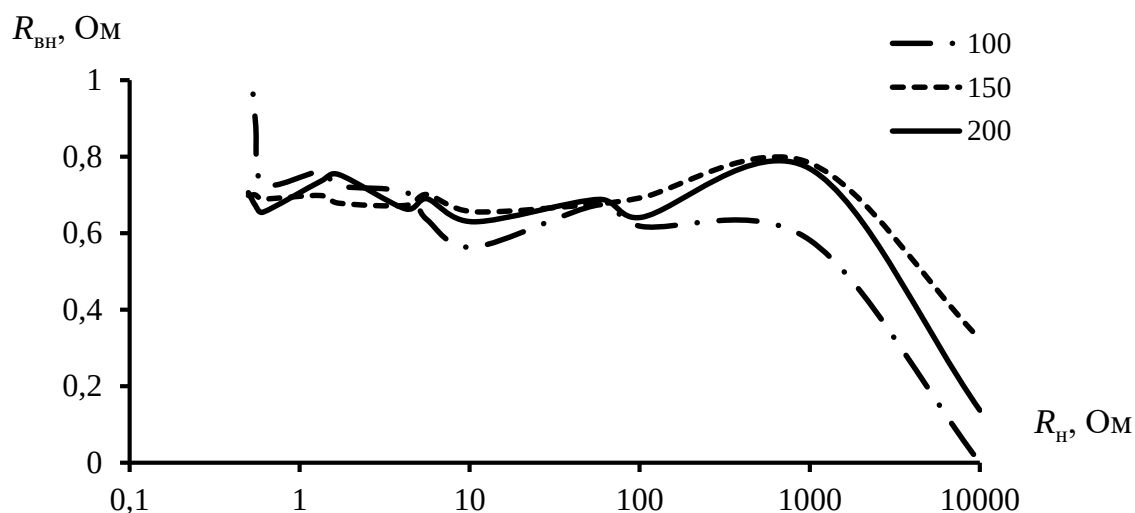


Рисунок 3.10 – Семейство характеристик внутреннего сопротивления пластически деформированной термопары хромель-капель со степенью деформации 17 %, для трех разностей температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 200 °C, пунктирная линия – 150 °C, штрихпунктирная линия – 100 °C

Из полученных данных можно сделать вывод, что внутреннее сопротивление пластически деформированной термопары хромель-капель со степенью деформации 17 % не зависит от температуры и составляет $(0,7 \pm 0,1)$ Ом, что примерно в 11,7 раза больше по сравнению с источником термоЭДС, образованного недеформированными сплавами хромель-капель. При сопротивлении нагрузки менее 1 Ом и более 100 Ом внутреннее сопротивление также определяется с большой погрешностью. Поэтому необходимо использовать данные из диапазона сопротивления нагрузки 1...100 Ом.

Используя данные из таблицы 3.3. можно рассчитать мощность на нагрузке, используя формулу (3.4). Результат расчета мощности на нагрузке недеформированной термопары хромель-капель в соответствии с выражением (3.4) в графическом виде показан на рисунке 3.11.

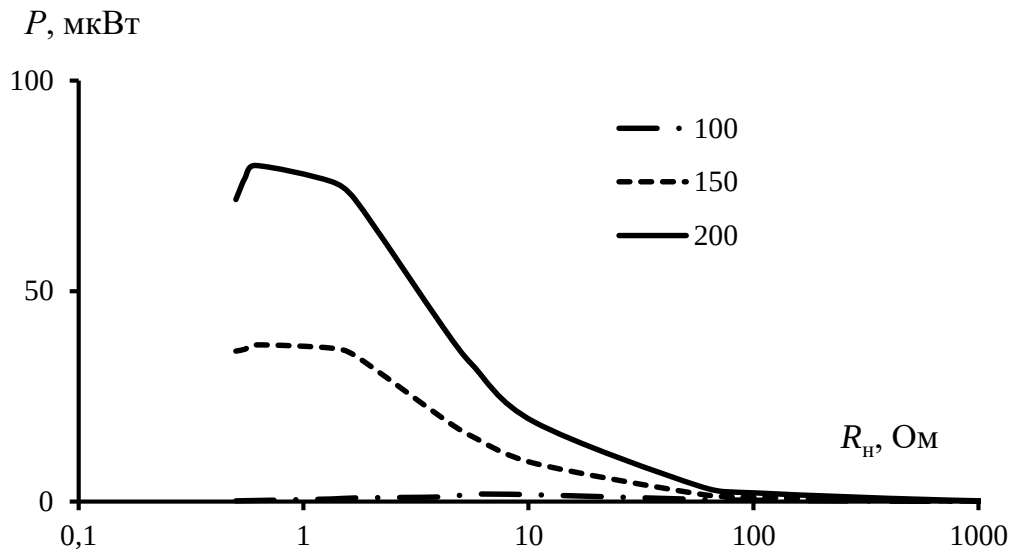


Рисунок 3.11 – Семейство характеристик мощности на нагрузке пластически деформированной термопары хромель-капель со степенью деформации 17 %, для трех разностей температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 200 °С, пунктирная линия – 150 °С, штрихпунктирная линия – 100 °С

По полученным результатам можно сделать вывод, что мощность пластически деформированной термопары хромель-капель со степенью деформации 17 % уменьшилась примерно в 1,5 раза для разницы температур горячего и холодного спаев 200 °С, в 1,75 раза для разницы температур горячего и холодного спаев 150 °С и в 12 раз для разницы температур горячего и холодного спаев 100 °С. Из-за увеличения внутреннего сопротивления на графике отображается режим согласованной нагрузки ($R_n = R_{вн} = 0,7$ Ом). Мощность в этой точке максимальна и составляет 79,85 мкВт (200 °С), 36,42 (150 °С) и 1,8 мкВт (100 °С).

Результаты исследования пластически деформированных образцов термопар хромель-алюмель со степенью деформации 17 % в усредненном виде из десяти измерений термоЭДС при разных сопротивлениях нагрузки представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Средние значения термоЭДС пластически деформированной термопары хромель-алюмель со степенью деформации 17 %

R_n , Ом	Разница температуры между горячим и холодным спаями		
	100 °C	150 °C	200 °C
0,5	1,607±0,032	1,620±0,032	2,119±0,042
0,6	1,767±0,043	1,788±0,035	2,381±0,047
0,7	1,841±0,037	2,002±0,040	2,705±0,054
1,2	2,168±0,043	3,157±0,063	4,303±0,086
1,6	2,420±0,048	3,697±0,074	5,199±0,104
4,2	2,810±0,056	4,422±0,088	5,984±0,119
5,6	2,915±0,058	4,586±0,092	6,415±0,128
10,6	3,083±0,061	4,803±0,096	6,793±0,136
58	3,244±0,065	5,033±0,101	7,136±0,142
102	3,259±0,065	5,070±0,101	7,170±0,143
1001	3,277±0,065	5,101±0,102	7,209±0,144
10005	3,279±0,065	5,102±0,102	7,214±0,144

Полученные данные, представленные в графическом виде, приведены на рисунке 3.12 для более наглядного отображения.

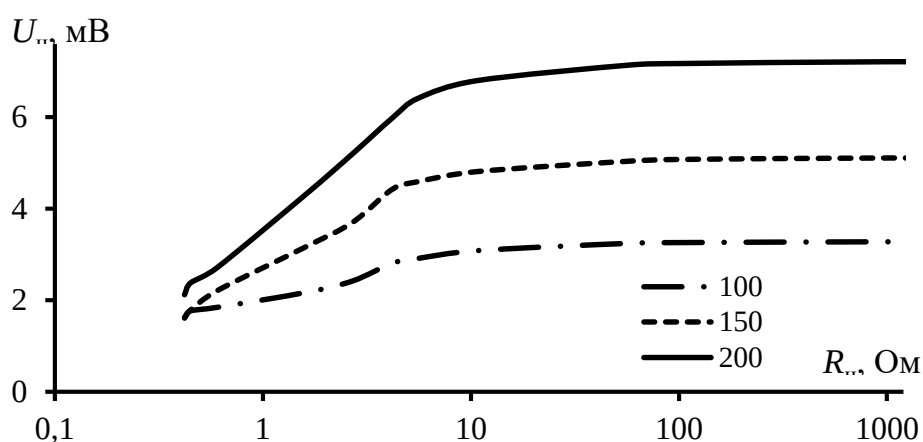


Рисунок 3.12 – Семейство нагрузочных характеристик деформированной термопары хромель-алюмель со степенью деформации 17 %, для трех разностей

температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 200 °С, пунктирная линия – 150 °С, штрихпунктирная линия – 100 °С

Анализ полученных данных показывает, что характер зависимости не изменился по сравнению с термопарой, изготовленной из недеформированных сплавов. Однако абсолютные значения уменьшились с 7,92 до 7,21 мВ (температура 200 °С), с 5,78 до 5,10 мВ (температура 150 °С) и с 3,58 до 3,28 мВ (температура 100 °С). Уменьшение составило около 10 % в относительных единицах.

Используя данные таблицы 3.4, рассчитаем величину внутреннего сопротивления по формуле (3.3). При расчете в качестве напряжения холостого хода было взято напряжение на нагрузке при сопротивлении нагрузки 10 кОм. Результат расчета внутреннего сопротивления деформированной термопары хромель-алюмель в соответствии с выражением (3.3) в графическом виде показан на рисунке 3.13.

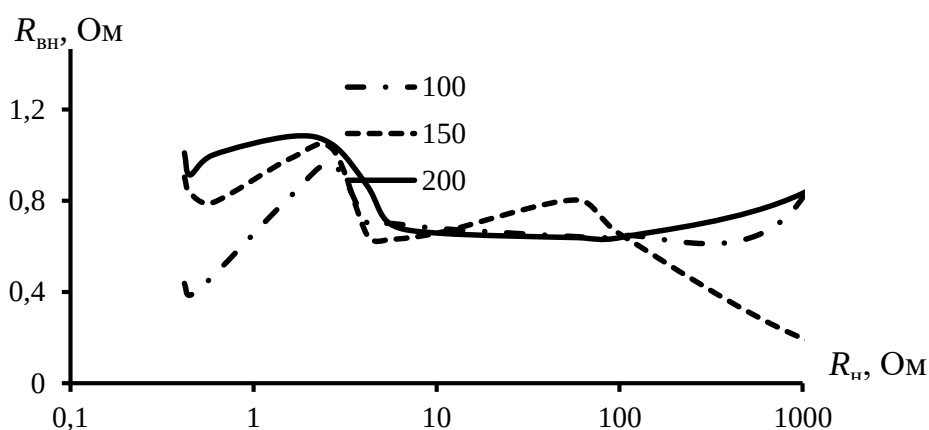


Рисунок 3.13 – Семейство характеристик внутреннего сопротивления деформированной термопары хромель-алюмель со степенью деформации 17 %, для трех разностей температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 200 °С, пунктирная линия – 150 °С, штрихпунктирная линия – 100 °С

Из полученных данных можно сделать вывод, что внутреннее сопротивление не зависит от температуры, сопротивления нагрузки и составляет $(0,8 \pm 0,1)$ Ом. При

сопротивлении нагрузки менее 1 Ом и более 100 Ом внутреннее сопротивление также определяется с большой погрешностью. Поэтому необходимо использовать данные из диапазона сопротивления нагрузки 1...100 Ом.

Используя данные из таблицы 3.4, рассчитаем мощность на нагрузке по формуле (3.4).

Результат расчета мощности на нагрузке деформированной термопары хромель-алюмель со степенью деформации 17 % в соответствии с выражением (3.4) в графическом виде показан на рисунке 3.14.

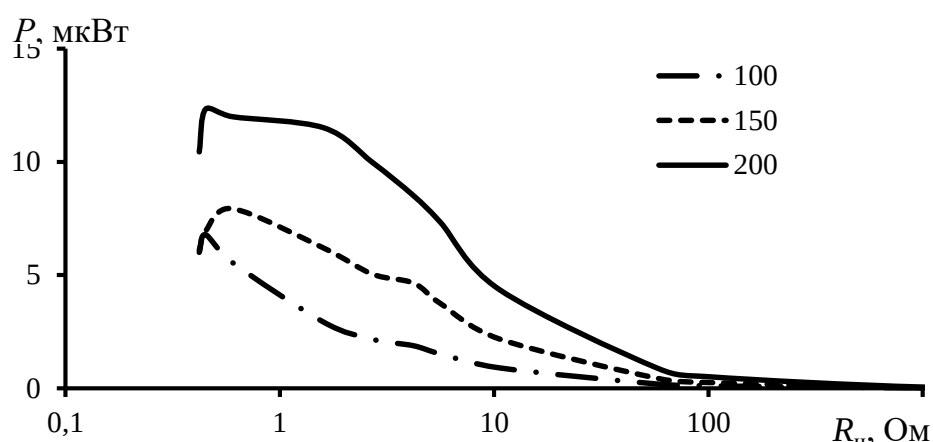


Рисунок 3.14 – Семейство характеристик мощности на нагрузке деформированной термопары хромель-алюмель со степенью деформации 17%, для трех разностей температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 200 °C, пунктирная линия – 150 °C, штрихпунктирная линия – 100 °C

По полученным результатам можно сделать вывод, что мощность пластически деформированной термопары хромель-алюмель со степенью деформации 17 % уменьшилась примерно в 2,2 раза для разницы температур горячего и холодного спаев 200 °C, в 1,8 раза для разницы температур горячего и холодного спаев 150 °C и в 2 раза для разницы температур горячего и холодного спаев 100 °C. Из-за увеличения внутреннего сопротивления на графике виден режим согласованной нагрузки ($R_n = R_{вн} = 0,7$ Ом). Мощность в этой точке максимальна и составляет 12,3 мкВт (200 °C), 7,9 мкВт (150 °C) и 5,5 мкВт (100 °C).

3.3 Исследование электрических характеристик термопар с деформацией 33 %

Следующим источником термоЭДС, выбранным для исследования, была пластически деформированная термопара хромель-капель со степенью деформации 33 %. При исследовании использовались три температуры нагрева горячего спая термопар 100 °С, 150 °С и 200 °С. Холодный спай поддерживался при температуре 0 °С.

Полученные данные деформированных образцов термопар хромель-капель, со степенью деформации 33 %, в усредненном виде из десяти измерений термоЭДС при разных сопротивлениях нагрузки, представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Средние значения термоЭДС термопары хромель-капель со степенью деформации 33 %

R_n , Ом	Разница температуры между горячим и холодным спаями		
	100 °С	150 °С	200 °С
0,5	0,631±0,001	0,823±0,002	0,901±0,018
0,6	0,633±0,001	0,938±0,002	1,028±0,02
0,7	0,805±0,002	1,047±0,011	1,158±0,013
1,2	1,559±0,031	2,295±0,045	2,902±0,059
1,6	1,926±0,039	2,799±0,056	3,915±0,07
4,2	3,128±0,062	4,550±0,091	5,998±0,119
5,6	3,405±0,068	5,033±0,102	6,748±0,135
10,6	3,892±0,048	6,014±0,12	7,942±0,159
58	4,372±0,087	6,809±0,136	9,162±0,183
102	4,414±0,088	6,915±0,139	9,278±0,185
1001	4,432±0,088	7,038±0,141	9,449±0,189
10005	4,437±0,088	7,055±0,141	9,469±0,189

Полученные данные, представленные в графическом виде, приведены на рисунке 3.15.

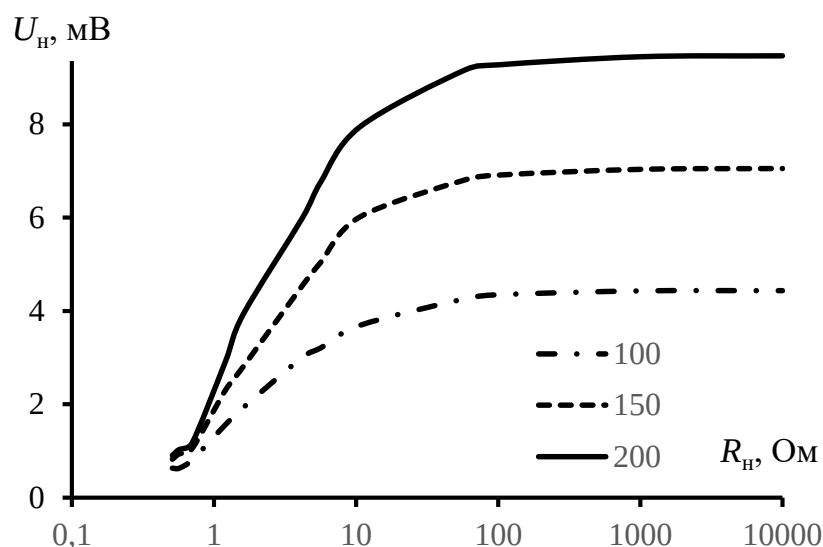


Рисунок 3.15 – Семейство нагрузочных характеристик пластически деформированной термопары хромель-капель со степенью деформации 33 %, для трех разностей температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 200 °C, пунктирная линия – 150 °C, штрихпунктирная линия – 100 °C

Анализ полученных данных показывает, что характер зависимости у источника термоЭДС, образованного пластически деформированными сплавами хромель-капель со степенью деформации 33 %, не изменился, изменились только абсолютные значения, а также произошло уменьшение напряжения на нагрузке с 14,48 до 9,47 мВ в режиме холостого хода при разнице температур между горячим и холодным спаями 200 °C, т.е. уменьшение составило 35 %. Для температуры 150 °C - уменьшение с 10,22 до 7,06 мВ, что составило также 31 %. Для температуры 100 °C - уменьшение с 6,21 до 4,44 мВ, что составило 28,5 %.

По полученным данным определили величину внутреннего сопротивления в соответствии с формулой (3.3). Результат расчета внутреннего сопротивления деформированной термопары хромель-капель в соответствии с выражением (3.3) в графическом виде показан на рисунке 3.16.

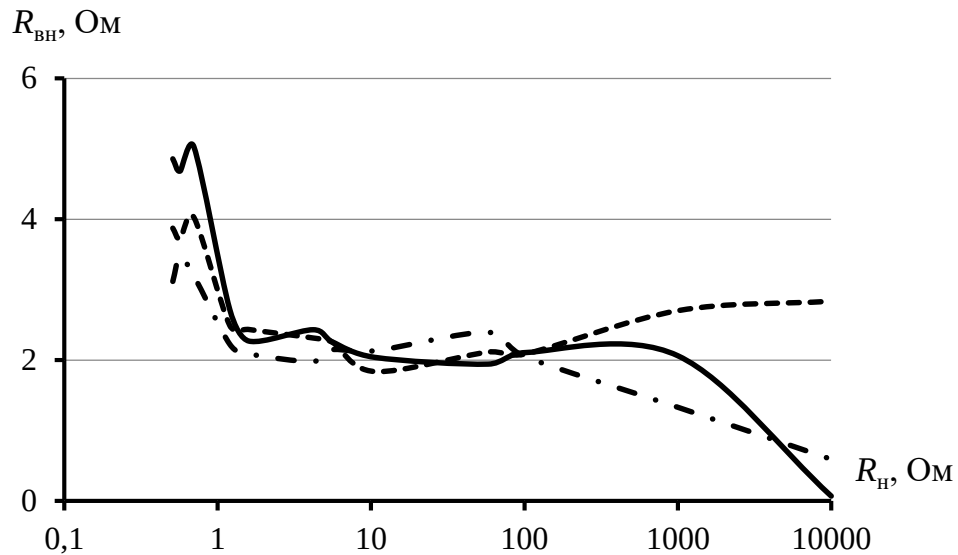


Рисунок 3.16 – Семейство характеристик внутреннего сопротивления пластически деформированной термопары хромель-капель со степенью деформации 33 %, для трех разностей температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 200 °С, пунктирная линия – 150 °С, штрихпунктирная линия – 100 °С

Из полученных данных можно сделать вывод, что внутреннее сопротивление пластически деформированной термопары хромель-капель со степенью деформации 33 % не зависит от температуры и составляет $(2,2 \pm 0,1)$ Ом. Это примерно в 31,4 раза больше по сравнению с источником термоЭДС, образованным недеформированными сплавами хромель-капель, и 2,8 раза больше по сравнению с источником термоЭДС, полученным деформированными сплавами хромель-капель со степенью деформации 17 %.

При сопротивлении нагрузки менее 1 Ом и более 100 Ом, внутреннее сопротивление также определяется с большой погрешностью. Поэтому необходимо использовать данные из диапазона сопротивления нагрузки 1...100 Ом.

Используя данные из таблицы 3.5, можно рассчитать мощность на нагрузке, используя формулу (3.4). Результат расчета мощности на нагрузке недеформированной термопары хромель-капель в соответствии с выражением (3.4) в графическом виде показан на рисунке 3.17.

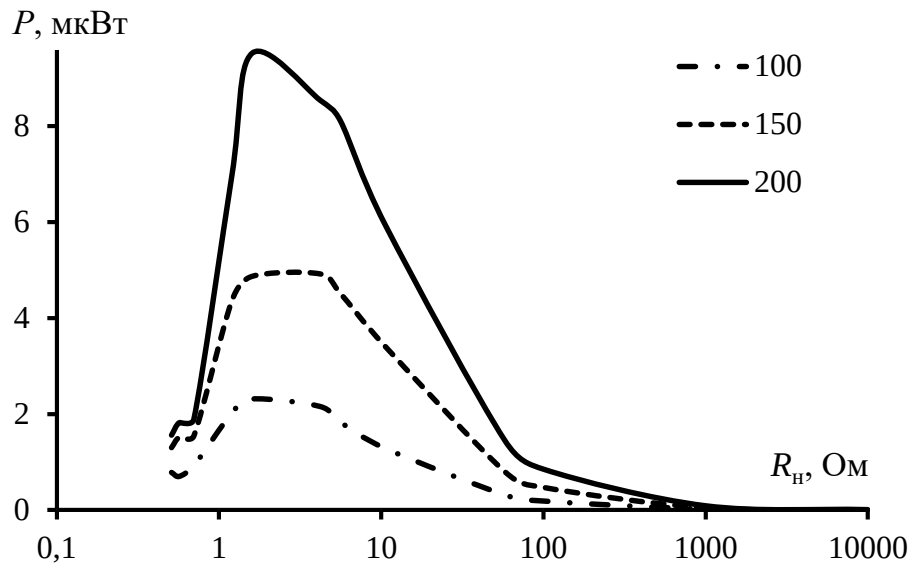


Рисунок 3.17 – Семейство характеристик мощности на нагрузке пластически деформированной термопары хромель-капель со степенью деформации 33 %, для трех разностей температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 200 °C, пунктирная линия – 150 °C, штрихпунктирная линия – 100 °C

По полученным результатам можно сделать вывод, что мощность пластически деформированной термопары хромель-капель со степенью деформации 33 % уменьшилась примерно в 6,5 раз для разницы температур горячего и холодного спаев 100 °C, 150 °C и 200 °C. Из-за увеличения внутреннего сопротивления на графике отображается режим согласованной нагрузки ($R_n = R_{вн} = 2,2 \text{ Ом}$). Мощность в этой точке максимальна и составляет 9,2 мкВт (200 °C), 4,9 мкВт (150 °C) и 2,2 мкВт (100 °C).

Результаты исследования пластически деформированных образцов термопар хромель-алюмель со степенью деформации 33 % в усредненном виде из десяти измерений термоЭДС при разных сопротивлениях нагрузки представлены в таблице 3.6.

Таблица – 3.6 Средние значения термоЭДС пластически деформированной термопары хромель-алюмель со степенью деформации 33%

R_H , Ом	Разница температуры между горячим и холодным спаями		
	100 °C	150 °C	200 °C
0,5	2,165±0,043	3,565±0,071	3,928±0,040
0,6	2,290±0,046	3,784±0,075	4,234±0,044
0,7	2,403±0,048	3,968±0,079	4,592±0,092
1,2	2,967±0,060	4,968±0,090	6,299±0,130
1,6	3,119±0,062	5,242±0,105	6,996±0,140
4,2	3,396±0,067	5,751±0,115	7,523±0,151
5,6	3,436±0,069	5,818±0,116	7,654±0,153
10,6	3,505±0,070	5,909±0,118	7,871±0,157
58	3,578±0,072	6,007±0,121	8,001±0,160
102	3,586±0,076	6,016±0,123	8,019±0,161
1001	3,592±0,079	6,025±0,125	8,030±0,162
10005	3,593±0,079	6,029±0,126	8,032±0,162

Полученные данные, представленные в графическом виде, приведены на рисунке 3.18 для более наглядного отображения.

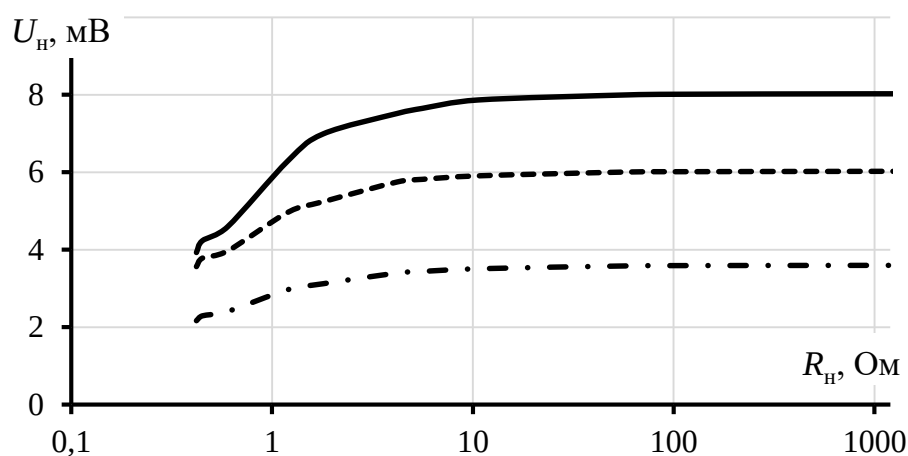


Рисунок 3.18 – Семейство нагрузочных характеристик деформированной термопары хромель-алюмель со степенью деформации 33 %, для трех разностей

температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 200 °С, пунктирная линия – 150 °С, штрихпунктирная линия – 100 °С

Анализ полученных данных показывает, что характер зависимости не изменился по сравнению с термопарой, изготовленной из недеформированных сплавов. Однако абсолютные значения немного увеличились с 7,92 до 8,03 мВ (температура 200 °С), с 5,78 до 6,03 мВ (температура 150 °С) и с 3,58 до 3,59 мВ (температура 100 °С). Уменьшение составило менее 4 % в относительных единицах.

Используя данные таблицы 3.6, рассчитаем величину внутреннего сопротивления по формуле (3.3). При расчете в качестве напряжения холостого хода было взято напряжение на нагрузку при сопротивлении нагрузки 10 кОм. Результат расчета внутреннего сопротивления деформированной термопары хромель-алюмель в соответствии с выражением (3.3) в графическом виде показан на рисунке 3.19.

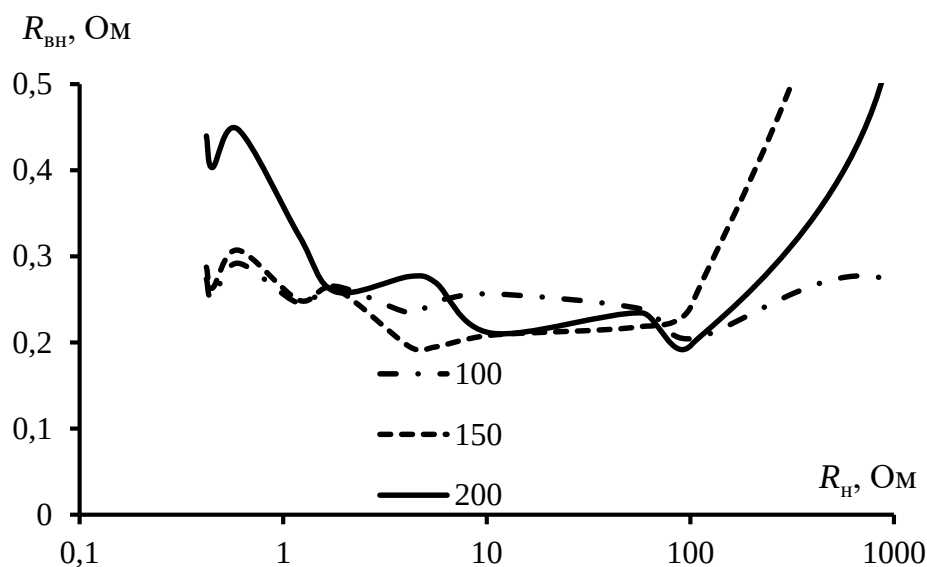


Рисунок 3.19 – Семейство характеристик внутреннего сопротивления деформированной термопары хромель-алюмель со степенью деформации 33 %, для трех разностей температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 200 °С, пунктирная линия – 150 °С, штрихпунктирная линия – 100 °С

Из полученных данных можно сделать вывод, что внутреннее сопротивление не зависит от температуры, сопротивления нагрузки и составляет $(0,25 \pm 0,1)$ Ом. При сопротивлении нагрузки менее 1 Ом и более 100 Ом внутреннее сопротивление также определяется с большой погрешностью. Поэтому необходимо использовать данные из диапазона сопротивления нагрузки 1...100 Ом.

Используя данные из таблицы 3.6, рассчитаем мощность на нагрузке по формуле (3.4).

Результат расчета мощности на нагрузке деформированной термопары хромель-алюмель со степенью деформации 33 % в соответствии с выражением (3.4) в графическом виде показан на рисунке 3.20.

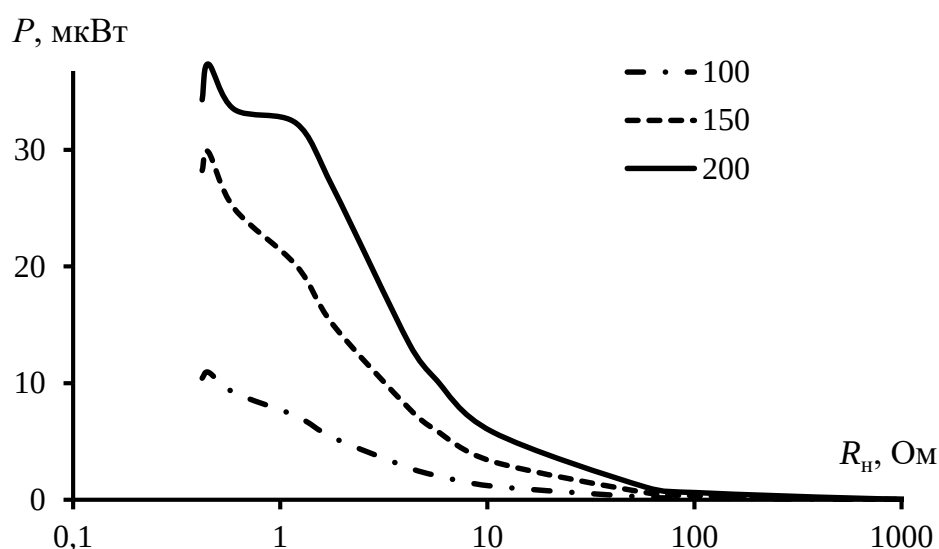


Рисунок 3.20 – Семейство характеристик мощности на нагрузке деформированной термопары хромель-алюмель со степенью деформации 33 %, для трех разностей температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 200 °C, пунктирная линия – 150 °C, штрихпунктирная линия – 100 °C

По полученным результатам можно сделать вывод, что мощность пластически деформированной термопары хромель-алюмель со степенью деформации 33 % увеличилась примерно в 1,5 раза для разницы температур горячего и холодного спаев 200 °C, в 2,5 раза для разницы температур горячего и

холодного спаев $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в 2 раза для разницы температур горячего и холодного спаев $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из-за увеличения внутреннего сопротивления на графике виден режим согласованной нагрузки ($R_{\text{н}} = R_{\text{вн}} = 0,25\text{ Ом}$). Мощность в этой точке максимальна и составляет $37,3\text{ мкВт}$ ($200\text{ }^{\circ}\text{C}$), $29,8\text{ мкВт}$ ($150\text{ }^{\circ}\text{C}$) и $10,93\text{ мкВт}$ ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$).

3.4 Влияние степени пластической деформации на величину термоЭДС и внутреннее сопротивление

Величина деформации влияет на количество дефектов в структуре металлов и сплавов, что приводит к изменению электрических характеристики источников термоЭДС, образованных этими металлами и сплавами. Для термопары хромель-капель изменение напряжения на нагрузке в режиме холостого хода представлено на рисунке 3.21. Результаты взяты из данных, полученных выше.

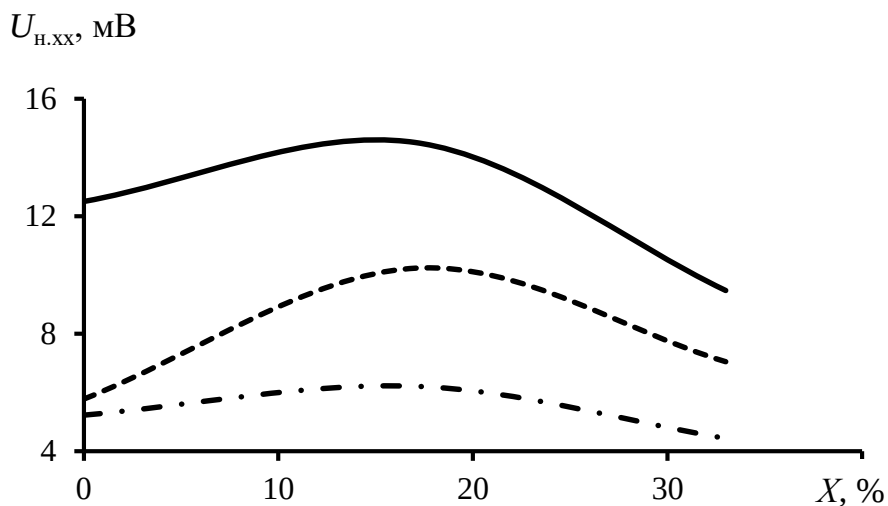


Рисунок 3.21 – Зависимость напряжения холостого хода на нагрузке термопары хромель-капель от относительной степени деформации для разностей температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, пунктирная линия – $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, штрихпунктирная линия – $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Анализ полученных данных не позволяет однозначно определить степень пластической деформации по изменению термоЭДС. Изменение внутреннего сопротивления источника термоЭДС от степени пластической деформации имеет монотонный характер. Зависимость внутреннего сопротивления источника термоЭДС от относительной степени пластической деформации показана на рисунке 3.22.

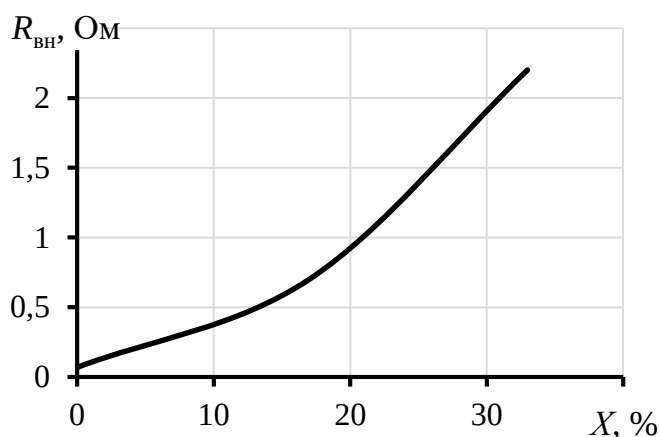


Рисунок 3.22 – Зависимость внутреннего сопротивления термопары хромель-капель от относительной степени деформации

Анализ полученных данных показывает, что с увеличением относительной степени деформации внутреннее сопротивление источника термоЭДС, образованного сплавами хромель-капель, увеличивается от 0,07 до 2,2 Ом при изменении относительной степени пластической деформации от 0 % до 33 %. Это позволяет использовать величину внутреннего сопротивления для контроля степени пластической деформации [43].

Для термопары хромель-алюмель также получается неоднозначная зависимость напряжения на нагрузке от относительной степени пластической деформации. Полученные результаты представлены на рисунке 3.23.

