

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
Направление подготовки 15.04.01 Машиностроение
Отделение электронной инженерии

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Управление процессом контактной точечной микросварки циркониевых сплавов УДК 621.791.763.1'296-04

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ61	Акболатов Елдос Жаннурулы		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Киселев А. С.	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Данков А. Г.	К.И.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Мезенцева И. Л.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
15.04.01 Машиностроение. Машины и технологии сварочного производства.	Гнюсов С. Ф.	Д.Т.Н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП 15.04.01

Код результата	Результат обучения
<i>Универсальные компетенции</i>	
P1	Способность применять глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания при создании новых конкурентоспособных технологий изготовления деталей и сборки машин с применением компьютерных технологий
P2	Способность ставить и решать инновационные инженерные задачи с использованием системного анализа и моделирования объектов и процессов машиностроения
P3	Способность разрабатывать методики и организовывать проведение теоретических и экспериментальных исследований в области технологии машиностроения с использованием новейших достижений науки и техники
P4	Способность проводить маркетинговые исследования, используя знания проектного менеджмента, участвовать в создании или совершенствовании системы менеджмента качества предприятия
P5	Способность работать в многонациональном коллективе над междисциплинарными проектами в качестве исполнителя и руководителя
P6	Способность подготавливать научно-технические отчеты, обзоры, методическую документацию, публикации по результатам выполненных исследований в области машиностроения
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P9	Применять глубокие знания в области конструирования сборочно-сварочных приспособлений, механизации и автоматизации сварочных процессов с учетом специфики технологии изготовления сварной конструкции
P10	Решать инновационные задачи по сварке специальных сталей, применению современных методов неразрушающего контроля с использованием системного анализа и моделирования процессов контроля
P11	Ставить и решать инновационные задачи по применению необходимого оборудования для контактной сварки, проектировать сварочные процессы с принципиально новыми технологическими свойствами, конкурентоспособных на мировом рынке машиностроительного производства

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
Направление подготовки 15.04.01 Машиностроение
Отделение электронной инженерии

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) С. Ф. Гнусов

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
1ВМ61	Акболатову Елдосу Жаннурулы

Тема работы:

Управление процессом контактной точечной микросварки циркониевых сплавов	
Утверждена приказом директора ИШНКБ	Приказ №8896/с от 18.10.2016 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	Процесс контактной точечной микросварки циркониевого сплава Э110. Определение влияния алгоритма изменения тока, усилия сжатия и геометрии рабочей поверхности электродов на величину общего сопротивления металла между электродами для подогревающего этапа сварки.
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none">1. Обзор литературы;2. Методика многофакторного эксперимента;3. Проведение экспериментальных исследований;4. Статистическая обработка результатов эксперимента;5. Выводы.
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	Демонстрационный материал (презентация)

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Обзор литературы Материалы и методы исследования Результаты проведенного эксперимента	М. С. Слободян, доцент ТПУ, отделение электронной инженерии
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	А. Г. Данков, доцент ТПУ, отделение социально-гуманитарных наук
Социальная ответственность	И. Л. Мезенцева, ассистент ТПУ, отделение общетехнических дисциплин
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
1. Обзор литературы	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
-------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Киселев А. С.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ61	Акболатов Елдос Жаннурулы		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 122 с., 18 рис., 37 табл., 130 источников, 1 прил.

Ключевые слова: контактная точечная микросварка, начальные контактные сопротивления, расчет сопротивления, сплав циркония, аустенитная нержавеющая сталь.

Объектом исследования являются тонкостенные детали, используемые для производства дистанционирующих решеток тепловыделяющей сборки ядерных реакторов (вариант 1: циркониевый сплав Э110 толщиной $0,25+0,25$ мм и вариант 2: аустенитная нержавеющая сталь 12X18Н10Т толщиной $0,3+0,3$ мм).

Целью работы является определение влияния алгоритма изменения тока, усилия сжатия и геометрии рабочей поверхности электродов, на величину общего сопротивления металла между электродами для подогревающего этапа контактной точечной микросварки, а также оценка возможности его прогнозирования.

В процессе исследования проводились теоритические расчеты сопротивления между электродами по методикам, изложенным в относительно недавно опубликованных обзорах по данной теме и многофакторный эксперимент.

В результате исследования выявлена степень влияния параметров режима подогревающего этапа сварки на величину общего сопротивления и оценена возможность его прогнозирования.

Область применения: атомная, радиоэлектронная и приборная промышленность, машиностроение, медицинская отрасль, а также иные, где используется сварка тонкостенных деталей.

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
2. ГОСТ 12.1.033-81 ССБТ Пожарная безопасность. Термины и определения.
3. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
4. ГОСТ 17.4.3.04-85 Охраны природы. Почвы. Общие требования к контролю и охране от загрязнения.
5. ГОСТ 15878-79 Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры.
6. ГОСТ 25142-92 Шероховатость поверхности. Термины и определения.
7. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.
8. ГОСТ 5632-72 Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные.

Список основных обозначений и сокращений

δ – толщина детали

σ_{δ}^* – сопротивление пластической деформации

σ_{σ} – предел прочности

σ_m – предел текучести

μ – коэффициент Пуассона

ρ – удельное электрическое сопротивление

ρ_f – удельное электросопротивление поверхностной пленки

E – модуль упругости

F – усилие сжатия электродов

HB – твердость

HV – микротвердость

I – сварочный ток

n – количество контактирующих точек

Q – общее количество тепла, выделенное на участке электрод-электрод

r – радиус контактной поверхности

R – электрическое сопротивление

$R_{эл}$ – радиус сферы рабочей поверхности электродов

$R_{э\sigma}$ – сопротивление участка электрод-электрод

S – площадь контакта

t – время подогрева

T – температура участка электрод-электрод во время прохождения сварочного тока

T_0 – температура окружающей среды

T_f – температура плавления свариваемых металлов

BWR – Boiling Water Reactor

CANDU – Canada Deuterium Uranium

PWR – Pressurized water reactor

АВП – амплитудно-временные параметры

АР – атомный реактор

АЭС – атомная электростанция

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор

ДР – дистанционирующая решетка

ЗТВ – зона термического влияния

РБМК – реактор большой мощности канальный

ТВС – тепловыделяющая сборка

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент

Оглавление

	С.
Введение	11
1 Обзор литературы	14
1.1 Конструкционные материалы, применяемые для изготовления элементов ТВС	14
1.2 Сварные соединения циркониевых сплавов и нержавеющей сталей	18
1.3 Особенности формирования сварного соединения при контактной точечной сварке	23
1.4 Особенности контактной точечной сварки тонкостенных деталей	29
1.5 Расчетные методы оценки сопротивления между электродами	34
2 Материалы и методы исследования	38
2.1 Циркониевый сплав Э110	38
2.2 Аустенитная нержавеющая сталь 12Х18Н10Т	41
2.3 Сварочный комплекс	43
2.5 Методика многофакторного эксперимента	46
2.6 Методика статистической обработки экспериментальных данных	48
3 Результаты проведенного эксперимента	50
3.1 Сравнительная оценка расчетных методов и экспериментальных значений начального сопротивления между электродами	50
3.2 Начальные значения сопротивления между электродами	56
3.3 Стабилизация значений сопротивлений между электродами подогревающим импульсом тока	61
3.4 Выводы	65
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	67
4.1 Предпроектный анализ	67
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	67
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	68
4.1.3 SWOT-анализ	70

4.2 Планирование управления научно-техническим проектом	74
4.2.1 План проекта	74
4.2.2 Бюджет научно-технического исследования	76
5 Социальная ответственность	82
5.1 Производственная безопасность	82
5.1.1 Анализ вредных и опасных факторов	82
5.1.2 Отклонение параметров микроклимата в помещении	83
5.1.3 Отклонение напряженности магнитного поля в помещении	84
5.1.4 Отклонение концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны	86
5.1.5 Электрический ток	87
5.1.6 Выплеск расплавленного металла	89
5.2 Экологическая безопасность	90
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	91
5.3.1 Пожарная безопасность	91
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	93
6 Заключение	94
Список публикаций	95
Список используемых источников	96
Приложение А	108

Введение

В настоящее время для безопасности атомных электростанции (АЭС) предъявляют исключительно жесткие требования к качеству их основных элементов – тепловыделяющих сборок (ТВС). Важнейшей составляющей ТВС является дистанционирующая решетка (ДР), в ячейках которой помещаются тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ) [1]. Значительное влияние на работоспособность ТВС оказывает сварные соединения тонкостенных ячеек ДР, выполненные контактной точечной микросваркой.

Конструкция элементов активной зоны атомных реакторов (АР) и их материалы должны обеспечивать надежную прочность всех узлов при рабочих условиях эксплуатации (при высоких тепловых нагрузках, больших температурных градиентах, высоких механических и переменных термических напряжениях) в течение трех лет или более. Для изготовления элементов ТВС наиболее широко применяют циркониевые сплавы и нержавеющие аустенитные стали. В частности ячейки ДР изготавливают из циркониевого сплава Э110 или нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н10Т, что обусловлено прочностью и коррозионной стойкостью в воде и водяном паре при повышенных температурах [2].

К числу существующих проблем контактной точечной сварки тонкостенных деталей (толщиной менее 0,5 мм) при производстве ДР относится необходимость стабилизации качества соединений. Наиболее критическое влияние на стабильность формирования соединений оказывает первоначальные значения сопротивления между электродами, зависящие от следующих факторов: материала электродов, геометрии их рабочей поверхности и усилия сжатия; материала и толщины свариваемых деталей; состояния контактирующих поверхностей. Значительное количество реально возможных комбинаций этих факторов является одной из основных причин отсутствия стабильности количества выделенного в зоне сварки тепла и, как следствие, характеристик сварного соединения. Для снижения разброса

значений контактных сопротивлений предложено использовать подогревающий импульс тока относительно небольшой амплитуды и длительности [3], которую возможно реализовать на современных источниках питания с программным управлением. Однако, в литературных источниках отсутствуют четкие рекомендации по заданию амплитудно-временных параметров (АВП) импульса подогревающего тока для точечной микросварки циркониевых сплавов и нержавеющей аустенитных сталей. Помимо этого, в настоящее время отсутствуют четкие обоснования необходимой формы рабочей части электродов. Приведены лишь рекомендации, что радиус сферы рабочей поверхности, независимо от свариваемых материалов, должен быть 15...25 мм [4]. Также нет обоснований оптимальных значений усилия сжатия электродов. Еще одной актуальной задачей является возможность прогнозирования значений сопротивления между электродами с помощью расчетных методов для конкретного периода протекания тока.

Целью работы является определение влияния алгоритма изменения тока, усилия сжатия и геометрии рабочей поверхности электродов, на величину общего сопротивления металла между электродами для подогревающего этапа контактной точечной микросварки, а также оценка возможности его прогнозирования. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Выполнить теоретические расчеты сопротивлений между электродами по методикам, изложенным в относительно недавно опубликованных обзорах по данной теме.
2. Провести многофакторный эксперимент по оценке влияния на первоначальное сопротивление между электродами усилия их сжатия и геометрии рабочей части, а также сравнить полученные данные с расчетными значениями.

3. Сделать оценку возможности стабилизации контактных сопротивлений путем применения подогревающего импульса модулированного тока с различными алгоритмами его нарастания.

Научная новизна работы заключается в проведении многофакторного эксперимента, который позволил выявить степень влияния алгоритма изменения тока, усилия сжатия и геометрии рабочей поверхности электродов на величину сопротивления металла между электродами для подогревающего этапа контактной точечной микросварки циркониевого сплава Э110 толщиной 0,25+0,25 мм и нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н10Т толщиной 0,30+0,30 мм.

Практическая значимость. Результаты исследований могут быть внедрены в ПАО «Новосибирский завод химических концентратов» (г. Новосибирск).

Апробация работы. Результаты данного исследования была изложена и обсуждена на международном научном конференции студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы» (г. Томск, 2017 г.).

1 Обзор литературы

1.1 Конструкционные материалы, применяемые для изготовления элементов ТВС

Основу современной атомной энергетики в России и во всем мире составляют реакторы на тепловых нейтронах, в активных зонах которых в качестве конструкционного материала для изготовления элементов ТВС используется циркониевые сплавы и аустенитные нержавеющие стали.

Разработка циркониевых сплавов для изделий активной зоны АР начиналось практически одновременно в США и СССР, 50-е годы прошлого столетия. В рамках этих работ в СССР создавались сплавы на основе использования электролитического циркония и легированием его ниобием, а в США – на основе губчатого циркония, полученного по методу Кроля, легированием олова. Таким образом, в 50-е годы в США создаются сплавы типа «Циркалой» для оболочек ТВЭЛов и других элементов реакторов PWR и BWR [5]. Затем в 60–70-е годы в Канаде, Англии, Швеции, Франции, Японии проводились работы для использования сплавов «Циркалой» в оболочках ТВЭЛов и канальных трубах реакторов CANDU, BWR и PWR. Опыт эксплуатации изделий из «Циркалоев» в реакторах выявил основной недостаток этих сплавов: значительное поглощение водорода, приводящее к охрупчиванию изделий при длительной работе [6-8]. С целью уменьшения поглощения водорода были разработаны Циркалои с пониженным содержанием никеля (Циркалой-4). Широкое применение для оболочек ТВЭЛов нашли сплавы Циркалой-2 и Циркалой-4 [9].

Результаты проводимых в СССР в 50-е годы исследований бинарных композиций на основе легирования циркония ниобием показали, что введение до 2,5 % ниобия позволяет значительно повысить прочность и обеспечить малое поглощения водорода. При этом добавки ниобия несколько усиливает коррозию в воде при высокой температуре, но при этом образуются достаточно плотные и прочные оксидные слои на поверхности

образцов. Таким образом, на основе результатов исследований в СССР создаются циркониевые сплавы для первых реакторов ВВЭР и РБМК с 1,0 и 2,5 % ниобием (в дальнейшем при использовании электролитического циркония им присвоены марки Э110 и Э125) [1, 10-12].

Вот уже более 50 лет созданные советскими учеными бинарные сплавы Э110 и Э125 являются основными промышленными сплавами для активных зон реакторов ВВЭР и РБМК, также широко используется в зарубежных реакторах Канаде и Южной Кореи (сплав $Zr-2.5\%Nb$ в реакторах CANDU), во Франции (сплав с 1 % Nb марки М5 в реакторах PWR) и других странах. В условиях эксплуатации в виде оболочек в реакторах ВВЭР и PWR сплав Э110 по коррозионной стойкости превосходит Циркалой и поглощает в 5 .. 10 раз меньше водорода [5].

В 70-годы в СССР группой ученых, возглавляемой А. В. Никулиной, создается многокомпонентный сплав, комплексно легированный 1 % Nb, 1,0 .. 1,3 % Sn и 0,3 .. 0,5 % Fe, которому была присвоена марка Э635 [5]. Сплав Э635 и созданные позднее его модификации являются в настоящее время наиболее перспективными материалами для работы в активной зоне водоохлаждаемых реакторов. Комплексное легирование сплава оловом, ниобием и железом повышает коррозионную стойкость в воде и паре, ниобий обеспечивает повышение сопротивления наводороживанию и коррозии при облучении, олово уменьшает вредное влияние примесей на коррозионную стойкость, а железо повышает стойкость против коррозии в широком диапазоне температуры воды и пара.

В настоящее время развитие производства сплавов в России, США, Франции, Японии и других странах идет по пути совершенствования уже имеющихся сплавов. Помимо этого, по программе развития атомной энергии России главной задачей в настоящее время является повышение эффективности выгорания топлива в реакторах ВВЭР и повышение компаниии. Для новых условий эксплуатации циркониевые сплавы системы $Zr-Nb$ не имеют необходимого запаса свойств. Поэтому сегодня ведутся

активные исследования по совершенствованию этих сплавов, среди которых актуальными считаются оптимизация химического состава по легирующим элементам сплава Э110 и Э635 [13, 14].