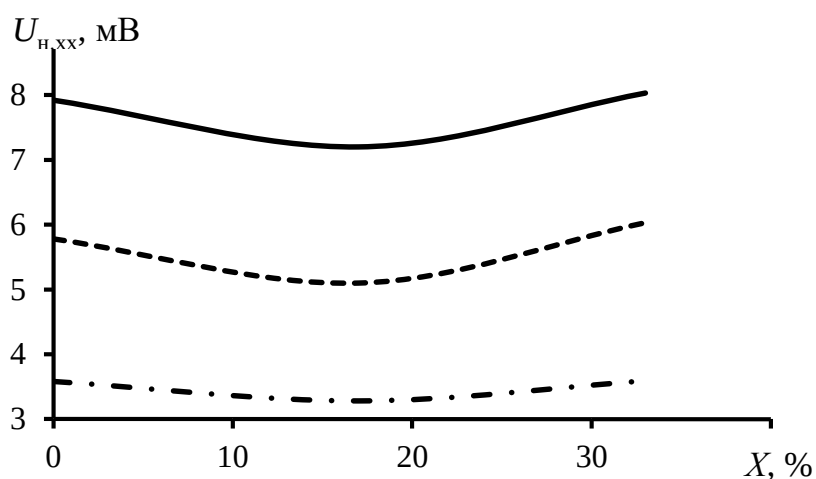


Рисунок 3.23 – Зависимость напряжения холостого хода на нагрузке термопары хромель-алюмель от относительной степени деформации для разностей температур горячего и холодного спаев, сплошная линия – 200 °С, пунктирная линия – 150 °С, штрихпунктирная линия – 100 °С

Анализ полученных данных показывает, что по полученной зависимости невозможно однозначно определить степень относительной пластической деформации. Изменение внутреннего сопротивления термопары хромель-алюмель показано на рисунке 3.24.

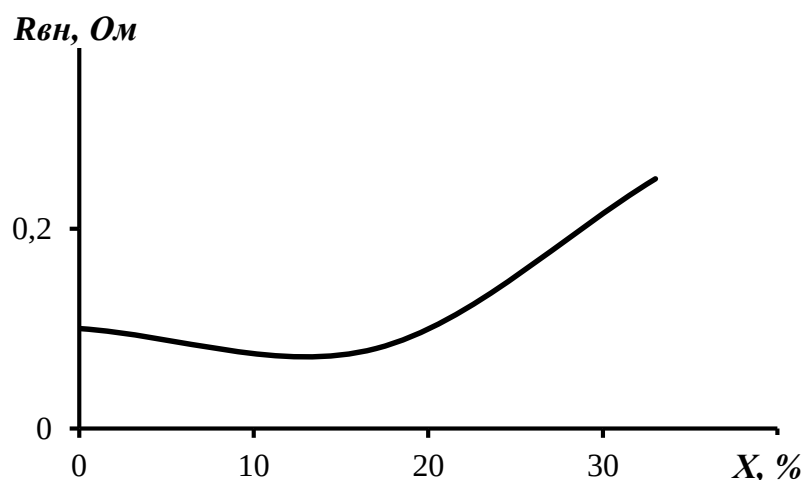


Рисунок 3.24 – Зависимость внутреннего сопротивления термопары хромель-алюмель от относительной степени деформации

Анализ полученных данных показывает, что по полученной зависимости невозможно однозначно определить степень относительной пластической деформации.

Если ввести безразмерный коэффициент, определяемый из выражения:

$$K = \frac{U_{н.хх}}{R_{вн}}$$

где $U_{н.хх}$ – напряжение на нагрузке в режиме холостого хода,

$R_{вн}$ – внутреннее сопротивление источника термоЭДС,

то получим монотонную зависимость этого коэффициента от величины пластической деформации.

Результаты расчета безразмерного коэффициента K представлены на рисунке 3.25.

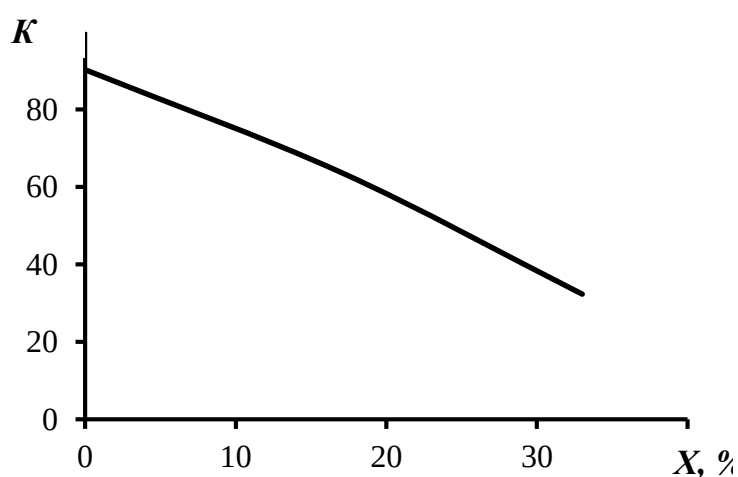


Рисунок 3.25 – Зависимость безразмерного коэффициента K от относительной деформации термопары хромель-алюмель

Анализ полученных данных позволяет утверждать, что по полученной зависимости можно однозначно определить относительную степень пластической деформации. Для термопары хромель-капель зависимость безразмерного коэффициента от относительной степени пластической деформации представлена на рисунке 3.26.

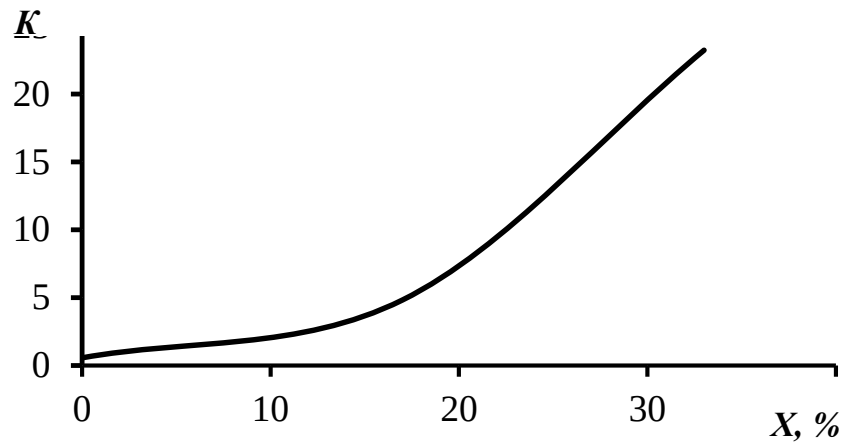


Рисунок 3.26 – Зависимость безразмерного коэффициента K от относительной степени пластической деформации термопары хромель-капель

Анализ данных, представленных на рисунке 3.26, позволяет сделать вывод о однозначной зависимости безразмерного коэффициента от относительной степени пластической деформации. Однако, зависимости безразмерного коэффициента термопар хромель-алюмель и хромель-капель имеют противоположный наклон. Это позволяет сделать вывод, что для использования безразмерного коэффициента в диагностике необходимо предварительно получить градуировочную характеристику этого коэффициента для контролируемых металлов и сплавов.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ термоэлектрических свойств металлов при пластической деформации позволяет сделать следующие выводы:

1. При пластической деформации происходит изменение напряжения на нагрузке источника термоЭДС, которое зависит от степени пластической деформации. Причем эта зависимость может быть неоднозначной.
2. При пластической деформации происходит изменение внутреннего сопротивления источника термоЭДС, которое также зависит от степени пластической деформации. Причем эта зависимость может быть как монотонной, так и немонотонной.

3. При определении внутреннего сопротивления необходим учет контактного сопротивления для получения достоверных данных о термоЭДС.

4. Для корректного детектирования степени пластической деформации целесообразно использовать безразмерный коэффициент, определяемый отношением напряжения холостого хода на нагрузке к внутреннему сопротивлению. В этом случае получается монотонная зависимость этого коэффициента от степени пластической деформации как для источника термоЭДС, образованного пластически деформированной термопарой хромель-алюмель, так и для источника термоЭДС, образованного пластически деформированной термопарой хромель-капель. Однако, зависимости безразмерного коэффициента источников термоЭДС, образованными пластически деформированными термопарами хромель-алюмель и хромель-капель, имеют противоположный наклон. Это позволяет сделать вывод, что для использования безразмерного коэффициента в диагностике необходимо предварительно получить градуировочную характеристику этого коэффициента для контролируемых металлов и сплавов.

ГЛАВА 4. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КОНТАКТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Неисправности в сети электроснабжения приводят к возникновению чрезвычайных ситуаций, таких как возгорание электроустановок. Согласно статистическим данным, опубликованным пожарным управлением США в национальной информационной системе реагирования на чрезвычайные ситуации, в 2019 году было более 87 тысяч пожаров, вызванных неисправностью электрооборудования и бытовых электроприборов. При этом количество пострадавших составило более 20 тысяч, из них со смертельным исходом - почти 4 тысячи человек. Материальные потери превысили 15 миллиардов долларов [194, 195]. В России ситуация чуть лучше. Так в 2021 году произошло 57390 пожаров, вызванных неисправностью электрооборудования и бытовых электроприборов. При этом количество пострадавших составило более 4,5 тысяч из них со смертельным исходом – более двух тысяч человек. Материальные потери превысили 15 244,7 млн. рублей [196, 197].

Существующие системы мониторинга сети электроснабжения позволяют контролировать объем потребления электроэнергии, качество напряжения, наличие перегрузок, но не обнаруживают неисправные контактные соединения. Это задача является одной из приоритетных, так как из-за неисправности контактного соединения возникает около 5 % пожаров в электроустановках. Основной неисправностью контактного соединения является возникновение большого контактного сопротивления. Контактное сопротивление обусловлено конечной площадью соприкосновения двух проводников. При этом площадь соприкосновения меньше, чем площадь сечения проводников. Кроме того, возможное окисление поверхности проводников также приводит к возникновению контактного сопротивления. Нормативное значение контактного сопротивления в соответствии с РД 34.45-51.300-97 [109] и ПТЭЭП [110] не должно превышать

50 мОм при расположении контактов в обычных помещениях и 30 мОм во взрывоопасных помещениях и помещениях с высокой влажностью.

Исследованию контактного сопротивления посвящено много работ, в которых предлагаются разные методы его снижения [198-213]. Большое контактное сопротивление является следствием уменьшенного усилия прижатия в контактном соединении, вызванного пластической деформацией. Пластическая деформация проводников в контактном соединении возникает из-за нагрева контактного соединения, например, в момент короткого замыкания или протекания пусковых токов электроустановок [214], которые длятся сотни микросекунд и в десятки раз превышают токи в установившемся режиме. Контактное соединение нагревается, размеры проводников увеличиваются, и происходит их пластическая деформация [215-216]. При коротких замыканиях и в момент протекания пусковых токов в проводах возникает вибрация [217], которая приводит к ослаблению усилия прижатия и, соответственно, к уменьшению площади соприкосновения, что в свою очередь повышает контактное сопротивление. Кроме того, окисление проводников в месте контактного соединения [218] приводит к увеличению контактного сопротивления. Контактное сопротивление нагревается за счет протекания тока нагрузки и нагревает за собой изоляцию проводников, что может привести к ее возгоранию. В конечном итоге это может привести не только к отказу сети электроснабжения, но и к появлению чрезвычайной ситуации [219-220]. Большое контактное сопротивление трудно детектировать, и на сегодняшний день для его выявления не существует эффективных средств. Наиболее распространенной практикой выявления большого контактного сопротивления является профилактика, которая выполняется обслуживающим персоналом вручную методом полной или частичной разборки контактного соединения. Еще одним способом выявления большого контактного сопротивления является использование термонаклеек. Однако это одноразовые элементы, которые необходимо заменять после использования, кроме того, их установка и периодический осмотр также производятся вручную и являются очень трудоёмкими. Современных приборов мониторинга большого контактного

сопротивления промышленность не выпускает. Поэтому задача разработки научно обоснованных подходов к созданию методов и устройств мониторинга контактного сопротивления является актуальной.

Существующие способы контроля контактного сопротивления ориентированы на использование микроомметров. Операция контроля предполагает отключение питающего напряжения при измерении контактного сопротивления. Для проверки всех контактных соединений в небольшом офисе требуется более одного часа времени, что доставляет определенные неудобства потребителям электроэнергии. Такая процедура проводится редко, а зачастую не проводится вовсе. В работе [113] было проведено обоснование по использованию термоэлектрического метода для контроля контактного сопротивления.

В сети электроснабжения предприятий, жилых помещений и офисов используют медные и алюминиевые провода. Для медных проводов используют электротехническую медь марки М0 и М1. Химический состав электротехнических марок меди М0 и М1 приведен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Химический состав электротехнических марок меди М0 и М1

Марка медных сплавов	Процентный состав примеси, не более												
	Fe	Ni	S	Cu	As	Pb	O	Sb	Bi	Sn	P	Zn	Ag
М 0	0,004	0,002	0,003	99,93	0,001	0,003	0,04	0,002	0,0005	0,001	0	0,003	0,002
М1	0,005	0,0020	0,004	99,91	0,0020	0,005	0,05	0,002	0,001	0,002	0,004	0,003	0,003

До 2000 года при монтаже электропроводки использовались алюминиевые провода. После 2000 года Министерство топлива и энергетики РФ запретило использование алюминиевой электропроводки при монтаже электропроводки в жилых и общественных зданиях [221]. Однако в зданиях, построенных до 2000 года, используется алюминиевая электропроводка. Кроме того, алюминиевая проводка не запрещена к использованию в производственных зданиях. Алюминиевые провода изготавливают из сплавов алюминия марок 8030 и 8176. Химический состав алюминиевых сплавов марок 8176 и 8030 по ГОСТ Р 58019 - 2017 [222] приведён в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Химический состав алюминиевых сплавов марок 8176 и 8030 (%)

Марка	Массовая доля, %, не более								
	Основных компонентов			Примесей					Прочие
	Al	Fe	Cu	Si	Cu	Mg	Zn	Ga	Сумма
8176	Основной компонент	0,4-0,5	--	0,07	0,01	0,02	0,04	0,01	0,18
8030	Основной компонент	0,35-0,45	0,15-0,19	0,07	--	0,02	0,04	0,01	0,13

Несмотря на то, что примеси ухудшают электропроводность, они повышают механическую прочность проводника, поэтому широко применяются при изготовлении проводников [219].

Сеть электроснабжения даже одного помещения содержит провода и контактные соединения, изготовленные из разных проводящих материалов. Контактные соединения могут быть как разъемными, так и неразъемными. Неразъемные соединения используют при сращивании проводов или ответвлений, при этом возможны разные способы соединения: скручивание, пайка, сварка, обжим. Разъемные соединения используют для оперативного подключения и отключения разного рода электроустановок. Это утюги, чайники, фены, электроплиты в жилых домах, офисная техника в производственных помещениях, медицинское оборудование в поликлиниках и больницах, кондиционеры, сушилки, вентиляторы, аппараты для влажной уборки полов в общественных зданиях. Примеры разъемного и неразъемного соединений показаны на рисунке 4.1, *а* и 4.1, *б*. Как отмечалось выше, при протекании тока через контактное соединение последнее нагревается больше, чем сам проводник за счет большего сопротивления, т.е. появляется разность температур, и, если контактное соединение выполнено из материалов с отличными друг от друга коэффициентами Зеебека, оно становится источником термоЭДС (рисунок 4.1, *в*).

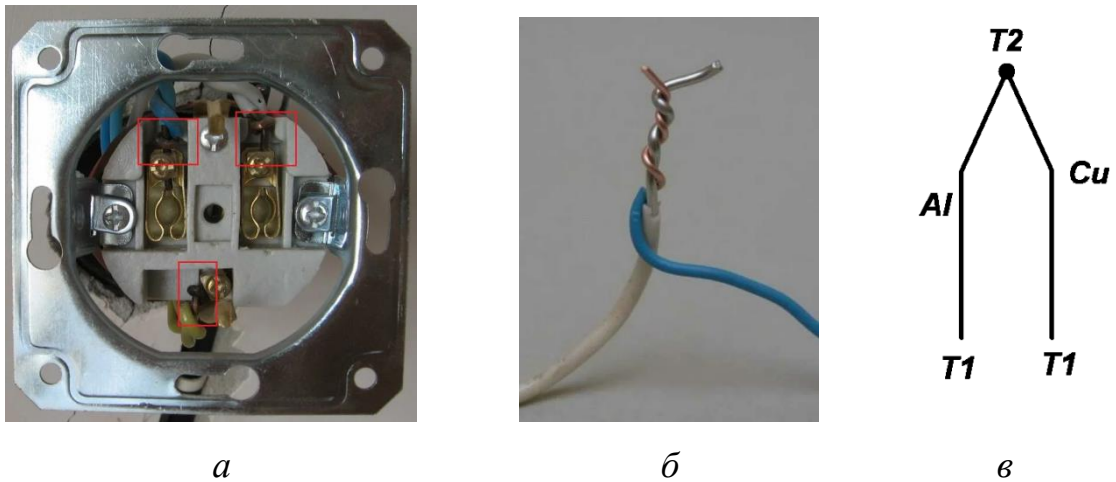


Рисунок 4.1 – Примеры соединений: *а* – разъемное (розетка), *б* – неразъемное (скрутка), *в* – искусственная термопара, образованная соединением двух проводников

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

Основные результаты 4 главы основаны на исследованиях автора и опубликованы в работах [223-236].

4.1 Контроль контактного сопротивления. Теоретический анализ

Каждый потребитель электроэнергии, называемый нагрузкой, подключается к сети электроснабжения через разъемное или неразъемное контактное соединение. При включении питания нагрузки через нее потечет ток, который будет одновременно и током контактного соединения. Этот ток будет нагревать контактное соединение, появится температура его перегрева. В соответствии с эффектом Зеебека [57, 237, 238] в цепи появится термоэлектродвижущая сила. Ее величина прямо пропорциональна интегралу от функции разности коэффициентов Зеебека металлов, используемых при изготовлении контактной пары (гнезда и вилки), в интервале температур горячего и холодного спаев [101, 239, 240]:

$$E = \int_{T_1}^{T_2} [\alpha_1(T) - \alpha_2(T)] dt, \quad (4.1)$$

где T_2 и T_1 – температура горячего и холодного спаев, соответственно;

α_1 и α_2 – коэффициенты Зеебека для первого и второго материала соответственно.

Уравнение (4.1) существенно упрощается при линейном изменении коэффициентов Зеебека в исследуемом температурном диапазоне:

$$E = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot (T_2 - T_1). \quad (4.2)$$

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

$$dQ = dQ_1 + dQ_2, \quad (4.3)$$

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

Тепло, выделяемое на контактном сопротивлении:

$$dQ = P_k t, \quad (4.4)$$

где t – время протекания тока, P_k – мощность, выделяемая на контактном сопротивлении.

Мощность равна:

$$P_k = I^2 R_k, \quad (4.5)$$

где I – ток, протекающий через контактное соединение; R_k – сопротивление контактного соединения.

Тепло dQ_1 можно найти из выражения:

$$dQ_1 = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad (4.6)$$

где m – масса контактного соединения, c – удельная теплоемкость металла, из

которого изготовлен контакт, ΔT – разница температуры контакта и окружающей среды (перегрев):

Тепло dQ_2 можно найти из формулы:

$$dQ_2 = K \cdot S \cdot (T - T_0) \cdot dt = K \cdot S \cdot \Delta T \cdot d, \quad (4.7)$$

где K – коэффициент, учитывающий все виды теплотерь; S – площадь.

Учитывая (4.6), (4.7) уравнение (4.3) приобретает вид:

$$I^2 \cdot R \cdot dt = m \cdot c \cdot \Delta T + K \cdot S \cdot \Delta T \cdot dt. \quad (4.8)$$

После преобразования получаем:

$$\frac{I^2 \cdot R}{m \cdot c} = \frac{\Delta T}{dt} + \frac{K \cdot S}{m \cdot c} \cdot \Delta T. \quad (4.9)$$

Если температура нагрева контактного соединения не будет превышать 100 °С, то R , c и K будут постоянными величинами. В этом случае решение уравнения (4.9) примет вид:

$$\Delta T = A e^{\frac{KS}{mc}t} + \frac{I^2 \cdot R}{K \cdot S}, \quad (4.10)$$

где A – постоянный коэффициент, вычисляемый из начальных условий.

В начальных условиях контактное соединение имело температуру окружающего воздуха, т.е. $\Delta T = 0$ при $t = 0$. С учетом этих начальных условий находится коэффициент A :

$$A = -\frac{I^2 \cdot R}{K \cdot S}, \quad (4.11)$$

После подстановки 4.11 в 4.10 получаем:

$$\Delta T = (T - T_0) = \frac{I^2 \cdot R}{K \cdot S} \left(1 - e^{\frac{KS}{mc}t} \right). \quad (4.12)$$

Результаты расчета температуры перегрева в соответствии с выражением (4.12) показаны на рисунке 4.2. На рисунке 4.2, *а* показан процесс нагрева, а на рисунке 4.2, *б* – процесс охлаждения.

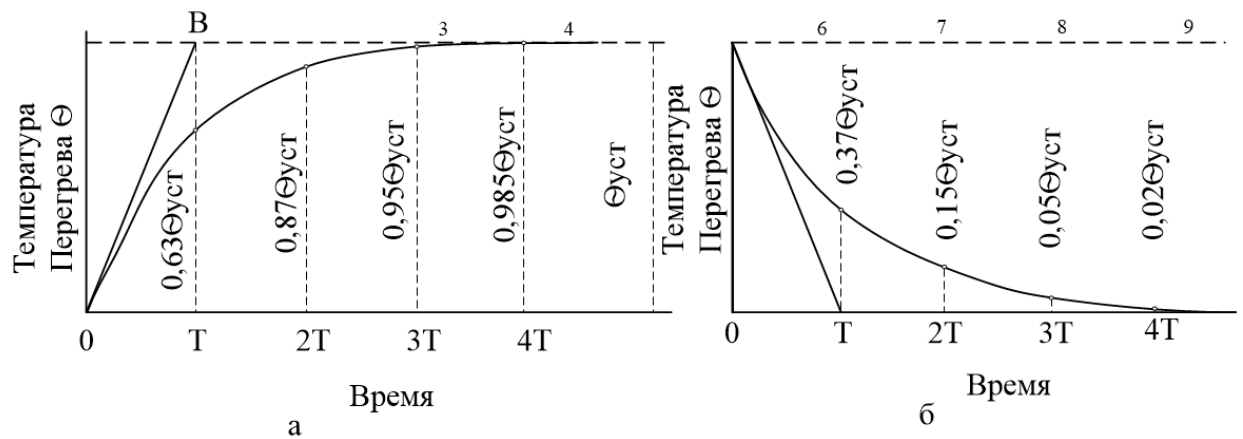


Рисунок 4.2 – Типовая зависимость температуры перегрева электрооборудования от времени, *а* – процесс нагрева, *б* – процесс охлаждения

Графическая зависимость температуры перегрева от времени имеет экспоненциальный характер, стремящийся к установившемуся значению, величину которого можно найти, если время в уравнении (4.12) приравнять к бесконечности. Тогда:

$$\Delta T_{t=\infty} = (T_{t=\infty} - T_0) = \frac{I^2 \cdot R}{K \cdot S}, \quad (4.13)$$

где $T_{t=\infty}$ – установившаяся температура контакта; T_0 – температура окружающей среды; $\Delta T_{t=\infty}$ – температура перегрева контактного соединения в установившемся режиме.

Преобразуем уравнение (4.13):

$$I^2 \cdot R = K \cdot S \cdot (T_{t=\infty} - T_0). \quad (4.14)$$

Величина $\frac{m \cdot c}{K \cdot S}$, называется постоянной времени нагрева и обозначается буквой τ , которая зависит от массы, удельной теплоемкости материала и коэффициента теплоотдачи. Температура перегрева с использованием постоянной нагрева будет иметь вид:

$$\Delta T = (T - T_0) = \Delta T_{t=\infty} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right). \quad (4.15)$$

На практике величину τ определяют экспериментальным путем. Сначала получают зависимость температуры перегрева электрооборудования от времени. На этой зависимости строят касательную, которая характеризует скорость нагрева. На рисунке 4.2.а приведен пример построения касательной ОВ на кривой нагрева и касательной ОТ на кривой охлаждения (рисунок 4.2.б). Величина от нуля до точки T на оси времени равна τ .

Выражение (4.15) позволяет проводить расчет температуры перегрева контактного сопротивления. Результаты расчета температуры перегрева медного контакта показаны на рисунках 4.3–4.5. При расчете использовались три значения массы контакта: 1 г, 2 г и 3 г. Также использовались три значения контактного сопротивления 0,01 Ом, 0,1 Ом и 1 Ом. Ток, протекающий через контакт, составлял 10 А, удельная теплоемкость меди – $\alpha=385$ Дж/(кг*К). Результаты моделирования процесса нагрева контактного сопротивления массой 1 г и сопротивлением 0,01, 0,1 и 1 Ом приведены на рисунке 4.3.

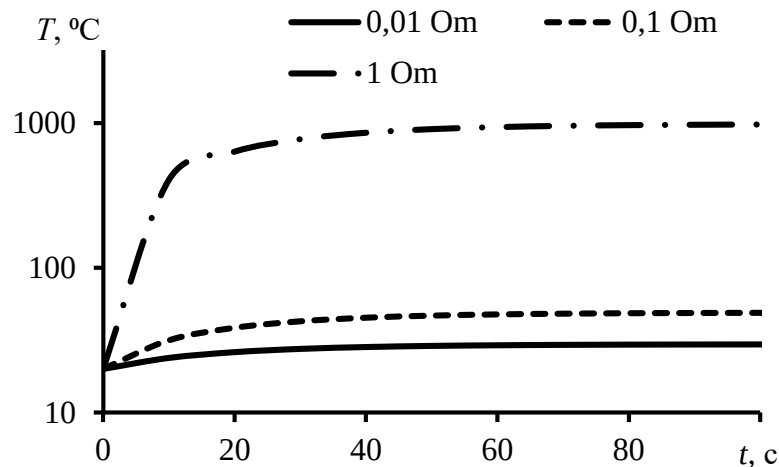


Рисунок 4.3 – Зависимость температуры перегрева контактного соединения массой 1 г и различным сопротивлением от времени, сплошная линия – 0,01 Ом; пунктирная линия – 0,1 Ом; штрих-пунктирная линия – 1 Ом

Из анализа рисунка 4.3 можно сделать вывод, что при параметрах контакта, указанных выше, его температура перегрева увеличится почти на 1000 за 100 с (штрихпунктирная линия). С уменьшением сопротивления контакта уменьшается

и температура перегрева. Так при сопротивлении контакта 0,1 Ом температура перегрева повысится всего на 50 °С (пунктирная линия) и на 30 °С – при сопротивлении 0,01 Ом (сплошная линия). Увеличение массы контакта до 2 г увеличило переходной процесс вдвое до 200 с (рисунок 4.4).

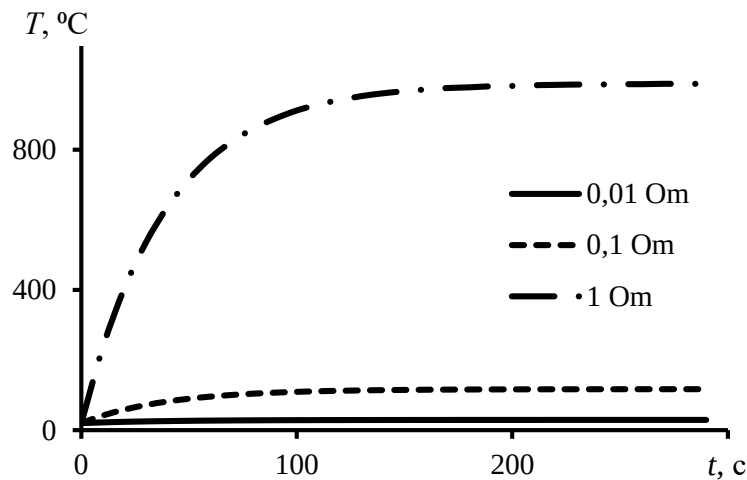


Рисунок 4.4 – Зависимость температуры перегрева контактного соединения массой 2 г и различным сопротивлением от времени, сплошная линия – 0,01, пунктирная линия – 0,1, штрих-пунктирная линия – 1 Ом

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что в стационарном режиме температура перегрева медного контакта может достичь 1000 °С, если сопротивление контакта составляет 1 Ом (штрихпунктирная линия). Температура перегрева достигнет 116 °С, если контактное сопротивление составит 0,1 Ом (пунктирная линия) и 30 °С, если контактное сопротивление будет 0,01 Ом (сплошная линия). Чем меньше значение контактного сопротивления, тем короче во времени переходный процесс. Если масса контакта составит 3 г, то длительность переходного процесса составит 300 с (рис. 4.5). Максимальные температуры перегрева контактных соединений в установившемся режиме для контактных сопротивлений 1, 0,1 и 0,01 Ом будут отличаться незначительно от максимальных температура перегрева контактного соединения массой 2 г.

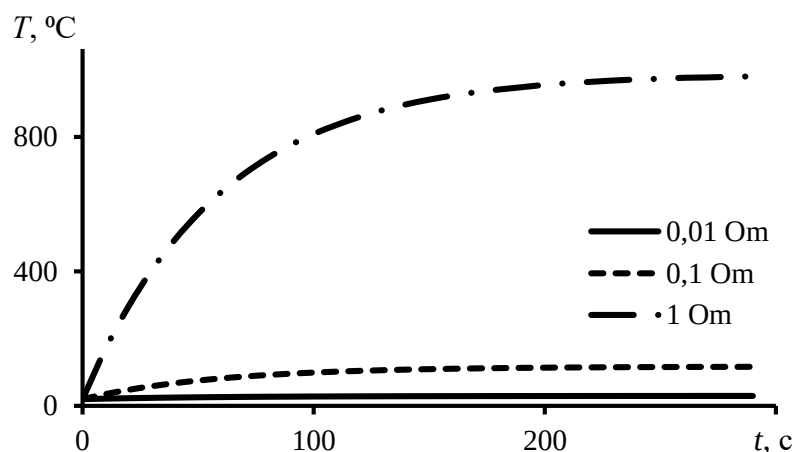


Рисунок 4.5 – Результаты моделирования процесса нагрева контактного соединения массой 3 г и различным сопротивлением; сплошная линия – 0,01; пунктирная линия – 0,1; штрих-пунктирная линия – 1 Ом

Исходя из данных, представленных на рисунках 4.3-4.5, можно сделать вывод, что независимо от массы контактного соединения, температура перегрева контактного соединения, достаточная для воспламенения изоляции, достигается уже при сопротивлении контактного соединения 0,35 Ом и токе 10 А. Пример плавления изоляции показан на рис.4.6.

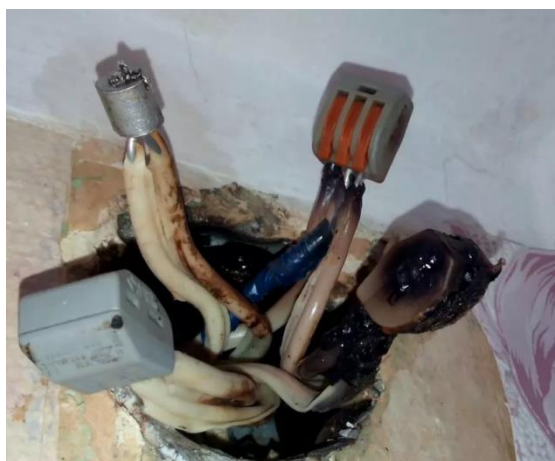


Рисунок 4.6 – Пример плавления изоляции проводов в контактном соединении

Хорошо известно, что температура воспламенения полиэтиленовой изоляции составляет 350 °C, а ПВХ изоляция превращается в углерод при температуре 160 °C. При увеличении длительности воздействия такой температуры на два

порядка приводит к появлению трещин в изоляции [241, 242]. Появление температуры перегрева контактного соединения приводит к появлению термоЭДС, которая будет прямо пропорциональна температуре перегрева в соответствии с выражением (4.1). Результаты расчета термоЭДС термопары, образованной соединением медь-алюминий с контактным сопротивлением 1 Ом и массой 1, 2 и 3 г приведены на рисунке 4.7. При расчете использовалась температура перегрева 300 °С.

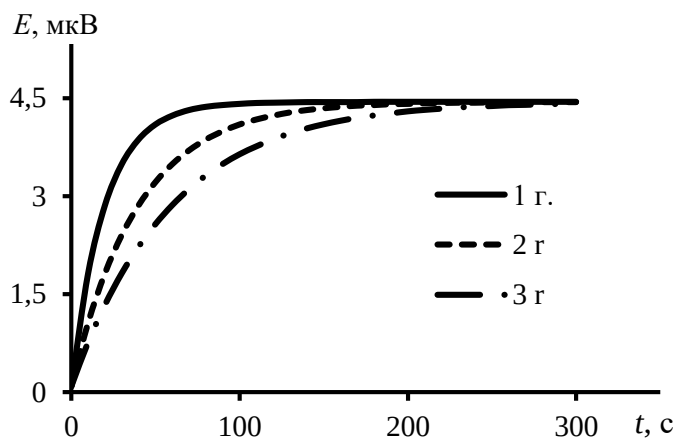


Рисунок 4.7 – Временная зависимость термоэлектродвижущей силы источника термоЭДС, образованного соединением медь-алюминий с сопротивлением 1 Ом и разной массой при температуре перегрева 300 °С, сплошная линия – 1 г, пунктирная линия – 2 г, штрих-пунктирная линия – 3 г

Масса контактного соединения влияет только на длительность переходного процесса и не влияет на максимальную температуру перегрева, поэтому и термоЭДС не будет зависеть от массы контактного соединения.

Для подтверждения полученных выводов были проведены исследования распределения температурного поля в контактной паре с использованием программного пакета Comsol Multiphysics. Для этого была спроектирована модель винтового разъемного контакта (рисунок 4.8, а), с параметрами, характерными для винтового контактного соединения, используемого в типовой розетке сети электроснабжения (рисунок 4.8, б), в программном пакете AutoCAD и затем конвертирована в программный пакет COMSOL Multiphysics. На рисунке 4.8.

представлена двухконтактная розетка, в которой используются винтовые разъемные контакты для подсоединения проводов сети электроснабжения к гнезду. Подобные винтовые контактные соединения используются в патронах ламп освещения, электрических печах с резистивным и индукционным нагревами, печах СВЧ и т.п. Винт изготавливается из стали, гнездо изготавливают из латуни, а провода сети электроснабжения могут быть медными или алюминиевыми. В процессе эксплуатации происходит ослабевание винтового зажима, что приводит к увеличению контактного сопротивления.

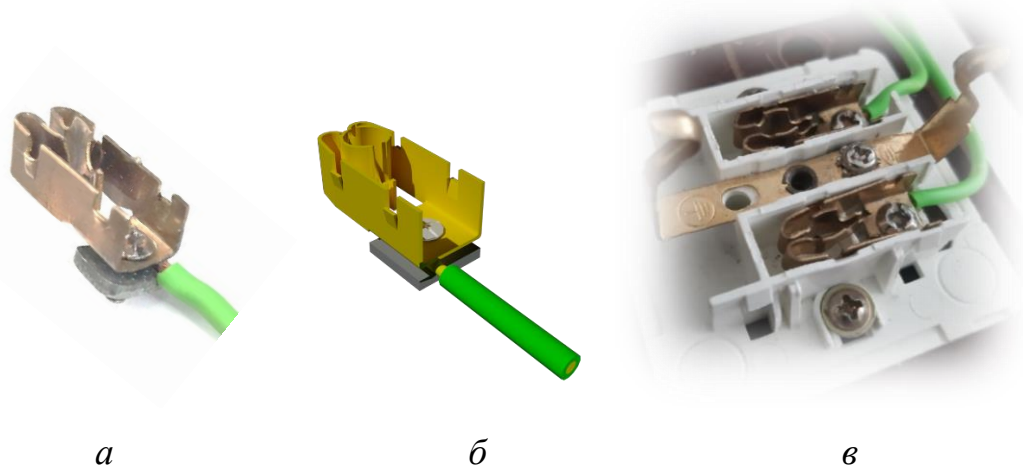


Рисунок 4.8 – Разъемный винтовой контакт для подсоединения проводов сети электроснабжения к гнезду розетки

При моделировании были заданы следующие параметры контакта:

- площадь контакта – 3 мм^2
- сопротивление контакта – $0,1 \text{ Ом}$,
- ток, через контактное соединение – 10 А .

В результате моделирования были рассчитаны значения температуры перегрева в разных областях контактного соединения. Иллюстрация температуры перегрева была осуществлено путем цветового кодирования элементов контактного соединения. Результат показан на рисунке 4.9.

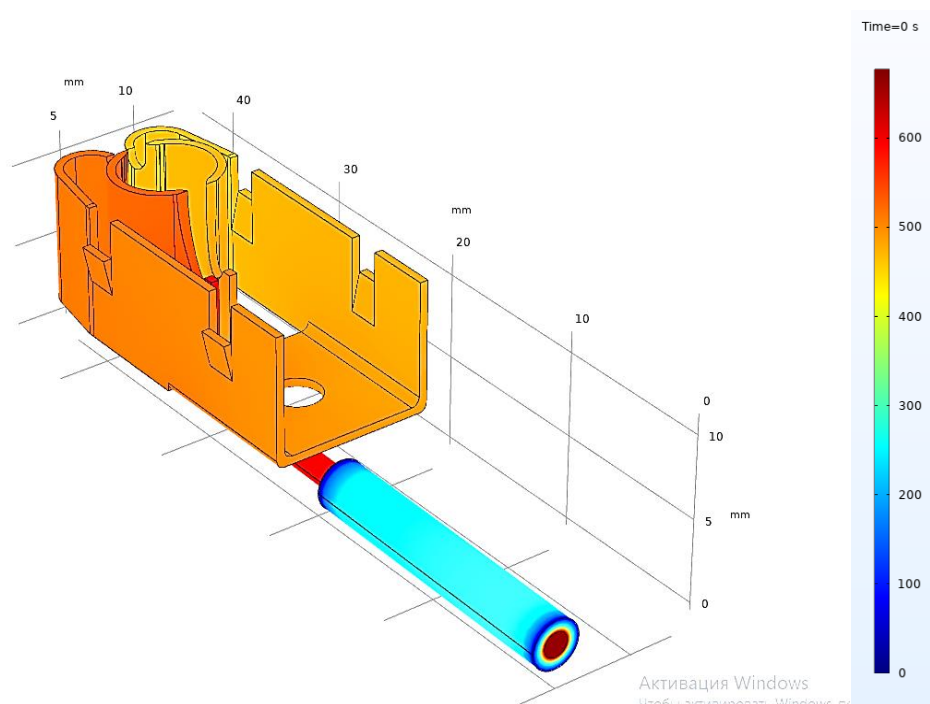


Рисунок 4.9 – Иллюстрация температуры перегрева гнездовой части разъема контактного соединения путем цветового кодирования элементов

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что температура перегрева контакта может достигать $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура воспламенения изоляции будет через 140 с. Увеличение температуры контактной пары приведет к увеличению термоЭДС согласно эффекту Зеебека.

По результатам моделирования была получена динамика изменения температуры контактной пары:

- начальная температура – $24\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- температура через 100 с – $250\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- температура через 200 с – $480\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- температура через 300 с – $610\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- температура через 500 с – $650\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Графическая зависимость температуры контактной пары от времени нагрева показана на рисунке 4.10.

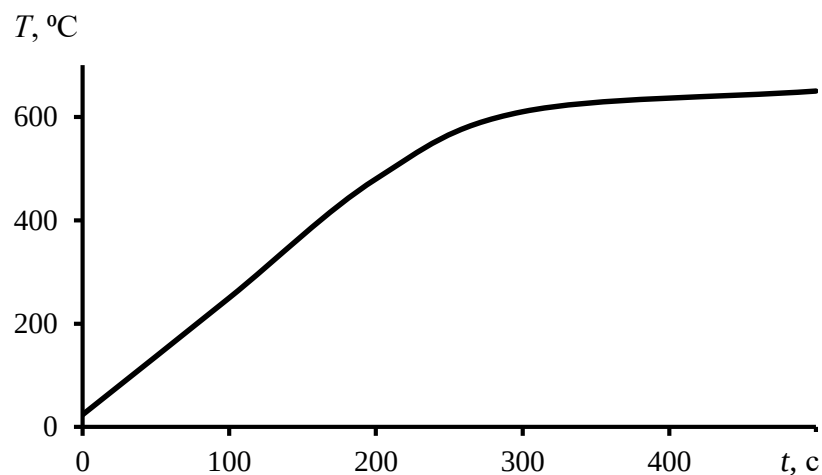


Рисунок 4.10 – Зависимость температуры контактной пары от времени нагрева

Анализ полученных данных показывает, что результаты моделирования соответствуют результатам теоретических расчетов.

Еще одним разъемным контактным соединением в штепсельной розетке является гнездо, выполненное из латуни, а ответной частью гнезда является вилка, которая изготавливается из стали (рисунок 4.11). Контактное соединение гнезда с вилкой образует термопару сталь-латунь.



Рисунок 4.11 – Разъемное контактное соединение гнездо-вилка

Исследования температуры нагрева разъемного контактного соединения гнездо-вилка проведем в программном пакете COMSOL Multiphysics. Начальные условия контактной пары:

- температура 24 °С,
- площадь контакта – 1 мм²,
- ток через контактное соединение – 10 А.

По результатам моделирования было получено температурное поле в гнезде и вилке, которое показано на рисунке 4.12. Для увеличения контактного сопротивления было задано условие неполного прилегания вилки к гнезду, что хорошо видно на рисунке 4.12. Максимальное значение температуры в месте контакта вилки и гнезда составляет 500 °С. При этой температуре латунь теряет упругие свойства, становится пластичной и сопротивление контактной пары увеличивается, что приводит к повышению температуры перегрева контактной пары. К сожалению, модель не позволяет учесть это свойство латуни. Следует заметить, что температура плавления латуни составляет 900 °С.

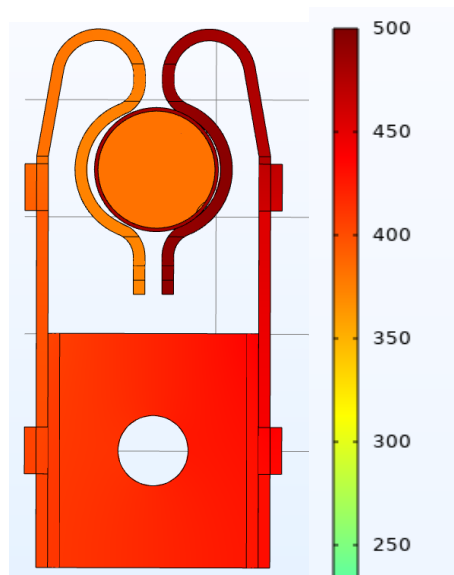


Рисунок 4.12 – Распределение температуры в контактной паре гнездо-вилка из латуни и стали (установившийся режим)

Из рисунка 4.12 видно, что температура гнезда в месте контакта с вилкой выше, чем у вилки и составляет $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом следует заметить, что температура плавления корпуса розетки, изготовленного из термостойкой пластмассы, такой как бакелит, составляет $390\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура воспламенения – $550\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Динамика изменения температуры в контактном соединении вилка-гнездо практически совпадает с динамикой изменения температуры в винтовом контактном соединении.

4.2 Экспериментальные исследования

Для подтверждения результатов теоретических исследований была проведена экспериментальная проверка изменения термоЭДС контактного соединения в электрической сети при нагреве контактного соединения за счет протекания тока нагрузки. Экспериментальная проверка осуществлялась на установке с гальванической развязкой от сети электроснабжения (рисунок 4.13). Для этого использовался развязывающий трансформатор с коэффициентом трансформации равным 1 и максимальным током 5 А, к вторичной обмотке которого была подключена нагрузка через разъемное контактное соединение. Такой подход обеспечил отсутствие термоЭДС от других контактных соединений, имеющихся в большом количестве в сети электроснабжения. Нагрузку обеспечили десять ламп накаливания суммарной мощностью 950 Вт. Параллельно контактному соединению был подключен низкочастотный фильтр с частотой среза 0,5 Гц, который не пропустил переменное напряжение на вольтметр. Это позволило измерять только постоянную составляющую, которая образована источником термоЭДС. Для измерения тока нагрузки в цепь нагрузки включили амперметр. Контактное соединение было выполнено из алюминиевого и медного проводов, для которых суммарный коэффициент Зеебека по данным различных источников составляет $3,6 \dots 4,5\text{ мкВ}\cdot\text{град}$ [243, 244]. Контактное соединение двух проводников было выполнено с помощью клеммной колодки. Сопротивление контактного соединения измерили с помощью мультиметра Rigol DM3068, и оно составило

0,29 Ом. Мультиметр Rigol DM3068 позволяет измерять сопротивление от 100 мкОм с дискретностью 100 мкОм и погрешностью измерения $\pm 0,014\%$.

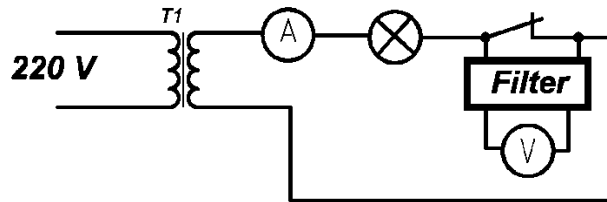


Рисунок 4.13 – Структурная схема экспериментальной установки

На контактом сопротивлении при протекании тока нагрузки выделилось тепло, которое его нагрело до температуры $(300 \pm 6)^\circ\text{C}$. Температуру контактного соединения контролировали с помощью пирометра DT-811. ТермоЭДС на выходе ФНЧ измеряли два раза в секунду в течение 5 мин. Измерение проводили с помощью мультиметра Rigol DM3068. Одновременно контролировали ток нагрузки и температуру контактного соединения. Результаты измерения термоЭДС контактного соединения представлены на рисунке 4.14.

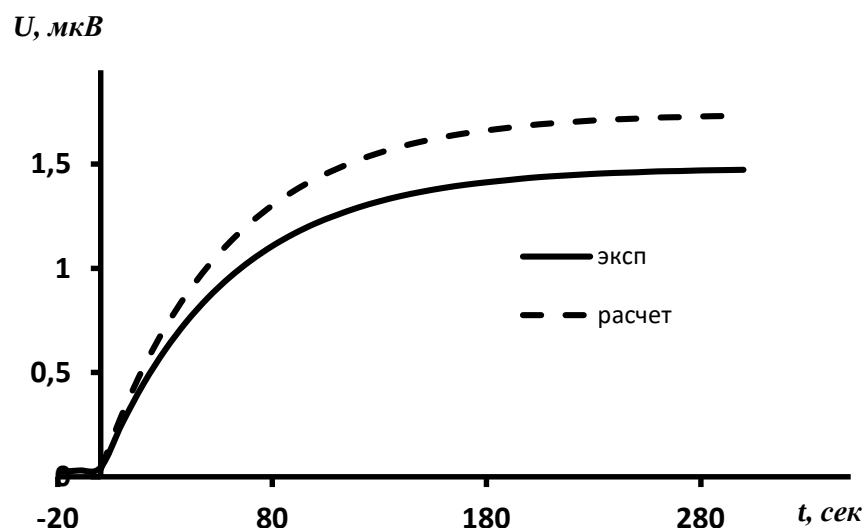


Рисунок 4.14 – Временная зависимость термоЭДС контактного соединения алюминий- медь с контактным сопротивлением 0, 29 Ом от времени, сплошная линия - экспериментальные исследования (среднее значение за 10 измерений), пунктирная линия – результаты моделирования.

Измеренное значение термоЭДС в установившемся режиме при 300 °С составило 1,7 мВ, что на 13 % больше расчетного значения. Отличие, скорее всего, вызвано разбросом коэффициента Зеебека из-за наличия примесей в материалах, из которых было изготовлено контактное соединение (источник термоЭДС), причем к нагрузке был подключен алюминиевый провод, а к трансформатору - медный. При изменении порядка подсоединения контактного соединения на противоположный (к трансформатору подключили алюминиевый провод, а к нагрузке – медный) изменилась полярность напряжения на выходе ФНЧ. Следовательно, постоянная составляющая на выходе ФНЧ обусловлена только термоэлектродвижущей силой нагретого контактного соединения (термопары). Ток нагрузки, который контролировали амперметром, оставался постоянным в течение всего эксперимента. Смена полярности включения термоЭДС, также не повлияла на изменение тока нагрузки, т.к. величина термоЭДС на несколько порядков меньше сетевого напряжения.

Сеть электроснабжения помещений бытовой, производственной или социальной сферы содержат несколько контактных соединений, которые имеют более высокое сопротивление по сравнению с самим проводником. Поэтому ток в сети электроснабжения нагревает контактные соединения сильнее, чем сам проводник. С учетом того, что в сети электроснабжения могут использоваться провода, изготовленные из разных сплавов, контактные соединения становятся источниками термоЭДС. Величина термоЭДС определяется температурой перегрева контактного соединения и коэффициентами Зеебека используемых металлов. Отсюда можно сделать вывод о возможности использования термоэлектрического метода для контроля переходного сопротивления контактного соединения в сети электроснабжения. Локализация места дефектного контактного соединения потребует дополнительных исследований по разработке алгоритмов обнаружения.

4.3 Алгоритм детектирования неисправного контактного соединения в сети электроснабжения

Для контроля величины переходного сопротивления контактного соединения предлагается использовать термоэлектрический метод [223-231]. С учетом того, что при протекании тока через контактную пару ее температура повышается, а сами контакты изготовлены из разных металлов, следует, что в цепи должна возникнуть термоЭДС. Однако система электроснабжения даже одного помещения содержит несколько контактных соединений и появление сигнала термоЭДС в сети электроснабжения не позволяет однозначно определить неисправное контактное соединение.

Для детектирования переходного сопротивления контактов определяют момент включения и номер электроустановки по наличию тока, протекающего через эту электроустановку, полученные данные о включенной электроустановке и величине протекающего тока передают в микроконтроллер, анализируют изменение термоЭДС при включении и выключении каждой электроустановки. По номеру включаемой или отключаемой электроустановки определяют номера контактных соединений, составляющих цепь электропитания этой установки. Для примера рассмотрим схему электропитания трех электроустановок с системой мониторинга переходного сопротивления контактного соединения (рисунок 4.15).

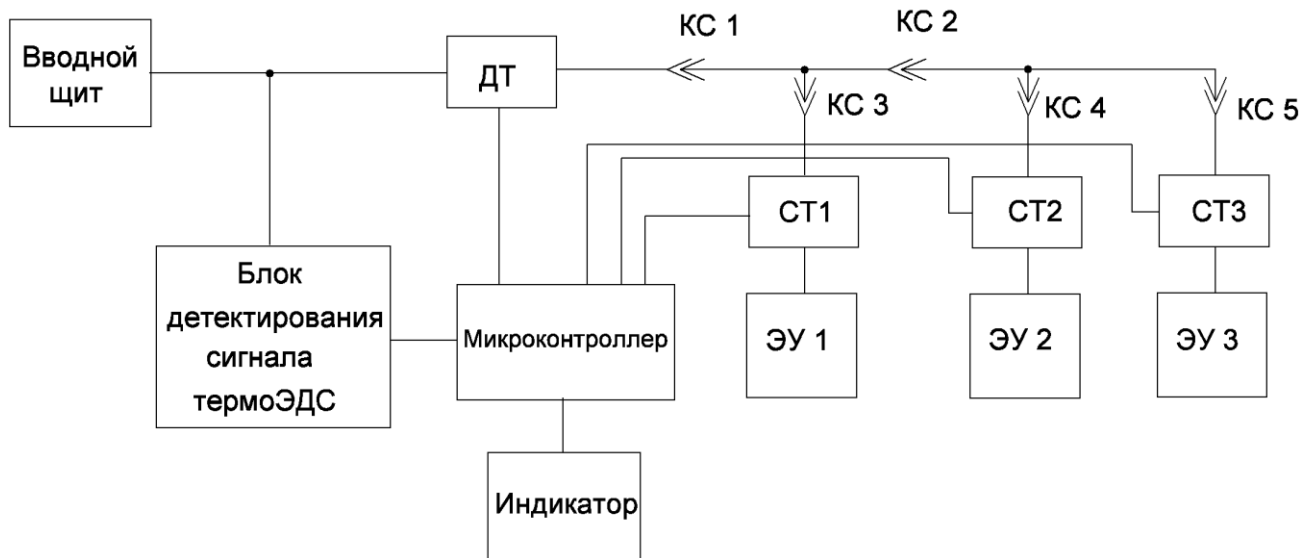


Рисунок 4.15 – Схема электропитания трех электроустановок с системой мониторинга сопротивления контактного соединения

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

При включении первой электроустановки ток протекает через датчик тока (ДТ), контактное соединение КС1, контактное соединение КС2, сигнализатор тока СТ1 и первую электроустановку. Блок детектирования сигнала термоЭДС выделяет сигнал термоЭДС из суммарного сигнала сети электроснабжения и передает его в микроконтроллер. Микроконтроллер считывает этот сигнал только в момент включения первой электроустановки. Момент включения электроустановки определяется по началу протекания тока через сигнализатор тока СТ1. Также в микроконтроллер поступают данные с датчика тока.

Микроконтроллер определяет ток, протекающий через первую электроустановку, путем вычитания тока до включения из тока после включения. Полученное значение сохраняется в памяти микроконтроллера. Аналогичная процедура осуществляется и при выключении первой электроустановки. По полученным данным о величине тока и термоЭДС микроконтроллер рассчитывает контактное сопротивление. С учетом того, что первая электроустановка подключена к вводному щиту через два контактных соединения КС1 и КС3, возможны два варианта. В первом через контактное соединение КС1 протекает только ток первой электроустановки, т.е. вторая и третья электроустановки не включены. В этом случае микроконтроллер может рассчитать только суммарное сопротивление двух контактных соединений. Во втором случае включенной может быть вторая или третья электроустановки, либо обе вместе. В этом случае на величину термоЭДС сопротивление контактного соединения КС1 не влияет и микроконтроллер рассчитывает сопротивление контактного соединения КС3.

При включении второй электроустановки ток протекает через датчик тока (ДТ), контактное соединение КС1, контактное соединение КС2, контактное соединение КС4, сигнализатор тока СТ2 и вторую электроустановку. Блок детектирования сигнала термоЭДС выделяет сигнал термоЭДС из суммарного сигнала сети электроснабжения и передает его в микроконтроллер. Микроконтроллер считывает этот сигнал только в момент включения второй электроустановки. Момент включения электроустановки определяется по началу протекания тока через сигнализатор тока СТ2. Также в микроконтроллер поступают данные с датчика тока. Микроконтроллер определяет ток, протекающий через вторую электроустановку путем вычитания тока до включения из тока после включения. С учетом того, что вторая электроустановка подключена к вводному щиту через контактное соединение КС1, контактное соединение КС2, контактное соединение КС4, возможны четыре варианта вычисления контактного сопротивления. В первом случае включена только вторая электроустановка. Тогда микроконтроллер может рассчитать только суммарное сопротивление трех контактных соединений. Во втором случае включена первая электроустановка.

Тогда рассчитывается суммарное сопротивление контактных соединений КС2 и КС4. В третьем случае включена третья электроустановка. Рассчитывается сопротивление контактного соединения КС4. В четвертом случае включены первая и третья электроустановки. При этом варианте рассчитывается сопротивление контактного соединения КС4. Полученное значение сохраняется в памяти микроконтроллера. Аналогичная процедура осуществляется и при выключении второй электроустановки.

При включении третьей электроустановки ток протекает через датчик тока (ДТ), контактное соединение КС1, контактное соединение КС2, контактное соединение КС5, сигнализатор тока СТ3 и третью электроустановку. Блок детектирования сигнала термоЭДС выделяет сигнал термоЭДС из суммарного сигнала сети электроснабжения и передает его в микроконтроллер. Последний считывает этот сигнал только в момент включения третьей электроустановки. Он определяется по началу протекания тока через сигнализатор тока СТ3. Также в микроконтроллер поступают данные с датчика тока. Микроконтроллер определяет ток, протекающий через третью электроустановку, путем вычитания тока до включения из тока после включения. С учетом того, что третья электроустановка подключена к вводному щиту через контактное соединение КС1, контактное соединение КС2 и контактное соединение КС5, возможны четыре варианта вычисления контактного сопротивления. В первом случае первая и вторая электроустановки не включены. Тогда рассчитывается суммарное сопротивление трех контактных соединений КС1, КС2 и КС5. Во втором случае включена первая электроустановка. Тогда рассчитывается суммарное сопротивление двух контактных соединений КС2 и КС5. В третьем случае включена вторая электроустановка. Рассчитывается сопротивление контактного соединения КС5. В четвёртом случае включены первая и вторая электроустановки. В этом варианте рассчитывается сопротивление контактного соединения КС5. Полученное значение сохраняется в памяти микроконтроллера. Аналогичная процедура осуществляется и при выключении второй электроустановки. Алгоритм мониторинга сопротивления контактного соединения представлен на рисунке 4.16.

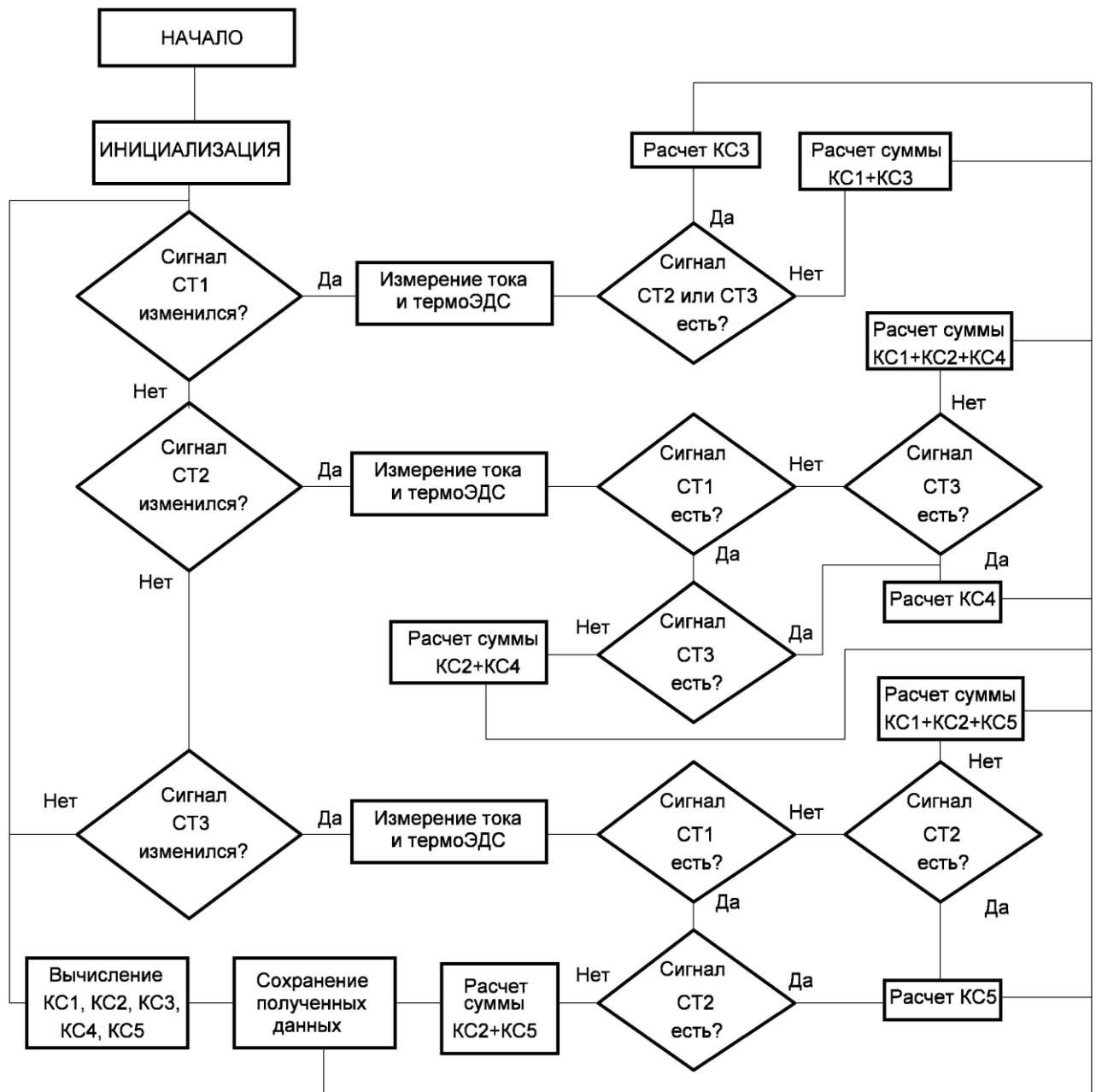


Рисунок 4.16 – Алгоритм мониторинга сопротивления контактного соединения

Процесс вычисления контактных соединений $КС1$, $КС2$, $КС3$, $КС4$ и $КС5$ из полученных данных включает решение нескольких уравнений. При включении первой электроустановки и уже включенной второй и\или третьей определяется контактное сопротивление $КС3$. При включении второй электроустановки и уже включенной первой и\или третьей рассчитывается контактное сопротивление $КС4$. При включении третьей электроустановки и уже включенной первой и\или второй

рассчитывается контактное сопротивление КС5. При других комбинациях включения электроустановок рассчитывается суммарное сопротивление нескольких контактов, а затем вычисляется неизвестное контактное сопротивление, например:

$$R_{KC1} = (R_{KC1} + R_{KC3}) - R_{KC3}, \quad (4.16)$$

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

$$R_{KC2} = (R_{KC2} + R_{KC4}) - R_{KC4}, \quad (4.17)$$

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

При другой схеме соединения электроустановок алгоритм прописывается аналогичным образом с учетом наличия конкретных контактных соединений. Методика расчета контактного сопротивления была подробно описана авторами в работе [224], в которой было получено выражение для расчета контактного сопротивления по измеренным значениям термоЭДС и тока, протекающего через контактное соединение:

$$R = \frac{K \cdot S \cdot \frac{E}{(S_1 - S_2)}}{I^2}, \quad (4.18)$$

где E – величина термоЭДС;

S_1 и S_2 – коэффициенты Зеебека контактной пары;

I – ток через контактную пару;

K – общий коэффициент теплоотдачи, учитывающий все ее виды;

S – площадь поверхности охлаждения контакта.

Практическая проверка работы алгоритма была проведена на макете устройства (рисунок 4.17).

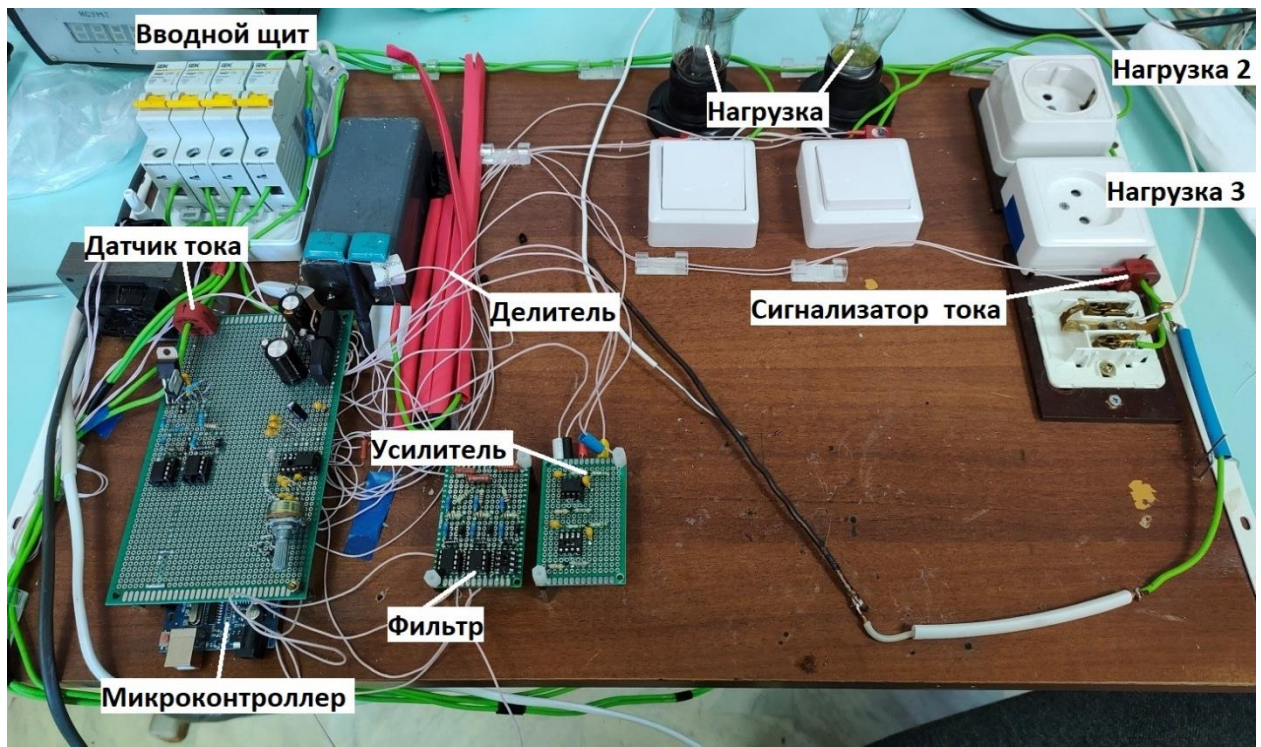


Рисунок 4.17 – Макет экспериментальной установки мониторинга сопротивления контактного соединения

Макет содержит вводной щит, три электроустановки (нагрузки): две лампы накаливания (нагрузка 1 с контактным соединением в виде выключателя (KC3)) и две розетки (Cariva 773659 фирмы Legrand) для подключения электрочайника и утюга (нагрузка 2 (KC4) и нагрузка 3 (KC5)), сигнализатор тока, датчик тока (ACS758LCB-100В фирмы Allegro), микроконтроллер с индикаторами, блок детектирования сигналов термоЭДС, включающий делитель, фильтр и усилитель. Также были искусственно введены два контактных соединения KC1 и KC2 в виде скрутки двух проводников, изготовленных из меди и алюминия, для соответствия структурной схеме, приведенной на рисунке 4.15. Для увеличения контактного сопротивления KC1 последний поместили в термокамеру и нагревали при температуре 150 °С в течение 20 ч. При этом на поверхности медного проводника образовалась окисная пленка и сопротивление контакта стало около 0,4 Ом. Измерение проводилось мультиметром Rigol DM3068. При последовательном включении и выключении трех электроустановок системой мониторинга было

выявлено первое контактное соединение КС1 с сопротивлением превышающем допустимое значение 0,05 Ом.

Использование предложенного алгоритма для детектирования неисправного контактного соединения в сети электроснабжения позволяет осуществлять непрерывный мониторинг состояния контактных соединений в сети электроснабжения офисного помещения или другого отдельного помещения. Своевременное обнаружение неисправного контактного соединения позволит исключить отказы сети электроснабжения, обеспечить безаварийную работу электрооборудования, исключить пожароопасное состояние контактных соединений и тем самым предупредить техногенные аварии. В работе рассмотрен общий подход к разработке алгоритма мониторинга неисправного контактного соединения. Для конкретной сети электроснабжения необходимо разрабатывать свой алгоритм детектирования неисправного контактного соединения основываясь на предложенном авторами подходе.

ВЫВОДЫ

Проведенные в четвертой главе исследования позволяют сделать следующие выводы:

Контактное соединение подвержено нагреву из-за наличия контактного сопротивления. Даже в исправном контактном соединении наблюдается повышение температуры. В контактном соединении с большим контактным сопротивлением повышение температуры может достигать значений, превосходящих температуру воспламенения изоляции подводящих проводов или конструктивных элементов соединителя. Длительность переходного процесса определяется параметрами контактного соединения, чем больше масса, тем длительнее переходной процесс. Максимальная температура контактного соединения зависит от величины протекающего тока и не зависит от характеристик контактного соединения. Для детектирования большого переходного сопротивления необходимо использовать переходной режим. В установившемся

режиме детектировать большое контактное сопротивление невозможно. Для выявления большого контактного сопротивления необходима информация о включенной электроустановке, токе через эту электроустановку и величину термоЭДС до включения и после включения электроустановки.

ГЛАВА 5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВУХ СОПРИКАСАЮЩИХСЯ ПРОВОДЯЩИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Современные радиоэлектронные устройства, как отмечалось в первой главе, широко используют системы охлаждения для поддержания допустимого температурного режима тепловыделяющих электронных компонентов [78, 245-247]. Система охлаждения состоит из радиатора и теплопроводящей пасты (термоинтерфейса), основная задача которой уменьшить тепловое сопротивление между радиатором и тепловыделяющим электронным компонентом (рис.5.1).

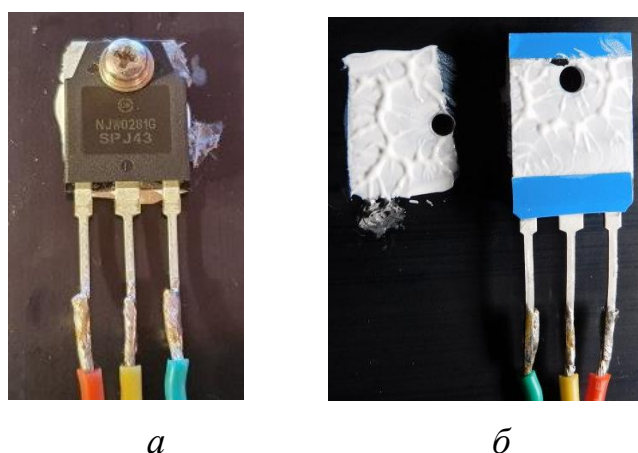


Рисунок 5.1 – Система охлаждения тепловыделяющего радиоэлектронного компонента, *а* - силовой транзистор, установленный на радиатор через теплопроводящую пасту, *б* - отпечаток термопасты на радиаторе и корпусе TO220

В последнее время появились силовые транзисторы в корпусах SKiM и MiniSKiiP без несущего основания. Это существенно повысило требования к уменьшению шероховатости радиатора в области установки транзисторов. Также повысились требования к заполнению теплопроводящей пастой промежутка между корпусом транзистора и радиатором охлаждения.

В работе [60] было предложено использовать термоэлектрический метод для контроля теплового сопротивления теплопроводящей пасты (термоинтерфейса). Однако такая формулировка не совсем верна т.к. термоэлектрический контроль предполагает не только тепловой, но и электрический контакт двух проводящих металлов. Теплопроводящая паста является диэлектриком, и говорить об электрическом контакте невозможно в этой ситуации. Более корректна формулировка: контроль теплового сопротивления контактной пары «корпус тепловыделяющего электронного компонента - радиатор охлаждения». Теплопроводящая паста позволяет исключить воздушные полости, возникающие из-за шероховатости соприкасающихся поверхностей или их неровностей (углубления или выступы), на границе соприкосновения двух проводящих металлических поверхностей, что приводит к некоторому уменьшению теплового сопротивления. На рисунке 5.2 показан пример соприкосновения двух поверхностей в разрезе с разной шероховатостью с образованием воздушных полостей.

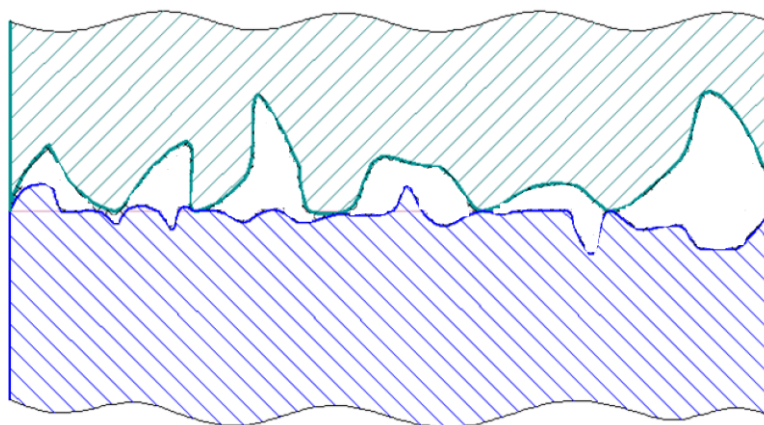


Рисунок 5.2 – Схематическое обозначение соприкосновения двух поверхностей с разной шероховатостью с образованием воздушных полостей

Но при этом электрический контакт между двумя поверхностями, изготовленными из проводящего металла, должен остаться. Если контакт отсутствует, то термоэлектрический метод контроля применить невозможно.

Поэтому термоэлектрический контроль теплового сопротивления контактной пары «корпус тепловыделяющего электронного компонента - радиатор охлаждения», соединённой через керамическую или полимерную прокладку, невозможен. Это и есть ограничение термоэлектрического метода контроля теплового сопротивления контактной пары «корпус тепловыделяющего электронного компонента - радиатор охлаждения».

Основные результаты 5 главы основаны на исследованиях автора и опубликованы в работах [97, 248-257].