Для изготовления элементов ТВС кроме циркониевых сплавов, широко используются аустенитные хромоникелевые стали стабилизированные титаном марки 1X18H10T, 08X18H10T, 12X18H10T (Россия), AISI 304, AISI 321, D9 (США), 15/15Ti (Франция), 1.4987 (Германия) и PNC 316 (Япония) [2, 6, 7, 9, 11]. Несмотря на более высокие значения сечения поглощения тепловых нейтронов ($2,7 \dots 2,9 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$ по сравнению с $0,19 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$ у циркониевых сплавов) они обладают важными преимуществами перед циркониевыми сплавами: высокой жаростойкостью и жаропрочностью до $600 \text{ }^\circ\text{C}$, хорошей коррозионной стойкостью в воде вплоть до критических параметров и перегретом паре высокого давления до $600 \text{ }^\circ\text{C}$, хорошей свариваемостью и дешевизной в производстве [11].

В зависимости от химического состава, структуры и наличия примесей среды нержавеющие аустенитные стали могут подвергаться к следующим видам коррозии: общей, местной и межкристаллитной [2, 11]. Наиболее опасной для элементов ТВС является межкристаллитная коррозия, сущность которого состоит в том, что выдержка этих сталей при температуре $500\text{-}850 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к выпадению карбидов хрома по границам зерен. В связи, с чем ограничивается максимальная температура и длительность эксплуатации элементов ТВС. Способом предупреждения этого вида разрушения является снижение углерода (до максимально возможного менее $0,03\%$) и связывание углерода в прочные карбиды титана или ниобия. Эти карбиды не диссоциируются даже в случае аустенизации сталей при температуре $1500\text{-}1600 \text{ }^\circ\text{C}$. Поэтому широкое применение в реакторостроении получили хромоникелевые стали с *Ti* и *Nb*, различающиеся по содержанию *C*, *Ni*.

Кроме стабилизации титаном и ниобием, стойкость аустенитных нержавеющих сталей к межкристаллитной коррозии существенным образом

зависит от термической обработки. После длительной эксплуатации при температуре 1000 .. 1500 °С, эти стали становятся склонны к межкристаллитной коррозии. Для устранения этого явления сталь подвергают аустенизации с последующей стабилизацией [11].

Поведение аустенитных сталей под облучением характеризуется радиационным распуханием и высокотемпературным охрупчиванием [2, 11, 14]. Радиационное распухание является результатом сложных структурно-фазовых превращений при облучении, которое во многом связано с температурой и дозой [15]. Например, для реакторов ВВЭР-1000, при температурах облучения 335 °С и дозах свыше 75 Кл/кг распухание аустенитных сталей составляет 10 %, вследствие чего резко падает пластичность. К сожалению, до настоящего времени радиационное распухание является главной проблемой ограничивающим применение аустенитных нержавеющей сталей в качестве конструкционного материала для реакторов будущего поколения [14]. Высокотемпературное охрупчивание объясняется ускорением диффузионных процессов, вследствие облучения, в результате которого по границам зерен образуются газовые полости, пузыри и т. п. из газовых осколков материала деления [2]. Несмотря на эти недостатки, при рациональном выборе состава стали и технологии производства из нее элементов ТВС и режима эксплуатации аустенитные нержавеющей стали являются надежными материалами для элементов активной зоны водоохлаждаемых реакторов [2, 6, 7, 11].

Таким образом, несмотря на полу вековую историю развития реакторостроения, к настоящему времени основными конструкционными материалами для изготовления элементов активной зоны АР остаются циркониевые сплавы и нержавеющей аустенитные стали.

1.2 Сварные соединения циркониевых сплавов и нержавеющей сталей

Эксплуатационная надежность ТВС ядерных реакторов во многом зависит от качества сварных соединений, которая определяется со свариваемостью применяемых конструкционных материалов, в частности циркониевых сплавов и аустенитных нержавеющей сталей, а также конструкцией соединений, оборудованием для выполнения сварки и изменением свойств соединения при эксплуатации под влиянием температуры, потока нейтронов, напряжений и среды.

Согласно одному из первых монографии [16], посвященной промышленному использованию циркония в качестве конструкционного материала, работы по получению неразъемного соединения из циркония начинались уже в 1940-х годах, с помощью дуговой и контактной сваркой. При этом сварные швы получались пластичными, (но без указания каких-либо количественных параметров) а также упоминались сведения о защите металла при нагреве выше 650 °С. В этой же работе приведены данные о пайке циркония в вакууме или аргоне с использованием в качестве припоя Ag и Cu.

В работе [17] приведены данные о хорошей свариваемости циркония с помощью дуговой сваркой. Обоснованием этого стало незначительное коробления металла в процессе сварки за счет низкого коэффициента теплового расширения. Помимо этого, в сварном шве была обнаружена пористость, но как утверждают авторы ее можно устранить увеличением силы тока, уменьшением скорости сварки или применением предварительного подогрева. Однако выявлена основная проблема, встречающейся при сварке циркония, это загрязнения металла шва кислородом и азотом воздуха. Решение этого заключалось в защите зоны сварки инертными газами, которое приводило к усложнению оборудования и снижению производительности.

В работах, опубликованных в 1960-х годах [18, 19], также говорится о хорошей свариваемости циркония и советует проводить сварку в инертной атмосфере во избежание вредного загрязнения атмосферными газами. В качестве основного способа рекомендует аргоно-дуговую сварку с вольфрамовыми электродами. Также сообщается об успешном применении сварки давлением для соединения циркония с алюминием [18].

В 1970-х годах, кроме дуговой [20] и контактной сварки, для соединения циркония стали применять микроплазменную сварку [21]. Помимо этого в то время особую актуальность имела биметаллическое соединение циркония с нержавеющей стали [22], так как предполагалось одновременное использование этих материалов для изготовления элементов активной зоны ядерных реакторов. Однако основной проблемой биметаллического соединения являлось ухудшение прочностных свойств при повышенных температурах, в связи с образованием на границе раздела металлов хрупких интерметаллидных прослоек.

Одним из актуальных направлений исследования в 1980-х годах стало термическая обработка сварных соединений сплавов циркония системы *Zr-Nb*. Согласно [23], снижение механических и коррозионных свойств в таких соединениях связано наличием в сплавах полиморфного $\alpha \leftrightarrow \beta$ превращения, монотектоидного распада, а также переменной растворимости ниобия в цирконии, что обуславливает возникновение в металле шва и зоны термического влияния (ЗТВ) сварного соединения структурной и фазовой неоднородности. В ряде работ, которые обобщены в монографию [1], для повышения коррозионной стойкости сварных соединений сплавов *Zr-Nb* рекомендует отжиг в интервале температуры $(\alpha + \beta)_{Nb}$ -области диаграммы состояния. Однако необходимое время выдержки при таком отжиге составляет 50-100 ч., что является неэкономичным. Поэтому по итогам проведенного исследования в работе [23], авторы предлагают наиболее рациональное решение, это предварительный подогрев до 700-800 °С, охлаждение до температуры $(\alpha + \beta)_{Nb}$ – области со скоростью 5-100 °С/с и

выдержка в $(\alpha + \beta)_{Nb}$ – области в течение 20-25 ч. Кроме этого, согласно [24], значительное снижение пластичности, вязкости и коррозионной стойкости сварных соединений связано с насыщением металла шва и ЗТВ азотом и углеродом, а не азотом и кислородом как считали раньше. Поэтому их содержания в швах ограничили до следующих количеств (% по массе): $N_2 - 0,003$; $C - 0,03$. Также особое внимание уделяли к наводороживанию поверхностных слоев и стали применять механические способы очистки кромок перед сваркой вместо химической. Одним из основных способов сварки плавлением циркония и их сплавов стало электронно-лучевая, которое обеспечивало хорошее формирование швов без дефектов. При этом достаточно широко использовали точечную, шовную и диффузионную сварку.

В 1990-х годах основные направления исследования сварки циркония и его сплавов было связано с оптимизацией параметров процесса и последующей термообработкой, а также модернизацией оборудования [2, 25-29]. Актуальным в реакторостроении являлось герметизация ТВЭЛов, решением которого стало автоматизация процесса сварки [25]. В качестве основных способов применяли дуговую сварку вольфрамовым электродом в среде аргона и гелия [26-29], электронно-лучевую в вакууме, контактную – точечную, шовную и стыковую [2, 25], магнитно-импульсную, диффузионную в вакууме или инертном газе [30] и лазерную [27]. Основными проблемами в получении неразъемного соединения были: снижение коррозионной стойкости и пористость металла шва и ЗТВ, локальное несплавления, горячие трещины возникающие в твердой фазе, склонность ЗТВ гидридному растрескиванию и охрупчиванию.

Сварка аустенитных нержавеющей сталей начала развиваться в 1940-х годах, когда возникла необходимость в изготовлении высококачественных ответственных конструкций. Первоначальным и широко применяемым способом сварки была дуговая в инертных газах [31]. Дальнейшее развитие сварки аустенитных нержавеющей сталей в 1960-1970-х годах было связано с

началом формирования ракетно-космической техники, атомной энергетики, химическим производством и сверхзвуковой авиации, где требовалось применение новых конструкционных материалов для изготовления деталей работающих в экстремальных условиях [32].

Согласно многочисленным исследованиям [33-38], несмотря на сложный химический состав, нержавеющие аустенитные стали можно отнести хорошо свариваемым материалам. Однако, при сварке этих сталей в целях обеспечения требуемых свойств сварного соединения необходимо применять специальные меры, причиной которого является склонностью к горячим трещинам в металле шва и ЗТВ, а также после сварочного нагрева в высокотемпературной зоне могут образоваться δ -феррит, с выделением карбидов из аустенита, которое снижает стойкость против межкристаллитной коррозии.

Теплофизические свойства аустенитных сталей определяют некоторые особенности их сварки. Так, теплопроводность этих сталей примерно в 4 раза ниже, а коэффициент линейного расширения в 1,5 раза выше, чем у низкоуглеродистых сталей. При сварке это приводит при равных погонных энергиях к увеличению глубины проплавки основного металла и возрастанию деформаций и напряжений. Поэтому для уменьшения коробления изделий из аустенитных сталей применять режимы сварки которые отличаются пониженным током 10 .. 30 % по сравнению со сваркой углеродистых сталей. Поэтому, целесообразно использовать те виды сварки, при которых тепловложение на свариваемый металл будет минимальным. В настоящее время наиболее широко используют дуговую в защитных газах, электронно-лучевую и разные способы сварки давлением [38].

Для сварных соединений из аустенитных сталей применяется в основном два вида термической обработки: стабилизирующий отпуск и аустенизация (закалка) с целью [35]:

- снятия остаточных сварочных напряжений;

- обеспечения стойкости против межкристаллитной коррозии при эксплуатации в агрессивных средах;
- повышения жаропрочности и стойкости против локальных разрушений при эксплуатации в условиях высоких температур.

Согласно [37], для изготовления деталей и агрегатов работающих в активной зоне ядерного реактора в целях сохранения стойкости к межкристаллитной коррозии сварные швы подвергают стабилизирующему отжигу при 850-950 °С.

За последние годы, несмотря на более чем полувековой опыт сварки циркониевых сплавов и нержавеющей аустенитных сталей в реакторостроении, количество исследований значительно увеличилось. Во многом это обусловлено с увеличением кампании ядерного топлива и постоянно возрастающими требованиями к надежности и иным эксплуатационным характеристикам ТВС. Также не уменьшается количество ТВЭЛов с заводскими дефектами сварных соединений [39]. Поэтому в настоящее время большинство работ направлены на исследования и модернизацию технологий, используемых для герметизации ТВЭЛов. В частности это сварка неплавящимися электродами в аргоне и гелии [40-43], электронно-лучевая [40, 42, 44] и контактная стыковая [42, 43]. Помимо этого продолжаются работы по получению биметаллического соединения циркония с нержавеющей сталью, с применением промежуточной прослойки (из никеля, ниобия и ванадия) в твердой фазе [45].

Еще одним актуальным направлением исследования в настоящее время является изготовление ДР методами лазерной и контактной точечной сварки [46-54]. Однако применение лазерной сварки ограничивает малое количество исследований [55-61], при чем все опубликованные работы посвящены сплавам Циркалой. Исследований по лазерной сварке отечественных сплавов (Э110, Э125, Э635) практически нет. Поэтому для изготовления ДР в данное время остается предпочтительным точечная контактная сварка.

1.3 Особенности формирования сварного соединения при контактной точечной сварке

Технология контактной точечной сварки, производимой путем пропускания электрического тока через детали, сжатые с помощью токопроводящих электродов, была разработана более века назад и нашла широкое применение во многих отраслях промышленности. Характерным особенностью процесса является весьма малое время сварки при больших усилиях и токах, обеспечивающих плавления металла. При этом к необходимым условиям формирования соединения относится образование общей зоны расплавления заданных размеров (литого ядра), которое обеспечивает важнейшие эксплуатационные свойства – прочность и герметичность соединения [4, 62-64]. Конструктивные элементы и размеры сварных соединений, выполняемые контактной точечной сваркой, регламентированы согласно стандарту [65].

Согласно [63], цикл контактной точечной сварки в зависимости от особенностей протекания термомеханических процессов предлагается условно разделить во времени на несколько этапов, из которых можно выделить три основных.

Первый этап начинается в момент приложения к деталям сжимающего усилия и заканчивается при расплавлении основного металла. На этом этапе происходит пластическая деформация микронеровностей в контакте электрод-деталь и деталь-деталь. После включения электрического тока основной металл разогревается, выравнивается микрорельеф, разрушаются поверхностные пленки, формируется электрический контакт.

Второй этап начинается с момента расплавления металла и заканчивается выключением сварочного тока. На этом этапе происходит рост ядра сварной точки, перемешивание металла, продолжается разрушение поверхностных пленок и образование металлических связей в жидкой фазе, продолжается процесс пластической деформации и тепловое расширение.

Третий этап начинается после выключения тока. На этом этапе происходит охлаждение, кристаллизация и усадка металла, вследствие чего возникает остаточные напряжения и деформация.

Таким образом, исходным условием процесса контактной точечной сварки является наличие электрического контакта (первый этап) между поверхностями электрод-деталь и деталь-деталь. Однако реальные контактирующие поверхности всегда имеют микронеровности, которые в машиностроении характеризуют шероховатостью и волнистостью, параметры и терминология, которых регламентированы стандартами [66, 67]. Шероховатость и волнистость поверхностей существенно зависят от различного способа обработки, качества инструмента и материала. К примеру, поверхностной слой металла после механической обработки шлифованием насыщается структурными дефектами (дислокациями, вакансиями и др.), что в свою очередь влияет на электрический контакт поверхностей [62]. Поэтому при сжатии свариваемые детали контактируют между собой и электродами только по отдельным участкам, которые распределены неравномерно по всей поверхности контакта. В литературных источниках для суммы таких дискретных площадок введено понятие «фактическая площадь контакта». Фактическая площадь до включения сварочного тока значительно меньше контурной площади контакта, которая определяется диаметром электрода или диаметром уплотняющего пояска [63]. Авторы работы [68] утверждают, что фактическая площадь контакта составляет 1 .. 25 % от контурной.

Образование механических микроконтактов в контурной площади контакта еще не гарантирует наличие в нем электрической проводимости, поскольку реальные поверхности свариваемых деталей всегда покрыты окисной пленкой, которые имеет низкую электропроводность [62, 69-73]. Согласно [62], образовавшийся оксидный слой представляет собой особую физическую систему, которая непрерывно обменивается с металлом электрическими зарядами. Как утверждает автор работы [69, 73], процесс

окисления в основном имеет диффузионный характер, однако при температуре сварки он протекает настолько интенсивно, что даже в условиях быстрого нагрева, характерного для контактной сварки, окисление имеет практическое значение. Помимо этого, поверхности окисных пленок могут быть покрыты органическими веществами, парами воды, жировыми прослойками и прочими наслоениями [62, 63, 69, 73]. Полностью удалить такие наслоения в обычных условиях с поверхности свариваемых деталей практически невозможно никакими химическими, физическими и механическими средствами [62]. Тем не менее, перед сваркой, необходимо проводить подготовку поверхностей деталей травлением или механическими способами [63, 70].