5.1 Теоретические основы применения термоэлектрического метода контроля теплового сопротивления двух соприкасающихся проводящих металлических поверхностей

Качество теплопроводящего компаунда характеризуется теплопроводностью и максимальной рабочей температурой без потери теплофизических характеристик. Номенклатура серийно выпускаемых термопаст довольно широка. В таблице 5.1 приведен перечень термопаст и их теплофизических свойств, используемых в радиоэлектронной промышленности [62]. Параметр « T » определяет максимальную рабочую температуру, « λ » – теплопроводность.

Таблица 5.1 – Термопасты и их теплофизические параметры

Название	λ, Вт/м·К	T системы, °C	Наполнитель	Связующее
Coollaboratory Liquid Pro	82	81	Ga, In	-
Coollaboratory Liquid Ultra	40	84	Ga, In	-
ЖМ-6	34	81	Ga, In	-
Indigo Xtreme	20	83	Ga, In	-
Nanoxia HeatBuster	10,4	85	Al, ZnO	
OCZ Ultra 5+	3,8	84	ZnO, Ag, BN, Al ₂ O ₃	Сл. Эфир
Thermalright Chill Factor III	3,5	85	ZnO	-
КИТ-8	0,8	89	ZnO	Силикон
Prolimatech PK-1	10	84	Al, ZnO	Масло

Продолжение таблицы 5.1

АлСил-3	1,8	89	ZnO, Al	Силикон
Thermax	2	-	AlN, BN	-
IC Diamond 24 Carat	4,5	83	C	-
Arctic Cooling MX-3	8,2	83	C	Силикон
Arctic Silver 5	8,7	86	Ag	Синт. масла
Nexus	7,8	85	Ag	-
Zalman ZM-STG2	4,1	86	-	-
Noctua	3,5	84	-	-
Cooler Master ThermalFusion 400	2,89	87	-	-
Shin-Etsu x23-7783D	6,0	84	-	-
Coolage CA-CT3 Nano	5	84	-	-
Gelid Solutions GC- Extreme	8,5	84	-	-
Thermaltake TG-1	3,0	83	-	-
Tuing TX-4	6,53	83	-	-

Чем выше теплопроводность и максимальная рабочая температура, тем эффективнее охлаждение тепловыделяющего электронного компонента. В любом случае теплопроводность термопасты в 5...10 раз меньше, чем теплопроводность радиатора и корпуса тепловыделяющего электронного компонента, поэтому между радиатором охлаждения и корпусом тепловыделяющего электронного компонента появляется разность температуры. Эта разность температуры приводит к возникновению термоЭДС в соответствии с эффектом Зеебека. На рисунке 5.3 показана термограмма силового транзистора, установленного на радиаторе охлаждения.

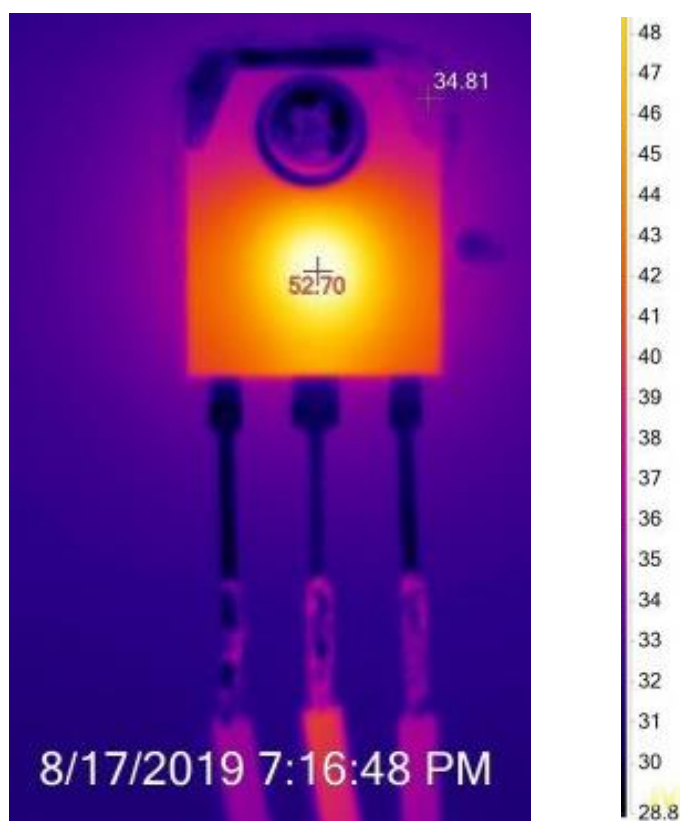


Рисунок 5.3 – Термограмма силового транзистора, установленного на радиаторе охлаждения

Температура радиатора охлаждения составляет 30°C , а максимальная температура подложки силового транзистора в области расположения полупроводникового кристалла составляет $52,7^{\circ}\text{C}$ (рисунок 5.3). Полученная разность температур подложки силового транзистора и радиатора охлаждения вызвана тепловым сопротивлением системы из двух соприкасающихся поверхностей, зазор между которыми заполнен теплопроводящей пастой или воздухом [95]:

$$R_{\text{th}} = \Delta T / P, \quad (5.1)$$

где ΔT – температурная разница между двумя соприкасающимися поверхностями;

P – тепловой поток, проходящий через границу соприкосновения двух поверхностей.

Определение теплового сопротивления этим способом довольно затруднительно, т.к. сложно измерить температуру на двух соприкасающихся поверхностях и тепловой поток через границу соприкосновения двух

поверхностей. Поэтому используют косвенные методы контроля теплового сопротивления. Один из таких методов - термоэлектрический. Если выполняется условие Зеебека, т.е. две соприкасающиеся металлические проводящие поверхности имеют разный химический состав, есть градиент температур по объему каждого из металлов, и они соединены в замкнутый контур, то в контуре появляется термоЭДС [258].

Контур будет состоять из подводящего провода, соединенного с радиатором охлаждения, радиатора, корпуса и подводящего провода, соединенного с корпусом тепловыделяющего электронного компонента. Подводящие провода выполнены из меди, радиатор охлаждения – из дюралюминия, корпус тепловыделяющего электронного компонента – из меди, покрытой сплавом олова с никелем. Величина термоЭДС для замкнутого контура, состоящего из двух проводников, линейно зависит от разницы температуры между горячим и холодным спаями [55, 103, 104]:

$$E = (T_2 - T_1) \frac{k}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}, \quad (5.2)$$

где T_2 – температура горячего спая;

T_1 – температура холодного спая;

k – постоянная Больцмана;

e – заряд электрона;

n_1 – концентрация носителей материала первого металла;

n_2 – концентрация носителей материала второго металла.

Величина

$$\alpha = \frac{k}{e} \ln \frac{n_2}{n_1} \quad (5.3)$$

является постоянной для каждой пары металлов и называется коэффициентом термоЭДС или коэффициентом Зеебека [97]. В соответствии с этим выражение 5.2 примет вид:

$$E = (T_2 - T_1) \cdot \alpha, \quad (5.4)$$

где α – коэффициент Зеебека.

Для замкнутого контура, состоящего из нескольких разнородных проводников, как было представлено выше: провода, соединенного с радиатором охлаждения, радиатора, корпуса ТО220 и подводящего провода, соединенного с корпусом ТО220 тепловыделяющего электронного компонента, термоЭДС будет определяться:

$$E = (T_2 - T_1) \cdot \alpha_1 + (T_3 - T_2) \cdot \alpha_2 + (T_4 - T_3) \cdot \alpha_3 + (T_5 - T_4) \cdot \alpha_1 + (T_6 - T_5) \cdot \alpha_1, \quad (5.5)$$

где α_1 – коэффициент Зеебека меди;

α_2 – коэффициент Зеебека алюминия;

α_3 – коэффициент Зеебека покрытия из сплава олова с никелем;

$T_2 - T_1$ – разность температуры пары металлов медь-алюминий;

$T_3 - T_2$ – разность температуры пары металлов алюминий-покрытие из сплава олова с никелем;

$T_4 - T_3$ – разность температуры пары металлов покрытие из сплава олова с никелем-медь;

$T_5 - T_4$ – разность температуры пары металлов медь-покрытие из сплава олова с никелем;

T_1 – температура окружающей среды.

Следует учесть, что покрытие корпуса тепловыделяющего электронного компонента очень тонкое, разница температуры по его толщине равна нулю. Также нет разницы температуры по толщине подложки корпуса ТО220, в котором размещен тепловыделяющий электронный компонент, т.е. в соответствии с правилом Зеебека промежуточные металлы не оказывают влияния на величину термоЭДС. Поэтому:

$$E = (T_2 - T_1) \cdot \alpha_1 + (T_3 - T_2) \cdot \alpha_2 + (T_1 - T_3) \cdot \alpha_1, \quad (5.6)$$

где T_1 – температура окружающей среды; T_2 – температура радиатора; T_3 – температура корпуса ТО220 тепловыделяющего электронного компонента.

После преобразования получим:

$$E = (T_2 - T_3) \cdot \alpha_1 + (T_3 - T_2) \cdot \alpha_2. \quad (5.7)$$

Группируем:

$$E = (T_2 - T_1) \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) = \Delta T \cdot (\alpha_1 - \alpha_2). \quad (5.8)$$

Из (5.8) можно найти ΔT и подставив в (5.2), получим:

$$R_{th} = \frac{E}{\alpha \cdot P}. \quad (5.9)$$

Как видно из формулы (5.9), неизвестной величиной является тепловой поток мощности. Его можно найти из основного уравнения теплопередачи [105]:

$$P = K \cdot S \cdot \Delta T, \quad (5.10)$$

где K – коэффициент теплопередачи;

S – площадь соприкасающихся поверхностей.

Коэффициент теплопередачи хорошо описан в литературе [106] и вычисляется по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{h}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (5.11)$$

где h – толщина зазора между двумя соприкасающимися поверхностями;

λ – коэффициент теплопроводности зазора;

β_1 – коэффициент теплоотдачи от первой поверхности к зазору;

β_2 – коэффициент теплоотдачи от зазора ко второй поверхности.

Таким образом, с учётом формулы (5.11) тепловое сопротивление, однородного тела рассчитанное по формуле (5.9) будет представлено как:

$$R_{th} = \frac{E \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{h}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}{\alpha \cdot S \cdot \Delta T} = E \cdot \theta. \quad (5.12)$$

Исходя из формулы (5.12), тепловое сопротивление зазора между тепловыделяющим элементом и радиатором охлаждения прямо пропорционально величине термоЭДС и обратно пропорционально площади соприкосновения двух поверхностей.

5.2 Влияние теплового сопротивления на температуру корпуса тепловыделяющего электронного компонента и радиатора охлаждения

Для обеспечения необходимого теплового режима работы тепловыделяющего электронного компонента его устанавливают на теплоотвод, при этом за счет шероховатости поверхности корпуса тепловыделяющего электронного компонента и радиатора охлаждения между ними возникает зазор. Тепловое сопротивление зазора приводит к возникновению разницы температур по обе стороны зазора, что повлечет возникновение термоЭДС. Для анализа влияния теплового сопротивления на разницу температур между корпусом тепловыделяющего электронного компонента и радиатором охлаждения было проведено моделирование в среде AutoCAD 2013. В качестве теплоотвода был выбран алюминиевый радиатор с площадью охлаждения 150 см^2 , чертеж которого приведен на рисунке 5.4. В качестве тепловыделяющего электронного компонента был выбран транзистор КТ818 в корпусе ТО220. При моделировании тепловое сопротивление задавалось $0,001$; $0,01$; $0,1$ и $1 \text{ К} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$.

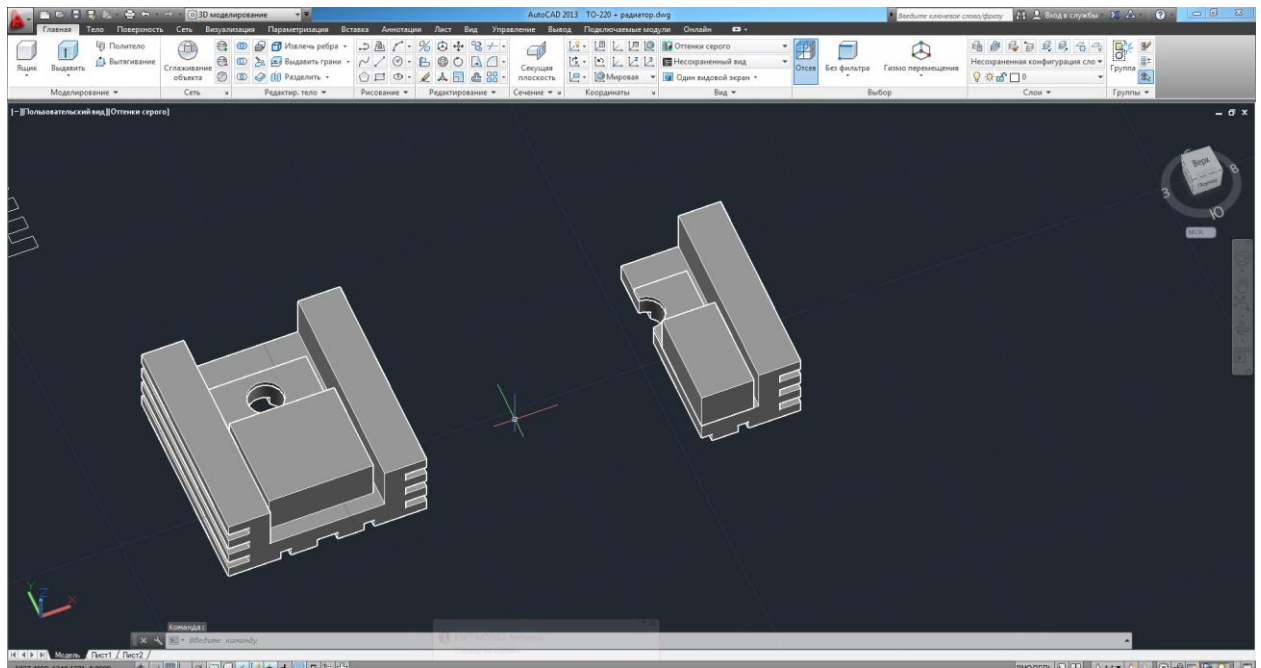


Рисунок 5.4 – Модель радиатора охлаждения для установки тепловыделяющего электронного компонента в корпусе ТО220

При моделировании нагреву подвергался тепловыделяющий электронный компонент транзистор КТ818. Результаты моделирования показаны на рисунке 5.5, который показывает изменение температуры корпуса тепловыделяющего электронного компонента - транзистора КТ818 при токе 10 А.

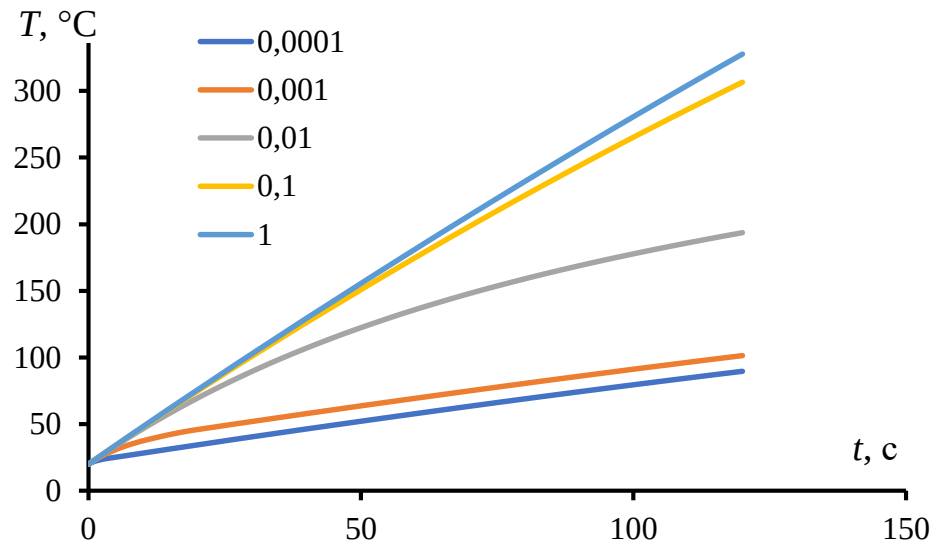


Рисунок 5.5 – Зависимость температуры корпуса транзистора КТ818 от времени

Температура корпуса с течением времени увеличивается. При большом тепловом сопротивлении границы соприкосновения корпуса с радиатором охлаждения температура корпуса возрастает. При тепловом сопротивлении границы соприкосновения $1 \text{ К}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$ температура корпуса через 120 с достигнет $327,65^\circ\text{C}$. Если сопротивление на порядок меньше, то температура достигнет 306°C за то же время. При ещё меньшем на порядок сопротивлении, температура корпуса составит – 193°C за то же время.

На рисунке 5.6 показан график изменения температуры радиатора. При тепловом сопротивлении границы соприкосновения $1 \text{ К}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$ температура радиатора через 120 с достигнет 21°C . Изменение составит всего 1°C . При уменьшении сопротивления на порядок температура радиатора через 120 с достигнет $27,1^\circ\text{C}$. Изменение составит всего $7,1^\circ\text{C}$. Скорость увеличения

температуры радиатора зависит от теплового сопротивления границы соприкосновения. Чем меньше тепловое сопротивление, тем круче характеристика.

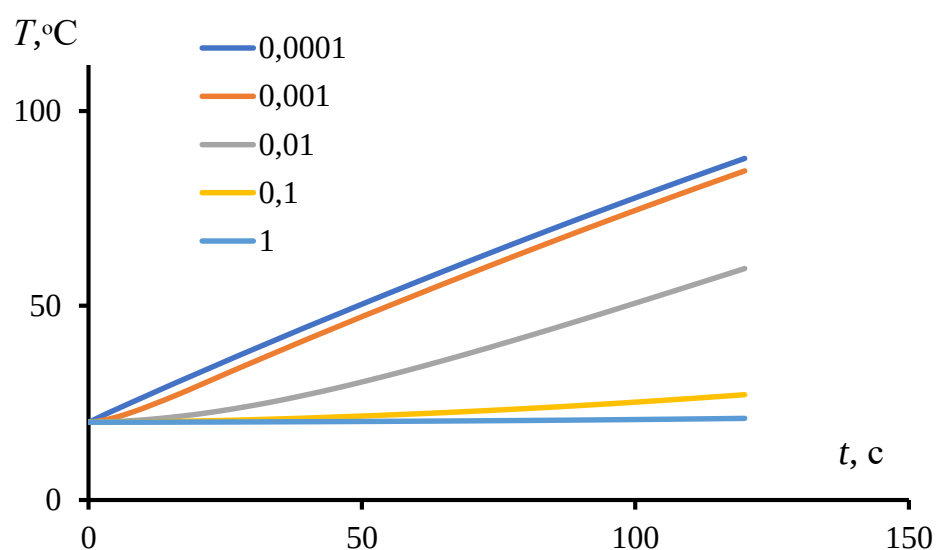


Рисунок 5.6 – График изменения температуры радиатора

На рисунке 5.7 показаны изменения температуры корпуса тепловыделяющего электронного компонента (транзистора КТ818) и радиатора в зависимости от теплового сопротивления границы их соприкосновения на 120 секунде. При тепловом сопротивлении $0,001 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ разница температур составляет $16 \text{ }^\circ\text{C}$. А при тепловом сопротивлении $0,0001 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ разница температур составляет $11 \text{ }^\circ\text{C}$.

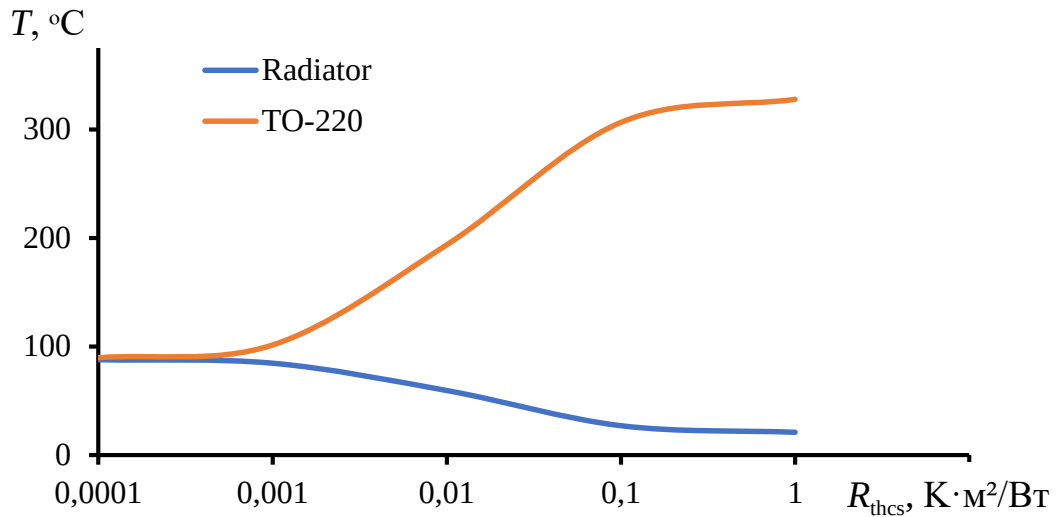


Рисунок 5.7 – График изменения температуры корпуса тепловыделяющего электронного компонента (транзистора KT818) и радиатора в зависимости от теплового сопротивления границы их соприкосновения на 120 секунде

Отмечу, что при наличии любого теплового сопротивления в зазоре двух соприкасающихся поверхностей, отличного от нуля, между ними будет разность температур, которая приведет к появлению термоЭДС.

5.3 Исследование характеристик источника термоЭДС при изменении теплового сопротивления

Как показал литературный обзор, тепловое сопротивление двух соприкасающихся поверхностей зависит от толщины слоя термоинтерфейса между тепловыделяющим электронным компонентом и теплоотводом (рисунок 5.8).

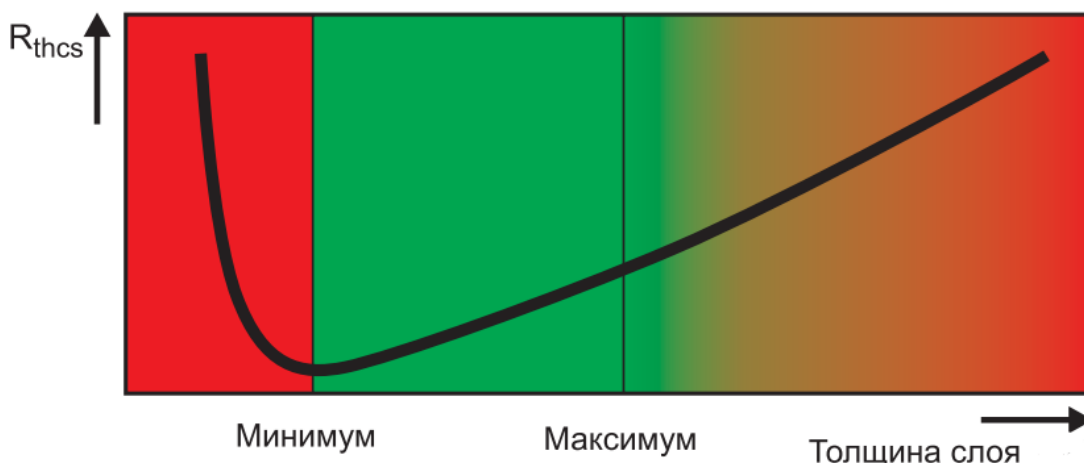


Рисунок 5.8 – Зависимость теплового сопротивления двух соприкасающихся поверхностей от толщины слоя термоинтерфейса

При оптимальном объеме термоинтерфейса заполняются все воздушные полости в зазоре, и тепловое сопротивление зазора становится минимальным. При изменении объема термопасты в зазоре в сторону уменьшения или увеличения увеличивается тепловое сопротивление зазора и, соответственно, изменение разности температур по разные стороны зазора, что, в свою очередь, приводит к увеличению термоЭДС. В результате измерения термоЭДС невозможно сделать заключение о недостатке или избытке термоинтерфейса в зазоре между тепловыделяющим электронным компонентом и теплоотводом.

Для оценки возможности использования внутреннего сопротивления источника термоЭДС при определении толщины слоя термоинтерфейса были проведены исследования, основанные на расчете внутреннего сопротивления.

Как правило, в конструкторской документации на радиаторы/теплоотводы РЭА закладываются параметры шероховатости теплоотводящих поверхностей в пределах R_a 1.25 — R_a 2.5. Реже встречаются и более высокие требования к шероховатости. Аналогичные требования предъявляются и к корпусам тепловыделяющих электронных компонентов. Исходная шероховатость является следствием технологической обработки поверхности материала. На рисунке 5.9 показан профиль поверхности и параметры шероховатости: L — длина профиля неровностей; m — средняя линия неровностей профиля; p — уровень сечения

профиля; S_{mi} – средний шаг неровностей профиля; S_i – средний шаг местных выступов профиля; H_{imax} – отклонение пяти наибольших неровностей профиля; H_{imin} – отклонение пяти наибольших неровностей профиля; h_{imax} – расстояние от высших точек наибольших неровностей до линии параллельной средней и не пересекающей профиль; h_{imin} – расстояние от низших точек наибольших неровностей до линии параллельной средней и не пересекающей профиль; b_1 , b_n – длины отрезков, отсекаемых на уровнер; R_{max} – наибольшая высота неровностей профиля; y_i – отклонения профиля от средней линии [259, 260].

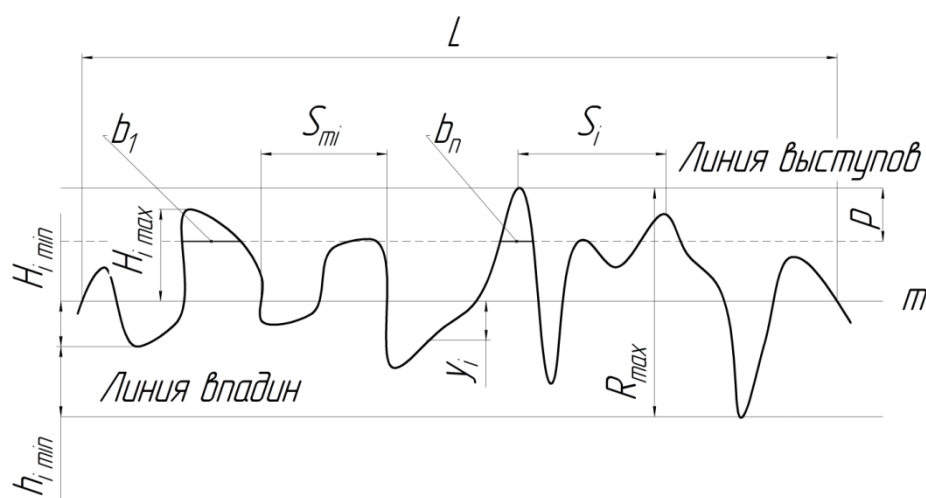


Рисунок 5.9 – Профиль и параметры шероховатости поверхности

Для обозначения шероховатости на практике используют два параметра R_a и R_z . R_a – среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины [261]:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_l^0 |y_i| dx, \quad (5.13)$$

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|. \quad (5.14)$$

R_z – наибольшая высота профиля, сумма высоты наибольшего выступа профиля и глубины наибольшей впадины профиля в пределах базовой длины. В качестве базовой длины выбирают одну из длин 0,01; 0,03; 0,08; 0,25; 0,80; 2,5; 8; 25 мм [262]. Для широкого класса поверхностей после технологической обработки

горизонтальный шаг неровностей находится в пределах от 1 до 1000 мкм, а высота – от 0,01 до 10 мкм. Корпус ТО220, в который устанавливаются силовые транзисторы, имеет форму прямоугольника размером 10,1х15,1 мм. Следовательно, количество неровностей в этой области будет:

$$N = \frac{L \cdot B}{S_{mi}}, \quad (5.15)$$

где L – длина корпуса, B – ширина корпуса.

При $S_{mi} = 10^{-6}$, $N = 152\,500$.

При $S_{mi} = 10^{-3}$, $N = 152,5$.

При контакте корпуса ТО220, у которого средний шаг неровностей профиля 1000 мкм, с радиатором охлаждения с таким же шагом неровностей профиля при отсутствии теплопроводящей пасты получится 152 точки контакта и, следовательно, 152 источника термоЭДС, соединенных параллельно. Такое количество будет оставаться до тех пор, пока теплопроводящая паста не заполнит все полости между соприкасающимися поверхностями. При увеличении количества теплопроводящей пасты, помещаемой между двумя соприкасающимися поверхностями, ее избыток будет приводить к увеличению расстояния между соприкасающимися поверхностями и, следовательно, к уменьшению точек соприкосновения. Такая тенденция будет продолжаться до тех пор, пока не останется одна точка контакта и, следовательно, один источник термоЭДС.

От теплового сопротивления будет зависеть термоЭДС. С учетом формулы (5.8) можно записать:

$$E = \frac{R_{th}}{\theta}. \quad (5.16)$$

Анализ выражения (5.16) позволяет сделать вывод, что характер зависимости термоЭДС от толщины теплопроводящей пасты будет аналогичен характеру зависимости теплового сопротивления двух соприкасающихся поверхностей от толщины термопасты, показанной на рисунке 5.7.

Параллельное соединение источников термоЭДС приведет к уменьшению внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС, как было показано в главе 2. Соответственно, при увеличении количества теплопроводящей пасты внутреннее сопротивление вначале будет оставаться неизменным до тех пор, пока количество точек контакта будет оставаться неизменным, т.е. до тех пор, пока теплопроводящая паста не заполнит все полости в зазоре. А тепловое сопротивление при этом будет уменьшаться, стремясь к минимуму. Последующее увеличение количества теплопроводящей пасты приведет к увеличению теплового сопротивления и к увеличению внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС за счет уменьшения количества параллельно соединенных источников термоЭДС.

Для проверки этого утверждения было проведено моделирование по изменению внутреннего сопротивления эквивалентного источника при изменении толщины теплопроводящей пасты между двумя соприкасающимися поверхностями. В качестве соприкасающихся поверхностей были выбраны корпус ТО220 и радиатор охлаждения. Корпус ТО220 имеет металлическую подложку размером 10,1x15,1мм. Площадь соприкосновения составит 152,5 мм². Относительная толщина слоя теплопроводящей пасты в 0,2 единицы была выбрана в качестве опорной, при которой все полости между двумя соприкасающимися поверхностями заполнены теплопроводящей пастой. При меньшей толщине слоя теплопроводящей пасты не все полости заполнены теплопроводящей пастой. Изменение количества источников термоЭДС при увеличении относительной толщины теплопроводящей пасты свыше 0,2 единицы может подчиняться разным законам. При расчетах было выбрано три варианта изменения количества параллельно соединенных источников термоЭДС: линейная, экспоненциальная и квадратичная. Внутреннее сопротивление эквивалентного источника термоЭДС рассчитывалось в соответствии с формулой:

$$R_{вн.экв} = \frac{R_{вн}}{K}, \quad (5.17)$$

где $R_{вн}$ – внутреннее сопротивление одиночного источника термоЭДС,

K – количество источников термоЭДС, соединенных параллельно.

С учетом выражений (5.12) и (5.13) и исходя из перечисленных выше начальных условий, были получены три зависимости внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС от относительной толщины теплопроводящей пасты в относительных единицах, показанные на рисунке 5.10. Сплошная линия соответствует квадратичному изменению количества параллельно соединённых источников термоЭДС, пунктирная линия – линейному и штрих-пунктирная линия – экспоненциальному.

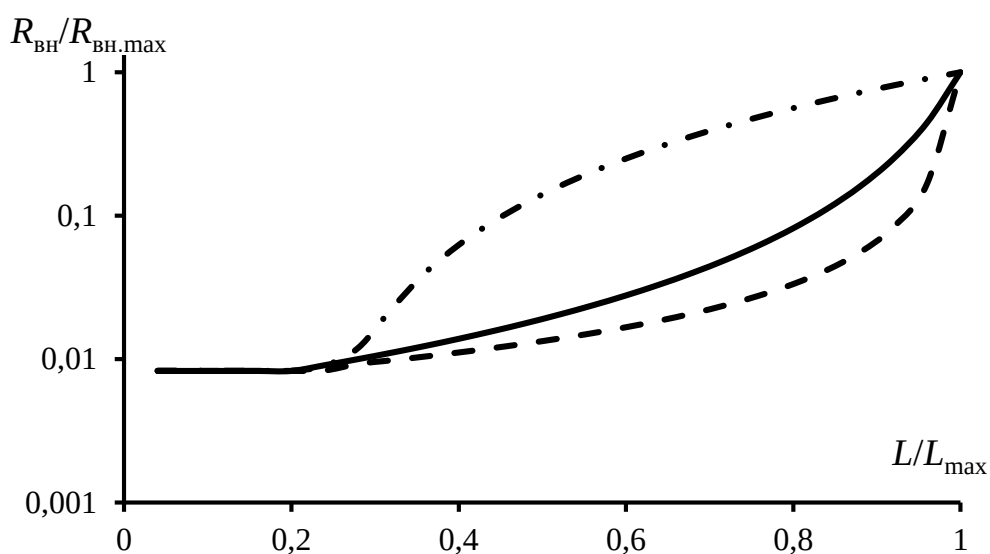


Рисунок 5.10 – Относительные зависимости внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС от относительной толщины теплопроводящей пасты, сплошная линия соответствует квадратичному изменению количества параллельно соединённых источников термоЭДС, пунктирная линия – линейному и штрих-пунктирная линия – экспоненциальному

Количество параллельно соединенных источников термоЭДС остается постоянным в диапазоне толщин слоя теплопроводящей пасты от нуля до 0,2 относительной величины, поэтому внутреннее сопротивление остается постоянным. При последующем увеличении толщины слоя теплопроводящей пасты количество источников уменьшается, и, соответственно, уменьшается внутреннее сопротивление эквивалентного источника термоЭДС. Закон изменения

количества параллельно соединенных источников термоЭДС влияет на характер кривой, описывающий внутреннее сопротивление эквивалентного источника термоЭДС. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать заключение о возможности детектирования относительной толщины теплопроводящей пасты по измеренному значению внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС.

5.4 Экспериментальные исследования

Для проверки теоретических результатов, представленных выше, был разработан экспериментальный стенд (рисунок 5.11), который содержит радиатор охлаждения 1, транзистор в корпусе TO220 2, подключенный к нагрузке 3. Резистор 4 одним выводом подключен к радиатору охлаждения 1 и первому выводу измерителя термоЭДС 7. Второй вывод резистора 4 подключен к подвижному контакту реле 5 (Р). Неподвижный контакт реле 5 (Р) подключен к измерителю термоЭДС 4. Источник питания 6 подключен к транзистору 2. Выход измерителя термоЭДС 4 подключен к аналого-цифровому преобразователю 7 (АЦП). Выход аналого-цифрового преобразователя 7 (АЦП) подключен к микроконтроллеру 8, который связан с реле 5 (Р) и персональному компьютеру 10 (ПК).

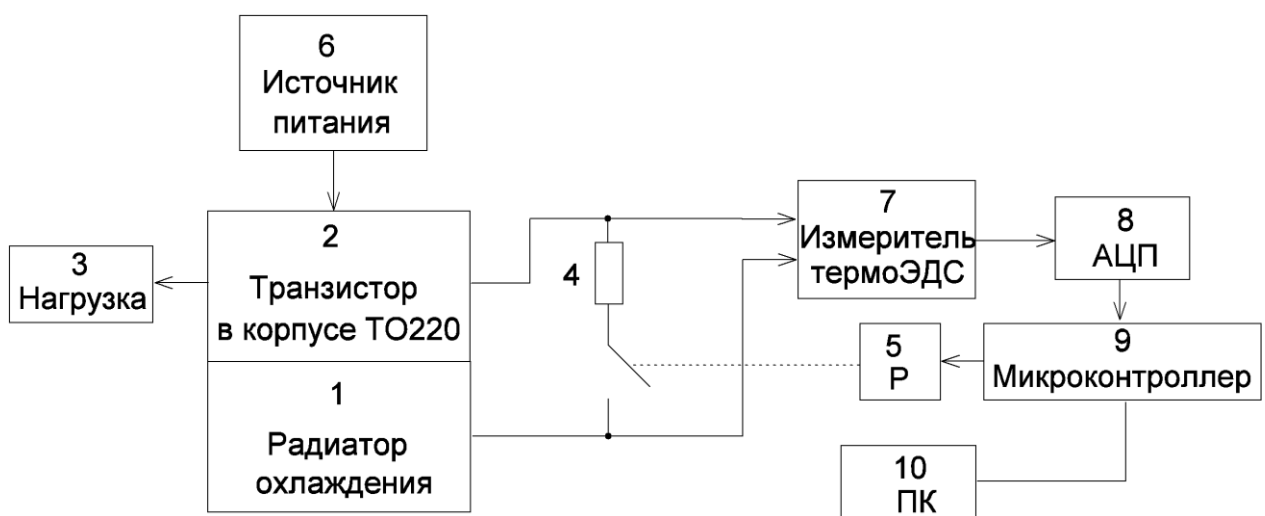


Рисунок 5.11 – Экспериментальная установка

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

$$R_{вн} = R \cdot \left(\frac{U_{xx} - U_n}{U_n} \right), \quad (5.18)$$

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

При экспериментальном исследовании сначала использовалось контактное соединение корпуса ТО220 с радиатором охлаждения без теплопроводящей пасты. При этом тепловое сопротивление между соприкасающимися поверхностями максимально. Затем понемногу добавлялась теплопроводящая паста (рисунок 5.12). Тепловое сопротивление постепенно снижалось, достигая минимального значения, а затем оно стало увеличиваться. При этом ток через транзистор поддерживался постоянным. Транзистор нагревался, его температура контролировалась термопарой. Также контролировалась температура радиатора.