Электрическая проводимость контактных поверхностей характеризуется электрическим сопротивлением. Как отмечалось выше, наличие контактных сопротивлений обусловлено снижением токопроводящего сечения, вследствие относительно небольшой площади электрического контакта по сравнению с номинальной, а также неровностями поверхностей деталей и электродов, различными неэлектропроводными наслоениями. В свою очередь начальная величина и стабильность контактных сопротивлений значительно влияет на тепловложения в процессе сварки и на качество готового соединения. Это подтверждено многочисленными результатами исследований процесса контактной точечной сварки [62-64, 72, 74, 75].

Из выше перечисленного можно сделать вывод, что формирование электрического контакта в зоне электрод-деталь и деталь-деталь с исходными стабильными параметрами представляет сложную задачу, так как зависит от большого числа переменных факторов (макро- и микрогеометрии поверхностей деталей, усилия сжатия электродов и их геометрия рабочей поверхности, наличие поверхностных пленок и др.), которые на практике зачастую носят случайный характер.

В момент включения сварочного тока начинается самый не стабильный период формирования литого ядра. Согласно [62], усилия сжатия электродов, при любой его программе приложения, не способны заметно изменить электрическое сопротивление микропирамид против того значения, которое определилось первоначально. Авторы работы [76] утверждают, что в условиях сжатия электродов при невысоких температурах, контактных поверхностях происходит деформационное упрочнение микропирамид (в 1,6 .. 2,4 раза), разупрочнение которых происходит только после нагрева до температуры выше 0,5 температуры плавления металла. Кроме этого из-за разного размера и степени деформации микропирамид, кривизна линий тока, вызывая ситочную проводимость, усиливается еще сильнее, которая в свою очередь значительно влияет на величину контактного сопротивления [4, 62, 63, 77].

По мере прохождения сварочного тока через контактирующие микропирамиды происходит нагрев и идет интенсивное формирование общей зоны расплавления, которая начиная с центра соединения, расширяется к периферии. В начальной стадии нагрева окисные пленки и поверхностные загрязнения частично выдавливаются к периферии, по мере прохождения тока часть их распределяются по всему объему литого ядра за счет перемешивания. Одновременно с расплавлением, значительное количество тепла (более 50 %) отводится в электроды, свариваемые детали и окружающую среду.

Величина контактного сопротивления после включения тока при определенных критических температурах (характерных для свариваемого металла) резко снижается. Это обусловлено с нагреванием микроконтактов и снижением сопротивления пластической деформации металла, что в свою очередь ведет к облегчению условия разрушения поверхностной пленки. Дальнейшее сопротивление между электродами в основном определяется сопротивлением самих деталей, которое при нагреве увеличивается, за счет увеличения удельного электросопротивления металла. Однако это

увеличение не компенсирует общую величину сопротивления между электродами. Таким образом, кинетика изменения общего сопротивления обычно имеет падающую характеристику [63, 64, 78].

Как известно в процессе плавления металла его объем резко увеличивается. В условиях точечной сварки, из-за неравномерного температурного поля, увеличения объема металла происходит преимущественно в направлении оси электродов, так как вокруг периметра литого ядра сдерживается более холодным металлом свариваемых деталей. В результате объемных изменений возникает дополнительные усилия, внутри формирующегося литого ядра, которая значительно превышает силу сжатия электродов. Такое тепловое расширение металла вызывает раздвигание электродов. Как утверждает автор работы [63], заметное перемещение электродов наблюдается с момента включения тока, а максимальное значение достигается в момент выключения.

С процессом нагрева одновременно продолжается пластическая деформация в зоне соединения за счет усилия электродов. В результате, которого формируется уплотняющий пояс по периметру контакта деталь-деталь. Уплотняющий пояс удерживает жидкий металл в ядре и герметизирует его от взаимодействия с атмосферой, предохраняя металл от выплесков. Согласно [79], основная причина появления выплеска связано с отставанием скорости деформации от скорости нагрева. Начальные выплески объясняется перегревом отдельных участков (локальных контактов) относительно малой площади из-за перекоса электродов, плохой подготовки поверхностей. Вероятность появления их возрастает при использовании жестких режимов сварки и небольших усилиях.

Основные физические процессы, протекающие в расплавленном ядре, наиболее подробно описаны в работе [63]. Расплавленный металл литого ядра под действием электромагнитных сил, возникающих от взаимодействия сварочного тока с его собственным электромагнитным полем, начинает перемешиваться, тем самым разрушая оксидные пленки. Такие объемные

силы достигают максимального значения на периферии ядра и снижаются до нуля в центре. В большинстве случаев литое ядро имеет форму эллипсоида, поэтому в расплавленном металле возникают градиенты давления в горизонтальном и вертикальном направлениях. Под действием этих градиентов слои жидкости циркулируют к периферии ядра, а затем по границе ядра возвращается к центру.

После выключения сварочного тока или уменьшения его до определенного значения, происходит охлаждение расплавленного ядра и последующая кристаллизация, которое сопровождается уменьшением объема расплавленного металла. В зоне сварки возникают остаточные напряжения, и происходит усадка металла. Для снижения уровня этих напряжений и предотвращения образования усадочных трещин и раковин, как правило, после выключения тока прикладываемое усилия сжатия электродов оставляют на некоторое время или увеличивают для проковки соединения [4, 62-64].

Согласно многочисленным исследованиям [62-64, 80], после кристаллизации литое ядро имеет дендритную структуру, вследствие высоких скоростей охлаждения. При дендритной кристаллизации снижается пластичность металла, причиной которого является скапливание хрупких, легкоплавких сплавов в центре ядра [63]. Для получения более однородного по составу ядра и прочного соединения, предпочтительна структура в форме равноосных кристаллов [63]. Размеры дендритов и ЗТВ напрямую зависят от режима сварки. Так как продолжительное воздействие высокой температурой приводят к росту зерен и тепловому охрупчиванию ЗТВ [81].

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод, что качество соединения при контактной точечной сварке, во многом определяется начальными условиями: состоянием свариваемых поверхностей (которые изменяются от партии к партии деталей, окисные пленки, различные поверхностные наслоения), величиной и стабильностью начального контактного сопротивления (которое определяется

теплофизическими свойствами свариваемых деталей, макро- и микрогеометрией поверхностей, усилием сжатия электродов, а также их геометрией рабочей поверхности). Для стабилизации начальных условий и дальнейшего тепловыделения наиболее широко применяют подогревающий импульс тока [4, 62]. Это особенно актуально при контактной точечной сварке деталей малых толщин (менее 0,5 мм), где значения первоначальных сопротивлений оказывает наиболее критическое влияние на характеристики соединений [47-53].

1.4 Особенности контактной точечной сварки тонкостенных деталей

Точечная контактная микросварка является эффективным методом получения неразъемного соединения, деталей толщиной от нескольких микрометров до 0,5 мм. Отличия от сварки толстостенных деталей заключаются в более интенсивном отводе теплоты, выделенной в зоне сварки, в электроды и окружающую среду. Кроме этого, скорости нагрева и охлаждения гораздо выше, а температурные поля более неравномерные из-за малой тепловой инерции свариваемых деталей. В связи с перечисленными особенностями, контактная точечная сварка деталей малых толщин была изначально выделена в отдельное направление исследований [4, 82], широко развитое к настоящему времени [83-92].

В работе [82] авторами утверждается, что основной нагрев происходит в контакте между свариваемыми деталями, а тепловыделение в металле деталей незначительно ввиду их малой толщиной. Помимо этого согласно работе [4], скорость охлаждения зоны сварки при точечной микросварке значительно превышает скорость ее нагрева.

В работах [91, 92] приведены данные о том, что при точечной микросварке наиболее значительно роль контактного сопротивления деталь-деталь, так как собственные сопротивления деталей не превышает 5% от общего сопротивления электрод-электрод, ввиду их малой толщиной. Как

известно, при сварке деталей больших толщин контактное сопротивление зоны электрод-деталь примерно в 2 раза меньше контактного сопротивления деталь-деталь [64, 69].

Согласно работе [82], поверхностные пленки свариваемых деталей в начале процесса точечной микросварки быстро разрушаются за счет теплового пробоя и контактное сопротивление не оказывает дальнейшего влияния на формирование соединения. Однако как утверждает авторы этой же работы, анализ экспериментальных данных не позволил установить закономерность между постоянством тока и постоянством контактного сопротивления в зоне деталь-деталь в холодном состоянии, но при этом достоверно известно, что с увеличением разброса значений тока, увеличивается разброс прочностных характеристик соединений.

При точечной микросварке рекомендовано использовать электроды со сферической рабочей поверхностью [4, 82]. Это обусловлено тем, что они менее чувствительны к перекосам осей при установке в привод сжатия, что особенно важно, учитывая малые размеры свариваемых деталей и вторичного контура машины контактной сварки. Кроме того, ток в основном проходит через центральные участки контакта (при использовании электродов с плоской поверхностью ток концентрируется на периферии, вследствие чего возможен кольцевой прожог в начальный период формирования соединения).

Использование при контактной точечной сварке тонкостенных деталей обычных контактных машин с синусоидальной формой импульса сварочного тока нецелесообразно. Это связано с тем, что детали свариваются на первой полусинусоиде и все последующие импульсы только подогревают уже сформировавшееся литое ядро [4, 82]. Многие годы для данной технологии использовали конденсаторные сварочные машины, формирующие униполярные импульсы тока [4, 82, 93]. В последнее время вместо них все больше используют оборудование с инверторными

источниками питания, позволяющими задавать необходимые АВП импульса тока [47, 90].

К сожалению, тепловые процессы при точечной микросварке недостаточно изучены, в связи с определенными трудностями. Размеры сварной точки не позволяет измерить температуру в зоне сварки с помощью термопары, потому что их размеры соизмеримы, вследствие чего искажается физическая картина тепловых процессов [82]. Применение фотоэлектрических способов измерения температуры не позволяет получить достоверные результаты, ввиду заложенных в него грубых допущений [4].

В настоящее время актуальным направлениям исследований в области точечной микросварки является оптимизация режимов процесса, что обусловлено с большим разнообразием форм, размеров сочетаний толщины и материалов деталей, применяемых в автомобилестроение, аэрокосмической индустрии, атомной энергетике и т. д., а также отсутствием четких рекомендации по выбору параметров режима для конкретных материалов с толщиной менее 0,5 мм (титана, нержавеющей стали, циркония, алюминия). Последние годы, значительно выросло число опубликованных работ по оптимизации параметров режима точечной микросварки, основанных на статистических методах планирования эксперимента. Ниже приведен, кратки обзор работ опубликованных за последние десять лет.

В работе [88], авторы провели многофакторный эксперимент методом поверхностного отклика (Response Surface Methodology) для нахождения оптимальных параметров при точечной микросварке листов из титанового сплава TC2 с толщиной 0,4 мм. Из анализа результатов эксперимента, авторы утверждают, что сварочный ток наиболее значительно влияет на прочность соединения, но при этом с увеличением величины тока прочность соединения увеличивается до определенного момента (до 2,4 кА), потом снижается. Рекомендуют следующие оптимальные значения параметров сварки: сила тока 2,4 кА, время сварки 9,54 мс, усилия сжатия электродов 127 Н и диаметр электродов 3 мм. Аналогичный эксперимент был проведен

авторами работы [85], но с использованием метода генетического алгоритма, где в качестве оптимальных параметров рекомендует следующие значения: сила тока 1,83 кА, время сварки 11,4 мс, усилия сжатия электродов 210 Н и диаметр электродов 3 мм.

В работе [84], более подробно рассмотрены взаимодействие основных параметров режима при точечной микросварке листов из титанового сплава, толщиной 0,4 мм с помощью анализа главных компонент (Principal component analysis). Из анализа результатов авторы пришли к выводу, что наиболее значительно на прочностные характеристики соединения влияет взаимодействие сварочного тока и усилия сжатия электродов по сравнению с взаимодействием сварочного тока и временем сварки, но при этом рекомендует подбирать конкретную величину комбинаций параметров в зависимости от требуемого размера литого ядра.

Авторами работы [89], был проведен многофакторный эксперимент для определения влияния параметров режима точечной микросварки на свариваемость металлической фольги Ti-1Al-1Mn с толщиной 0,05 мм. Из анализа полученных результатов, авторы утверждают, что для деталей с толщиной 0,05 мм, передний фронт сварочного импульса не влияет на качество соединения, а также рекомендуют следующие оптимальные значения параметров режима: время сварки 6 мс, усилия сжатия электродов 17,6 Н, сварочный ток 600 А. При этом наблюдали увеличение микротвердости в литом ядре, за счет образования мартенсита, также величина ЗТВ больше по сравнению со сваркой толстостенных деталей из титана.

В работе [83], авторы исследовали влияние параметров режима сварки на динамику изменения сопротивления между электродами и на прочность соединения при точечной микросварке листов из титанового сплава с толщиной 0,4 мм. С помощью анализа главных компонент авторами найдено уравнения регрессии, которое можно применять для

прогнозирования размера литого ядра, а также для прочности соединения при растяжений.

Таким образом, обобщая приведенные данные можно сделать вывод, что основными направлениями исследований, направленных на повышение стабильности качества и достоверности методов контроля соединений, выполненных контактной точечной микросваркой, являются:

1. определение оптимальных технологических параметров режимов сварки новых конструкционных материалов (в том числе при помощи компьютерного моделирования термомеханических процессов методом конечных элементов);
2. повышение достоверности оценки качества формируемых соединений по обратной связи (динамике изменения сопротивления, тепловому расширению металла, ускорению подвижного электрода, прямому или косвенному измерению температуры свариваемых деталей и т.п.), а также оптимизация технологии неразрушающего контроля сварных соединений;
3. управление процессом сварки путем стабилизации одного или нескольких параметров режима сварки (сварочного тока, напряжения, введенной энергии), а также программным изменением во времени ввода энергии или усилия сжатия электродов.

Однако, следует отметить, что несмотря на гигантский объем работы, проделанный многими исследователями более, чем за век работы над изучением процессов, протекающих при данном способе сварки, до настоящего времени остается множество вопросов, на которые не получено ответов. Большинство из них связано со сложной взаимосвязью между свойствами формируемых сварных соединений, алгоритмом ввода энергии в зону сварки, параметрами свариваемых деталей (материал, геометрические размеры, состояние поверхности и т. д.), а также геометрическими размерами рабочей поверхности электродов и усилием их сжатия.

1.5 Расчетные методы оценки сопротивления между электродами

Достоверно известно, что на геометрические размеры, структуру и иные эксплуатационные характеристики сварного соединения напрямую оказывает влияние количество тепла Q , выделившегося по закону Джоуля за время сварки t при прохождении тока I на участке между электродами, обладающим электрическим сопротивлением R [62-64]:

$$Q = \int_0^t I^2(t) \cdot R(t) \cdot dt \quad (1.1)$$

Электрическое сопротивление R , в свою очередь, состоит из сопротивлений основного металла свариваемых деталей, контактных сопротивлений между деталями и электродами, а также непосредственно между деталями. Значения всех перечисленных составляющих изменяются в процессе сварки и характеризуются значительной неопределенностью. Наибольший вклад в разброс значений R вносят первоначальные контактные сопротивления, зависящие от следующих факторов:

- материала электродов, геометрии их рабочей поверхности и усилия сжатия;
- материала и толщины свариваемых деталей;
- состояния контактирующих поверхностей;
- износа элементов вторичного контура контактных машин и т. д.

Значительное количество реально возможных комбинаций этих факторов является одной из основных причин отсутствия стабильности количества выделенного в зоне сварки тепла и, как следствие, характеристик сварного соединения. Во многом это объясняется варьированием толщины и состояния поверхности свариваемых деталей от партии к партии, изменением геометрии электродов в процессе их износа, изменении усилия сжатия из-за нестабильной работы гидравлической или вакуумной системы сварочного оборудования, а также перекоса устанавливаемых во вторичный контур свариваемых деталей. Для снижения разброса значений контактных

сопротивлений предложено использовать подогревающий импульс тока относительно небольшой амплитуды и длительности [3]. В процессе предварительного подогрева зоны сварки деформируются микровыступы и разрушаются оксидные пленки, что приводит к уменьшению и стабилизации начальных значений переходных сопротивлений. Благодаря этому при сварке снижается нестабильность тепловыделения и уменьшается вероятность местного перегрева металла, приводящего к выплескам. При плавном нарастании тока его плотность в контактах микропирамид значительно меньше критических значений, приводящих к взрыву (выплеску) определенного объема металла в области стягивания. В этом случае разрушение оксидных пленок и смятие микровыступов протекает дольше и обеспечивает плавное формирование сварного соединения. В результате снижается рассеяние и абсолютные значения контактного сопротивления перед основной стадией процесса.

Для оценки влияния перечисленных выше параметров разработано множество методик моделирования электрического контакта шероховатых поверхностей [4, 63, 69, 94-100], однако вопрос достоверности получаемых расчетных результатов остается открытым. Кроме того, приведенные в этих монографиях и обзорах методики не позволяют объективно оценить, в какой степени каждый из перечисленных ранее факторов оказывает влияние на контактное сопротивление.

По мнению авторов работы [63] основная роль тепловыделения отводится собственному сопротивлению двух деталей:

$$R = \rho \cdot \frac{2 \cdot \delta}{S} \quad (1.2)$$

где ρ – удельное электросопротивление металла, Ом·мм;

δ – толщина детали, мм;

S – площадь сечения детали, по которому протекает сварочный ток, мм².

С этой методикой определения сопротивления между электродами согласны авторы работ [4, 69, 94]. Однако они предложили дополнить

уравнение (1.2) коэффициентом k , учитывающим растекание сварочного тока в деталях:

$$R = k \cdot \rho \cdot \frac{2 \cdot \delta}{S} \quad (1.3)$$

В работе [95] сопротивление участка электрод-электрод вычисляли по выражению:

$$R = \rho \sqrt{\frac{\sigma_{\delta}^*}{F}} \quad (1.4)$$

где σ_{δ}^* – сопротивление пластической деформации металла, Н/мм²;

F – усилие сжатия электродов, Н.

Авторы работы [96] для определения R предлагают учитывать сопротивления поверхностной оксидной пленки:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot r} + \frac{\rho_f \cdot S \cdot n \cdot HV}{F} \quad (1.5)$$

где ρ_f – удельное электросопротивление поверхностной пленки, Ом·мм;

r – радиус контактной поверхности, мм;

n – количество контактирующих точек (для шероховатых поверхностей $n \rightarrow 3$);

HV – микротвердость соединяемого металла, Па.

В работе [97], сопротивление на участке электрод-электрод рассчитывали по выражению:

$$R = \frac{\rho}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot HV \cdot (T_f - T)}{3 \cdot F \cdot (T_f - T_0)}} \cdot \frac{T}{T_0} \quad (1.6)$$

где HV – твердость металла свариваемых деталей, Па;

T_f – температура плавления свариваемых металлов, °С;

T_0 – температура окружающей среды, °С;

T – температура в момент прохождения сварочного тока, °С.

Также автор работы [98] разработал программное обеспечение SORPAS® для расчета R при контактной точечной сварке, в которой использовал следующую зависимость:

$$R = \frac{1}{\delta} \cdot \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{4} + \rho_f \right) \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \pi \cdot \sigma_{\partial}^*}{F}} \quad (1.7)$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельное электросопротивление свариваемых деталей, Ом·мм.

Таким образом, проведенный анализ литературных источников показывает, что предложенные разными авторами методика оценки общего сопротивления, значительно различаются, также существует расхождение экспериментальных и расчетных данных [99, 100].

2 Материалы и методы исследования

2.1 Циркониевый сплав Э110

На рисунке 2.1 приведена диаграмма состояния для сплавов системы *Zr-Nb*. Точное положение линий на диаграмме состояний зависит от содержания примесей, особенно от кислорода [1, 10, 101].

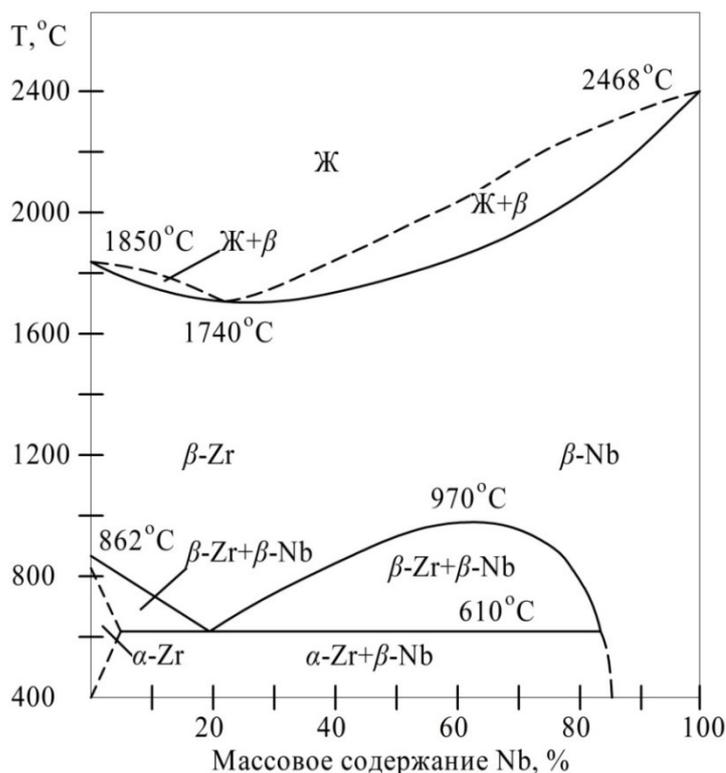


Рисунок 2.1 – Фазовая диаграмма цирконий-ниобий [4]

При комнатной температуре в равновесном состоянии сплавы *Zr-Nb* имеют двухфазное строение, который состоит из α_{Zr} (с содержанием ниобия в твердом растворе $\alpha_{Zr} - 0,6\%$) и β_{Nb} (с содержанием циркония в $\beta_{Nb} - 10..15\%$). α_{Zr} – низкотемпературное состояние циркония, имеет гексагональную плотноупакованную решетку [1, 10, 101-103]. Согласно [103], 1% ниобия в твердом растворе α_{Zr} не вносит заметного изменение параметров решетки, в частности отношения a/c , его значение у сплава *Zr-1%Nb* равное 1,59271 сравнимо со значением 1,5931 для чистого циркония. Поэтому сплав Э110 по характеру текстуры и анизотропии

приближен к чистому цирконию, который в значительной степени меняет текстуру в процессе обработки давлением.

Легирование 1% ниобием сплава Э110 объясняется следующими причинами [1]:

- ниобий имеет очень небольшое сечение захвата нейтронов, поэтому добавление в количестве 1% процента не повышает сечения захвата сплава;
- 1% ниобий стабилизирует коррозионную стойкость нелегированного циркония, устраняет вредное влияние малых количеств таких примесей, как углерод, алюминий, титан, имеющихся в реакторно-чистом цирконий;
- ниобий эффективно снижает долю водорода, поглощаемую циркониевым сплавом;
- ниобий образует с β -фазой циркония ряд твердых растворов, что объясняется одинаковыми кристаллическими решетками и очень близкими атомными радиусами;

Основным недостатком сплава Э110 является большая зависимость коррозионных свойств от режима термообработки. Согласно [1, 10, 101-103], в процессе высокотемпературной закалки или при ее старении после закалки может образовываться метастабильная ω -фаза, имеющая нестабильную и часто низкую коррозионную стойкость. Это обстоятельство не позволяет использовать возможности системы $Zr-Nb$ для получения высокой прочности сплавов и ограничивает использование сплавов для реакторных целей только в равновесном состоянии путем термообработки в температурной области существования α -фазы (до 600 °С) после холодной обработки давлением [1].

Массовая доля элементов в сплаве Э110 приведено в таблицах 2.1 и 2.2, теплофизические свойства в таблице 2.3, механические свойства в таблице 2.4.

Твердость по Бринелю сплава Э110 составляет 1500 .. 1700 МПа [12], коэффициент Пуансона в диапазоне температур от 20 до 700 °С равно

0,38 [104], модуль Юнга при комнатной температуре равно 91000 .. 97000 МПа [104], модуль упругости при 20 °С – 93600 МПа, при 320 °С – 76200 МПа [105, 106].

Таблица 2.1 – Массовая доля элементов, % в сплаве Э110, ТУ 95.166-83 [107]

Nb	Sn	Fe	Cr	O	C	Si	N	Cu	Zr
0,95 – 1,05	0,05	0,05	≤ 0,02	0,005 – 0,010	0,005 – 0,010	0,005 – 0,010	0,003 – 0,006	–	основа

Таблица 2.2 – Массовая доля элементов, % в сплаве Э110, ТУ 001.392-2006 [107]

Nb	Sn	Fe	Cr	O	C	Si	N	Cu	Zr
0,95 – 1,05	0,05	0,05	≤ 0,02	≤ 0,09	≤ 0,02	0,005 – 0,010	≤ 0,006	≤ 0,005	основа

Таблица 2.3 – Теплофизические свойства сплава Э110 [1, 107-109]

Температура, °С	20	100	200	300	400	500	600	700	800
Коэффициент линейного расширения α , $10^{-6} 1 / ^\circ\text{C}$	5,8	6,0	6,2	6,3	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2
Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	17,2	18,0	19,3	20,1	20,5	20,9	21,8	22,9	–
Теплоемкость C , Дж/(кг·°С)	–	285	301	322	343	398	448	–	–
Плотность γ , кг/м ³	6550	–	–	–	–	–	–	–	–
Удельное электрическое сопротивление ρ , нОм·м	439	547	730	861	972	1082	1134	1192	1223

Таблица 2.4 – Механические свойства сплава Э110 [11, 18, 107]

Температура, °С	20	350	380	420
σ_B , МПа	372	196	182	174
$\sigma_{0,2}$, МПа	294	159	143	142
σ_T , МПа	204	–	–	–
δ , %	32±2	38±3	40	40

2.2 Аустенитная нержавеющая сталь 12X18Н10Т

Согласно [38] фазовое и структурное состояние высоколегированных хромоникелевых рассматривают в виде псевдобинарных разрезов тройных систем, обычно *Fe-Cr-Ni* с углеродом (рис. 2.2). В соответствии с диаграммой для сплава I-I, содержащего 0,1 % С, возможны следующие превращения. При очень медленном охлаждении по достижении температуры, отвечающей точке 1 на линий ликвидус, из жидкого расплава вначале начинают выпадать кристаллы первичного феррита (δ -железа), а по мере охлаждения от точки 2 и ниже – выпадение кристаллов легированного аустенита, имеющего гранцентрированную решетку -железа. При дальнейшем охлаждении в точке 3 происходит превращение $\delta \rightarrow \gamma$, и сталь приобретает аустенитную структуру. Далее в условиях медленного охлаждения стали ниже точки 4 из аустенита вследствие уменьшения в нем предельной растворимости (линия ESP) начинает выделяться углерод в виде химического соединения – карбидов хрома типа $Cr_{23}C_6$, располагающихся преимущественно по границам зерен. Поэтому дальнейшее охлаждение ниже точки 5 (линия SK) из-за уменьшения устойчивости аустенита приводит к выпадению по границам зерен вторичного феррита ($\gamma \rightarrow \alpha$). Таким образом, хромоникелевая сталь 12X18Н10Т в условиях медленного охлаждения приобретает при комнатной температуре аустенитную структуру с расположенными по границам зерен вторичными карбидами и ферритом, упрочняющими металл.

Массовая доля элементов в стали 12X18Н10Т приведено в таблице 2.5, теплофизические свойства в таблице 2.6, механические свойства в таблице 2.7.

Таблица 2.5 – Химический состав стали 12X18Н10Т, % (ГОСТ 5632 – 72) [107]

C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	S	P	Cu
не более						не более		
0,12	0,80	2,00	17-19	9-11	5С-0,8	0,020	0,035	0,30

Таблица 2.7 – Механические свойства стали 12X18H10T [107]

Температура испытания, °С	$\delta_{0,2}$	δ_B	δ_5	Ψ	КСУ, Дж/см ²
	МПа		%		
20	275	610	41	63	245
300	200	450	31	65	–
400	175	440	31	65	313
500	175	440	29	65	363
600	175	390	25	61	353
700	160	270	26	59	333

Твердость по Бринелю стали 12X18H10T составляет 179 МПа [107], коэффициент Пуансона в диапазоне температур от 20 до 700 °С равно 0,35 [108], модуль упругости при 20 °С – 20190 МПа [110].

2.3 Сварочный комплекс

Экспериментальное определение начальных сопротивлений между электродами и стабилизацию их значений подогревающим модулированным импульсом тока проводили на специальном сварочном комплексе, который состоит из источника питания ИПТКМ-10, позволяющий задавать необходимый импульс тока с требуемыми АВП (рис. 2.3) и механизма сжатия от контактной машины МТТ-02 (рис. 2.4) [111]. Форму и АВП импульса тока задавали через встроенный компьютер источника питания с помощью программы «Create FIT UNI», разработанной специалистами ОАО «НЗХК». Основные технические характеристики источника питания ИПТКМ-10 приведены в таблице 2.8.

Регистрацию тока и напряжения проводили с помощью цифрового осциллографа марки RIGOL MSO 1074. Осциллограф подключали к выходным шинам источника питания через активное сопротивление 159 мкОм (рис. 2.4).

Контактную машину МТТ-02 использовали в качестве механизма сжатия, связи с этим была проведена следующая модернизация (рис.2.4):

- проводили наладку усилия сжатия электродов с расширением диапазона от 0 до 400 Н;
- обеспечили токоподвод от источника питания ИПТКМ-10 на электрододержатели.

Использовали электроды из сплава БрХЦР со сферической рабочей поверхностью. Детальями являлись ячейки для производства дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок ядерных реакторов из циркониевого сплава Э110 толщиной 0,25±0,25 мм, а также аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 0,30±0,30 мм (рис. 2.5). Использовали ячейки из разных партий заводской поставки, которые выбирали случайным образом. На всех отсутствовали видимые дефекты, следы загрязнения и окисления поверхности. Непосредственно перед экспериментами контактирующие поверхности обезжиривали этиловым спиртом.

Таблица 2.8 – Технические характеристики источника питания ИПТКМ-10

Напряжение питающей сети, В	3 × 380
Частота переменного тока сети, Гц	50
Пределы регулирования амплитудного значения тока, кА	0,125 .. 5
Пределы регулирования длительности импульса тока, мс	1 .. 100
Дискретность регулирования амплитудного значения тока, А	125
Дискретность регулирования длительности импульса тока, мс	0,1
Производительность, сварок в час (не менее)	1500
Время готовности к следующей сварке, с (не менее)	0,5
Гарантированный ресурс работы, час (не менее)	10000



Рисунок 2.3 – Внешний вид источника питания ИПТКМ-10



Рисунок 2.4 – Механизм сжатия МТТ-02 и цифровой осциллограф RIGOL MSO 1074

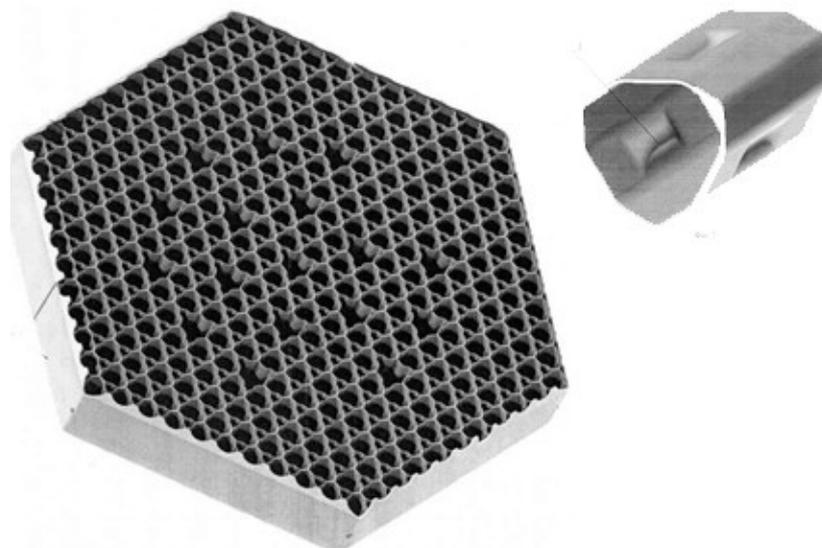


Рисунок 2.5 – Внешний вид ДР и ячейки

2.5 Методика многофакторного эксперимента

С целью определения наиболее рациональных параметров подогревающего импульса тока для стабилизации сопротивления между электродами был проведен многофакторный эксперимент.