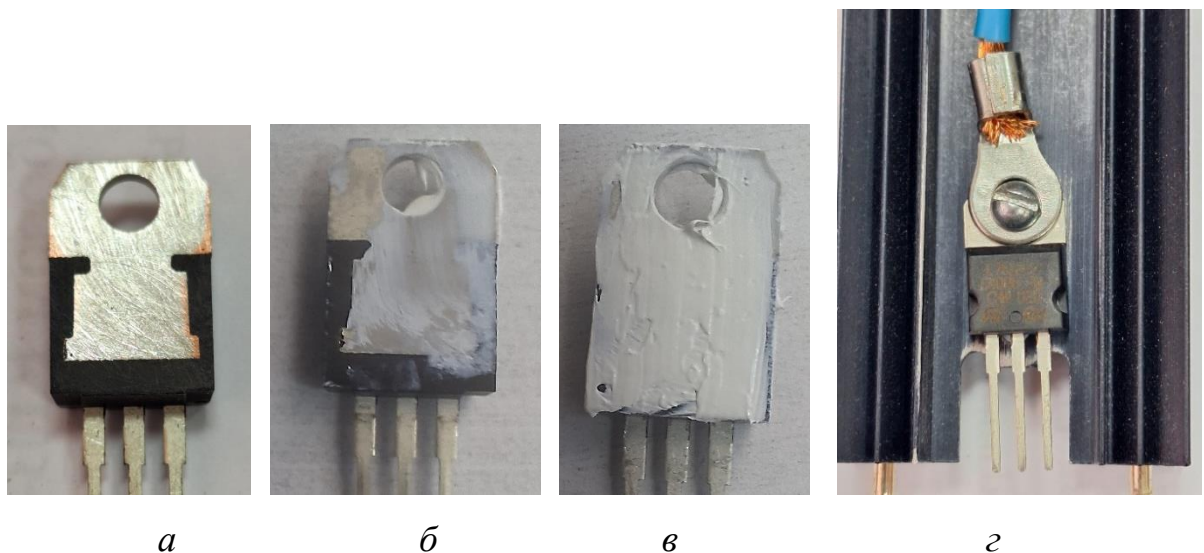


Рисунок 5.12 – Фотография экспериментальных образцов, *а* – без теплопроводящей пасты, *б* – с небольшим количеством теплопроводящей пасты, *в* – с толстым слоем теплопроводящей пасты, *г* – транзистор с радиатором

Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунках 5.13 - 5.15. На рисунке 5.13 показана зависимость разницы температур радиатора и корпуса ТО220 транзистора КТ808А от времени при наличии и при отсутствии теплопроводящей пасты в зазоре между ними. Штрихпунктирная линия соответствует отсутствию теплопроводящей пасты в зазоре, сплошная линия соответствует наличию теплопроводящей пасты в зазоре.

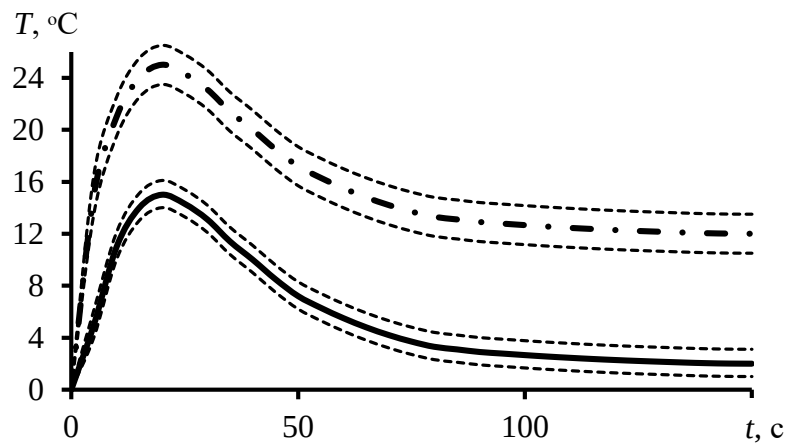


Рисунок 5.13 – Изменение разницы температур между корпусом ТО220 и радиатором охлаждения от времени, полученные с помощью термопар, штрихпунктирная линия - при отсутствии теплопроводящей пасты в зазоре между ними, сплошная линия - при наличии теплопроводящей пасты в зазоре между ними

Зависимость разницы температур между корпусом ТО220 и радиатором охлаждения от времени имеет экстремум примерно на 25 с как с теплопроводящей пастой, так и без неё. До 25 с идёт увеличение, а после – уменьшение, стремясь к установившемуся значению. Длительность переходного процесса не зависит от количества теплопроводящей пасты в зазоре, т.к. определяется только теплоемкостью радиатора и корпуса ТО 220. Доверительный интервал не превышает 10 %. Относительное изменение термоЭДС показано на рисунке 5.13. Так как толщину теплопроводящей пасты измерить было невозможно, то определяли зависимость термоЭДС эквивалентного источника от количества

теплопроводящей пасты в зазоре, которое коррелирует с толщиной слоя теплопроводящей пасты.

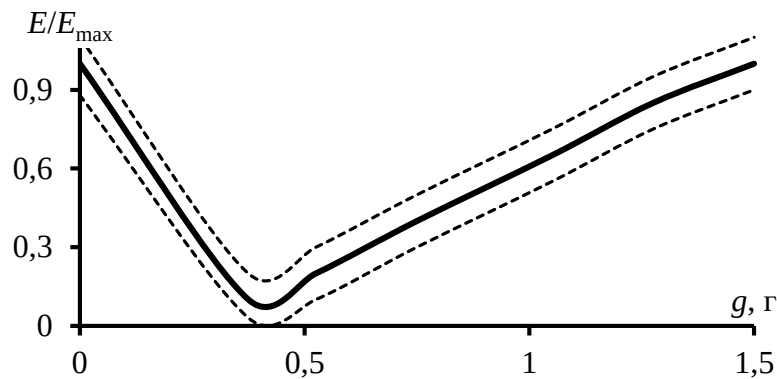


Рисунок 5.14 – Зависимость относительной термоЭДС эквивалентного источника от количества теплопроводящей пасты

Характер зависимости относительной термоЭДС эквивалентного источника от количества теплопроводящей пасты очень похож на зависимость теплового сопротивления от толщины слоя теплопроводящей пасты в зазоре между корпусом ТО220 и радиатором охлаждения, приведенную на рис.5.7. Зависимость внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС в относительных единицах от количества теплопроводящей пасты показана на рисунке 5.15.

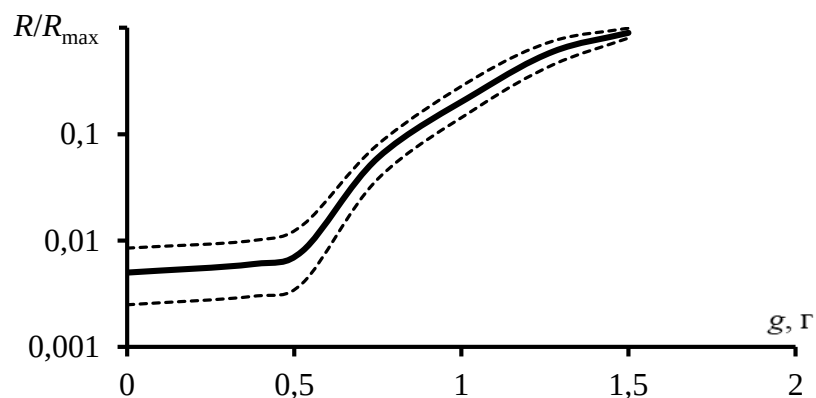


Рисунок 5.15 – Зависимость внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС в относительных единицах от количества теплопроводящей пасты

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что гипотеза о характере изменения внутреннего сопротивления от толщины слоя теплопроводящей пасты подтвердилась. Однако характер экспериментальной зависимости внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС в относительных единицах от количества теплопроводящей пасты отличается от характера расчетной кривой в области превышения теплопроводящей пасты минимально необходимого количества. При отсутствии теплопроводящей пасты внутреннее сопротивление эквивалентного источника термоЭДС оказалось больше расчетного. Это связано с меньшим количеством параллельно соединенных источников в экспериментальной установке по сравнению с расчетной. Видимо, размер шероховатости поверхности корпуса ТО220 или радиатора оказался выше, чем тот, который использовался в расчётах. Кроме того, в области превышения теплопроводящей пасты минимально необходимого количества характер экспериментальной зависимости имеет экспоненциальный вид, а расчетной – логарифмический, что, по всей видимости, связано с разным характером изменения количества параллельно соединенных источников термоЭДС, используемых в расчетах и полученных экспериментальным путем.

При практическом использовании внутреннего сопротивления в качестве диагностического параметра необходимо вначале получить корреляционную зависимость внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС, получаемого при соприкосновении двух поверхностей: радиатора охлаждения и корпуса ТО220 или другого корпуса тепловыделяющего электронного компонента. Причем радиаторы охлаждения должны иметь одинаковый химический состав, пройти одинаковую термическую и механическую обработку и иметь одинаковую шероховатость. Эти же требования относятся и к корпусу ТО220 или любому другому корпусу, в который помещен тепловыделяющий электронный компонент.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования по влиянию теплового сопротивления двух соприкасающихся поверхностей на характеристики эквивалентного источника термоЭДС позволяют сделать следующие выводы:

1. Характер изменения термоЭДС эквивалентного источника от теплового сопротивления двух соприкасающихся поверхностей корпуса ТО220 и радиатора охлаждения совпадает с характером изменения теплового сопротивления от толщины теплопроводящей пасты.

2. Получена зависимость изменения относительного внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС, образованного корпусом электронного компонента и радиатором охлаждения от количества теплопроводящей пасты в промежутке между ними.

3. Характер зависимости изменения относительного внутреннего сопротивления эквивалентного источника термоЭДС, образованного корпусом электронного компонента и радиатором охлаждения, от количества теплопроводящей пасты в промежутке между соприкасающимися поверхностями позволяет однозначно детектировать причину возникновения большого теплового сопротивления в этом месте.

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

Следует отметить, что метод термоэлектрического контроля может быть использован непосредственно во время эксплуатации электронного оборудования.

ГЛАВА 6. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенные исследования, представленные в предыдущих главах, нашли свое применение при практической реализации нескольких вариантов приборов термоэлектрического контроля. Материалы, представленные в главе 6, были опубликованы в работах автора [98, 187, 261, 263-268].

6.1 Прибор термоэлектрического контроля с дифференциальным датчиком

Для входного контроля металлов и сплавов, контроля толщины обезуглероженного слоя и качества термической обработки был разработан и изготовлен термоэлектрический прибор «ТЕРМОТЕСТ-1М» с дифференциальным датчиком. Авторы разработали и внедрили оригинальную конструкцию датчика, которая удобна в эксплуатации, и является составной частью термоэлектрического прибора «ТЕРМОТЕСТ-1М» (рисунок 6.1), на который был получен патент RU 2498281 C1 [266].



Рисунок 6.1 – Прибор термоэлектрического контроля металлов и сплавов
«ТЕРМОТЕСТ-1М»

Использование дифференциального датчика позволило получить высокую разрешающую способность. При этом производится сравнение эталона с тестируемым изделием. Например, при контроле содержания углерода на поверхности изделия (контроль толщины обезуглероженного слоя) можно выявить изменение от 0,05 %. Основные технические характеристики прибора термоэлектрического контроля металлов и сплавов «ТЕРМОТЕСТ-1М» приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Технические характеристики прибора «ТЕРМОТЕСТ-1М».

№	Наименование параметра	Ед. измерения	Величина
1	Напряжение питания прибора	Вольт	220
2	Напряжение питания датчика	Вольт	220
2	Температура датчика	Градус Цельсия	130 ± 3
3	Точность поддержания температуры	%	± 5
4	Пределы установки напряжения порога при разбраковке	мкВ	0,01...0,4
5	Диапазон измерения термо-ЭДС - в диапазоне X1 - в диапазоне X2 - в диапазоне X3	мкВ	0...±9,99 0...±1,99 0...±0,999
6	Время готовности прибора	минуты	15
7	Включение сигнала «Норма»	Зеленый индикатор	ЭДС меньше напряжения порога
8	Включение сигнала «Брак»	Красный индикатор	ЭДС больше напряжения порога
9	Потребляемая мощность, не более	Вт	6

Из-за расположения двух нагреваемых электродов и нагревателя с датчиком температуры в одном корпусе, "Термотест-1М" может быть внедрён на конвейерной линии для автоматического контроля. Конструкция датчика и его

положение на тестируемом и эталонном образцах показаны на рисунке 6.2, *а*. На рисунке 6.2, *б* представлена фотография датчика.

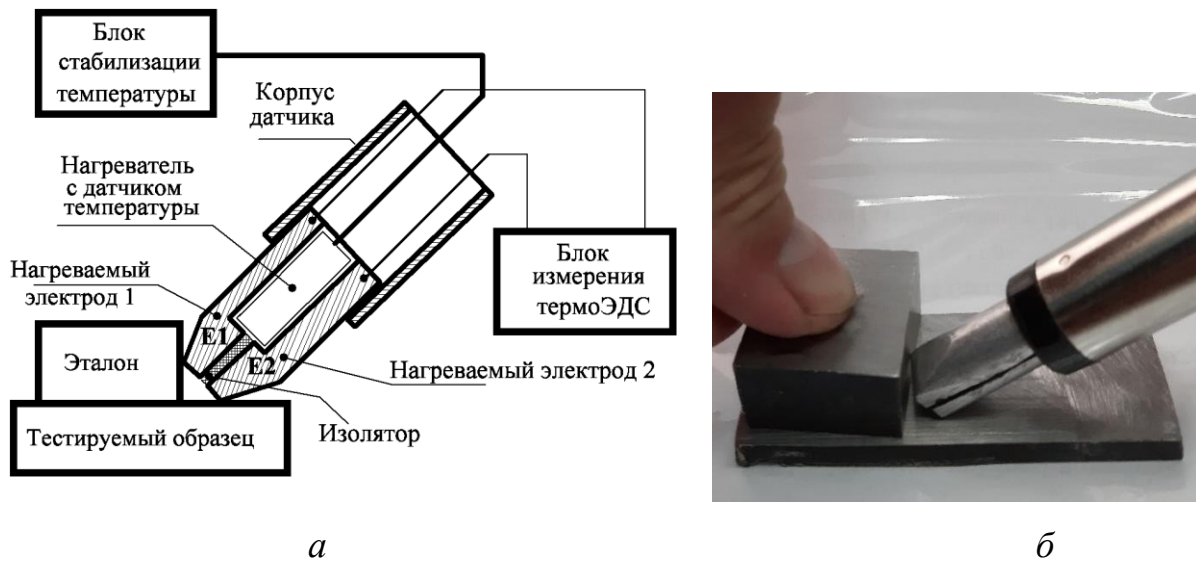


Рисунок 6.2 – Дифференциальный датчик, *а* – схематичное изображение датчика, *б* – фотография датчика

Дифференциальный датчик состоит из двух нагреваемых электродов Э1 и Э2, нагревательного элемента, датчика температуры, который контролирует температуру нагревательного элемента, все элементы помещены в общий корпус. Общий нагреватель для двух нагреваемых электродов обеспечивает одинаковую температуру в точках их контакта с эталоном и испытуемым образцом. Электроды закрепляются в общем корпусе так, чтобы не было электрического контакта между ними. Это можно обеспечить путем установки изолирующей пластины между ними. Результирующая термоЭДС является суммой ЭДС контактных пар, входящих в измерительный контур датчика:

$$E_{dif} = E_1 \pm E_2 - E_3 + E_4 - E_5, \quad (6.1)$$

где E_1 – термоЭДС, образованная первым нагреваемым электродом и эталоном; E_2 – ЭДС, образованная эталоном и контролируемым изделием; E_3 – ЭДС, образованная вторым нагреваемым электродом и контролируемым изделием; E_4 – ЭДС, образованная первым нагреваемым электродом и медным соединительным

проводником; E_5 – ЭДС, образованная вторым нагреваемым электродом и медным соединительным проводником.

Так как нагреваемые электроды одинаковы, то можно записать:

$$E_4 = E_5. \quad (6.2)$$

С учетом этого формула (6.1) примет вид:

$$E_{dif} = E_1 \pm E_2 - E_3. \quad (6.3)$$

Форма эталона и тестируемого изделия может произвольной, т.к. термоЭДС не зависит от размеров и формы образца.

Следует учесть, что контролировать можно не все группы сталей. Так, например, стали группы А, к которой относятся стали: Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6, контролировать невозможно из-за различного химического состава одной и той же марки стали. Стали групп Б и В контролировать можно, т.к. они имеют одинаковый химический состав. При подготовке образцов для контроля можно использовать только абразивный инструмент. Напильники, резцы и т.п. использовать нельзя, т.к. после их использования остаются частицы металла, из которого сделаны эти инструменты, и они повлияют на результат контроля.

Электронная часть прибора состоит из трех электронных трактов. Первый электронный тракт предназначен для измерения термоЭДС, второй электронный тракт предназначен для сравнения величины термоЭДС с пороговым значением, третий электронный тракт предназначен для стабилизации температуры нагреваемых электродов. Первый электронный тракт включает дифференциальный усилитель, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и индикатора термоЭДС. Второй электронный тракт состоит из выпрямителя, компаратора, регулятора порога и индикатора «Норма-Брак». Тракт стабилизации температуры включает нагреватель, датчик температуры, блок управления нагревателем и индикатор нагрева (рис.6.3).



Рисунок 6.3 – Структурная схема прибора термоэлектрического контроля
«Термотест-1»

Прибор работает следующим образом: между горячими электродами, эталоном и тестируемым изделием возникает термоЭДС, которая усиливается дифференциальным усилителем, преобразуется в цифровой код аналого-цифровым преобразователем и поступает на индикатор термЭДС для отображения. Также с выхода дифференциального усилителя термоЭДС поступает во второй электронный тракт на вход выпрямителя. С выхода выпрямителя однополярное напряжение положительной полярности поступает на компаратор, где происходит его сравнение с пороговым. Если сигнал термоЭДС меньше напряжения порога, то индицируется «Норма». В противном случае - «Брак». Вторым электронным трактом используется при массовой разбраковке изделий. Уровень порогового напряжения при массовой разбраковке устанавливается пользователем путем изменения величины порогового напряжения на инверсном входе компаратора с помощью регулятора порога.

Третий электронный тракт работает следующим образом: при включении прибора происходит плавный нагрев нагреваемых электродов. При достижении рабочей температуры с датчика температуры подается сигнал в блок управления нагревателем, который отключает нагрев. Индикатор нагрева включен при нагреве электродов и отключается при отключении нагревателя.

Опыт применения

При входном контроле поставляемой продукции по маркам сталей и сплавов была подготовлена таблица значений термоЭДС, выполненная с использованием прибора «ТЕРМОТЕСТ-1М». Результаты измерения дифференциальной термоЭДС приведены в таблице 6.2. По вертикали приведен перечень марок сталей, используемых при изготовлении эталонного образца, а по горизонтали – тестируемого образца.

Таблица 6.2 – Значения дифференциальной термоЭДС некоторых широко распространенных марок сталей

Марка стали	9ХС	Р6М5	3Х3М3Ф	ДИ22	Х12МФ	6ХВ2С	У8А	Х12Ф1	ХВГ
9ХС	0 ±0,05	-0,95 ±0,05	- 1,35 ±0,05	-0,90 ±0,05	-1,25 ±0,05	-0,45 ±0,05	-0,60 ±0,05	-1,30 ±0,05	-0,80 ±0,05
Р6М5		0 ±0,05	-0,30 ±0,05	+0,15 ±0,05	-0,25 ±0,03	+0,55 ±0,05	+0,30 ±0,05	-0,30 ±0,05	+0,25 ±0,05
3Х3М3Ф			0 ±0,05	+0,40 ±0,05	+0,10 ±0,05	+0,70 ±0,05	+0,75 ±0,05	+0,12 ±0,05	+0,50 ±0,05
ДИ22				0± 0,05	- 0,35 ±0,05	+0,45 ±0,05	+0,40 ±0,05	-0,30 ±0,05	+0,20 ±0,05
Х12МФ					0± 0,05	+0,70 ±0,03	+0,60 ±0,05	- 0,10 ±0,05	+0,45 ±0,05
6ХВ2С						0 ±0,03	-0,15 ±0,03	-0,85 ±0,05	-0,25 ±0,5
У8А							0 ±0,03	-0,70 ±0,05	-0,10 ±0,05
Х12Ф1								0 ±0,05	+0,55 ±0,05

Продолжение таблицы 6.2.

Марка стали	20Х	ШХ15	Х12М	Х12Ф	Ст.30	Ст.45	У8	У12
20Х	0 ±0,05	0,50 ±0,05	0,90 ±0,05	1,90 ±0,05	0,50 ±0,05	0,60 ±0,05	0,75 ±0,05	0,80 ±0,05
ШХ15		0 ±0,05	1,25 ±0,05	2,00 ±0,05	0,12 ±0,05	0,20 ±0,05	0,50 ±0,05	0,55 ±0,05
Х12М			0 ±0,03	1,00 ±0,05	1,35 ±0,05	1,45 ±0,05	1,60 ±0,05	1,65 ±0,05
Х12Ф				0 ±0,03	2,05 ±0,05	2,15 ±0,05	2,40 ±0,05	2,45 0±0,05
Ст.30					0 ±0,05	-0,10 ±0,05	0,10 ±0,05	0,15 ±0,05
Ст.45						0 ±0,05	0,20 ±0,05	0,25 ±0,05
У8							0 ±0,05	0,05 ±0,05

Из таблицы 6.2 видно, что некоторые пары имеют очень близкие значения термоЭДС. Например, сталь Х12Ф1 и сталь Х12МФ, а также сталь ХВГ и сталь У8А. В таблице 6.3 близкими значениями термоЭДС обладают пары сталь Ст.30 и сталь Ст.45, а также сталь У8 и сталь У12. Поэтому возможны ошибки при входном контроле и сортировке готовой продукции этих пар сталей. Остальные марки стали имеют большее различие в термоЭДС, и проблем с их сортировкой не возникает.

Прибор термоэлектрического контроля металлов и сплавов «ТЕРМОТЕСТ-1М» был применен для контроля качества термической обработки стали Р6М5.

Для исследования зависимости термоЭДС от температуры нагрева были использованы 10 образцов. Образцы нагревали в температурном диапазоне 1150...1250 °С с шагом 10 °С. Закалку нагретых образцов производили путем охлаждения в масле. В качестве эталона использовали образец из этой же марки стали, нагретый до 1225 °С и охлажденный в масле. Усредненная зависимость термоЭДС от температуры нагрева образцов приведена на рисунке 6.4.

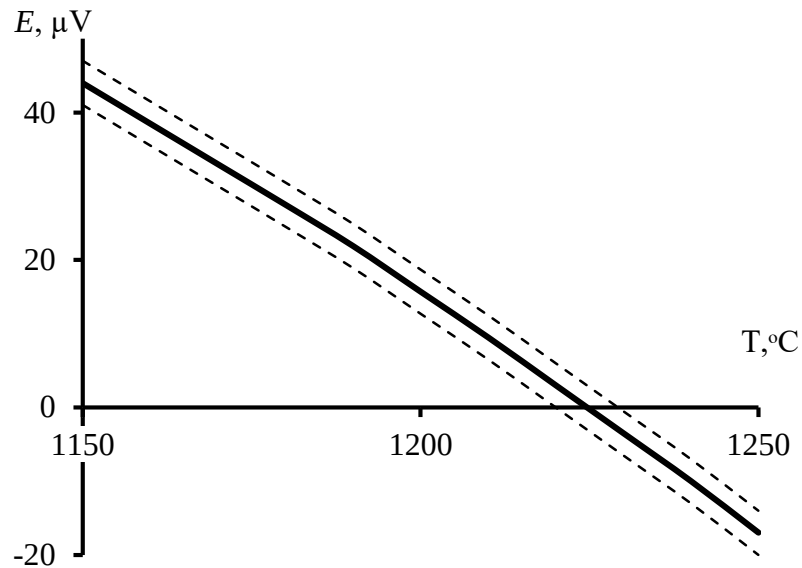


Рисунок 6.4 – Усредненная зависимость термоЭДС от температуры нагрева под закалку стали Р6М5

Расчетный коэффициент вариации для экспериментальной зависимости, представленной на рисунке 6.4, составил $w = 3,5 \%$ и доверительный интервал $\Delta x = \pm 2$, с уровнем доверия 95 %.

При получении корреляционной зависимости качества термической обработки стали необходимо предварительно удалить обезуглероженный слой с поверхности контролируемого изделия, особенно после закалки, что приведет к искажению результатов контроля, т.к. содержание углерода очень сильно влияет на величину термоЭДС.

Основным контролирующим параметром химико-термической обработки (ХТО) является глубина насыщаемого слоя. Для контроля глубины насыщаемого слоя традиционно используют металлографический метод, который является прямым методом контроля. Он позволяет с высокой точностью определять глубину цементованного или азотированного слоя. Но этот метод относится к разрушающим методам контроля, т.к. требует подготовки металлографического шлифа и, кроме того, процедура контроля является длительной.

Для оценки возможности использования прибора «ТЕРМОТЕСТ-1М» для контроля толщины цементованного слоя стали 12Х2Н4А была построена зависимость дифференциальной термоЭДС от глубины слоя на образце.

Для исследования зависимости термоЭДС от толщины цементованного слоя были подготовлены образцы из стали 12Х2Н4А, подвергнутые цементации, закалке и отпуску. Изменение толщины слоя цементации достигалось за счет шлифовки поверхности образцов. Величина сошлифованного слоя каждый раз составляла 0,2 мм. Одновременно толщину цементованного слоя контролировали металлографическим методом. После каждой шлифовки измерялась дифференциальная термоЭДС. Максимальная толщина сошлифованного слоя составила 2 мм. Эталон изготовили из этой же марки стали и его не подвергали цементации. Результаты контроля величины термоЭДС от толщины цементованного слоя показаны на рисунке 6.5.

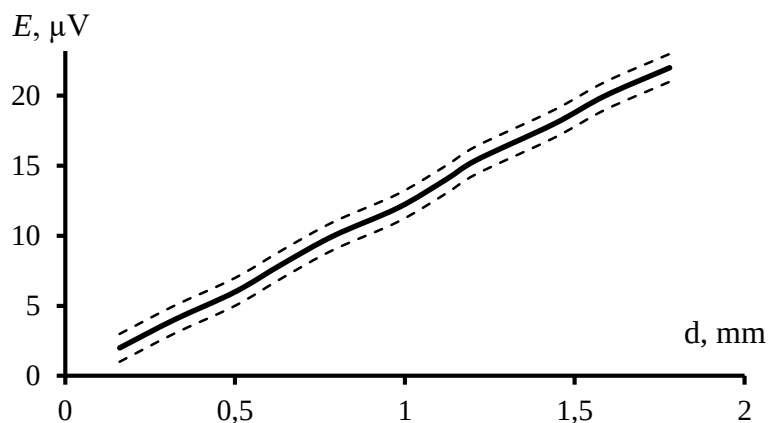


Рисунок 6.5 – Зависимость дифференциальной термоЭДС от толщины цементованного слоя

Расчетный коэффициент вариации для экспериментальной зависимости, представленной на рисунке 6.5, составил $w = 4,9 \%$ и доверительный интервал $\Delta x = \pm 1,5$, с уровнем доверия 95 %.

Как видно из рисунка 6.5, изменение дифференциальной термоЭДС от толщины цементованного слоя имеет практически линейный характер.

Для контроля толщины цементованного или азотированного слоя на другой марке стали необходимо вначале получить свою зависимость термоЭДС от толщины цементованного слоя и использовать ее при контроле. При этом контроль этим методом возможен в любой точке детали.

6.2 Прибор термоэлектрического контроля «ТЕРМОТЕСТ-2»

Прибор термоэлектрического контроля «ТЕРМОТЕСТ-1М» имеет недостаток, заключающийся в отсутствии контроля контактного сопротивления, которое оказывает влияние на результат контроля, как было показано в главе 3. Этот недостаток был устранен в приборе «ТЕРМОТЕСТ-2» путем контроля контактного сопротивления на переменном токе высокой частоты. Структурная схема тракта контроля контактного сопротивления приведена на рисунке 6.6. Этот тракт был добавлен в структурную схему прибора «Термотест-1М». На способ контроля контактного сопротивления и устройство контроля контактного сопротивления были получены патенты РФ № 2670365 и № 2652657 [267, 268].

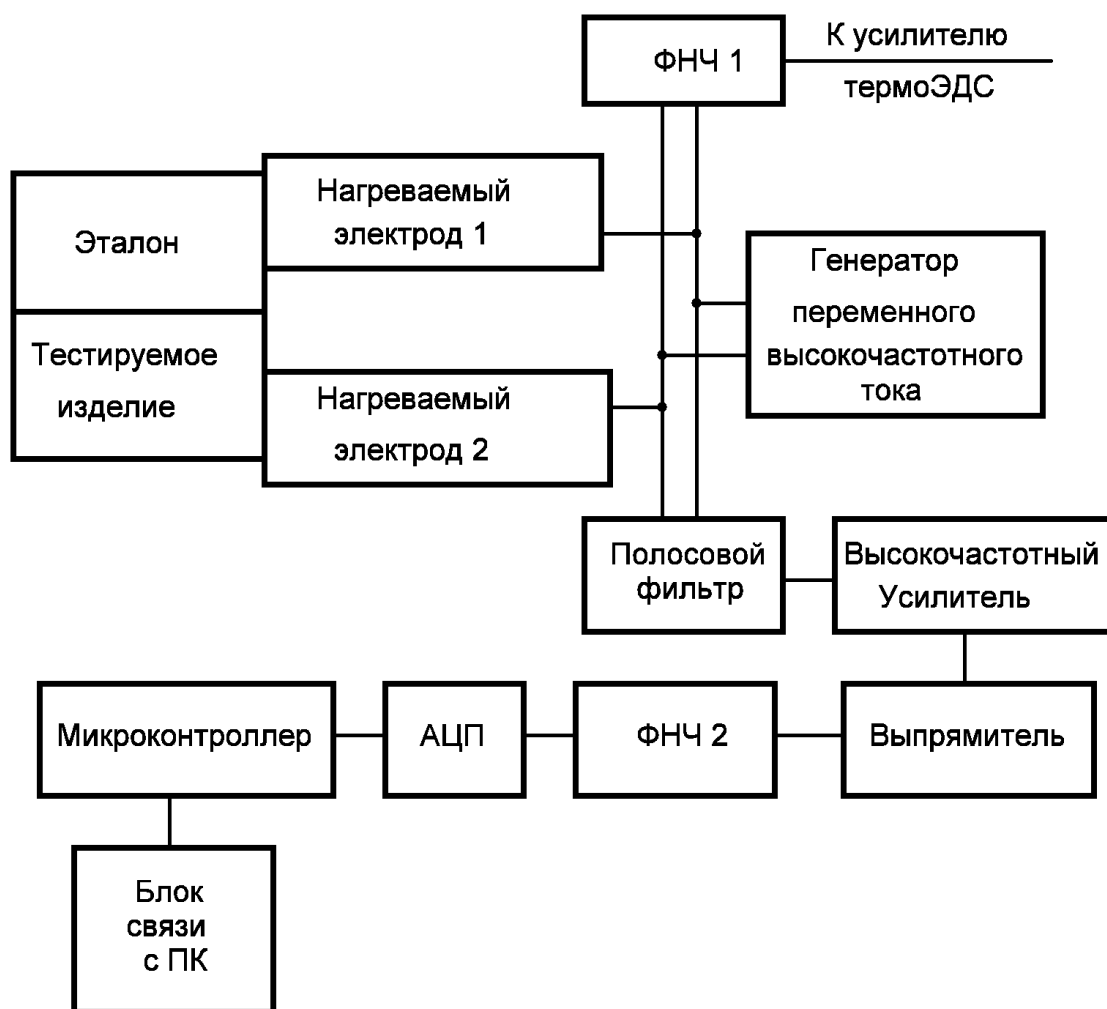


Рисунок 6.6 – Структурная схема тракта контроля контактного сопротивления

Тракт контроля контактного сопротивления состоит из генератора высокочастотного переменного тока, полосового фильтра, высокочастотного усилителя, выпрямителя, первого фильтра низких частот (ФНЧ 1), аналого-цифрового преобразователя, микроконтроллера, блока связи с персональным компьютером и второго фильтра низких частот (ФНЧ 2). Схема работает следующим образом. Генератор переменного высокочастотного тока генерирует синусоидальный ток. Основное требование к генератору – величина тока не должна зависеть от нагрузки. Ток высокочастотного генератора протекает по замкнутой цепи датчика. При протекании тока генератора на контактном сопротивлении появится напряжение. Напряжение на контактном сопротивлении, в соответствии с законом Ома, определяется из выражения:

$$U_k = I_m \cdot R_k, \quad (6.4)$$

где I_m – ток генератора, R_k – контактное сопротивление.

С дифференциального датчика снимаются два вида напряжения: постоянное, соответствующее термоЭДС и высокочастотное переменное, соответствующее току генератора и контактному сопротивлению. Для выделения высокочастотного напряжения используется полосовой фильтр с резонансной частотой, равной частоте генератора тока. Для выделения постоянного напряжения термоЭДС используется фильтр низких частот, выходное напряжение которого поступает на усилитель термоЭДС. С выхода полосового фильтра высокочастотное напряжение поступает на высокочастотный усилитель. После усиления производится его выпрямление, фильтрация и преобразование в цифровой код, который поступает на микроконтроллер. Микроконтроллер рассчитывает контактное сопротивление и принимает решение об индикации термоЭДС. Если контактное сопротивление большое, то микроконтроллер отображает на индикаторе символ «ERROR». Если контактное сопротивление маленькое, то микроконтроллер отображает на индикаторе величину термоЭДС. Использование переменного напряжения для контроля контактного сопротивления позволяет контролировать сопротивление контактов в процессе измерения термоЭДС. В дополнение к тракту измерения контактного сопротивления прибор «ТЕРМОТЕСТ-2» содержит тракт измерения термоЭДС и тракт стабилизации температуры горячих электродов (рисунок 6.7), которые были подробно описаны в приборе «Термотест-1М».