Согласно [112, 113], при многофакторном эксперименте можно изменять значение не одного, а сразу нескольких факторов и оценивать их влияние на процесс. В качестве факторов в данном случае выступали параметры режима подогревающей стадии сварки, которым предъявляют следующие требования: управляемость и однозначность. Учитывая эти требования, в качестве входных факторов влияющих на общее сопротивление выбрали (см. рис. 2.6):

- Усилия сжатия электродов от 200 до 400 Н, изменяемые с дискретностью 50 Н.
- Радиусы рабочей поверхности электродов 15, 20 и 25 мм.
- Представленные на рисунке 2.7 алгоритмы модуляции подогревающего импульса тока с дискретным (режимы 1 и 3) и ступенчатым (режимы 3 и 4), а также резким (рис. 2.7, а) и плавным (рис. 2.7, б) его повышением. Общее тепловложение во всех исследованных случаях было соизмеримым.

Комбинацию параметров осуществляли в следующем порядке: для каждого радиуса рабочей поверхности электродов по алгоритмам модуляции подогревающего тока изменяли усилия сжатия. В целях определения разброса значения сопротивления опыты проводили по 10 раз для каждой комбинации, общее количество опытов 1200.

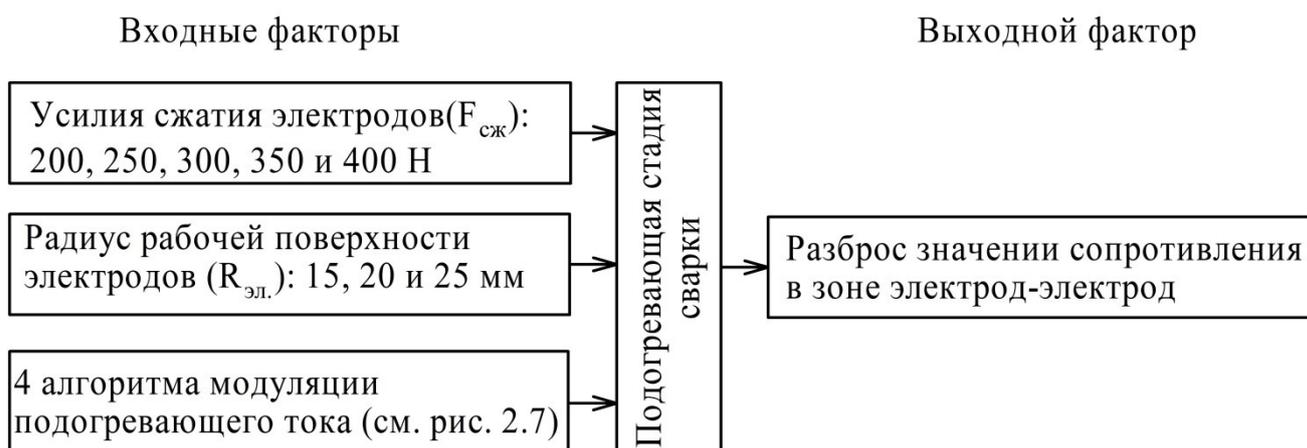
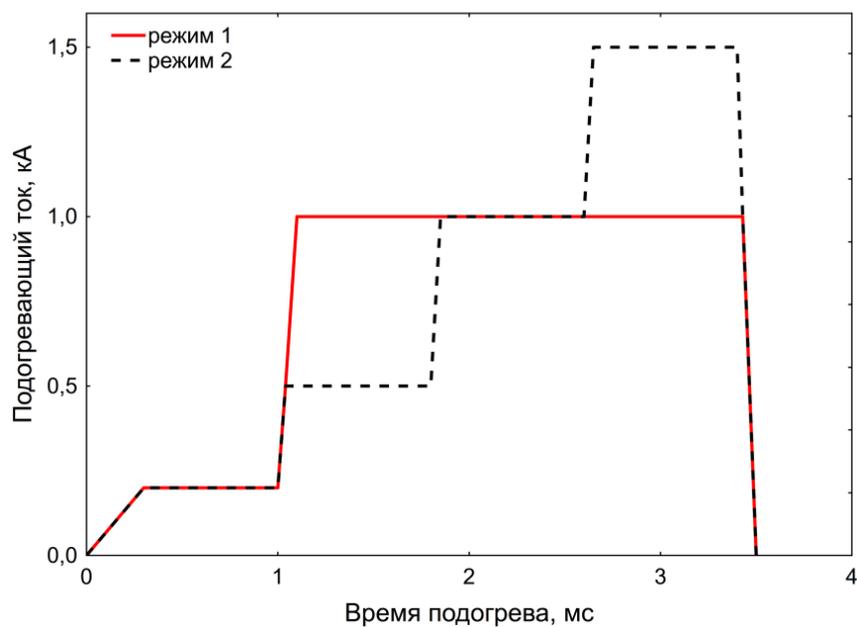
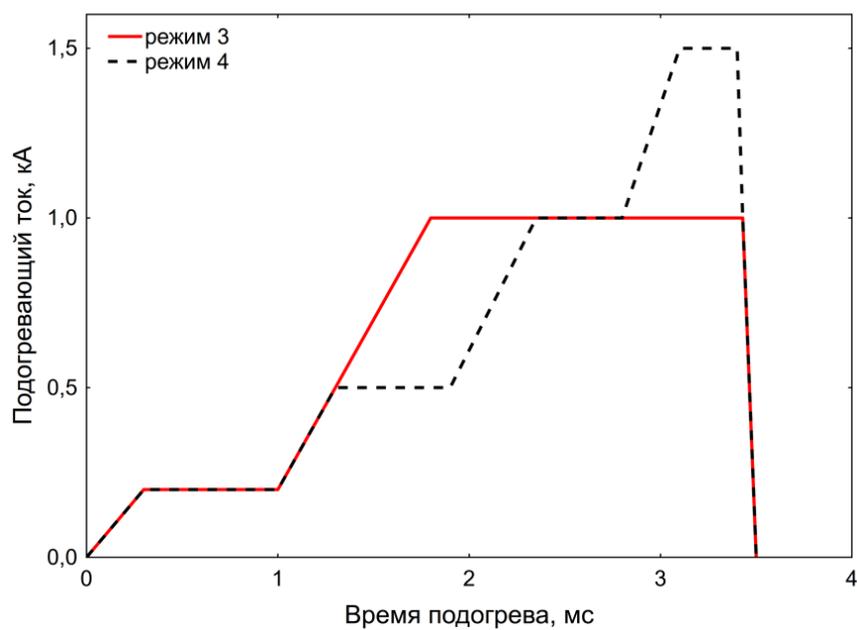


Рисунок 2.6 – Схема многофакторного эксперимента

Сопротивление участка между электродами вычисляли по закону Ома с использованием измеренных значений тока и напряжения (по десять раз для каждой комбинации входных параметров). Данные предварительно обрабатывали методом «сглаживания по трем точкам» с помощью ПО MS Excel. Начальное сопротивление между электродами определяли через 0,5 мс (с целью завершения переходных процессов во вторичном контуре) после включения тока на минимально возможном значении 125 А. Конечное сопротивление оценивали непосредственно перед отключением тока длительностью 3,5 мс в соответствии с циклограммами, приведенными на рис. 2.7. Все теоретические расчеты по оценке начальных значений сопротивления между электродами производили с использованием ПО Mathcad V15.



а



б

Рисунок 2.7 – Алгоритмы модуляции подогревающего импульса тока с дискретным (режимы 1 и 3) и ступенчатым (режимы 3 и 4): а) режим б) плавным повышением

2.6 Методика статистической обработки экспериментальных данных

Для анализа данных и представления полученных результатов использовали ПО STATISTCA. Методика статистической обработки

экспериментальных данных состоит из двух этапов: до подогревающего импульса и после.

До подогревающего импульса. Примененные в данном эксперименте алгоритмы модуляции подогревающего импульса тока (рис. 2.7) имеет начальную одинаковую ступень в промежуток времени от 0 до 1,0 мс. В связи с этим, для оценки влияния параметров сварки (усилия сжатия и радиуса рабочей поверхности электродов) на начальное значение сопротивления между электродами (в момент времени 0,5 мс), объединили экспериментальные значения сопротивления по соответствующему материалу (сплав Э110 и сталь 12Х18Н10Т), радиусу рабочей поверхности электродов (15, 20 и 25 мм) и усилию сжатия (200, 250, 300, 350 и 400 Н). В итоге составили 15 выборок с объемом 40 для каждого материала, различающиеся по радиусу рабочей поверхности электродов и усилию сжатия. Для каждой выборки построили распределение данных с интервалом группирования 4. Для количественной оценки разброса сопротивления рассчитали числовые характеристики выборок, в частности это математическое ожидание (среднее значение) и дисперсию. Для оценки степени влияния усилия сжатия и радиуса рабочей поверхности электродов на начальное сопротивление определили коэффициенты корреляций между дисперсией и усилием сжатия, а также между дисперсией и радиусом рабочей поверхности электродов. Полученные экспериментальные значения начальных сопротивлений сравнили с теоритический рассчитанными данными.

После подогревающего импульса. По алгоритмам подогревающего импульса тока для каждой комбинации материала, усилия сжатия и радиуса рабочей поверхности электродов составили 120 выборок с объемом 10 после этапа подогрева в момент времени 3,5 мс. Для количественной оценки разброса сопротивления после подогревающего импульса также рассчитали числовые характеристики выборок: математическое ожидание и дисперсию.

3 Результаты проведенного эксперимента

3.1 Сравнительная оценка расчетных методов и экспериментальных значений начального сопротивления между электродами

На основании обзора приведенный в разделе 1.5 был проведен сравнительный анализ между расчетными методами и начальными (после 0,5 мс) экспериментальными значениями сопротивления в зоне электрод-электрод. В результате, которого были определены:

- диапазон изменения значений токопроводящего сечения деталей (S) по мере увеличения усилия сжатия (F) и радиуса рабочей сферы электродов ($R_{эл}$);
- диапазон изменения сопротивления в зоне электрод-электрод ($R_{ээ}$) по мере изменения токопроводящего сечения и параметров режима подогрева.

Площадь сечения детали, по которому протекает сварочный ток S , определяли по уравнения (3.1), предложенному для электрических контактов сферы с плоскостью [114]:

$$S = \pi \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{3}{4} \cdot F \cdot \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)^{-1}} \right)^2 \quad (7) \quad (3.1)$$

где F – усилия сжатия электродов, Н;

μ_1 – коэффициент Пуассона материала электродов;

μ_2 – коэффициент Пуассона материала деталей;

E_1 – модуль упругости материала электродов, кг/мм²;

E_2 – модуль упругости материала деталей, кг/мм²;

r_1 – радиус рабочей поверхности электродов, мм;

r_2 – радиус поверхности деталей ($r_2 = \infty$), мм.

Расчеты сопротивлений между электродами по приведенным в разделе 1.5 формулам (1.2)-(1.7) производили для усилий их сжатия и радиусов сферы рабочей поверхности, представленных в таблице 3.1.

Использовали значения свойств циркониевого сплава Э110 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т, приведенные в таблице 3.2. Толщины деталей принимали: для циркониевого сплава Э110 – 0,25+0,25 мм, аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т – толщиной 0,3+0,3 мм. Общая схема зоны сварки представлена на рисунке 3.1.

Для расчета площади контакта по формуле (3.1) использовали следующие данные: из за отсутствия в литературных источниках коэффициента Пуассона для БрХЦр, использовали значения для хромистой бронзы БрХ $\mu_l = 0,32$ [115]; модуль упругости бронзы Бр.ХЦр $E_l = 13000 \dots 13800$ кг/мм² [116].

Таблица 3.1 – Значения усилия сжатия и радиуса рабочей поверхности электродов, используемые в расчетах

Сила сжатия, Н	200			250			300			350			400		
Радиус рабочей поверхности электродов, мм	15	20	25	15	20	25	15	20	25	15	20	25	15	20	25

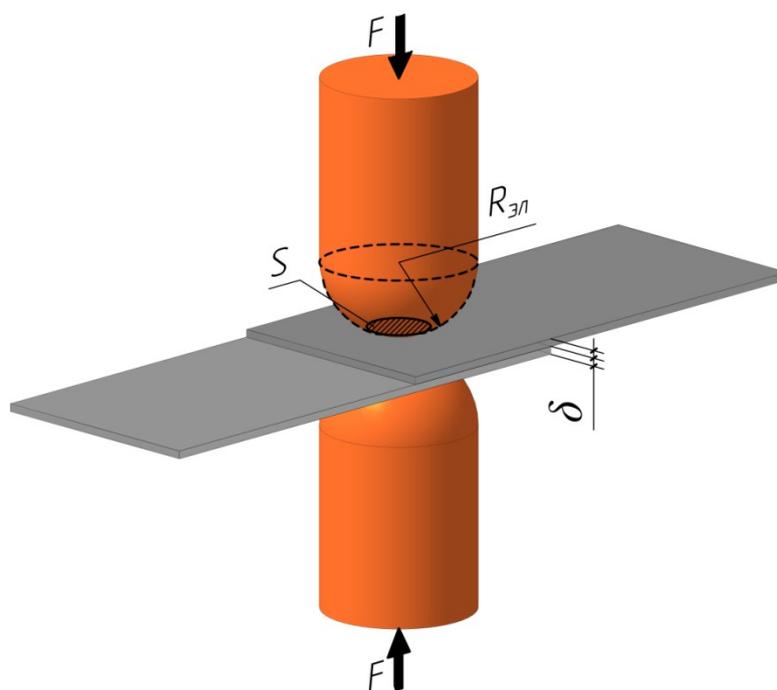


Рисунок 3.1– Общая схема зоны сварки

Таблица 3.2 – Свойства циркониевого сплава Э110 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т, используемые в расчетах

Наименование, обозначение, единица измерения	Э110		12Х18Н10Т	
	Значение	Источник [ссылка]	Значение	Источник [ссылка]
Коэффициент Пуассона, μ	0,38	[104]	0,35	[108]
Модуль упругости, E , кг/мм ²	9600	[117]	20190	[108]
Удельное электросопротивление металла при температуре 20°С, ρ , нОм·м	439	[1, 107]	761	[1, 107]
Коэффициент, учитывающий растекание тока, $k_{p.m}$	1,04	[69, 94, 118];	1,04	[69, 94, 118];
Сопротивление пластической деформации металла, σ_d^* , Н/мм ²	260	[107]	530	[107]
Удельное электросопротивление поверхностной пленки при температуре 20°С, ρ_f , Ом·м	$3 \cdot 10^{-4}$	[119, 120]	$1,3 \cdot 10^{-3}$	[120]
Твердость, HV , Па	$2,5 \cdot 10^9$	[121]	$1,45 \cdot 10^8$	[122]
Температура плавления, $T_{пл}$, °С	1856	[109]	1425	[109]
Твердость по Бринеллю, Па	$1,5 \cdot 10^9$	[12]	$1,79 \cdot 10^8$	[107]

На рисунках рис. 3.2 и 3.3 представлены расчетные и, для сравнения, экспериментальные значения сопротивлений между электродами. Из шести формул (1.2)-(1.7), использованных для теоретических расчетов, только формула (1.5) позволила получить значения, лежащие в диапазоне полученных экспериментально для циркониевого сплава (рис. 3.2). Следует заметить, что совпадения наблюдались во всех исследованных случаях, однако в большинстве из них по верхней границе диапазона (рис. 3.2, б, с). При этом для нержавеющей стали использование данной формулы позволило получить значение в два-три раза меньшие, чем полученные

экспериментально в большинстве исследованных случаев (рис. 3.3, а, б). Только при радиусе сферы 25 мм расчетные значения вписываются в диапазон минимальных экспериментальных значений при усиллии сжатия 300 и 400 Н (рис. 3.3, с). Вероятно, это связано со значительными расхождениями значений фактических свойств нержавеющей стали с данными, приведенными в справочной литературе (табл. 3.2). Расчетные значения сопротивлений, полученные с использованием формул (1.2)-(1.4) и (1.6), в несколько раз (в некоторых случаях до двух десятков) меньше, чем полученные экспериментально во всех исследованных случаях. Использование формулы (1.7) для циркониевого сплава в большинстве случаев дало завышенные результаты (рис. 3.2, б, с), а для нержавеющей стали (рис. 3.3) – во всех случаях заниженные. При этом расчетные значения сопротивления, полученные по формуле (1.7) повышаются с увеличением усилия сжатия (рис. 3.2 и 3.3). Это не согласуется с общепринятой теорией [62-64 и др.], согласно которой с увеличением усилия сжатия площадь фактического контактирования деформированных микрошероховатостей возрастает. Кроме того, увеличивает и рассчитанная по формуле (3.1) общая площадь контакта сфер электродов с деталями (рис. 3.4). Оба этих фактора приводят к повышению сечения токопроводящей части деталей и, соответственно, должны способствовать уменьшению сопротивления при повышении усиллии сжатия.