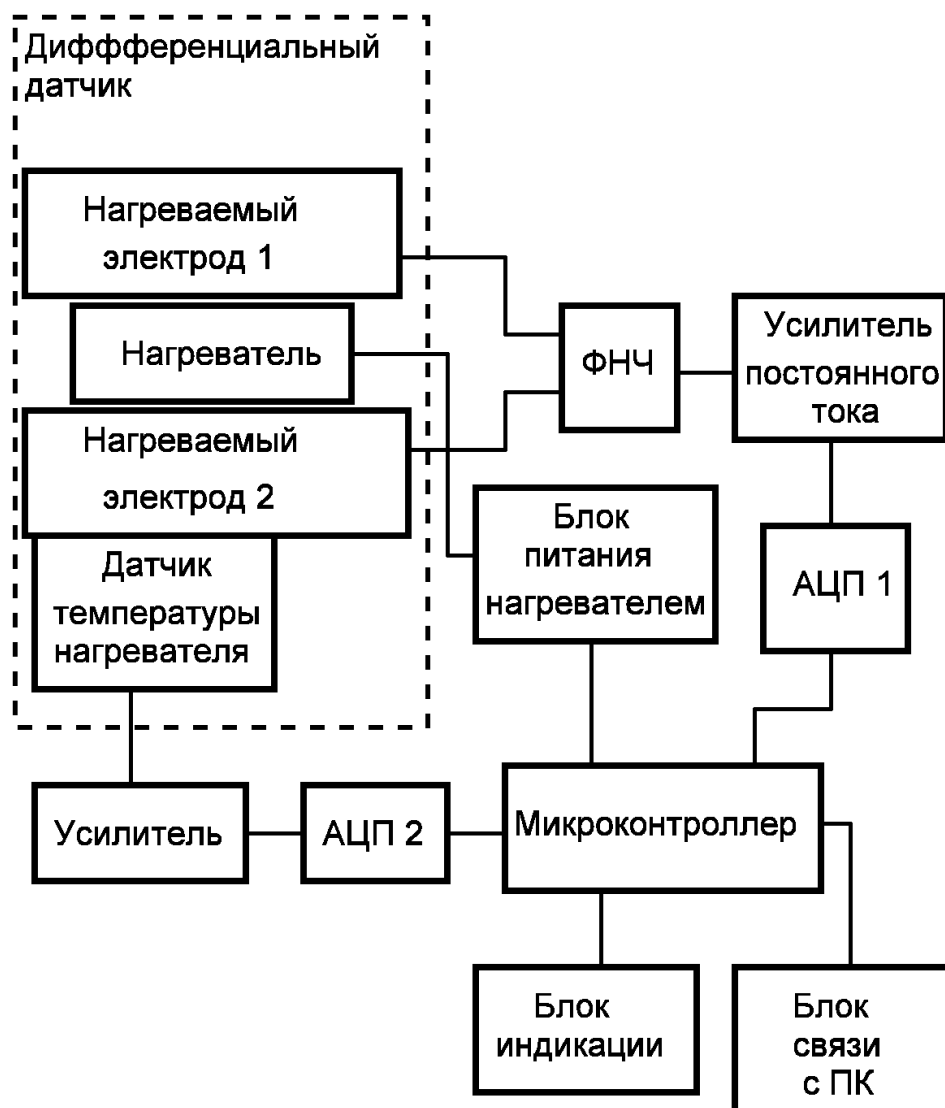


Рисунок 6.7 – Тракты измерения термоЭДС и стабилизации температуры прибора «ТЕРМОТЕСТ-2»

Дополнительно прибор «ТЕРМОТЕСТ-2» содержит блок связи с ПК, что позволяет отображать данные не только на цифровом индикаторе прибора, но и на мониторе ПК и, кроме того, сохранять эти данные в файле.

ИНТЕРФЕЙС ОПЕРАТОРА

Данные о величине термоЭДС, температуре нагреваемых электродов, текущем времени и контактном сопротивлении по интерфейсу связи передаются от прибора «ТЕРМОТЕСТ-2» в персональный компьютер. Полученные данные

отображаются на экране монитора. На рисунке 6.8 приведено окно «Графики» интерфейса оператора. Это окно для пользователей содержит информацию о величине термоЭДС в графическом виде (зеленые линии на верхнем и нижнем графиках). Также на верхнем графике отображается величина контактного сопротивления (красная линия на верхнем графике). На нижнем графике отображается текущая температура нагреваемых электродов (красная линия на нижнем графике). Над верхним графиком в центре отображается текущая температура нагреваемых электродов. На представленном рисунке видно, что температура нагреваемых электродов составляет 126 °С.



Рисунок 6.8 – Окно «Графики» интерфейса оператора

При проведении измерения, когда цепь дифференциального датчика замкнута, контактное сопротивление резко уменьшается. Момент начала измерения фиксируется на 630 отсчете (верхний график). До этого момента цепь дифференциального датчика разомкнута, и термоЭДС равна нулю (зеленая линия),

а контактное сопротивление равно 44 единицы, что означает превышение верхнего предела измерения. В момент замыкания цепи датчика наблюдается переходной процесс в течение 3 отсчетов. После его завершения величина термоЭДС составила -11,5 мкВ, контактное сопротивление - около нуля. Процесс измерения закончился на 820 отсчете, термоЭДС стала равна нулю, контактное сопротивление – 44 единицы. Процесс измерения от 630 до 820 отсчетов дополнительно отображается на нижнем графике. Температура нагреваемых электродов упала со 130 °С до 117 °С. Изменение составило 13 °С или 10 %. Изменение термоЭДС по графику не наблюдается. Анализ данных из файла показал изменение термоЭДС на 0,7 %.

Окно «Служебная» (рисунок 6.9) не предназначено для пользователей и используется при ремонте прибора, настройке драйверов и программного обеспечения. В нем отображаются принятые (в индикаторе «Прием») и переданные (в индикаторе «Передача») данные. Их регулярное изменение свидетельствует о регулярном обмене данными между прибором и ПК. Работа интерфейса USB индицируется индикатором USB=Ok, если связь установлена и USB=Off, если связи нет. Поток передаваемых данных отображается в большом окне справа. Также индицируется температура, напряжение питания и некоторые другие параметры работы прибора.

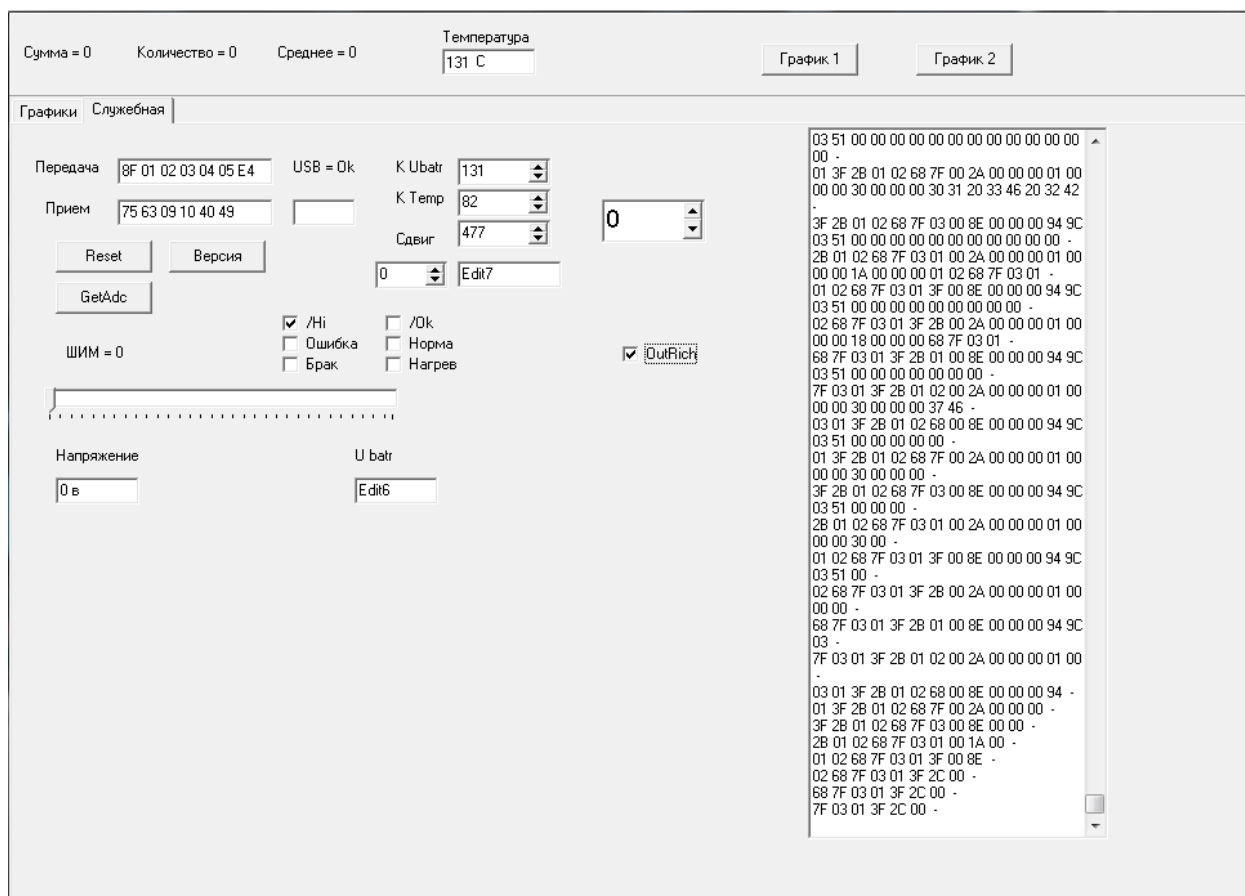


Рисунок 6.9 – Окно «Служебная» интерфейса оператора

Фотография прибора термоэлектрического контроля «Термотест-2» приведена на рисунке 6.10.



Рисунок 6.10 – Фотография прибора термоэлектрического контроля «Термотест-2»

Использование нового схемотехнического решения по контролю контактного сопротивления в приборе термоэлектрического контроля «Термотест-2» позволило повысить достоверность результатов контроля.

6.3 Прибор термоэлектрического контроля «Thermo Fitness Testing»

Из таблицы 6.2 видно, что некоторые пары металлов и сплавов имеют очень близкие значения термоЭДС. Например, сталь Х12Ф1 и сталь Х12МФ, а также сталь ХВГ и сталь У8А. В таблице 6.3 близкими значениями термоЭДС обладают пары сталь Ст.30 и сталь Ст.45, а также сталь У8 и сталь У12. Поэтому возможны ошибки при входном контроле и сортировке готовой продукции этих пар сталей. Кроме того, у некоторых сталей и сплавов термоЭДС практически одинакова в пластически деформированном и недеформированном состояниях, и определить место пластической деформации у таких марок сталей и сплавов затруднительно или невозможно [194]. Однако источники термоЭДС, образованные горячим электродом и этими сталями, могут иметь разное внутреннее сопротивление, которое можно вычислить по формуле:

$$R_{вн} = R \cdot \left(\frac{U_{xx} - U_n}{U_n} \right), \quad (6.6)$$

где R – сопротивление подключенного резистора;

U_n – величина термоЭДС, измеренная при подключенном резисторе;

U_{xx} – величина термоЭДС, измеренная при отключенном резисторе.

На рисунке 6.11 представлена структурная схема блока для измерения внутреннего сопротивления, примененная в приборе «Thermo Fitness Testing».

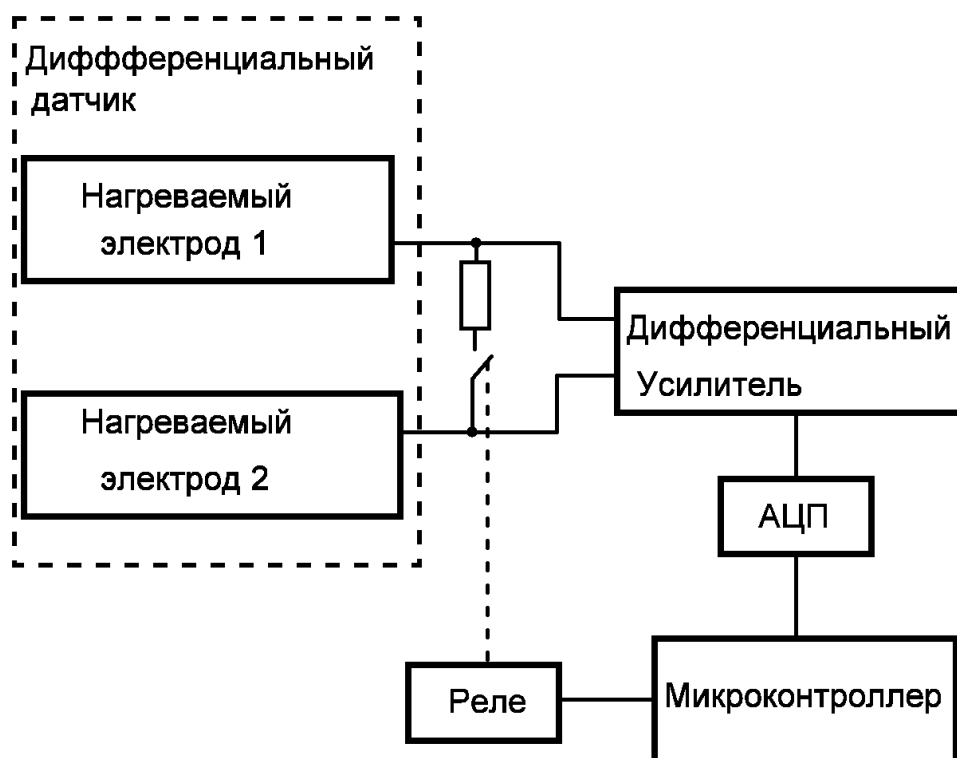


Рисунок 6.11 – Структурная схема блока для измерения внутреннего сопротивления

Блок для изменения внутреннего сопротивления содержит нагреваемый электрод 1, нагреваемый электрод 2, резистор, который одним выводом подключен к нагреваемому электроду 1 и первому входу дифференциального усилителя. Второй вывод резистора подключен к неподвижному контакту реле. Подвижный контакт реле подключен ко второму входу дифференциального усилителя. Выход дифференциального усилителя подключен к аналого-цифровому преобразователю. ТермоЭДС в цифровом виде поступает на микроконтроллер, который управляет реле.

Фотография прибора термоэлектрического контроля «Thermo Fitness Testing» показана на рисунке 6.12.



Рисунок 6.12 – Фотография прибора термоэлектрического контроля «Thermo Fitness Testing»

По результатам контроля внутреннего сопротивления источников термоЭДС, образованных горячим электродом из дюралюминия и некоторых марок сталей были получены результаты, представленные в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Внутреннее сопротивление источников термоЭДС.

Марка стали	Внутреннее сопротивление, Ом
Ст30	0,35
Ст45	1,51
Ст20	0,91
У8А	0,78
Х12	0,35
09Г2С	1,23
ШХ15	0,66

Как видно из таблицы 6.3 различие между сталями Ст30 и Ст45 очень существенное. В то же время из таблицы 6.2 видно, что величина термоЭДС у них очень близка. Также имеется отличие и у сталей Ст20 и ШХ15.

Результаты контроля пластической деформации сталей 12Х18Н10Т и 08КП показаны на рисунке 6.13 и рисунке 6.14.

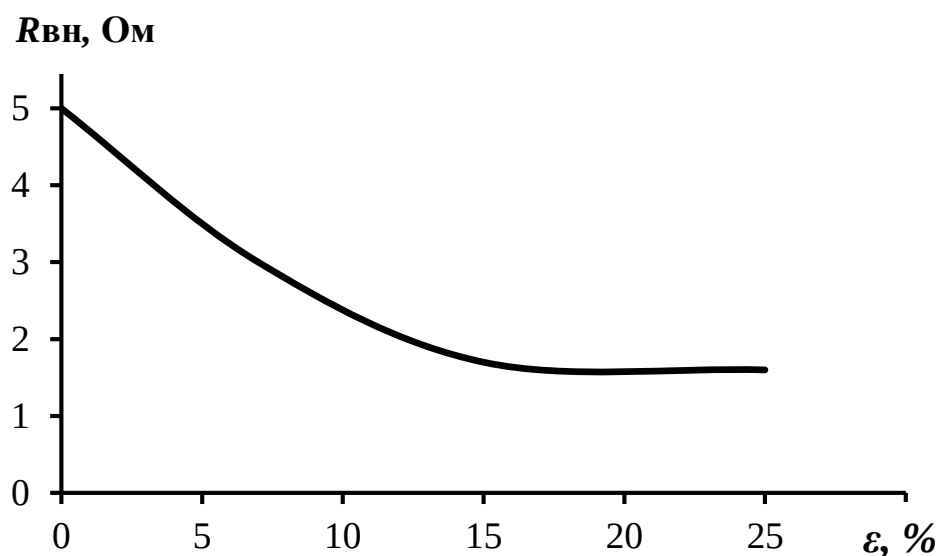


Рисунок 6.13 – Зависимость внутреннего сопротивления источника термоЭДС, образованного дюралюминием и сталью 12Х18Н10Т, от относительной величины пластической деформации

Как видно из рисю.6.13 с увеличением относительной величины пластической деформации стали 12Х18Н10Т внутреннее сопротивление уменьшается. Максимальная относительная деформация составила 26 %, после этого произошел обрыв образца.

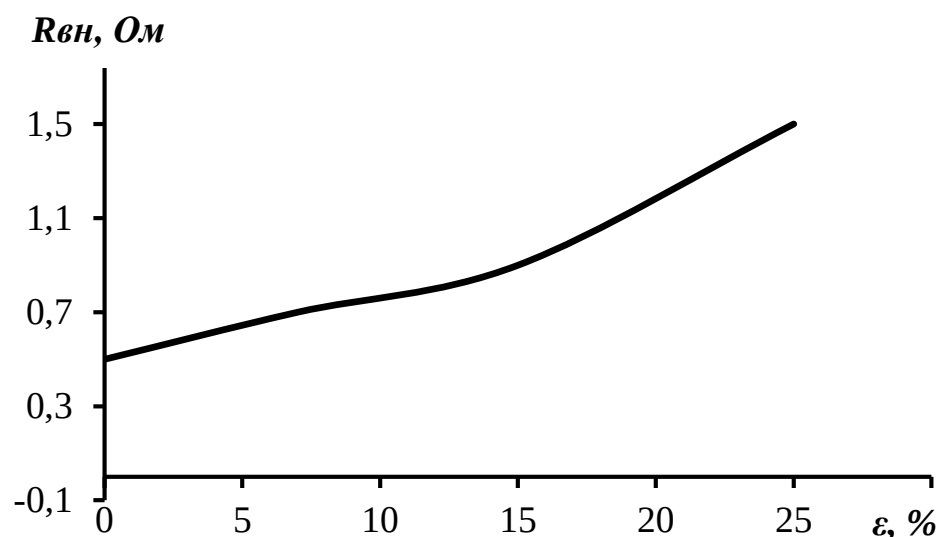


Рисунок 6.14 – Зависимость внутреннего сопротивления источника термоЭДС, образованного дюралюминием и сталью 08КП, от относительной величины пластической деформации

Как видно из рисунка 6.14 с увеличением относительной величины пластической деформации стали 08КП внутреннее сопротивление увеличивается.

Реализация нового информативного параметра, такого как внутреннее сопротивление источника термоЭДС, позволило существенно расширить сферу применения приборов термоэлектрического контроля, а также достоверность результатов контроля.

6.4 Прибор термоэлектрического контроля «ТЕРМОТЕСТ-4»

Для измерения термоЭДС образцов цилиндрической формы был изготовлен прибор термоэлектрического контроля «Термотест-4», способный работать в двух режимах: автоматическом и ручном. Прибор состоит из ПК, блока электроники, блока горячих электродов, состоящего из трех горячих электродов и системы перемещения блока горячих электродов для работы в автоматическом режиме. Для ручного режима используется первый канал. В этом режиме горячий электрод первого канала из блока горячих электродов отключается, а вместо него

подключается датчик для ручного режима с горячим электродом, нагревателем и датчиком температуры. Холодный электрод является общим для всех горячих электродов (рисунок 6.15).

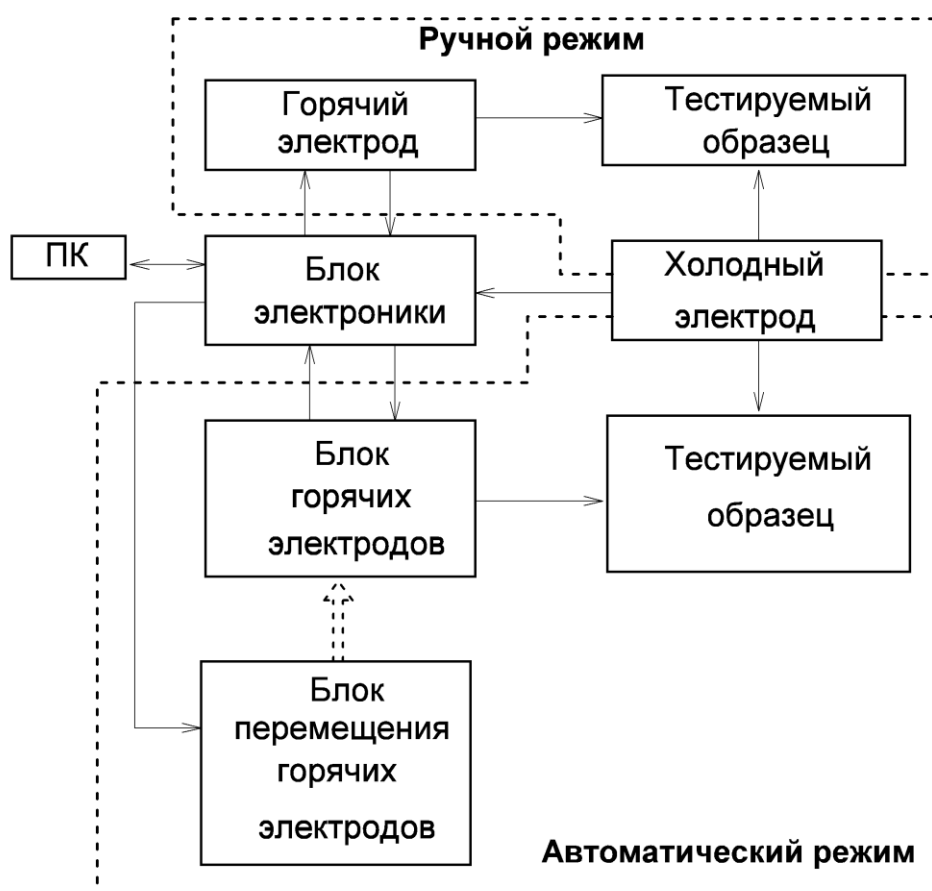


Рисунок 6.15 – Схема экспериментальной установки для контроля экспериментальных образцов цилиндрической формы

Блок электроники содержит четыре одинаковых канала. Блок горячих электродов содержит три горячих электрода с возможностью автоматического перемещения с помощью системы перемещения для обеспечения электрического контакта с контролируемым образцом, что позволяет получить одинаковое усилие прижима электродов к тестируемому образцу. Все три горячих электрода имеют один общий холодный электрод. Система перемещения трех электродов управляется блоком электроники. Такая конфигурация экспериментальной установки позволяет контролировать изделия цилиндрической формы диаметром от 8 до 11 мм и высотой от 60 до 300 мм в автоматическом режиме. При этом

происходит одновременное измерение термоЭДС в трех точках, расположенных под углом 120 градусов друг от друга на поверхности цилиндра. Экспериментальная установка управляется программным обеспечением, написанным на языке высокого уровня «Delphi» с помощью интерфейса оператора. Для контроля изделий другой формы предусмотрен ручной режим контроля, при котором используется четвертый канал. В этом режиме блок горячих электродов и система их перемещения отключаются.

Структурная схема блока электроники представлена на рисунке 6.16. Каждый канал содержит тракт измерения термоЭДС, в который входят горячий электрод, усилитель, аналого-цифровой преобразователь и блок коммутации нагрузки, что позволяет вычислять внутреннее сопротивление источника термоЭДС, методика которого описана выше. Также каждый канал содержит тракт стабилизации температуры, который состоит из датчика температуры, усилителя, аналого-цифрового преобразователя, регулятора и нагревателя. Каждый канал подключен к микроконтроллеру, который получает данные о величине термоЭДС и о величине температуры горячего электрода в каждом канале. Исходя из значения температуры горячего электрода, микроконтроллер выдает управляющее воздействие на регулятор для поддержания заданного значения температуры. Для связи с ПК предусмотрен USB интерфейс. К микроконтроллеру подключен и детектор нуля сети электроснабжения.

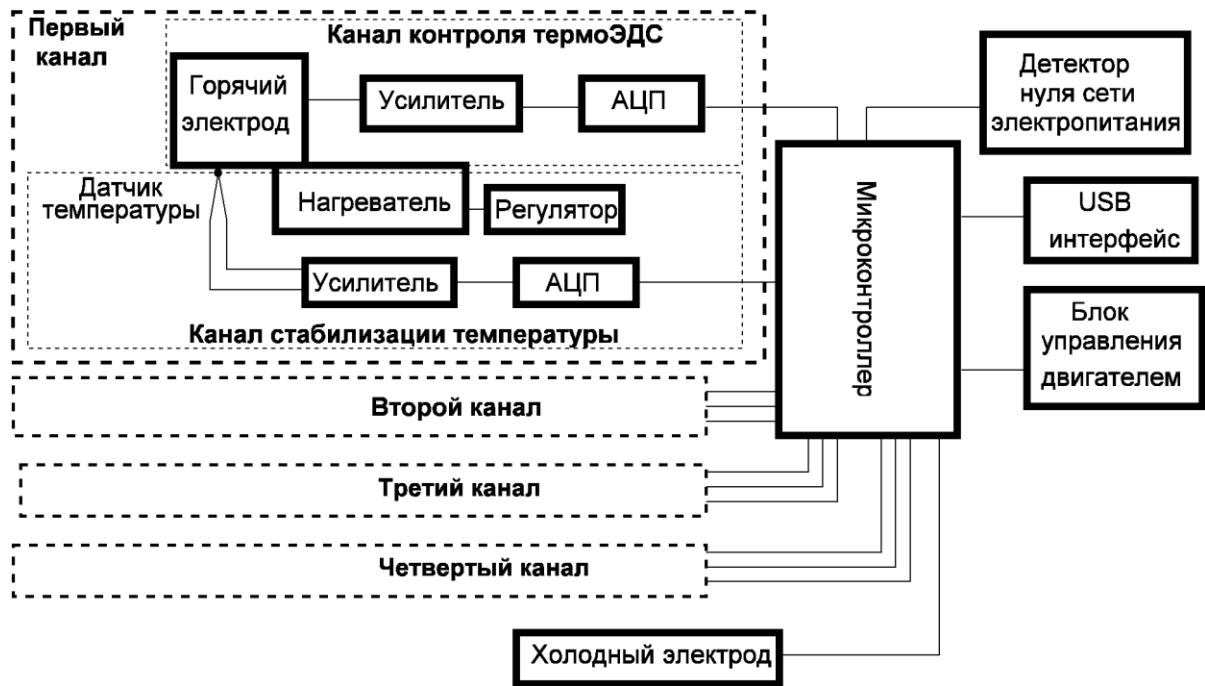


Рисунок 6.16 – Структурная схема блока электроники

Схема работает следующим образом. Вначале происходит выбор режима работы автоматический или ручной. В автоматическом режиме по сигналу оператора с ПК микроконтроллер измеряет температуру каждого из трех горячих электродов и сравнивает ее с температурой, поступившей от оператора через блок связи с ПК. Полученная разница между текущей и заданной температурами является информационным сигналом, поступающим на три блока управления нагревателями горячих электродов. Три нагревателя начинают нагревать горячие электроды. Каждый нагреватель нагревает свой электрод. По мере нагрева горячего электрода разница между текущей и заданной температурами уменьшается, что приводит к уменьшению сигнала управления нагревателем. По достижении заданной температуры горячего электрода, блок управления нагревателем переходит в режим поддержания температуры. После этого разрешается измерение термоЭДС. По сигналу оператора с ПК микроконтроллер выдает сигнал на блок управления двигателем системы перемещения горячих электродов. Двигатель начинает перемещать горячие электроды до соприкосновения с объектом контроля.

Одинаковый прижим горячих электродов к объекту контроля обеспечивается пружинами, закрепленными на ручках горячих электродов. При обнаружении контакта горячего электрода с объектом контроля микроконтроллер отключает сигналы, подаваемые на блок управления нагревателями и блок управления двигателем. Двигатель останавливается. Нагрев электродов прекращается. Для уменьшения наводок на измерительные цепи прибора измерение термоЭДС осуществляется в момент времени перехода через ноль сетевого напряжения.

В ручном режиме отключаются первый, второй и третий каналы, а также система перемещения блока горячих электродов. Подключается только четвертый канал, с помощью которого производится измерение термоЭДС образцов произвольной формы и размеров.

Интерфейс оператора

Управление блоком электроники осуществляется с персонального компьютера через блок связи. Для управления блоком электроники была разработана специализированная программа, показанная на рисунке 6.17.

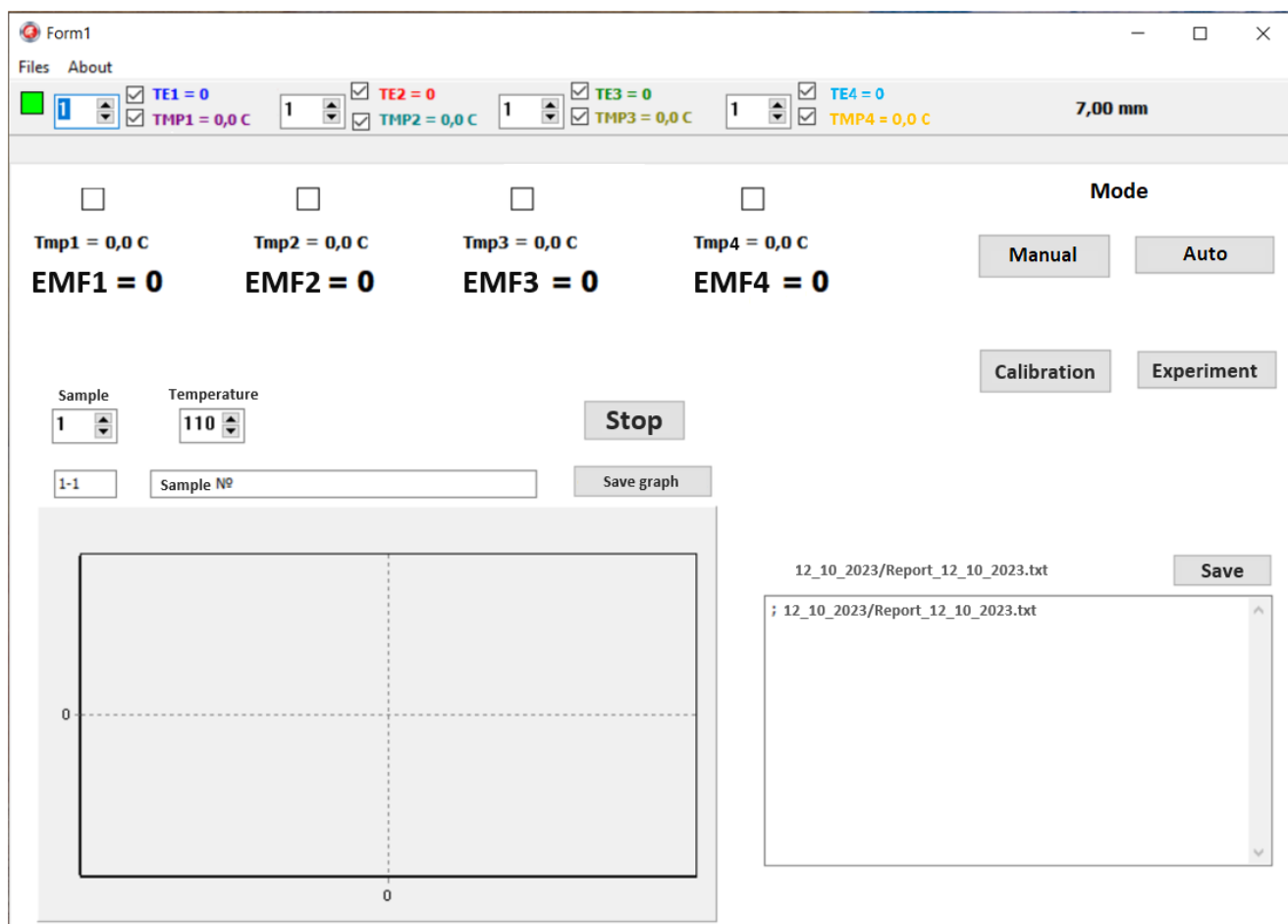


Рисунок 6.17 – Интерфейс оператора для работы в автоматическом режиме.

Вкладка «Измерение»

Зеленое окно в верхнем левом углу сигнализирует о наличии связи между ПК и блоком электроники. Правее друг за другом расположены четыре окна для отображения термоЭДС первого (TE1=0 темно - синего цвета), второго (TE2=0 красного цвета), третьего (TE3=0 зеленого цвета) и четвертого (TE=0 светло - синего цвета) каналов. Рядом с ними расположены окна для отображения температуры горячих электродов первого (TMP1=0,0 С фиолетового цвета), второго (TMP2=0,0 С тёмно - зеленого цвета), третьего (TMP3=0,0 С коричневого цвета) и четвертого (TMP=0,0 С желтого цвета). Правее этих окон расположено окно для отображения величины перемещения горячих электродов. В текущем варианте отображается 7 мм.

Ниже расположены четыре окна для отображения средних значений измеренных термоЭДС каждого канала: первого – EMF1=0, второго – EMF2=0,

третьего – $EMF3=0$ и четвертого – $EMF4=0$. Правее этих окон расположены кнопки «AUTO» и «MANUAL» для запуска автоматического или ручного процесса измерения термоЭДС. Под кнопками выбора режима измерения термоЭДС расположены кнопки «Calibration» для проведения процедуры калибровки и кнопка «Experiment» для измерения термоЭДС экспериментальных образцов. Ниже окон отображения результатов измерения термоЭДС расположена кнопка «Stop» для экстренного прерывания процесса измерения или калибровки при возникновении аварийной ситуации. Еще ниже расположено окно «Sample №» для ввода названия файла при сохранении данных. Правее от него расположена кнопка «Save graph», с помощью которой сохраняется график отображения результатов измерения термоЭДС по трем каналам. Измерение проводится три раза, и каждое измерение отображается на графиках. Поле для отображения динамики изменения термоЭДС в процессе измерения расположено слева внизу.

Для измерения термоЭДС в одноканальном варианте при ручном контроле используется четвертый канал со своим датчиком. Результат измерения термоЭДС отображается только по четвертому каналу. Также отображается графическая зависимость изменения термоЭДС четвертого канала в процессе измерения. Результат измерения термоЭДС отображается только по первому каналу. Также отображается графическая зависимость изменения термоЭДС первого канала в процессе измерения. Фотографии системы перемещения трех горячих электродов с установленными электродами приведены на рисунке 6.18. На рисунке 6.19 показана фотография блока электроники.