На основании изложенного можно сделать вывод, что, наиболее вероятно может предсказать значения начальных сопротивлений использование формулы (1.5). Однако для проверки этой гипотезы необходимы дальнейшие исследования корректности расчетов для других материалов. Кроме того, возможно требуется повышенное внимание к корректности значений свойств материалов, используемых в расчетах.

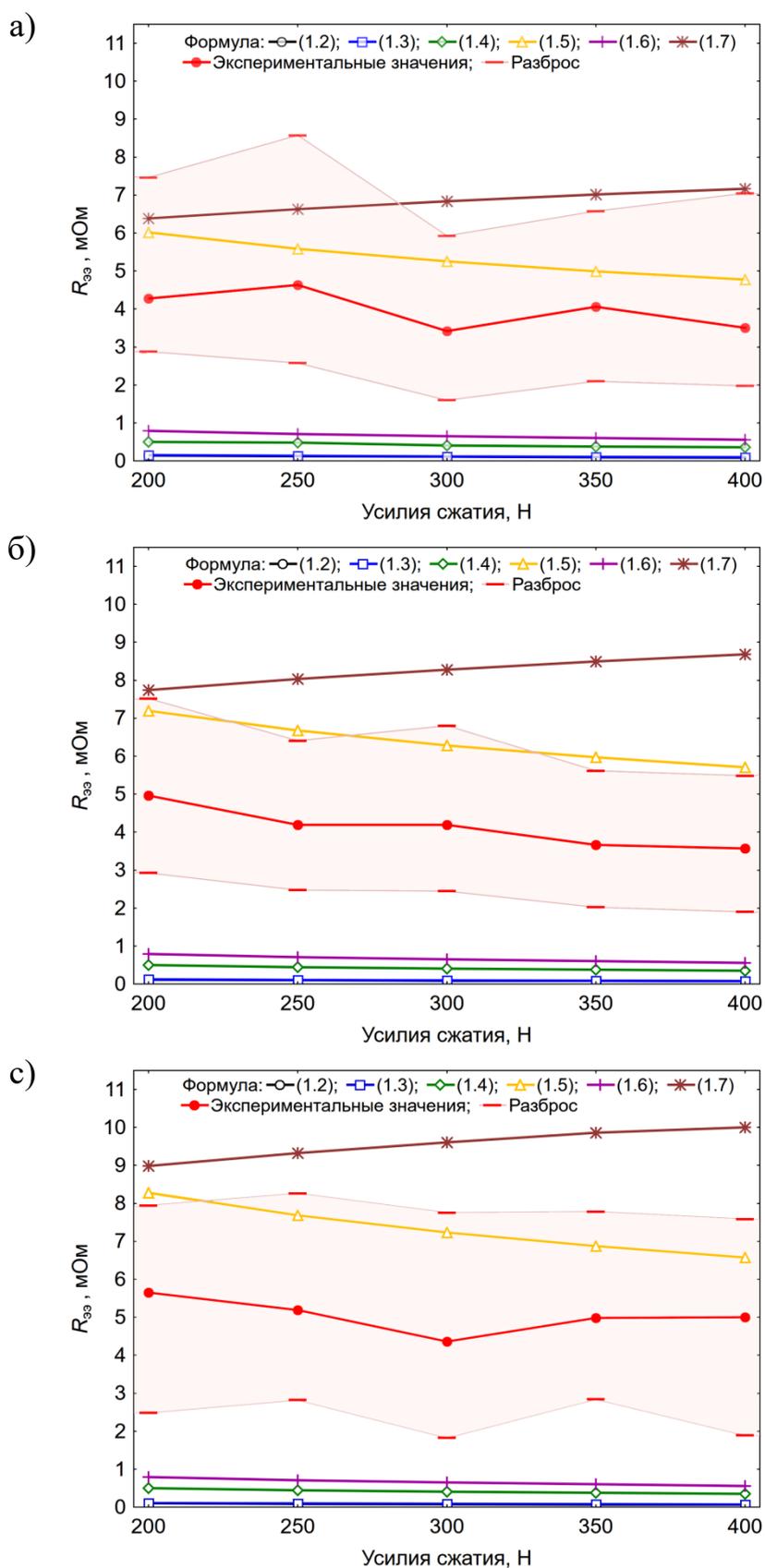


Рисунок 3.2 – Расчетные и экспериментальные зависимости начального сопротивления между электродами для сплава Э110 при разном радиусе рабочей поверхности электродов: а) 15 мм, б) 20 мм, в) 25 мм

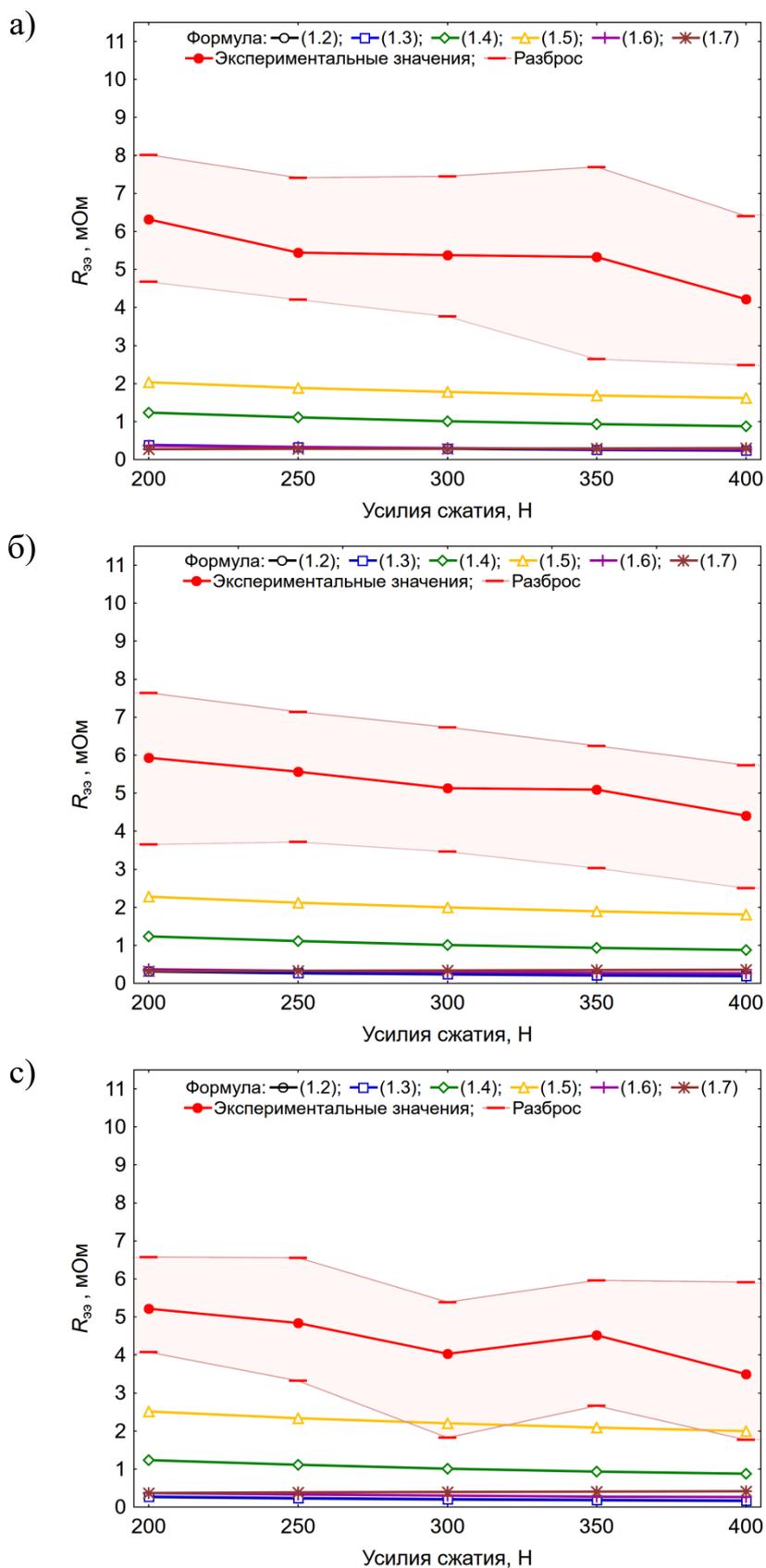


Рисунок 3.3 – Расчетные и экспериментальные зависимости начального сопротивления между электродами для стали 12X18H10T при разном радиусе рабочей поверхности электродов: а) 15 мм, б) 20 мм, в) 25 мм

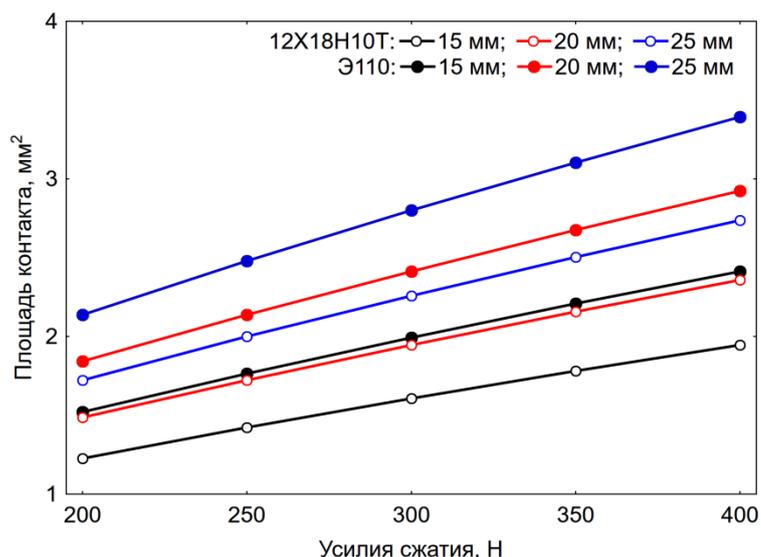


Рисунок 3.4 – Расчетные значения площади контакта

3.2 Начальные значения сопротивления между электродами

На рисунках 3.5 и 3.6 представлены распределения значений сопротивлений между электродами для различных комбинаций усилия сжатия и радиуса сферы рабочей части электродов. Из их анализа можно сделать вывод, что они соответствуют нормальному закону, как для циркониевого сплава (рис. 3.5), так и нержавеющей стали (рис. 3.6). С помощью статистической обработки представленных данных были получены средние значения сопротивлений и их дисперсия. Зависимости этих результатов от входных параметров эксперимента представлены на рисунке 3.7. Кроме того, в таблице 3.3 приведены коэффициенты корреляции между ними и значениями усилия сжатия, в таблице 3.4 – радиусами сферы электродов. Анализ полученных данных позволяет утверждать, что во всех исследованных случаях отсутствует четкая связь между выходным и каким-либо входным параметрами (рис. 2.6) проведенного многофакторного эксперимента. Коэффициенты корреляции между значениями начального сопротивления и усилия сжатия (таблица 3.3), а также радиусом рабочей поверхности электрода (таблица 3.4) изменяются во всем возможном диапазоне значений (от -0,99 до 1,00). При этом не прослеживается какая-

либо четкая закономерность динамики изменения хотя бы от одного из входных параметров эксперимента.

На основании полученных результатов можно утверждать, что для циркониевого сплава и нержавеющей стали не было выявлено прямой зависимости между усилием сжатия, радиусом сферы рабочей поверхности и средними значениями сопротивления между электродами, а также их дисперсией, во всех исследованных диапазонах.

Таблица 3.3 – Коэффициенты корреляции начальных значений сопротивления и силы сжатия электродов

Радиус сферы рабочей поверхности электродов, мм	Циркониевый сплав Э110		Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т	
	Среднее значения	Дисперсия	Среднее значения	Дисперсия
15	-0.94	-0.23	-0.91	-0.89
20	-0.65	-0.89	-0.97	0.88
25	-0.52	0.19	-0.88	0.59

Таблица 3.4 – Коэффициенты корреляции начальных сопротивлений и радиуса сферы рабочей поверхности электродов

Сила сжатия электродов, Н	Циркониевый сплав Э110		Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т	
	Среднее значения	Дисперсия	Среднее значения	Дисперсия
200	0.55	-0.17	-0.99	0.53
250	1.00	0.85	-0.78	-0.53
300	0.94	0.90	-0.94	-0.79
350	0.68	0.95	-0.97	-0.83
400	0.89	0.57	-0.75	-0.69

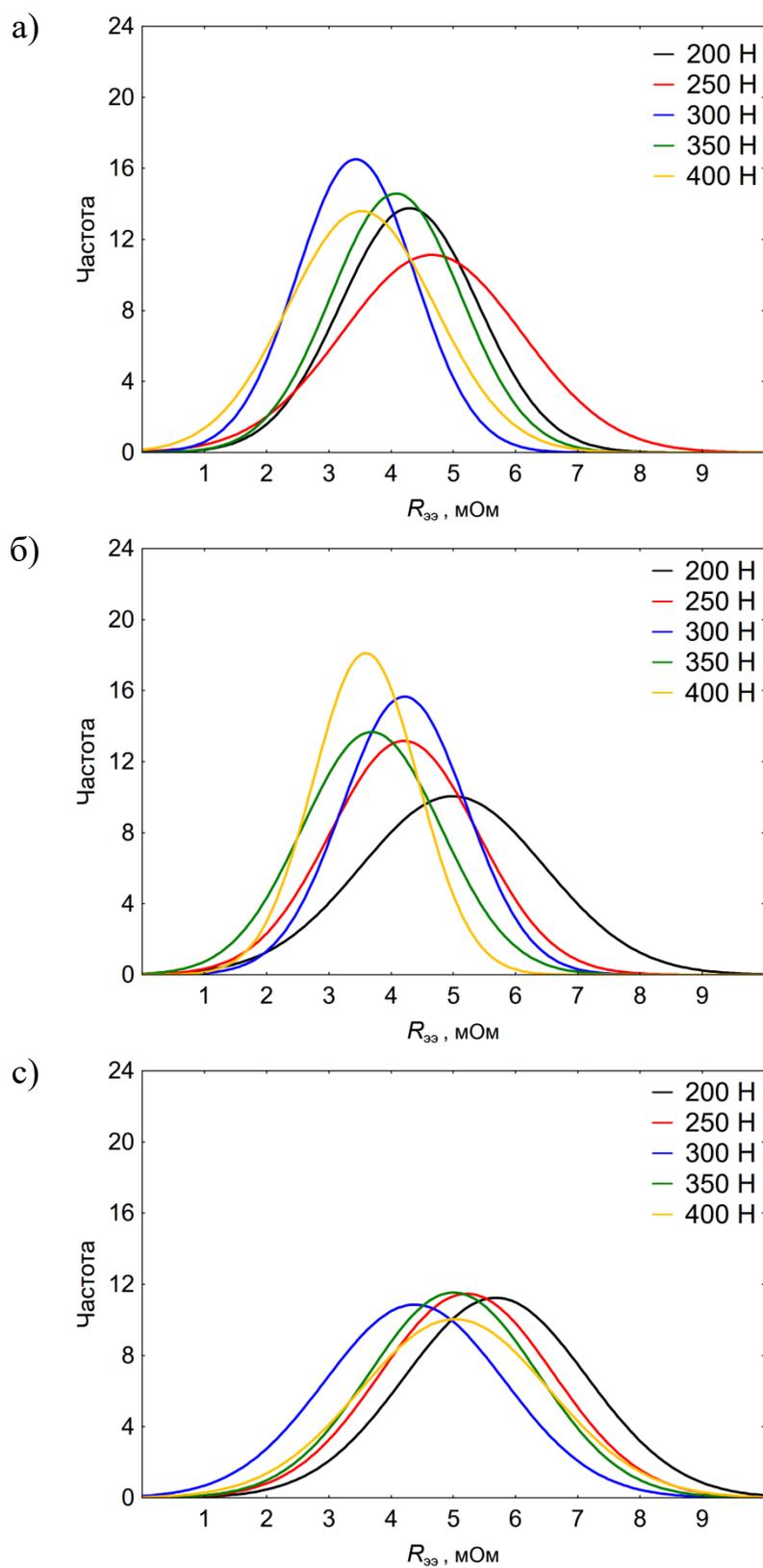


Рисунок 3.5 – Статистические распределения экспериментальных значений начального сопротивления между электродами для сплава циркония Э110 при использовании различной силы и радиуса сферы электродов: а) 15 мм, в) 20 мм, с) 25 мм

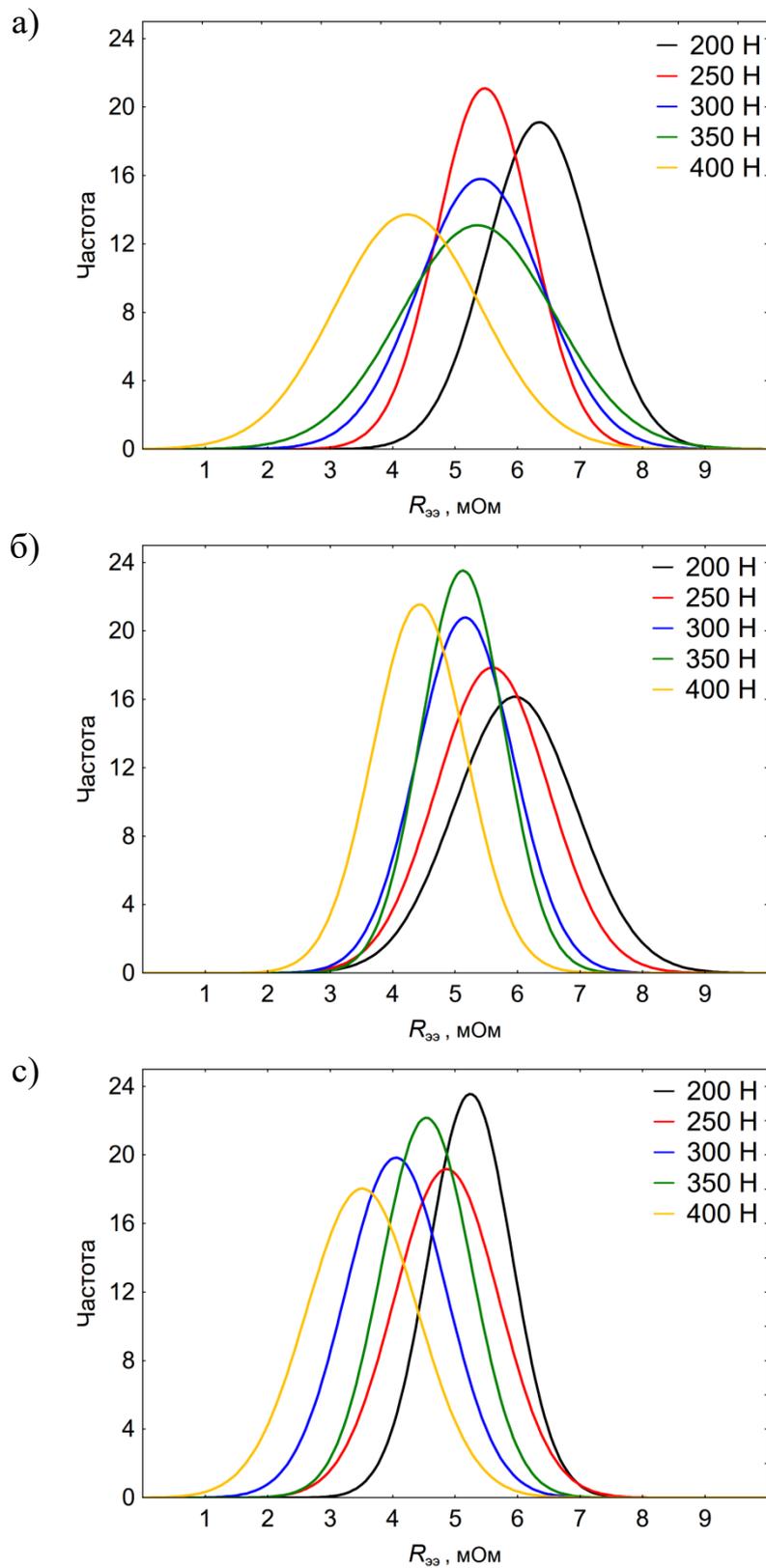


Рисунок 3.6 – Статистические распределения экспериментальных значений начального сопротивления между электродами для нержавеющей стали 12X18H10T при использовании различной силы и радиуса сферы электродов:

а) 15 мм, б) 20 мм, в) 25 мм

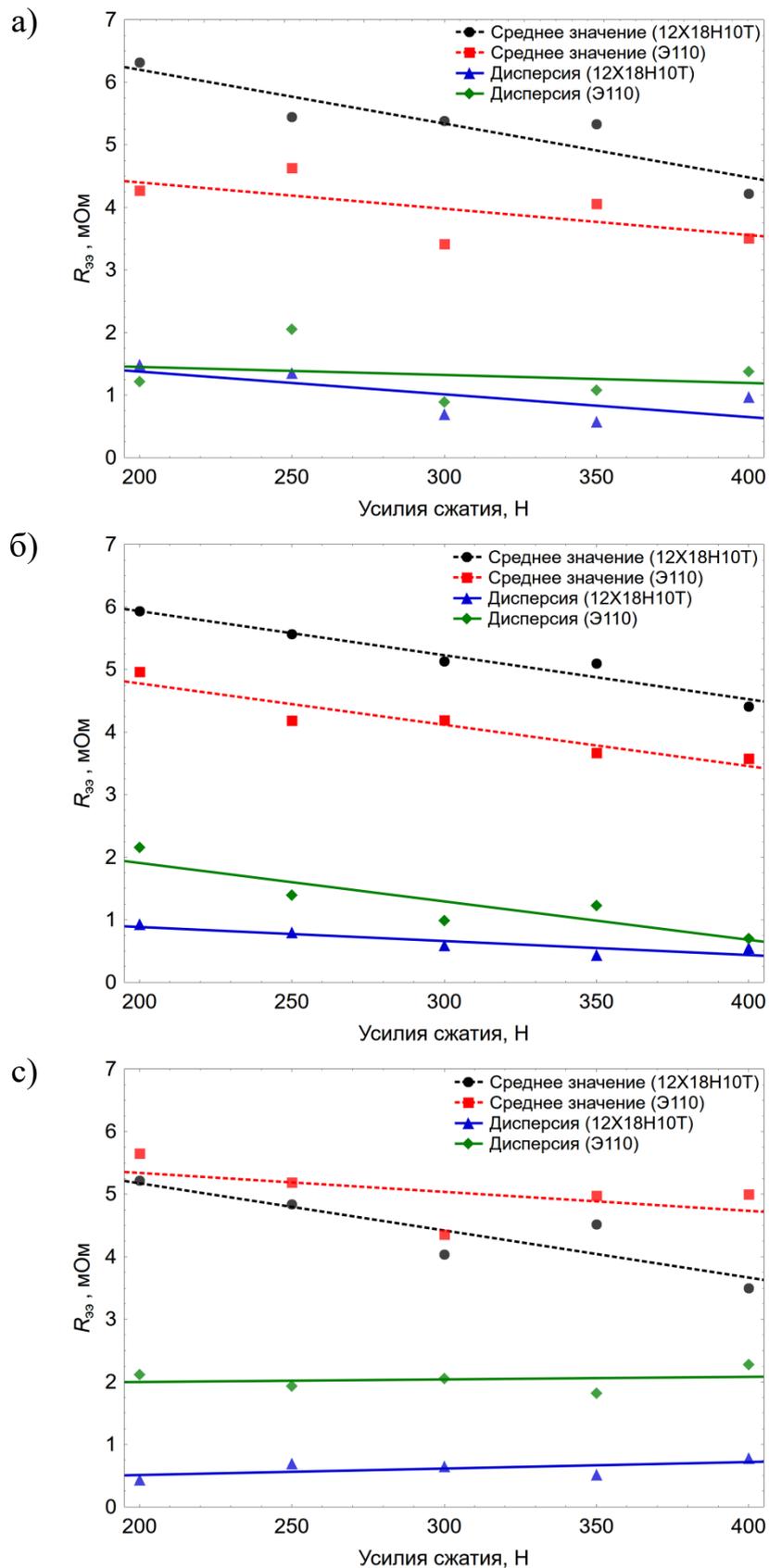


Рисунок 3.7 – Средние значения и дисперсия экспериментальных значений начального сопротивления между электродами для различной силы и радиуса сферы электродов: а) 15 мм, в) 20 мм, с) 25 мм

3.3 Стабилизация значений сопротивлений между электродами подогревающим импульсом тока

На рисунках 3.8 - 3.11 представлены средние значения общего сопротивления металла между электродами и их дисперсии после воздействия подогревающего импульса тока по алгоритмам, приведенным на рисунке 2.7. При их статистической обработке учитывали значения усилия сжатия и радиус сферы рабочей части электродов. Оценка влияния каждого параметра режима сварки представлена внизу. Из их анализа, можно сделать вывод, что свойства свариваемого материала оказывают решающее значение на воздействие каждого из входных параметров (рис. 2.6) многофакторного эксперимента.

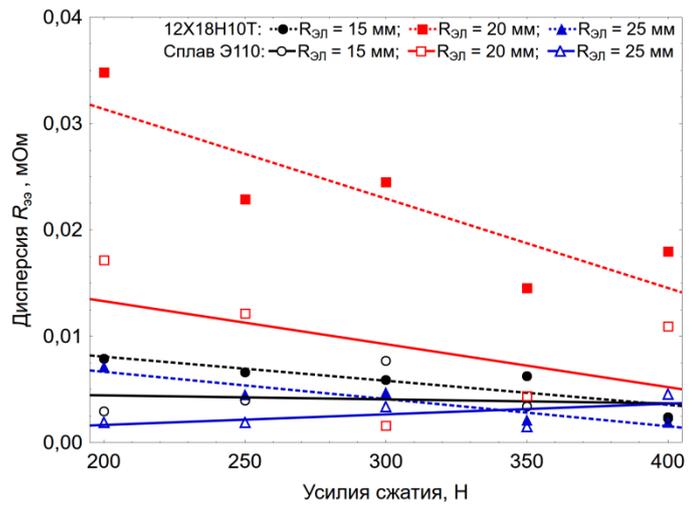
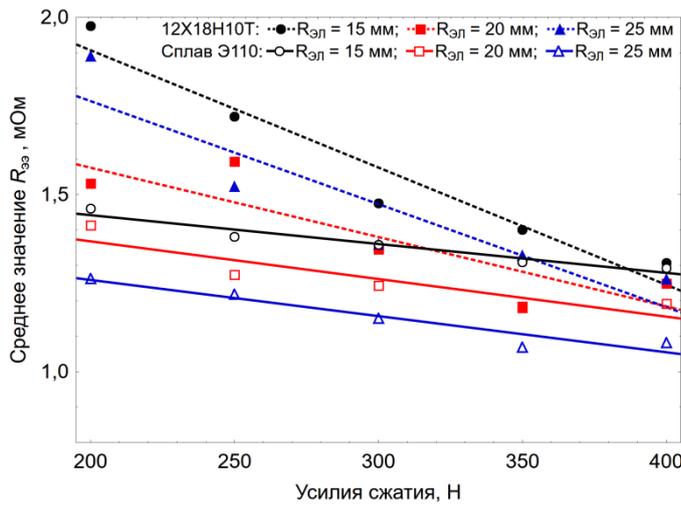
Сила сжатия электродов. Усилие сжатия электродов оказывает прямое влияние на средние значения сопротивлений между электродами во всех исследованных случаях (рис. 3.8 а - 3.11 а). Это связано с увеличением степени деформации контактирующих микрошероховатостей поверхностей и, соответственно, сечения токопроводящих частей деталей. Скорость изменения средних значений сопротивлений нержавеющей стали гораздо выше, чем циркониевого сплава. Наиболее вероятно это вызвано ее большей пластичностью (таблица 3.2). По этой же причине снижение разброса значений сопротивлений при увеличении усилия сжатия наблюдается только исключительно у нержавеющей стали (рис. 3.8 б - 3.11 б). Исследованный диапазон усилий сжатия электродов не позволяет управлять стабильностью значений сопротивлений для циркониевого сплава наиболее вероятно из-за его более высокой твердости.

Радиус сферы рабочей поверхности электродов. Для деталей из циркониевого сплава средние значения сопротивления между электродами уменьшаются при увеличении радиуса сферы их рабочей поверхности (рис. 3.8 а - 3.11 а). Наиболее вероятно, это связано с увеличением площади фактического контакта микрошероховатостей и, соответственно, сечения

токопроводящих частей деталей. Однако, зависимости между радиусом сферы рабочей части электрода и разбросом значений сопротивлений выявлено не было (рис. 3.8 б - 3.11 б).

Для нержавеющей стали какая-либо взаимосвязь между радиусом сферы рабочей части электродов, средними значениями сопротивлений и их дисперсией отсутствует (рис. 3.8 - 3.11). Вполне вероятно, это можно объяснить сложным химическим и структурным составом окисных поверхностных слоев, обладающих существенными различиями в динамике изменения теплофизических свойств при нагреве. С учетом случайного характера их распределения по поверхности в каждом конкретном случае, фактическая площадь контактирования и, соответственно, сечение токопроводящих частей деталей также будет различаться [81].

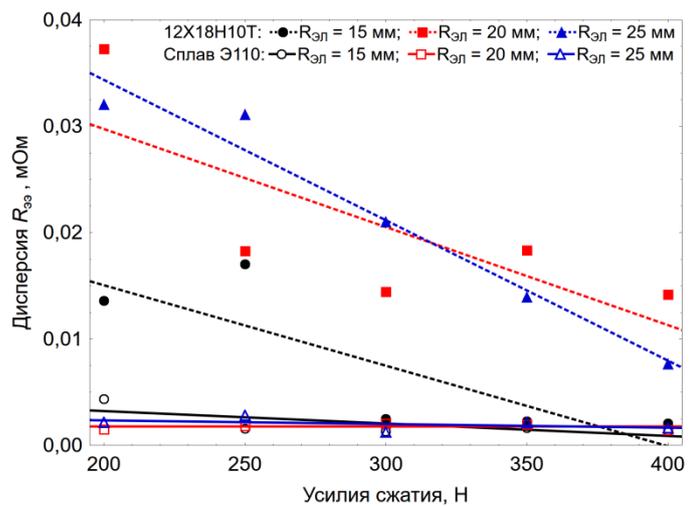
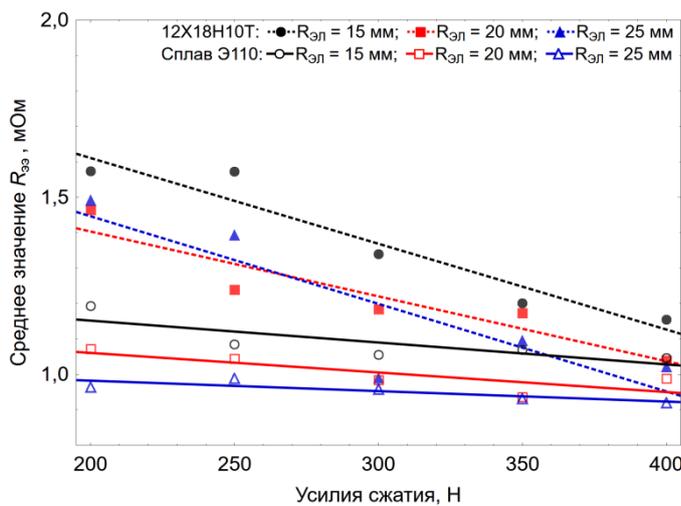
Алгоритм модуляции подогревающего импульса. Скорость нарастания тока подогревающего импульса не оказала влияния на стабильность значений сопротивлений между электродами во всех исследованных случаях (рис. 3.8 - 3.11). Ступенчатое увеличение тока позволило существенно снизить разброс значений сопротивлений циркониевого сплава практически до нулевого уровня во всех исследованных случаях (рис. 3.9 б и 3.11 б). Для нержавеющей стали изменение алгоритма ввода энергии не позволило гарантировать стабильность значений сопротивлений. Во всех исследованных случаях они характеризуются значительной неопределенностью, хотя и значительно ниже, чем начальные значения (рис. 3.7).