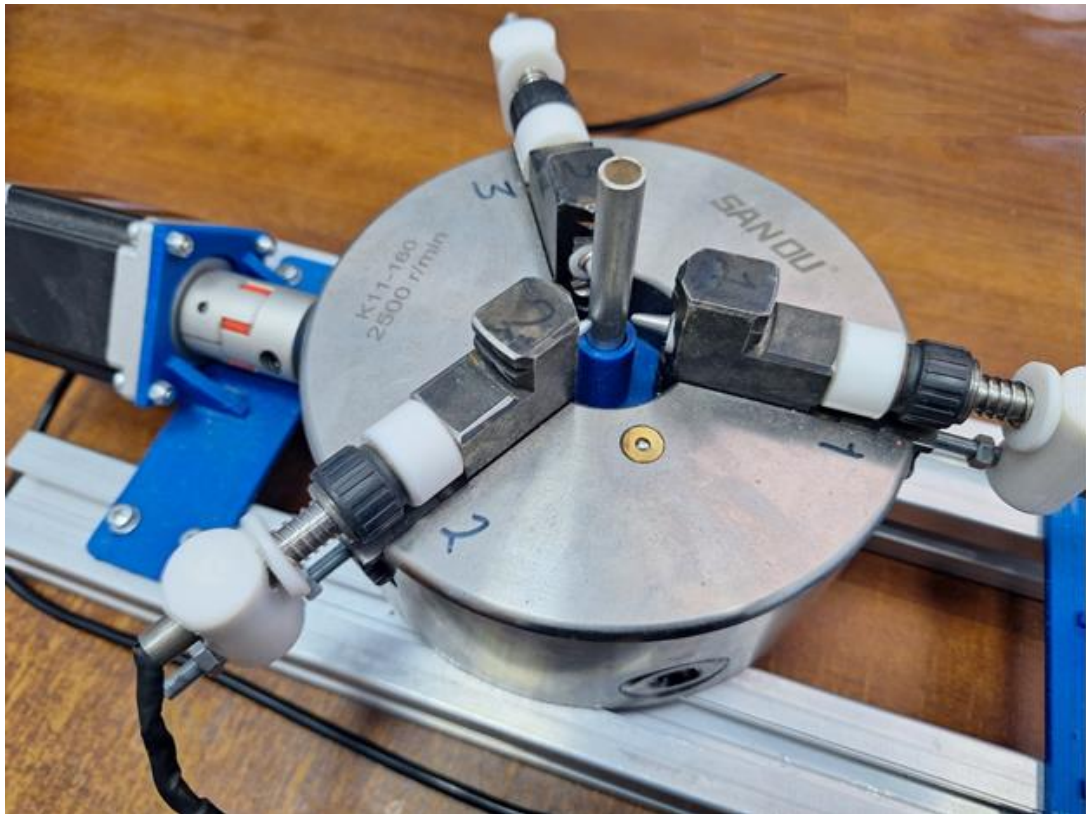


Рисунок 6.18 – Система перемещения трех горячих электродов

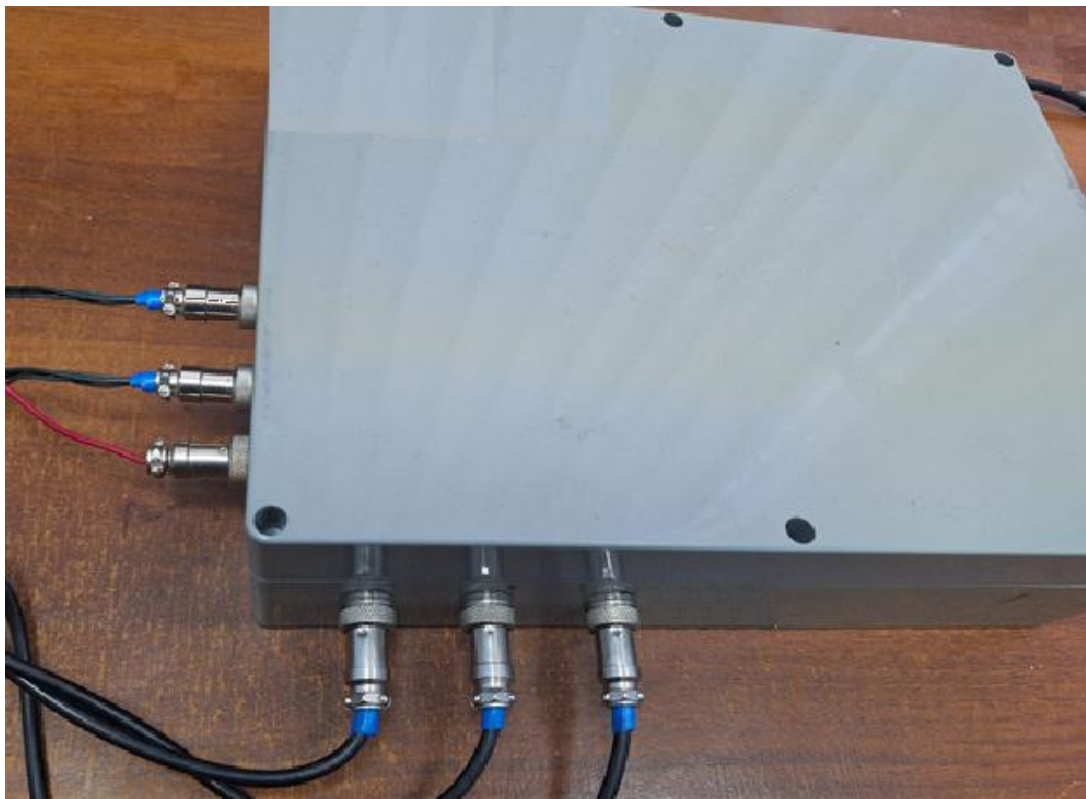


Рисунок 6.19 – Блок электроники прибора «Термотест-4»

«Термотест-4» позволяет измерять термоЭДС от 1 до 1000 мкВ с погрешностью 0,5 мкВ. Для уменьшения уровня шумов в тракте измерения термоЭДС применен низкочастотный фильтр. Измерение температуры горячих электродов производится с точностью 0,5 °С. Измерение термоЭДС производится при разнице температуры горячего и холодного электродов, равной заданному значению с отклонением $\pm 0,5$ °С, и только в момент перехода переменного напряжения сети электроснабжения через ноль. Дальнейшая фильтрация осуществляется путем вычисления среднего значения из 10 измерений. Диапазон изменения температуры горячего электрода составляет от 50 °С до 130 °С. Каждый электрод имеет свою систему терморегулирования. Учет температуры окружающей среды осуществляется отдельным датчиком, что позволяет вычислять разницу температур между горячим и холодным электродами. Для уменьшения флуктуации температуры горячих электродов, вызванной внешними факторами, в автоматическом режиме измерения горячие электроды с нагревателями помещены внутрь фторопластовой трубки. Такое решение также позволило снизить силу трения при перемещении горячих электродов по направляющей втулке. Использование фторопласта, с другой стороны, ограничило верхнее значение температуры горячего электрода.

ВЫВОДЫ

Разработанный комплекс приборов термоэлектрического контроля с применением предложенных методов и средств получения и обработки информации позволил проводить контроль металлов и сплавов с близкими термоэлектрическими характеристиками.

1. Прибор «Термотест-1М» оснащен дифференциальным датчиком с общей системой нагрева и стабилизации температуры измерительных электродов, что позволило обеспечить одинаковый температурный режим двух нагреваемых электродов и проводить экспресс-контроль металлов и сплавов.

2. Прибор «Термотест-2» дополнительно оснащен трактом контроля

контактного сопротивления, что позволило исключить влияние плохого контакта на результат контроля.

3. Прибор «Thermo Fitness Testing» дополнительно оснащен блоком контроля внутреннего сопротивления источника термоЭДС. Реализация нового информативного параметра позволила существенно расширить сферу применения приборов термоэлектрического контроля, а также повысить достоверность результатов контроля.

4. «Термотест-4» позволяет измерять термоЭДС от 1 до 1000 мкВ с погрешностью 0,5 мкВ. Для уменьшения уровня шумов в тракте измерения термоЭДС применен низкочастотный фильтр. Измерение температуры горячих электродов производится с точностью 0,5 °С. Измерение термоЭДС производится при разнице температуры горячего и холодного электродов, равной заданному значению с отклонением $\pm 0,5$ °С, и только в момент перехода переменного напряжения сети электроснабжения через ноль. Дальнейшая фильтрация осуществляется путем вычисления среднего значения из 10 измерений. Диапазон изменения температуры горячего электрода составляет от 50 °С до 130 °С. Каждый электрод имеет свою систему терморегулирования. Учет температуры окружающей среды осуществляется отдельным датчиком, что позволяет вычислять разницу температур между горячим и холодным электродами. Для уменьшения флуктуации температуры горячих электродов, вызванной внешними факторами, в автоматическом режиме измерения горячие электроды с нагревателями помещены внутрь фторопластовой трубки. Такое решение также позволило снизить силу трения при перемещении горячих электродов по направляющей втулке. Использование фторопласта, с другой стороны, ограничило верхнее значение температуры горячего электрода.

Предложенные устройства можно применить для контроля самых разнообразных изделий из металлов и сплавов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

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

- Предложено использовать внутреннее сопротивление источника термоЭДС, образованного двумя разнородными металлами, использоваться в качестве дополнительного информативного параметра при контроле дефектов в металлах и сплавах.
- Предложена методика корректного определения внутреннего сопротивления источника термоЭДС, основанная на учете контактного сопротивления и сопротивления подводящих проводов. Расчет внутреннего сопротивления источника термоЭДС производится путем умножения сопротивления нагрузки на дробь, числитель которой определяется путем вычитания величины термоЭДС при наличии нагрузки и напряжения на

контактном сопротивлении и сопротивлении подводящих проводов из величины термоЭДС при отсутствии нагрузки, а знаменатель равен разности величины термоЭДС при наличии нагрузки и напряжения на контактном сопротивлении и сопротивлении подводящих проводов.

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

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

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

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

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

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

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nagy, P.B. Non-destructive methods for materials' state awareness monitoring / P.B. Nagy // *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2010. – Vol. 52 (2). – P. 61–71.
2. Li, J.F. High-performance nanostructured thermoelectric materials / J.F. Li, W.S. Liu, L.D. Zhao, M. Zhou // *Npg Asia Mater.* – 2010. – Vol. 2 (4). – P. 152–158.
3. Paul, E.M. Introduction to nondestructive testing: a training guide, second edition / E.M. Paul. – John Wiley & Sons, 2005. – 712 p.
4. Cooper, R.F. Sorting mixed metals by the thermoelectric effect / R.F. Cooper // *Physics Education*. – 1976. – Vol. 11(4). – P. 290–292.
5. Stuart, C.M. The Seebeck effect as used for the nondestructive evaluation of metals / C.M. Stuart // *Int. Adv. Nondestr. Test.* – 1983. – Vol. 9. – P. 177–192.
6. Stuart, C.M. Thermoelectric differences used for metal sorting / C.M. Stuart // *Journal of Testing and Evaluation*. – 1987. – Vol. 15 (4). – P. 224–230.
7. Dragunov, V.K. New approaches to the rational manufacturing of combined constructions by EBW / V.K. Dragunov, A.L. Goncharov // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 681. – P. 012010.
8. Goncharov, A. Research of thermoelectric effects and their influence on electron beam in the process of welding of dissimilar steels / A. Goncharov, A. Sliva, I. Kharitonov, A. Chulkova, E. Terentyev // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 759 (1). – P. 012008.
9. Kharitonov, I.A. Investigation of magnetic properties of various structural classes steels in weak magnetic fields characteristic for generation of thermoelectric currents in electron beam welding / I.A. Kharitonov, R.V. Rodyakina, A.L. Goncharov // *Solid State Phenomena*. – 2020. – Vol. 299. – P. 1201–1207.
10. Fulton, J.P. Automated weld characterization using the thermoelectric method / J.P. Fulton, B. Wincheski, M. Namkung [et al] // *Materials Science*. – 1993. – P. 262902.
11. Carreon, H. Nondestructive characterization of the level of plastic deformation

by thermoelectric power measurements in cold-rolled Ti-6Al-4V samples / H. Carreon, A. Medina // *Materials Science, Nondestructive Testing and Evaluation*. – 2007. – Vol. 22 (4). – P. 299–311.

12. Carreon, H. Detection of fretting damage in aerospace materials by thermoelectric means / H. Carreon // *Smart Structures, Engineering, Physics*. – 2013. – Vol. 8694.

13. Lakshminarayan, B. Monitoring of the level of residual stress in surface treated specimens by a noncontacting thermoelectric technique / B. Lakshminarayan, H. Carreon, P. Nagy // *Materials Science*. – 2003. – Vol. 657. – P. 1523–1530.

14. Carreon, H. Evaluation of Thermoelectric Methods for the Detection of Fretting Damage in 7075-T6 and Ti-6Al-4V Alloys / H. Carreon // *Materials Science*. – 2015. – Vol.2. – P. 435–442.

15. Carreon, H. Assessment of blasting induced effects on medical 316 LVM stainless steel by contacting and non-contacting thermoelectric power techniques / H. Carreon, S. Barriuso, G. Barrera [et al] // *Materials Science*. – 2012. – Vol.2. – P. 2941–2946.

16. Hu, J. On the Thermoelectric Effect of Interface Imperfections / J. Hu, P.B. Nagy // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. – 1999. – Vol. 188. – P. 1487–1494.

17. Goncharov, A.L. Investigation of the thermal electromotive force of steels and alloys of different structural grades in electron beam welding / A.L. Goncharov // *Welding International*. – 2011. – Vol.25 (9). – P. 703–709.

18. Goncharov, A.L. Investigation of thermo-EMF temperature dependences for construction materials of various structural classes / A.L. Goncharov, A.V. Chulkova, R.V. Rodyakina, V.K. Dragunov and I.S. Chulkov // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 681. – P. 012017.

19. Li, J.F. High-performance nanostructured thermoelectric materials / J.F. Li, W.S. Liu, L.D. Zhao, M. Zhou // *Npg. Asia Materials*. – 2010. – Vol.2. – P. 152–158.

20. Ritzer, T.M. A critical evaluation of today's thermoelectric modules / T.M. Ritzer, P.G. Lau and A.D. Bogard // *Thermoelectrics*. – 1997. – P. 619–623.

21. Buist, R.J. A new method for testing thermoelectric materials and devices / R.J. Buist // 11-th International Conference on Thermoelectrics. – 1992. – P. 1–15.
22. Ciylan, B. Design of a thermoelectric module test system using a novel test method / B. Ciylan, S. Yılmaz // International Journal of Thermal Sciences. – 2007. – Vol. 46(7). – P. 717–725.
23. Xuan, X.C. A general model for studying effects of interface layers on thermoelectric devices performance / X.C. Xuan, K.C. Ng, C. Yap, H.T. Chua // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2002. – Vol. 45(26). – P. 5159– 5170.
24. Uchida, K. Thermal spin pumping and magnon-phonon-mediated spin-Seebeck effect / K. Uchida, T. Ota, H. Adachi [et al] // Journal of Applied Physics. – 2012. – Vol. 111 (10). – P. 103903.
25. Uchida, K. Observation of the spin Seebeck effect / K. Uchida, S. Takahashi, K. Harii [et al] // Nature. – 2008. – Vol. 455. – P. 778–781.
26. Iwanaga, S. A high temperature apparatus for measurement of the Seebeck coefficient / S. Iwanaga, E.S. Toberer, A. LaLonde, G.J. Snyder // Review of Scientific Instruments. – 2011. – Vol. 82(6). – P. 063905.
27. Sarath Kumar, S.R. A hot probe setup for the measurement of the Seebeck coefficient of thin wires and thin films using integral method / S.R. Sarath Kumar, S. Kasiviswanathan // Review of Scientific Instruments. – 2008. – Vol. 79. – P. 02432.
28. Корндорф, С.Ф. Термоэлектрический метод диагностики режущего инструмента / С.Ф. Корндорф, Е.Е. Мельник // Контроль.Диагностика. – 2003. – № 1. – С. 44–46.
29. Zhou Y. Fast Seebeck coefficient measurement based on dynamic method / Y. Zhou, D. Yang, L. Li [et al] // Review of Scientific Instruments. – 2014. – Vol. 85 (5). – P. 054904.
30. Hu, J. On the role of interface imperfections in thermoelectric nondestructive materials characterization / J. Hu, P.B. Nagy // Applied Physics Letters. – 1998. – Vol. 73. – P. 467–469.

31. Нестерович, Ю.И. Разработка метода и средства термоэлектрического контроля металлов и сплавов : дис.... канд. техн. наук 05.11.13 / Нестерович Юрий Иванович. – Орел, 2000. – 281 с.

32. Ismailov, T.A. A mathematical model of a thermoelectric device for extracting foreign objects from the human body by freezing / T.A. Ismailov, O.V. Yevdulov, A.M. Nasrulaev // Biomedical Engineering. – 2021. – Vol. 55(3). – P. 219–223.

33. Kikuchi, M. Dental alloy sorting by the thermoelectric method / M. Kikuchi // European Journal of Dentistry. – 2010. – Vol. 4(1). – P. 66–70.

34. Ismailov, T.A. A Thermoelectric Refrigerator for Short-Term Storage and Transportation of Biological Materials / T.A. Ismailov, O.V. Yevdulov, I.S. Mispakhov, A.P. Adamov // Biomedical Engineering. – 2020. – Vol. 54(4). – P. 240–243.

35. Ismailov, T.A., Ragimova, T.A., Khazamova, M.A. Research on a thermoelectric device for thermopuncture // Journal of Thermoelectricity. – 2017. – Vol. 1. – P. 29–33.

36. Carreon, H. Thermoelectric Detection of Fretting Damage in Aerospace Materials / H. Carreon // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. – Vol. 50 (11). – P. 684–692.

37. Ismailov, T.A. A thermoelectric device to stop bleeding / T.A. Ismailov, O.V. Yevdulov, T.A. Ragimova, N.A. Nabiev // Biomedical Engineering. – 2019. – Vol. 53(2). – P. 92–96.

38. Васильев, И.М. Автоматизированная установка для исследования теплового сопротивления термоэлектрическим методом / И.М. Васильев, А.И. Солдатов // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2020. – № 1. – С. 201–204.

39. Васильев, И.М. Теоретическое и экспериментальное исследование теплопереноса с учетом контактного термического сопротивления / И.М. Васильев, А.А. Дементьев // В сборнике: Решетневские чтения. Материалы XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика

М.Ф. Решетнева. В 2-х частях. Под редакцией Ю.Ю. Логинова. – 2019. – С. 213–215.

40. Васильев, И.М. Метод определения качества нанесения теплопроводящего компаунда с помощью термоЭДС / И.М. Васильев, А.И. Солдатов //В сборнике: ИННОВАТИКА-2019. сборник материалов XV Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2019. – С. 174–177.

41. Павлов, Б.П. Термоэлектрическая неоднородность электродов термопар / Б.П. Павлов. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 216 с.

42. Яворский, Б. М. Справочник по физике: для инженеров и студентов ВУЗов / Б. М. Яворский, А.А. Детлаф – Изд. 4-е, перераб. – М : Наука - Главная редакция Физико-математической литературы, 1968. – 417 с.

43. Солдатов, А.И. Современные тренды применения термоэлектрического метода в неразрушающем контроле (обзор) / А.И. Солдатов, А.А. Солдатов, М.А. Костина //Дефектоскопия. – 2024. – № 2. – С. 64–83.

44. Soldatov, A.I. Modern trends in the application of thermoelectric method in nondestructive testing (review) / A.I. Soldatov, A.A. Soldatov, M.A. Kostina //Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2024. – Т. 60. – № 2. – С. 207-222.

45. ГОСТ 15467–79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 2009. – 21 с.

46. Абрикосов, А.А. Основы теории металлов / А. А. Абрикосов. – 2-е изд., доп. и испр. – М.: Физматлит, 2010. – 598 с.

47. Сайт компании ООО «Спирит-Бер» [офиц. сайт] – [Электронный ресурс] / Деформация металла – Режим доступа: <https://spirit-bear.ru/blog/deformatsiya-metalla/> – Заглавие с экрана (дата обращения 03.03.2022).

48. Герасимова Н. С. Кристаллические решетки и их дефекты : учебное пособие по курсу «Материаловедение». — Калуга : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. — 72 с.

49. Солдатов, А.А. Аппаратно-программный комплекс для контроля пластически деформированных металлов дифференциальным термоэлектрическим

методом : дис.... канд. техн. наук 05.11.13 / Солдатов Андрей Алексеевич. – Томск, 2014. – 155 с.

50. Liang, S. Plastic deformation of metal / S. Liang, X. Kuangdi // The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy. – 2023. – P. 2370.

51. Новиков, И.И. Дефекты кристаллического строения металлов / И.И. Новиков – М.: Металлургия, 1983. – 232 с.

52. Попов, Ю.А. Сравнительная оценка выявляемости дефектов типа несплошностей при различных режимах и способах активного теплового контроля/ Ю.А. Попов, А.Е. Карпельсон, С.Д. Цейтлин // Дефектоскопия. – 1978. – № 9. – С. 44–53.

53. Лухвич, А.А. Влияние дефектов на электрические свойства металлов / А.А. Лухвич. – Минск : Наука и техника, 1976. – 69 с.

54. Акулов, Н.С. Дислокации и пластичность / Н.С. Акулов. – Минск : АН БССР, 1961. – 107 с.

55. Лухвич, А.А. Структурная зависимость термоэлектрических свойств и неразрушающий контроль / А.А. Лухвич, В.И. Шарандо, А.С. Каролик. – Минск : Наука и техника, 1990. – 192 с.

56. Акулов, Н.С. О влиянии пластической деформации на плотность дислокаций поликристаллического никеля / Н.С. Акулов, А.Г. Козлов, А.К. Шукевич // Доклад АН БССР – 1969. – Т.13. – № 4. – С. 309–312.

57. Бацула, А.П. Конструирование радиоэлектронных устройств: учебное пособие / А.П. Бацула. – Томск : Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2002. – С. 53–64.

58. Лидер, И. А. Контроль тепловых параметров полупроводниковых приборов с использованием переходных тепловых характеристик / И.А. Лидер, В.П. Худоногов, В. Н. Гейман // Решетневские чтения: сборник материалов. – 2012. – Т.1. – С. 320–321.

59. Сайт компании Intel [офиц. сайт] – [Электронный ресурс] / CPU Intel Core i9-11900KF – Режим доступа: <https://www.intel.com/> – Заглавие с экрана (дата обращения 25.12.2021).

60. Васильев, И. М. Термоэлектрический метод контроля теплофизических параметров теплопроводящей пасты (термоинтерфейса) : дис.... канд. техн. наук 2.2.8 / Васильев Иван Михайлович. – Томск, 2022. – 128 с.

61. Дрекседж, П. Применение термопасты в силовой электронике: практические аспекты основные положения / П. Дрекседж, П. Бекедаль, А. Колпаков // Силовая электроника. – 2018. – № 75. – С. 50–60.

62. Елагин, А.А. Обзор теплопроводных материалов и термопаст на их основе / А.А. Елагин, Р.А. Шишкин, М.В. Баранов [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т.16. – № 4. – С. 132–136.

63. Liu, Y. A protocol to further improve the thermal conductivity of silicone-matrix thermal interface material with nano-fillers / Y. Liu, J. Li // *Thermochimica Acta*. – 2022. – Vol. 708. – P. 179136.

64. Swamy, M.C.K. A review of performance and characterization of conventional and promising thermal interface materials for electronic package applications / M.C.K. Swamy, Satyanarayan // *Journal of Electronic Materials*. – 2019. – Vol. 48. – P. 7623–7634.

65. Zhang, Y. Recent progress in the development of thermal interface materials: a review / Y. Zhang, J. Ma, N. Wei, J. Yanga, Q.-X. Pei // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2021. – Vol. 23. – P. 753–776.

66. Xing, W. Recent advances in thermal interface materials for thermal management of high-power electronics / W. Xing, Y. Xu, C. Song, T. Deng // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 12(19). – P. 3365.

67. Prasher, R. Thermal interface materials: historical perspective, status, and future directions / R. Prasher // *Proceedings of the IEEE*. – 2006. – Vol. 94(8). – P. 1571–1586.

68. Drexhage, P. Thermal paste application / P. Drexhage, P. Beckedahl. – SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH, 2018. – Rev. 7. – 24 p.

69. Esau, D. Thermal paste application / D. Esau. – SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH, 2010. – Rev. 7. – 6 p.

70. Thermal interface materials for electronics cooling // Parker Chromerics, 2012. – 57 p.
71. Freyberg, M. Application of thermal paste for Power Modules without base plate / M. Freyberg, C. Daucher. – SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH, 1999. – 9 p.
72. Shishkin, R. Development of the production technology of a new highly effective thermal grease / R. Shishkin // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 126. – P. 709-717.
73. Guo, X. A review of carbon-based thermal interface materials: mechanism, thermal measurements and thermal properties / X. Guo, S. Cheng, W. Cai [et al] // Materials & Design. – 2021. – Vol. 209. – P. 109936.
74. Sarvar, F. Thermal interface materials - a review of the state of the art / F. Sarvar, D.C. Whalley, P.P. Conway // Proceedings of the Electronics System integration Technology Conference. – 2006. – P. 1292–1302.
75. Otiaba, K.C. Thermal interface materials for automotive electronic control unit: Trends, technology and R&D challenges / K.C. Otiaba, N.N. Ekere, R.S. Bhatti [et al] // Microelectronics Reliability. – 2011. – Vol. 51(12). – P. 2031–2043.
76. Колпаков, А. Возвращаемся к термопасте / А. Колпаков // Силовая Электроника. – 2015. – №3. – С. 90-95.
77. Дитер, Э. Теплопроводящая паста – это действительно важно / Э. Дитер, М. Штрубе, А. Колпаков // Компоненты и технологии. – 2010. – №6. – С. 88–90.
78. Колпаков, А. Компаунд, паста или пленка? / А. Колпаков // Силовая Электроника. – 2008. – №3. – С.130–134.
79. Хопфе, С. Plug & play: применение силовых модулей с предварительно нанесенной термопастой / С. Хопфе, А. Винтрих, А. Колпаков // Силовая электроника. – 2017. – Т. 3. – № 66. – С. 12–18.
80. Беспалов, Н.Н. Метод определения теплового сопротивления биполярных транзисторов с изолированным затвором / Н.Н. Беспалов, В.Г. Мясин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII всероссийской научно-технической конференции. – 2019. – С. 259–261.

81. ОСТ 11 0944–96 Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления. – М. : ГУП НПП Пульсар, 1997. – 110 с.

82. Schulz, M. Thermal interface – an inconvenient truth / M. Schulz // Article Bodo's Power Systems. – 2010. – Vol. 6. – P. 1–4.

83. Смирнов, М. Применение теплопроводящей пасты. Производство Электроники / М. Смирнов // Технологии, оборудование, материалы. – 2013. – № 3. – С. 119–123.

84. Болтовец, Н.С. Исследование перегрева р-п-перехода на деградацию мощных импульсных кремниевых лавиннопролетных диодов / Н.С. Болтовец, Р.В. Конакова, Я.Я. Кудрик // Современные проблемы физики полупроводников: материалы конференции. – 2011 – с. 256–262.

85. JEDEC Standard JESD51–14 Transient dual interface test method for the measurement of the thermal resistance junction to case of semiconductor devices with heat flow through a single path. 2010. – 46 p.

86. Смирнов, В.И. Спектральный метод измерения теплового сопротивления светодиодов и оценка оптимальных режимов его реализации / В.И. Смирнов // Автоматизация процессов управления. – 2014. – № 2. – С. 28–35.

87. Smirnov, V.I. Modulation method for measuring thermal impedance components of semiconductor devices / V.I. Smirnov, V.A. Sergeev, A.A. Gavrikov, A.M. Shorin // Microelectronics Reliability. – 2018. – Vol. 80. – P. 205–212.

88. Szekely, V. Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method / V. Szekely, Tran Van Bien // Solid-State Electronics. – 1988. – V. 31. – P. 1363–1368.

89. T3ster. Fast, accurate and repeatable semiconductor thermal transient test technology for measurement and characterization. – 2011. – 12 p.

90. Smirnov, V.I. Thermal impedance meter for power MOSFET and IGBT transistors / V.I. Smirnov, V.A. Sergeev, A.A. Gavrikov, A.M. Shorin // Proceeding of the IEEE Transactions on Power Electronics. – 2018. – Vol. 33(7). – P. 6211–6216.

91. Смирнов, В.И. Спектральный и временной методы измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов / В.И. Смирнов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2014. – № 10. – С. 58–60.

92. Smirnov, V.I. Comparative analysis of standard and modulation methods for measuring thermal resistance of power bipolar transistors / V.I. Smirnov, V.A. Sergeev, A.A. Gavrikov [et al] // Journal of Radio Electronics. – 2019. – № 1. – P. 1–14.

93. Smirnov, V.I. The study of current localization in solar cells during the thermal resistance measurements / V.I. Smirnov, V.A. Sergeev, A.A. Gavrikov [et al] // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies 2020 – Proceedings, 2020. – P. 9067386.

94. Smirnov, V.I. Measuring thermal resistance of gan hemts using modulation method / V.I. Smirnov, V.A. Sergeev, A.A. Gavrikov [et al] // Proceeding of the IEEE Transactions on Electron Devices. – 2020. – Vol. 67(10). – P. 4112-4117.

95. Коротких, А. Г. Теплопроводность материалов / А. Г. Коротких. –Томск: Изд-во Том. Политехн. ун-та, 2011. – 97 с.

96. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.

97. Васильев, И.М. Термоэлектрический метод контроля качества нанесения теплопроводящего компаунда / И.М. Васильев, А.А. Дементьев, А.А. Солдатов, А.И. Солдатов // Дефектоскопия. – 2020. – № 5. – С. 28–34.

98. Soldatov, A.I. Control system for device «thermotest» / A.I. Soldatov, A.A. Soldatov, P.V. Sorokin [et al] // In: Proceeding of the International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2016. – pp. 1–5.

99. Abouellail, A.A. Influence of destabilizing factors on results of thermoelectric testing / A.A. Abouellail, A.I. Soldatov, A.A. Soldatov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – Vol. 58(7). – P. 607–616.

100. Carreon, H. Thermoelectric nondestructive evaluation of residual stress in shot-peened metals / H. Carreon, P. B. Nagy, M. Blodgett // AIP Conference Proceedings. – 2002. – Vol. 615(1). – P. 1667–1674.

101. Carreon, H. Thermoelectric nondestructive evaluation of residual stress in shot-peened metals / H. Carreon, P.B. Nagy, V.P. Blodgett // *Research in Nondestructive Evaluation*. – 2002. – Vol. 14. – P. 59–80.
102. Anatychuk, L.I. On the discovery of Thermoelectricity by Volta / L.I. Anatychuk // *Journal of Thermoelectricity*. – 2004. – № 2. – P. 5–10.
103. Путилов, К.А. Курс физики: учеб. пособие. Т. II. Учение об электричестве / К. А. Путилов. – М. : Гостехтеориздат, 1954. – 156 с.
104. Лившиц, Б.Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б. Г. Лившиц, В. С. Крапоткин, Я. Л. Линецкий. – М. : Металлургия, 1980. – 320 с.
105. Брюханов, О.Н. Тепломассообмен: учебное пособие / О. Н. Брюханов, С. Н. Шевченко. – М.: АСВ, 2005. – 460 с.
106. Уонг, Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Пер. с англ / Х. Уонг. – М. : Атомиздат, 1979. – 216 с.
107. Дерюгин, В. В. Тепломассообмен / В. В. Дерюгин, В. Ф. Васильев, В. М. Уляшева. – 6-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2023. – 240 с.
108. Ногачева, Т. И. Локальный метод измерения термоэлектрической способности поверхностного слоя металлических изделий и его использование при неразрушающем контроле других физических величин / Т.И. Ногачева, Е.В. Кузнецова // *Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение*. – 2005. – С. 7–14.
109. РД 34.45–51.300–97 Объем и нормы испытаний электрооборудования, 6-е издание (с изменениями и дополнениями по состоянию на 01.10.2006). – М.: ЗАО "Издательство НЦ ЭНАС", 2008. – 153 с.
110. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии : [Приказ Минэнерго России от 12 августа 2022 года №811] – 2022. – 162 с.
111. Пожары и пожарная безопасность в 2023 году : информационно-аналитический сборник / В. С. Гончаренко, Т. А. Чечетина, В. И. Сибирко [и др.]. – Балашиха : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2024. – 110 с.

112. ГОСТ 24606.3–82 Изделия коммутационные, установочные и соединители электрические. Методы измерения сопротивления контакта и динамической и статической нестабильности переходного сопротивления контакта. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 8 с.

113. Солдатов, Д.А. Диагностика переходного сопротивления контактов в сети промышленной частоты термоэлектрическим методом : дис.... канд. техн. наук 2.2.8 / Солдатов Дмитрий Алексеевич. – Томск, 2023. — 122 с.

114. Гаркушин, И.К. Словарь-справочник по физико-химическому анализу / И.К. Гаркушин, М. А. Истомова. – Самара: СГТУ, 2012. – 184 с.

115. Годунов, С.К. Разностные схемы (введение в теорию): учебное пособие / С.К. Годунов, В.С. Рябенский. – М. : Наука, 1977. – 551 с.

116. Абуеллаиль, А.А. Лабораторное обоснование термоэлектрического метода контроля переходного сопротивления контактов / А.А. Абуеллаиль, А.И. Солдатов, А.А. Солдатов [и др.] // Дефектоскопия. – 2022. – № 12. – С. 70–78.

117. Mishra, R.S. Friction Stir Welding and Processing / R.S. Mishra, P.S. De, N. Kumar. – Science and Engineering, Springer, 2014 – 338 p.

118. Magalhães, A. Thermoelectric measurements for temperature control of robotic friction stir welding : PhD thesis / Ana Catarina Ferreira Magalhães. – University West, Sweden, 2020. – № 33. – 137 p.

119. Magalhães, A. 2019. Thermal dissipation effect on temperature-controlled friction stir welding / A. Magalhães, J. De Backer, G. Bolmsjö // Soldagem & Inspeção. – Vol. 24(3). – P. 1–9.

120. Silva Ana, C.F. TWT method for temperature measurement during FSW process / C.F. Silva Ana, J. De Backer, G. Bolmsjö // The 4th international conference on scientific and technical advances on friction stir welding & processing. – 2015. – P. 95–98.

121. Silva, A.C.F. Cooling rate effect on temperature controlled FSW process / A.C.F. Silva, J. De Backer, G. Bolmsjö // IIV International Conference High-Strength Materials - Challenges and Applications. – 2015.

122. Silva, A.C.F. Analysis of plunge and dwell parameters of robotic FSW using TWT temperature feedback control / A.C.F. Silva, J. De Backer, G. Bolmsjö // 11th International Symposium on FSW. – 2016.
123. Threadgill, P.L. Friction stir welding of aluminium alloys / P.L. Threadgill, A.J. Leonard, H.R. Shercliff, P.J. Withers // International Materials Reviews. – 2009. – Vol. 54. – P. 49–93.
124. Mandal S. Experimental and numerical investigation of the plunge stage in friction stir welding / S. Mandal, J. Rice, A.A. Elmustafa // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – Vol. 203. – P. 411–419.
125. Malik, V. Time efficient simulations of plunge and dwell phase of FSW and its significance in FSSW / V. Malik, N.K. Sanjeev, H.S. Hebbar, S.V. Kailas // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 5. – P. 630–639.
126. Awang M. Energy generation during friction stir spot welding (FSSW) of Al 6061-T6 plates / M. Awang, V.H. Mucino // Materials and Manufacturing Processes. – 2010. – Vol. 25. – P. 167–174.
127. Zimmer, S. Experimental investigation of the influence of the FSW plunge processing parameters on the maximum generated force and torque / S. Zimmer, L. Langlois, J. Laye, R. Bigot // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2010. – Vol. 47(1). – P. 201–215.
128. Ambriz, R.R. Welding of Aluminum Alloys. In: Ahmad Z (ed) Recent Trends in Processing and Degradation of Aluminium Alloys / R.R. Ambriz, V. Mayagoitia. – InTech, 2011. – 26 p.
129. Padhy, G.K. (2018) Friction stir based welding and processing technologies - processes, parameters, microstructures and applications: A review / G.K. Padhy, C.S. Wu, S. Gao // Journal of Materials Science & Technology. –2018. – Vol. 34 (1). – P. 1-38.
130. De Backer, J. Temperature control of robotic friction stir welding using the thermoelectric effect / J. De Backer, G. Bolmsjö, A-K. Christiansson // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 70 – P. 375–383.

131. Fehrenbacher, A. Toward automation of friction stir welding through temperature measurement and closed-loop control / A. Fehrenbacher, N.A. Duffie, N.J. Ferrier, F.E. Pfefferkorn, M.R. Zinn // *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. – 2011. – Vol. 133 (5). – P. 051008.
132. Magalhães, A. Thermo-electric temperature measurements in friction stir welding – Towards feedback control of temperature : Licentiate // Ana Catarina Ferreira Magalhães. – University West, Sweden, 2016. – № 13. – 152 p.
133. Upadhyay, P. Effects of thermal boundary conditions in friction stir welded AA7050-T7 sheets / P. Upadhyay, A.P. Reynolds // *Materials Science and Engineering: A*. – 2010. – Vol. 527(6). – P. 1537–1543.
134. Mishra, R.S. Friction stir welding and processing / R.S. Mishra, Z.Y. Ma // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. – 2005. – Vol. 50. – P. 1–78.
135. Silva, A.C.F. Optimização do processo SFL aplicando a metodologia taguchi – efeitos dos parametros na temperatura / A.C.F. Silva, M.A.V.de Figueiredo, P.M.G.P. Moreira // *APAET- Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões* – 2013. – Vol. 22. – P. 35–40.
136. Rosales, M.J.C. Influência do material do backing no fluxo de calor e na formação de zonas deformadas pelo processo FSW em ligas de alumínio / M.J.C. Rosales, N.G. Alcântara, J.F. Dos Santos // *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. – 2009. – Vol. 5(3). – P. 167–172.
137. Anatychuk, L.I. Thermoelectric device with electronic control unit for diagnostics of inflammatory processes in the human organism / L.I. Anatychuk, R.R. Kobylanskyi, R.G. Cherkez [et al] // *BIOMEDICAL ELECTRONICS*. – 2017. – № 6. – P. 44–48.
138. De Backer, J. Thermoelectric method for temperature measurement in friction stir welding / J. De Backer, G. Bolmsjö // *Science and Technology of Welding & Joining*. – 2013. – Vol. 18(7). – P. 558-565.
139. Bentley, R.E. Handbook of temperature measurement 3. Theory and practice of thermoelectric thermometry / R.E. Bentley. – Singapore : Springer, 1998. – 245 p.

140. De Backer, J. Feedback control of robotic friction stir welding : PhD thesis / Jeroen De Backer. – University West, Sweden, 2014. – № 4. – 151 p.
141. De Backer, J. Self-tuning algorithm for friction stir welding using temperature feedback / J. De Backer, G. Bolmsjö // Paper presented at the 10th International Friction Stir Welding Symposium Beijing. – 2014.
142. Lider, A.M. Hydrogen concentration measurements at titanium layers by means of thermo-EMF / A.M. Lider, V.V. Larionov, M.S. Syrtanov // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 683. – P. 199–202.
143. Kudiyarov, V.N. Hydrogen accumulation in technically pure titanium alloy at saturation from gas atmosphere / V.N. Kudiyarov, A.M. Lider, S.Y. Harchenko // Advanced Materials Research – 2014. – Vol. 880. – P. 68–74.
144. Сюй, Ш. Исследование неоднородно наводороженного титана методом измерения термоЭДС / Ш. Сюй, В.В. Ларионов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – № 2. – С. 33–37.
145. Кудияров, В.Н. Особенности распределения водорода в титане ВТ1-0 в зависимости от способа насыщения: электролитическим способом и методом Сивертса / В.Н. Кудияров, А.М. Лидер, Н.С. Пушилина, М. Кренинг // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 11(115). – С. 10–15.
146. Сюй, Ш. Закономерности влияния водорода на структуру и электрофизические свойства титана ВТ1-0 : дис.... канд. физ.-мат. наук : 01.04.07 / Сюй Шупэн. – Томск, 2021. – 126 с.
147. Исмаилов, Т.А. Прецизионное измерение температурных параметров тканей и полостей человеческого организма / Т.А. Исмаилов, К.А. Гафуров // Восьмая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» : Сб. научн. тр. – 2002. – Т. 1. – С. 228–230.
148. Исмаилов, Т.А. Применение термоэлектрических устройств для измерения теплопроводности тканей человеческого организма / Т.А. Исмаилов,

К.А. Гафуров // Третья Российская национальная конференция по теплообмену : Сб. научн. тр. – 2002. – С. 225-227.

149. Гафуров, К.А. Термоэлектрические цифровые преобразователи для исследования локальных температурных полей человеческого организма : дис.... канд. техн. наук 05.04.03 / Гафуров Керим Абсаламович. – Махачкала, 2005. – 159 с.

150. Патент RU № 2624804. Термоэлектрическое полупроводниковое устройство для контрастной термоодонтометрии / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Рагимова Т.А., Меджидов М.Н., Рагимова Т.А. ; заявитель и патентообладатель "Дагестанский государственный технический университет". – № 2016109497 ; заявл. 16.03.2016 ; опубл. 03.07.2017, Бюл. № 19. – 8 с.

151. Заявка на изобретение RU № 2006106008/14. Термоэлектрическое устройство для температурной диагностики и электроодонтометрии состояния зубов / Исмаилов Т.А., Аминов Г.И., Юсуфов Ш.А., Меджидов М.Н., Казумов Р.Ш. ; заявитель и патентообладатель "Дагестанский государственный технический университет". – заявл. 11.09.2006 ; опубл. 10.09.2007.

152. Nestorova, G.G. Lab-on-a-chip thermoelectric DNA biosensor for label-free detection of nucleic acid se-quences / G.G. Nestorova, B.S. Adapa, V.L. Kopparthy, E.J. Guilbeau // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2016. – Vol. 225. – P. 174-180.

153. Сайт группы компаний «ГРАНАТ» [офиц. сайт] – [Электронный ресурс] / Структуроскоп термоэлектрический МЕТЭК-М – Режим доступа: <https://granat-e.ru/metek-m.html> – Заглавие с экрана (дата обращения 03.05.2022).

154. Чичинадзе, А.В. Справочник по триботехнике. Т1. Теоретические основы / А.В. Чичинадзе под ред. М. Хебды. – М.: Машиностроение, 1989. — 400 с.

155. Сайт компании ООО ТПС "ГЕО-НДТ" [офиц. сайт] – [Электронный ресурс] / Термоэлектрический дефектоскоп-толщиномер ТЭС-364М – Режим доступа: <https://www.geo-ndt.ru/pribor-1093-termoelektricheskii-defektoskop-tolshinomer-tes-364m.htm?t=1> – Заглавие с экрана (дата обращения 03.05.2022).

156. Сайт компании ООО ТПС "ГЕО-НДТ" [офиц. сайт] – [Электронный ресурс] / Определитель марки металлов ОМЕТ – Режим доступа: [https://www.geo-](https://www.geo-ndt.ru/pribor-1093-termoelektricheskii-defektoskop-tolshinomer-tes-364m.htm?t=1)

ndt.ru/pribor-10060-opredelitel-marki-metallov-omet.htm – Заглавие с экрана (дата обращения 03.05.2022).

157. Абуеллаиль А.А. Термоэлектрический контроль металлов геодезических скважин : дис.... канд. техн. наук 05.11.13 / Абуеллаиль Ахмед Али Сабри Ахмед Рефаат. – Томск, 2020. – 139 с.

158. Сайт компании ACTTR Technology [офиц. сайт] – [Электронный ресурс] / Анализатор коэффициента Зеебека SeebeckPro – Режим доступа: <https://product.acttr.com/en/thermal-analyzer-c-5/thermodynamics-analyzer-tma-dilatometer-dil-c-46/seebeckpro-seebeck-coefficient-analyzer-p-170> – Заглавие с экрана (дата обращения 16.05.2022).

159. Сайт компании Linseis Inc. [офиц. сайт] – [Электронный ресурс] / – LSR-3 (LSR L31) Seebeck coefficient / Electrical conductivity / Harman method / ZT on modules – Режим доступа: <https://www.linseis.com/en/instruments/lsr-thermoelectrics/lsr-l31/> – Заглавие с экрана (дата обращения 16.05.2022).

160. Сайт компании NETZSCH [офиц. сайт] – [Электронный ресурс] / SBA 458 Nemesis – Режим доступа: <https://analyzing-testing.netzsch.com/en/products/seebeck-analyzer-sba/sba-458-nemesis> – Заглавие с экрана (дата обращения 16.05.2022).

161. Сайт компании ULVAC [офиц. сайт] – [Электронный ресурс] / ZEM-3 series – Режим доступа: <https://www.ulvac.com/userfiles/files/Components/Thermal-Analysis-and-Coating/Thermoelectric-Testers/ZEM-3.pdf> – Заглавие с экрана (дата обращения 16.05.2022).

162. Сайт NTRS - NASA Technical Reports Server [офиц. сайт] – [Электронный ресурс] / Detailed uncertainty analysis of the ZEM-3 measurement system – Режим доступа: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20140010867/downloads/20140010867.pdf> – Заглавие с экрана (дата обращения 16.05.2022).

163. Kostina, M.A. Simulation of multipoint contact under thermoelectric testing / M.A. Kostina, A.I. Soldatov, A.A. Soldatov, A.A. Abouellail // Eurasian Physical Technical Journal. – 2024. – Vol. 21(1). – P. 93–103.

164. Soldatov, A.I. Direct contact resistance measurement during thermoelectric testing / A.I. Soldatov, A.A. Soldatov, M.A. Kostina, A.A. Abouellail // Eurasian Physical Technical Journal. – 2024. – Vol. 21(2). – P. 38–48.
165. Soldatov, A.I. Thermoelectric method of plastic deformation detection / A.I. Soldatov, A.A. Soldatov, P.V. Sorokin, A.A. Abouellail, M.A. Kostina // Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 938. – P. 112–118.
166. Abouellail, A.A. Surface inspection problems in thermoelectric testing / A.A. Abouellail, I.I. Obach, A.I. Soldatov, A.A. Soldatov // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 102. – P. 01001.
167. Soldatov, A.I. Experimental studies of thermoelectric characteristics of plastically deformed steels ST3, 08KP and 12H18N10T / A.I. Soldatov, A.A. Soldatov, M.A. Kostina, O.A. Kozhemyak // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 685. – P. 310–314.
168. Soldatov, A.I. An experimental setup for studying electric characteristics of thermocouples / A.I. Soldatov, A.A. Soldatov, P.V. Sorokin [et al] // SIBCON 2017 – Proceedings. – 2017. – P. 79985342017.
169. Soldatov, A.A. Nondestructive proximate testing of plastic deformations by differential thermal EMF measurements / A.A. Soldatov, A.I. Seleznev, I.I. Fiks [et al] // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2012. – Vol. 48(3). – P. 184–186.
170. Abouellail, A.A. Software simulation of thermocouples / A.A. Abouellail, Y.A. Abouellail, A.A. Soldatov [et al] // Proceedings: 2019 International Siberian Conference on Control and Communications. – 2019. – P. 8729629.
171. Солдатов, А.И. Автоматизированная установка для исследования характеристик источников термоэлектродвижущей силы / А.И. Солдатов, А.А. Абуеллаиль, А.А. Солдатов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2018. – № 3. – С. 152–153.
172. Soldatov, A.I. Modelling of the thermal field of hot electrode and the controlled sample at thermoelectric testing of metals / A.I. Soldatov, A.A. Soldatov, M.A. Kostina [et al] // В сборнике: Proceedings of 2015 International Conference on

Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). – 2015. – P. 7414922.

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

174. Патент RU № 2624787. Устройство для неразрушающего контроля шероховатости поверхностного слоя металла / Солдатов А.И., Солдатов А.А., Сорокин П.В., Мельников А.Г., Костина М.А. ; заявитель и патентообладатель "Национальный исследовательский Томский политехнический университет". – № 2016132020 ; заявл. 03.08.2016 ; опубл. 06.07.2017, Бюл. № 19. – 9 с.

175. 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(3). – P. 148-155.

176. Абуеллаиль, А.А. Исследование характеристик термоэлектрических источников ЭДС / А.И. Солдатов, А.А. Абуеллаиль, А.А. Солдатов [и др.] // Дефектоскопия. – 2018. – № 7. – С. 54–60.

177. Абуеллаиль, А. А. Исследование электрических характеристик источников термоэдс / А. А. Абуеллаиль, И. И. Обач, П. В. Сорокин // Инженерия для освоения космоса : Сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного Форума с международным участием, Томск, 12–14 апреля 2016 года. – 2016. – С. 116–121.

178. Атлас микроструктур черных и цветных металлов и сплавов: Учебное наглядное пособие/ сост. А.А.Андрушевич и др. – Минск. : БГАТУ, 2012. – 100 с.

179. Hetznera, D.W. Crystallography and metallography of carbides in high alloy steels / D.W. Hetznera, W. Van Geertruyden // Materials Characterization. – 2008. – Vol. 59. – P. 825 – 841, doi:10.1016/j.matchar.2007.07.005.

180. Corcoran, J. Improved thermoelectric power measurements using a four-point technique / J. Corcoran, S. Raja, P. Nagy // *NDT & E International*. – 2017. – Vol. 94. – P. 92–100.
181. Johnson, D.H. Equivalent circuit concept: the voltage-source equivalent / D.H. Johnson // *Proceedings of the IEEE*. – 2003. Vol. 91(4). – P. 636—640.
182. Кузнецов, С.И. Курс физики с примерами решения задач. Часть I. Механика. Молекулярная физика. Термодинамика: учебное пособие / С.И. Кузнецов; под ред. В.В. Ларионова; Томский политехнический университет. – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 413 с.
183. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л.А. Бессонов. – М.: Издательство Гардарики, 2002. – 640 с.
184. Корис, Р. Справочник инженера - схемотехника : перевод с немецкого / Р. Корис, Х. Шмидт-Вальтер. – М. : Техносфера, 2006. – 608 с.
185. Солдатов, А.И. Неразрушающий экспресс-контроль пластической деформации с помощью измерения дифференциальной термоЭДС / А.И. Солдатов, А.И. Селезнев, А.А. Солдатов [и др.] // *Дефектоскопия*. – 2012. – № 3. – С. 49–52.
186. Abouellaill, A.A. Research of thermocouple electrical characteristics / A.A. Abouellaill, A.A. Soldatov, P.V. Sorokin [et al] // *Materials Science Forum*. – 2018. – Vol. 938. – С. 104–111.
187. Патент RU 2495410. Устройство для разбраковки металлических изделий / Солдатов А.И., Солдатов А.А., Селезнев А.И., Кренинг Х.М.В.А. ; заявитель и патентообладатель "Национальный исследовательский Томский политехнический университет". – № 2012116376/28 ; заявл. 23.04.2012 ; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 28. – 7 с.
188. 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: ТПУ, 2013. – Т.1. – С. 155–159.

189. Солдатов, А.А. Неразрушающей контроль качества поверхностного слоя металла / 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.

190. 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.

191. 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.

192. Солдатов, А.А. Неразрушающий экспресс контроль металлов и сплавов методом дифференциальной термо-эдс / А.А. Солдатов, Е.А. Кривенко // Современные техника и технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т. – Томск: ТПУ, 2011. – Т.1 – С. 208–209.

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

194. Сайт U.S. Fire Administration – [Электронный ресурс] / U.S. Fire Statistics – Режим доступа: <https://www.usfa.fema.gov/data/statistics/#causesR/> – Заглавие с экрана (дата обращения 16.02.2024).

195. Сайт U.S. Fire Administration – [Электронный ресурс] / Residential Building Causes - ROUNDED National Fire Estimates by Cause (2003-2021). Data Sets – Режим доступа: <https://www.usfa.fema.gov/downloads/xls/statistics/residential->

nonresidential-fire-loss-estimates-2003- 2021.xlsx – Заглавие с экрана (дата обращения 22.01.2024).

196. Пронин, С.В. Анализ пожаров по причинам, связанным с эксплуатацией электроприборов // Актуальные исследования. – 2021. – № 38(65). – С. 11–14.

197. Чечетина, Т.А. Обстановка с пожарами в российской федерации в 2021 году / Т.А. Чечетина, В.С. Гончаренко, В.И. Сибирко, М.В. Загуменнова // Пожарная безопасность. – 2022. – № 1(106). – С. 98–115.

198. Apostolakis, G. Methodology for assessing the risk from cable fires / G. Apostolakis, M. Kazarians, D.C. Bley // Nucl. Saf. – 1982. – Vol. 23(4). ID 5329326.

199. Delplace, M. Electric short circuits help the investigator determine where the fire started / M. Delplace, E. Vos // Fire Technology. – 1983. – Vol. 19(3). – P. 185–191.

200. Wang, J. Effect of electrical contact resistance on measurement of thermal conductivity and wiedemann-franz law for individual metallic nanowires / J. Wang, Z. Wu, C. Mao [et al] // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8(1). – P. 4862.

201. Kim, S.-W. The effect of interfacial dipoles on the metal-double interlayers-semiconductor structure and their application in contact resistivity reduction / S.-W. Kim, S.-H. Kim, G.-S. Kim [et al] // ACS Applied Materials and Interfaces. – 2016. – Vol. 8(51). – P. 35614–35620.

202. Khoo, K.H. Origin of contact resistance at ferromagnetic metal-graphene interfaces / K.H. Khoo, W.S. Leong, J.T.L. Thong, S.Y. Quek // ACS Nano. – 2016. – Vol. 10(12). – P. 11219–11227.

203. Dillig, M. Thermal contact resistance in solid oxide fuel cell stacks / M. Dillig, T. Biedermann, J. Karl // Journal of Power Sources. – 2015. – Vol. 300. – P. 69–76.

204. Münzenrieder, N. Contact resistance and overlapping capacitance in flexible sub-micron long oxide thin-film transistors for above 100 MHz operation / N. Münzenrieder, G.A. Salvatore, L. Petti [et al] // Applied Physics Letters. – 2014. – Vol. 105(26). – P. 263504.

205. Alhazmi, N. The through-plane thermal conductivity and the contact resistance of the components of the membrane electrode assembly and gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cells / N. Alhazmi, D.B. Ingham, M.S. Ismail [et al] // Journal of Power Sources. – 2014. – Vol. 270. – P. 59–67.

206. Kwiatkowski, R. Contact resistance anomalies in reed contacts - Influence of temperature and external magnetic field / R. Kwiatkowski, M. Vladimirescu, A. Zybura // IEEE 59th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm 2013). – 2013. – P. 1–10.

207. Ren, W. A new automated test equipment for measuring electrical contact resistance of real size rivets / W. Ren, Y. Chen, S. Cao [et al] // IEEE 59th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm 2013). – 2013. – P. 1–7.

208. Мозгалин, Н.Ф. Электропроводящие смазки – надежная мера снижения аварийности в сетях и уменьшения потерь в электрических контактах / Н.Ф. Мозгалин // Промышленная энергетика. – 2010. – №11. – С. 12–16.

209. Беляев, В.Л. Исследование влияния электропроводящих смазок на сопротивление сильноточных контактных систем электролизеров и электрических аппаратов / В.Л. Беляев, А.А. Шалагинов // Промышленная энергетика. – 2014. – №5. – С. 34–37.

210. Sivkov, A.A. High-speed thermal plasma deposition of copper coating on aluminum surface with strong substrate adhesion and low transient resistivity / A.A. Sivkov, Y.L. Shanenkova, A.S. Saygash, I.I. Shanenkov // Surface and Coatings Technology. – 2016. – Vol. 292. – P. 63–71.

211. Беляев, В.Л. Математическое моделирование полного переходного сопротивления идеализированного сильноточной контактной системы электролизеров и электрических аппаратов / В.Л. Беляев, Ю.В. Куклев, А.А. Шалагинов // Электротехника. – 2014. – № 2. – С. 35–37.

212. Сивков, А.А. Влияние свойств медного покрытия на алюминиевой контактной поверхности на переходное сопротивление / А.А. Сивков, А.С. Сайгаш, Ю.Л. Колганова // Электротехника. – 2013. – №8. – С.11–14.

213. Колганова (Шаненкова), Ю.Л. Влияние микрогеометрии поверхности на величину удельного переходного контактного сопротивления / Ю.Л. Колганова (Шаненкова), И.И. Шаненков, А.С. Сайгаш // Современная техника и технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск: ТПУ, 2013 – Т.1 – С. 54–55.

214. Титков, В.В. О возможностях мониторинга нестационарных тепловых процессов в контактах силовых электроустановок / В.В. Титков, А.Б. Бекбаев, Е.А. Сарсенбаев // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т. 23 – № 1. – С. 168–178.

215. Чалый, А.М. Нагрев сильноточных электрических контактов ударными токами короткого замыкания / А.М. Чалый, В.А. Дмитриев, М.А. Павлейно, О.М. Павлейно // Электронная обработка материалов. – 2013. – № 49(5). – С. 81–88.

216. Чалый, А.М. Об особенностях сваривания и разрушения поверхности сильноточных контактов импульсными токами / А.М. Чалый, В.А. Дмитриев, М.А. Павлейно [и др.] // Электронная обработка материалов. – 2016. – № 52(6). – С. 12–18.

217. Троицкий, О.А. Вибрации проводников при пропускании импульсного электрического тока и неразрушающий контроль / О.А. Троицкий, В.И. Стащенко, О.Б. Скворцов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – № 3. – Р. 1–16.

218. Чупрова, Л.В. Химико-технологические аспекты проблемы окисления медных контактов электрооборудования, эксплуатируемого в цехах очистки воды / Л.В. Чупрова, О.В. Ершова, Э.Р. Муллина // Молодой ученый. – 2013. – № 9(56). – С. 77–80.

219. Jiang, Z.-F. Influences of the $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x/\text{Ag}$ interface and interfilamentary bridge connections on AC loss of composite wires / Z.-F. Jiang, F. Xue, X.-F. Gou // Physica C: Superconductivity and its Applications. – 2018. – Vol. 547. – P. 69–76.

220. Cong, S. Effect of heat input on failure mode and connection mechanism of parallel micro-gap resistance welding for copper wire / S. Cong, W.W. Zhang, Y.S. Wang [et al] // Int. J. of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 96. – P. 299–306.
221. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е издание. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2007. – 115 с.
222. ГОСТ Р 58019-2017 Катанка из алюминиевых сплавов марок 8176 и 8030. – М.: Стандартинформ, 2018. – 20 с.
223. Патент RU №2656128. Способ неразрушающего контроля неисправностей в электрической сети / Солдатов А.И., Солдатов А.А., Костина М.А., Борталевич С.И., Логинов Е.Л. ; заявитель и патентообладатель "Национальный исследовательский Томский политехнический университет". – № 2017105632 ; заявл. 20.02.2017 ; опубл. 14.06.2018, Бюл. № 16. – 8 с.
224. Abouellail, A.A. Laboratory substantiation of thermoelectric method for monitoring contact resistance / A.A. Abouellail, A.I. Soldatov, A.A. Soldatov [et al] // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – Т. 58. – № 12. – P. 1153–1161.
225. Obach, I.I. Monitoring of power supply / I.I. Obach, A.A. Abouellail, A.A. Soldatov [et al] // SIBCON 2019 - Proceedings. – 2019. – P. 8729572.
226. Обач, И.И. Мониторинг электрической сети с помощью термоэлектрической составляющей / И.И. Обач, А.А. Солдатов // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2018. – № 2. – С. 60–62.
227. Солдатов, А.А. Устройство для определения постоянной составляющей в гармоническом сигнале промышленной частоты / А.А. Солдатов, Д.А. Солдатов // В сборнике: Состояние и перспективы развития термоэлектрического приборостроения. Сборник материалов VIII всероссийской научно-технической конференции. Махачкала, 2023. – С. 119–122.
228. Солдатов, А.А. Моделирование теплового поля горячего электрода и исследуемого образца при термоэлектрических испытаниях металлов / А.А. Солдатов, Д.А. Солдатов // В сборнике: Состояние и перспективы развития термоэлектрического приборостроения. Сборник материалов VIII всероссийской научно-технической конференции. Махачкала, 2023. – С. 8–11.

229. Абуллаель, А.А. Анализ электрических характеристик датчика термоэлектрического дефектоскопа / А.А. Абуллаель, Д.А. Солдатов, А.А. Солдатов // В сборнике: Современные технологии, экономика и образование. Сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции. – 2019. – С. 17–19.

230. Солдатов, Д.А. Исследование тепловых процессов в контактных соединениях в электрической сети промышленной частоты / Д.А. Солдатов, А.А. Солдатов, Е.С. Солдатова [и др.] // В сборнике: Инноватика-2021. сборник материалов XVII Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 2021. – С. 410–413.

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

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

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

234. Патент RU 2762526. Способ неразрушающего контроля неисправностей в электрической сети / Солдатов А.И., Солдатов А.А., Костина М.А., Нариманова Г.Н., Солдатов Д.А., Борталевич С.И. ; заявитель и патентообладатель "Томский государственный университет систем управления и

радиоэлектроники". – № 2021105793 ; заявл. 09.03.2021 ; опубл. 21.12.2021, Бюл. № 36. – 8 с.

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

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

237. Carreon, H. Thermoelectric detection of spherical tin inclusions in copper by magnetic sensing / H. Carreon // J. Appl. Phys. – 2000. – Vol. 88(11). – P. 6495–6500.

238. Boor, J. Data analysis for Seebeck coefficient measurements / J. de Boor, E. Müller // The Review of scientific instruments. – 2013. – Vol. 84(6). – P. 065102.

239. Блатт, Ф. Дж. Термоэлектродвижущая сила металлов : пер. с англ. / Ф. Дж. Блатт [и др.] – М. : Металлургия, 1980. – 248 с.

240. Bringuier, E. The thermodynamical foundation of electronic conduction in solids / E. Bringuier // European Journal of Physics. – 2018. – Vol. 39(2). – P. 025101.

241. Courty, L. External heating of electrical cables and auto-ignition investigation / L. Courty, J.P. Garo // Journal of Hazardous Materials. – 2016. – Vol. 321(9). – P. 528–536.

242. Wang, Z. Comparative thermal decomposition characteristics and fire behaviors of commercial cables / Z. Wang, J. Wang // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2020. – Vol. 144(7). – P. 1–3.

243. Moore, J.P. Absolute Seebeck coefficient of platinum from 80 to 340 K and the thermal and electrical conductivities of lead from 80 to 400 K / J.P. Moore // Journal of Applied Physics. – 1973. – Vol. 44(3). – 1174–1178.

244. Muhammad1, U.K. Experimental Performance Investigations and Evaluation of Base Metals Thermocouples / U.K. Muhammad1, S. Umar // International Journal of Modern Applied Physics. – 2013. – Vol. 3(1). – P. 26–37.

245. Колпаков, А. Охлаждение в системах высокой мощности / А Колпаков. // Силовая электроника. – 2010. – № 3. – С. 62–66.

246. Шостаковский, П. Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской, промышленной и бытовой техники / П. Шостаковский // Силовая электроника. – 2009. – №12. – С. 120–126.

247. Зенин, В.В. Охлаждение изделий микроэлектроники / В.В. Зенин, Е.П. Новокрещенова, К.А. Мухин, Ю.В. Шарапов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – С.127–131.

248. Солдатов, А.А. Контроль качества нанесения теплопроводящего компаунда / А.А. Солдатов, А.А. Дементьев, А.И. Солдатов, И.М. Васильев // Дефектоскопия. – 2020. – № 3. – С. 65–71.

249. Vasiliev, I. Thermoelectric quality control of the application of heat-conducting compound / I. Vasiliev, A. Soldatov, A. Abouellail [et al] // Studies in Systems, Decision and Control. – 2021. – Vol. 351. – P. 59–68.

250. Abouellail, A.A. Thermoelectric monitoring of thermal resistance in electronic systems / A.A. Abouellail, A.I. Soldatov, A.A. Soldatov [et al] // Eurasian Physical Technical Journal. – 2023. –Vol. 20(3). – P. 52–61.

251. Soldatov, A.I. Detection algorithm for faulty contact joints in electrical network / Soldatov A.I.1, Soldatov A.A.1, Kostina M.A. [et al] // Eurasian Physical Technical Journal. – 2025. –Vol. 22(1). – P. 76–82.

252. Васильев, И.М. Автоматизированная установка для исследования теплового сопротивления термоэлектрическим методом / И.М. Васильев, А.И. Солдатов, А.А. Солдатов, А.А. Дементьев // В сборнике: Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции. Сборник материалов III Международного форума. Под редакцией В.И. Сырямкина. – 2020. – С. 32–34.

253. Vasiliev, I.M. Automatic device for testing thermal resistance with thermoelectric effect / I.M. Vasiliev, A.A. Soldatov, A.A. Dementiev [et al] / Journal of

Physics: Conference Series. International Conference "Actual Trends in Radiophysics". – 2020. – P. 012047.

254. Солдатов, А.А. Применение термоэлектрического метода для контроля качества нанесения термоинтерфейса / А.А. Солдатов // В сборнике: Инноватика-2024. Сборник материалов XX Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 2024. – С. 161–164.

255. Soldatov, A.A. Control of quality of applying heat-conducting compound / I.M. Vasiliev, A.A. Soldatov, A.A. Dementiev [et al] // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2020. – Vol. 56. – № 3. – P. 284–290.

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

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

258. Порохов, А. М. Физическая энциклопедия / А. М. Порохов. – М. : Большая Российская энциклопедия, 1998. – 760 с.

259. ГОСТ 25142-82 Шероховатость поверхности. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 2018. – 22 с.

260. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. М.: Стандартиформ, 2018. – 14 с.

261. Абуллаель, А.А. Влияние дестабилизирующих факторов на результаты контроля термоэлектрическим методом / А.А. Абоуеллаиль, Ц. Чан, А.А. Солдатов [и др.] // Дефектоскопия. – 2022. – № 7. – С. 54–63.

262. Терашкевич, Д.И. Разработка полировальных материалов на основе полиэфируретанов для химико-механической планаризации диэлектрических слоев полупроводниковых пластин : дис.... канд. техн. наук 2.6.11 / Терашкевич, Дмитрий Игоревич. Москва, 2023. – 155 с.

263. Kolosova, Yu.R. Numerical study of a heat transfer across a contact pair / Yu.R. Kolosova, A.A. Dementiev, A. A. Soldatov // IICST2020: 5th International Workshop on Innovations in Information and Communication Science and Technology. –2020. – P. 26-32.

264. Soldatov, A.A. Hands-on Experience of THERMO FITNESS TESTING Device Use for Thermoelectric Evaluation of Metallic Materials / A.A. Soldatov, A.I. Soldatov, M.A. Kostina, A.A. Abouellail // Devices and Methods of Measurements. – 2024. – Vol. 13(2). – P. 87–94.

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

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

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

268. Патент RU 2652657. Способ контроля наличия контакта нагреваемого электрода с контролируемым изделием при разбраковке металлических изделий. Солдатов А.И., Солдатов А.А., Костина М.А., Нариманова Г.Н. ; заявитель и патентообладатель "Томский государственный университет систем управления и

радиоэлектроники". – № 2017108676 от 15.03.2017 ; опубл. 28.04.2018, Бюл. № 13.
– 9 с.

Приложение А

(справочное)

Акты внедрения

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)**

Утверждаю

и.о. проректора по учебной работе и
международной деятельности ТУСУР

 Нариманова Г.Н.
«30» апреля 2025 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Солдатов А.А.

Комиссия в составе:

председатель: зав. кафедрой УИ, к.ф.-м.н., Нариманова Г.Н, члены комиссии: доцент кафедры УИ, к.ф.-м.н. Антипин М.Е., доцент кафедры УИ, к.т.н. Костина М.А., составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Солдатов А.А., представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8 – методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, используются в учебном процессе кафедры Управления инновациями Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники в методических материалах дисциплин: «Сенсорные системы роботов», «Сенсоры робототехнических систем», «Измерительные преобразователи в технологических системах», а также при подготовке магистерских диссертаций и курсовых проектов студентами ТУСУР.

Председатель комиссии



Г.Н. Нариманова

Члены комиссии




М.Е. Антипин

М.А. Костина



ПРОРЫВ
РОСАТОМ

**Акционерное общество «Прорыв»
(АО «Прорыв»)**

107140, Москва, пл. Академика Доллежале, д.1,
к.7, офис 307
Телефон +7(495) 380-35-76
E-mail: info@pnproryv.ru
ОКПО 29668500, ОГРН 1187746578480
ИНН 7708332920, КПП 770801001

11.09.2024 № 740-01*/2982

На № 222-4/2725 от 01.08.2024

Об использовании результатов
ЕОТП-ДКЯЭ-214

Заместителю генерального директора
по термоядерным и магнитным
технологиям – Директору НТЦ
«Синтез»
АО «НИИЭФА»

Еникееву Р.Ш.

Уважаемый Рустам Шамильевич!

В ответ на Ваш запрос (исх. №222-4/2725 от 01.08.2024) сообщаю, что
согласовываю акт внедрения результатов диссертационной работы Солдатов А.А.

Генеральный директор

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
СВЕДЕНИЯ О СЕРТИФИКАТЕ ЭП
Сертификат: 020764e20077b13c9a4d397117d3a8cbcl
Владелец: Евланов Дмитрий Сергеевич
Действителен с 21.05.2024 по 21.08.2025

Д.С. Евланов

Шишкина Анна Владимировна
shavl@pnproryv.ru

АО «НИИЭФА»
Вх. № 222-4/3745 от 11.09.2024

Утверждаю

Главный инженер

АО «ННЦ «Полус»

Марзоль М.Р.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Солдатова А.А.

Настоящий акт составлен о том, что в АО «НПЦ «Полус» используются результаты научных исследований Солдатова А.А. для выявления контактов в силовой сети с большим переходным сопротивлением. Принцип работы прибора основан на термоэлектрическом методе, на основе которого возможен непрерывный мониторинг переходного сопротивления контактов в электрической сети без отключения нагрузки с детектированием места появления большого контактного сопротивления

Ведущий инженер-конструктор

A handwritten signature in blue ink, likely belonging to O.V. Vartanov.

О.В. Варганов

Утверждаю
 Технический директор ОАО «ТЭМЗ»

 А.А.Котельников
 2018 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Солдатов 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 Солдатов 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

Утверждаю

Генеральный директор

ООО «МК «Ильма»

Короленко А. А.

2014 г.



АКТ

Внедрения результатов диссертационной работы Солдатова А.А.

Мы, нижеподписавшиеся, заместитель главного инженера Чуркин С. Л. и заместитель начальника цеха по технической части Майоров А. А., составили настоящий акт в том, что в ООО «Ильма» внедрен термозлектрический прибор «ТЕРМОТЕСТ-2» для неразрушающего экспресс-контроля металлов и сплавов, в котором использованы результаты научных исследований по диссертационной работе Солдатова А.А.:

1. Методика неразрушающего экспресс-контроля поверхностного слоя металлов и сплавов.
2. Устройство для неразрушающего экспресс-контроля металлических изделий, выполненное в виде переносного блока, обеспечивающий в сравнении с известными аналогами лучшие метрологические характеристики.

заместитель главного инженера

29.08.14

Чуркин С. Л.

заместитель начальника цеха по технической части

Майоров А. А.

29.08.14



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФВТ ТПУ,

А.Н.Яковлев

«___» _____ 2014 г.

Акт

внедрения результатов диссертационной работы

Солдатова Андрея Алексеевича

Комиссия в составе:

председатель: зав. кафедрой МТМ, к.т.н., доцент Мельников А.Г., члены комиссии: доцент кафедры МТМ, к.т.н. Егоров Ю.П., старший преподаватель кафедры МТМ, Утьев О.М. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Солдатова А.А. «Аппаратно-программный комплекс для контроля пластически деформированных металлов дифференциальным термоэлектрическим методом», 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 научно-исследовательской работе на кафедре материаловедения и технологии металлов Томского политехнического университета при проведении металловедческих экспертиз промышленных стальных конструкций, а также при выполнении исследовательских проектов студентами кафедры.

Председатель комиссии

А.Г.Мельников

Члены комиссии

Ю.П.Егоров

О.М.Утьев



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФВТ ТПУ,

А.Н.Яковлев

2014 г.

внедрения результатов диссертационной работы

Солдатова Андрея Алексеевича

Комиссия в составе:

председатель: зав. кафедрой МТМ, к.т.н., доцент Мельников А.Г., члены комиссии: доцент кафедры МТМ, к.т.н. Егоров Ю.П., старший преподаватель кафедры МТМ, Утьев О.М. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Солдатова А.А. «Аппаратно-программный комплекс для контроля пластически деформированных металлов дифференциальным термоэлектрическим методом», 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 научно-исследовательской работе на кафедре материаловедения и технологии металлов Томского политехнического университета при проведении металловедческих экспертиз промышленных стальных конструкций, а также при выполнении исследовательских проектов студентами кафедры.

Председатель комиссии

А.Г.Мельников

Члены комиссии

Ю.П.Егоров

О.М.Утьев

УТВЕРЖДАЮ



Директор ИНК ТПУ,
д.т.н., профессор,

В.Н.Бориков

2014 г.

Акт

внедрения результатов диссертационной работы

Солдато́ва Андре́я Алексе́евича

Комиссия в составе:

председатель: зам. зав. кафедрой ПМЭ, к.т.н., доцент Огородников Д.Н.,
члены комиссии: старший преподаватель кафедры ПМЭ, Васенькин А.И.,
доцент кафедры ПМЭ, к.т.н. Гребенников В.В. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Солдато́ва А.А. «Аппаратно-программный комплекс для контроля пластически деформированных металлов дифференциальным термоэлектрическим методом», 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 на кафедре промышленной и медицинской электроники Томского политехнического университета в методических материалах дисциплины: «Электронные промышленные устройства», а также при выполнении магистерских диссертаций и курсовых проектов студентами кафедры.

Председатель комиссии

Д.Н. Огородников

Члены комиссии

В.В. Гребенников

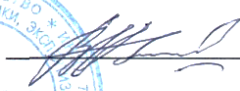
А.И. Васенькин

Томский центр технической диагностики экспертизы и сертификации
«ХИМОТЕСТ»

Утверждаю:

Директор НП ТЦТД «ХИМОТЕСТ»



 В. Т. Платоненко

« 4 »



2014 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Солдатов А.А.

Настоящий акт составлен в том, что на НП ТЦТД «ХИМОТЕСТ» внедрен прибор неразрушающего экспресс-контроля металлов и сплавов термоэлектрическим методом «ТЕРМОТЕСТ».

Прибор «ТЕРМОТЕСТ» используется в процессе входного контроля металлических материалов по образцам свидетелям, а также при экспертизе промышленной безопасности технических устройств при необходимости подтверждения соответствия примененных материалов проекту и техническим условиям на изготовление изделий (трубопроводов, корпусов сосудов и т. д.).

Прибор разработан с использованием научных исследований проведенных Солдатовым А.А.

1. Методика и термоэлектрический способ неразрушающего контроля качества поверхностного слоя металла, обеспечивающие в сравнении с известными аналогами лучшие метрологические характеристики.
2. Технические решения, используемые в приборе, защищены патентами РФ №2498281 и №2495410.

Гл. инженер НП ТЦТД «ХИМОТЕСТ»  Селиверстов В. А.

Начальник ЛНК НП ТЦТД «ХИМОТЕСТ»  Саженов А. П.