а)

б)

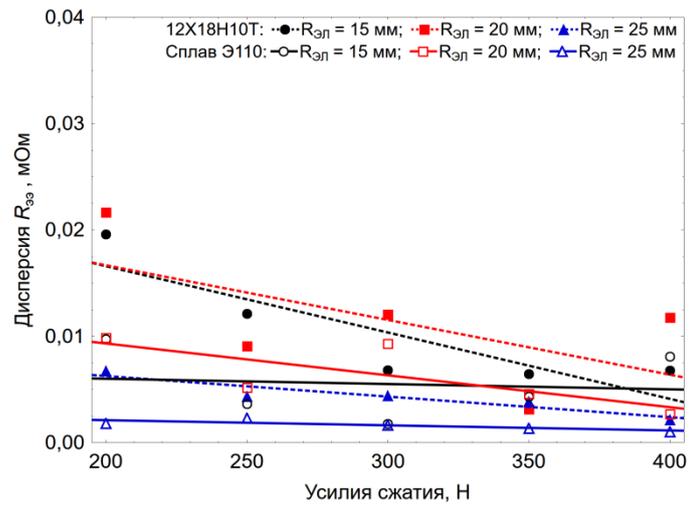
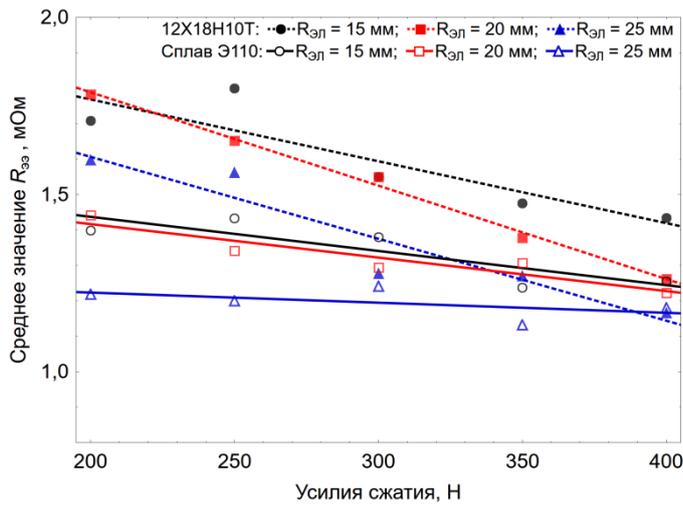
Рисунок 3.8 – Сопротивление между электродами после прохождения подогревающего импульса с резким дискретным увеличением тока (рис. 2.7 а, режим 1): а) средние значения, в) дисперсия



а)

б)

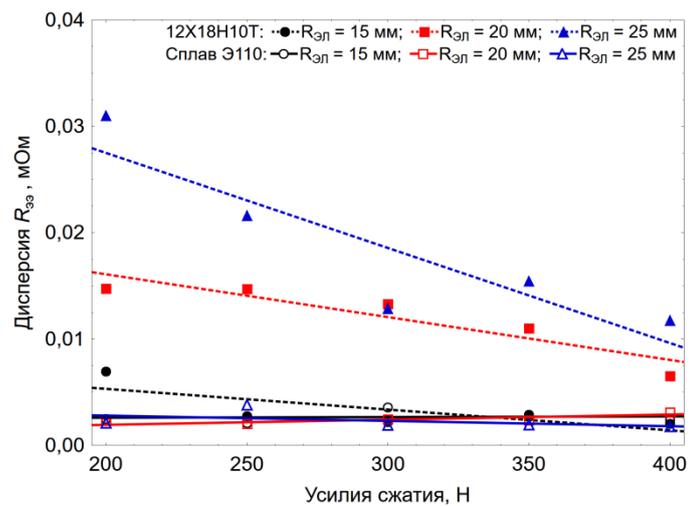
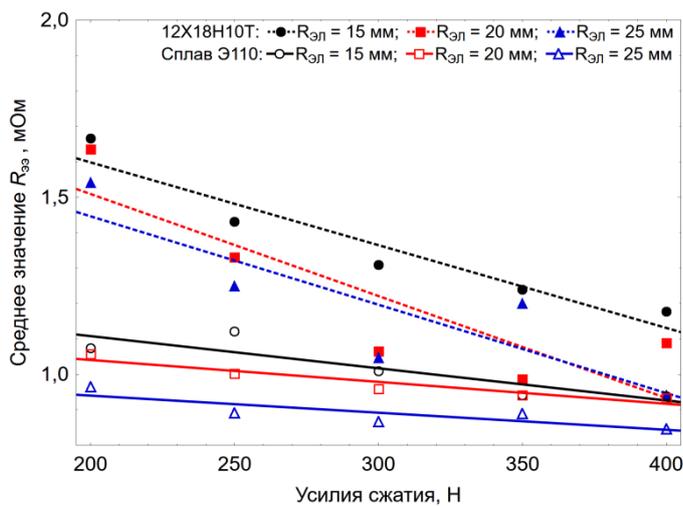
Рисунок 3.9 – Сопротивление между электродами после прохождения подогревающего импульса с резким ступенчатым увеличением тока (рис. 2.7 а, режим 2): а) средние значения, в) дисперсия



а)

б)

Рисунок 3.10 – Сопротивление между электродами после прохождения подогревающего импульса с плавным дискретным увеличением тока (рис. 2.7 б, режим 3): а) средние значения, в) дисперсия



а)

б)

Рисунок 3.11 – Сопротивление между электродами после прохождения подогревающего импульса с плавным ступенчатым увеличением тока (рис. 2.7 б, режим 4): а) средние значения, в) дисперсия

3.4 Выводы

1. Современные методы расчетов значений начальных сопротивлений между электродами с использованием опубликованных справочных данных теплофизических свойств материалов не позволяет с должной степенью достоверности предсказывать их значения. Для деталей из циркониевого сплава и нержавеющей стали использование только одной из шести формул позволило получить расчетные значения, находящиеся внутри диапазона, полученного экспериментально.

2. Во всех исследованных случаях не было выявлено четкой зависимости между усилием сжатия электродов и значением начального сопротивления между ними. После прохождения подогревающего импульса тока данный параметр оказывает прямое влияние на средние значения сопротивлений для циркониевого сплава и нержавеющей стали. Снижение разброса значений сопротивлений при увеличении усилия сжатия наблюдалось только у нержавеющей стали, что было объяснено более низкими значениями твердости по сравнению с циркониевым сплавом.

3. Для нержавеющей стали взаимосвязь между радиусом сферы рабочей части электродов, средними значениями сопротивлений и их дисперсией отсутствует. Для циркониевого сплава во всех исследованных случаях увеличение радиуса сферы приводит к снижению средних значений сопротивления, однако не влияет на разброс их значений.

4. Скорость нарастания тока подогревающего импульса не оказала влияния на стабильность значений сопротивлений между электродами во всех исследованных случаях. Ступенчатое увеличение тока позволило существенно снизить разброс значений сопротивлений циркониевого сплава практически до нулевого уровня. Для нержавеющей стали во всех исследованных случаях сопротивление между электродами характеризуется значительной неопределенностью, хотя их разброс значительно меньше начальных значений.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1ВМ61	Акболатов Елдос Жаннурулы

Инженерная школа	Неразрушающего контроля и безопасности	Отделение	Электронной инженерии
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Машиностроение

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях аналитических материалах, статических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; наблюдение.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Определение потенциального потребителя результатов исследования, SWOT-анализ, определение возможных альтернатив проведения научных исследований
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Планирование этапов работы, определение календарного графика и трудоемкости работы, расчет бюджета
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Оценка сравнительной эффективности проекта.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. *Оценка конкурентоспособности технических решений*
2. *Матрица SWOT*
3. *Альтернативы проведения НИ*
4. *График проведения и бюджет НИ*
5. *Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Данков А. Г.	К.И.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ61	Акболатов Елдос Жаннурулы		

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Выпускная квалификационная работа на тему «Управление процессом контактной точечной микросварки циркониевых сплавов» выполняется в рамках магистерской диссертации в целях нахождения оптимальных параметров режима подогревающего этапа сварки и разработки методики прогнозирования качества соединения с помощью расчетной оценки сопротивления между электродами.

В данном разделе магистерской диссертации выполнено технико-экономическое обоснование научно-исследовательского проекта. В частности это оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения данного исследования с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, а также планирование и организация научно-исследовательского проекта.

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

К целевым рынкам, в которых будут применяться результаты данного исследования, можно отнести предприятия по производству элементов тепловыделяющих сборок (ТВС) ядерных реакторов, а также радиоэлектронную и приборную промышленность. В основном в этих отраслях возникает необходимость получения неразъемного соединения тонкостенных деталей (менее 0,5 мм) из циркониевого сплава и нержавеющей аустенитной стали.

Основываясь на этих предпосылках, произвели сегментирования рынка, где в качестве критериев выбрали размер компании и выпускаемую продукцию. Карта сегментирования рынка представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Карта сегментирования рынка

		Выпускаемая продукция	
		ТВС	Полупроводниковые приборы
Размер компании	Крупные		
	Средние		
	Мелкие		

 ПАО "МСЗ"	 ПАО "НЗХК"	 АО "ЗПП"	 НЗПП с ОКБ
---------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------

Как видно из таблицы 4.1, наиболее перспективным сегментом в отраслях производства элементов ТВС и полупроводниковых приборов для формирования спроса является сегмент мелких и средних предприятий. Однако в настоящее время в России существует только две предприятия по производству элементов ТВС для ядерных реакторов (ПАО «МСЗ» и ПАО «НЗХК»). Поэтому целесообразно ориентироваться на эти предприятия, так как они заинтересованы в повышении качества производимых элементов ТВС, причиной которого является постоянно возрастающие требования к надежности атомных электростанции, в том числе и сварным соединениям.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

В настоящее время для контактной точечной сварки тонкостенных деталей применяют контактные машины с конденсаторным источником питания, которые не могут в полной мере обеспечить модуляцию импульса сварочного тока. Данное же исследование посвящено для более современных

инверторных источников питания, которые позволяют задавать требуемые амплитудно-временные параметры импульса тока. Таким образом, в настоящий момент единственным конкурентом разрабатываемой в данной работе технологии является контактная точечная сварка с применением конденсаторных машин. В таблице 4.2 приведена оценочная карта, включающая конкурентные технические разработки в области производства ТВС и полупроводниковых приборов.

Таблица 4.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _{к1}	К _ф	К _{к1}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Повышение производительности труда	0,2	5	3	1	0,6
2. Удобство в эксплуатации	0,1	5	3	0,5	0,3
3. Энергоэкономичность	0,1	4	3	0,4	0,3
4. Степень автоматизации процесса	0,1	4	4	0,4	0,4
5. Безопасность	0,05	4	4	0,2	0,2
8. Наличие квалифицированного персонала	0,05	3	3	0,15	0,15
9. Снижение дефектов в сварных соединениях	0,2	5	3	1	0,6
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Конкурентоспособность проекта	0,05	4	3	0,2	0,15
2. Цена	0,05	5	4	0,25	0,2
3. Финансирование научной разработки	0,05	3	5	0,15	0,25
4. Срок выхода на рынок	0,05	4	5	0,2	0,25
Итого:	1			4,35	3,4

Примечание

1 Б_ф – технология, разрабатываемая в ходе исследовательской работы (контактная точечная сварка с применением инверторных источников питания)

2 Б_{к1} – контактная точечная сварка с применением конденсаторных источников питания

На основании таблицы 4.2 можно сделать вывод, что технология контактной точечной сварки, основанная на инверторных источниках питания, может составить серьезную конкуренцию распространенной в настоящее время сварке на конденсаторных машинах. Главными преимуществами данной технологии является повышение производительности, удобства в эксплуатации и снижение дефектов в сварных соединениях за счет модуляции импульса тока.

4.1.3 SWOT-анализ

На основе работы, проведенной в предыдущих разделах магистерской диссертации, был составлен SWOT-анализ научно-исследовательского проекта. Результаты первого этапа SWOT-анализа представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Матрица первого этапа SWOT-анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта:	Слабые стороны научно-исследовательского проекта:
	<p>С1. Более высокая производительность, по сравнению с применяемыми способами микросварки.</p> <p>С2. Удобство в эксплуатации.</p> <p>С3. Заявленная энергоэффективность технологии.</p> <p>С4. Наличие квалифицированного персонала.</p>	<p>Сл1. Сложности финансирования в дальнейшем для реализации проекта.</p> <p>Сл2. Отсутствие рекомендации и литературы для точного подбора параметров режима сварки.</p> <p>Сл3. Большой срок поставок материалов, используемых в проводимом исследовании.</p>

Продолжение таблицы 4.3

<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2. Организационная поддержка проекта со стороны производителей элементов ТВС для ядерных реакторов.</p> <p>В3. Получение качественных сварных соединений.</p>		
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Появление новых технологий.</p> <p>У2. Отсутствие спроса на новые технологии производства</p> <p>У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.</p>		

Интерактивные матрицы представлены в таблицах 4.4-4.7.

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица возможностей и сильных сторон проекта

	Сильные стороны проекта				
		С1	С2	С3	С4
В1		+	+	+	+
В2		+	+	0	0
В3		+	+	-	+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильные сторон и возможности: В1С1С2С3С4; В2С1С2; В3С1С2С4.

Таблица 4.5 – Интерактивная матрица возможностей и слабых сторон проекта

Возможности проекта	Слабые стороны проекта		
		Сл1	Сл2
B1	-	-	-
B2	+	+	+
B3	+	+	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабых сторон и возможности: B2Сл1Сл2Сл3; B3Сл1Сл2.

Таблица 4.6 – Интерактивная матрица угроз и сильных сторон проекта

Угрозы проекта	Сильные стороны проекта			
		С1	С2	С3
У1	+	0	+	0
У2	-	-	0	0
У3	-	-	-	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильных сторон и угроз: У1С1С3.

Таблица 4.7 – Интерактивная матрица угроз и слабых сторон проекта

Угрозы проекта	Слабые стороны проекта		
		Сл1	Сл2
У1	+	+	-
У2	+	0	-
У3	+	0	0

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабых сторон и угроз: У1Сл1Сл2; У2Сл1; У3Сл1.

Таким образом, по анализу интерактивных таблиц можно составить итоговую матрицу SWOT-анализа (таблица 4.8).

Таблица 4.8– Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Более высокая производительность, по сравнению с применяемыми способами микросварки.</p> <p>С2. Удобство в эксплуатации.</p> <p>С3. Заявленная энергоэффективность технологии.</p> <p>С4. Наличие квалифицированного персонала.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1.Сложности финансирования в дальнейшем для реализации проекта.</p> <p>Сл2. Отсутствие рекомендации и литературы для точного подбора параметров режима сварки.</p> <p>Сл3.Большой срок поставок материалов, используемых в проводимом исследовании.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2. Организационная поддержка проекта со стороны производителей элементов ТВС для ядерных реакторов.</p> <p>В3. Получение качественных сварных соединений.</p>	<p>Высокая производительность технологии, удобство в эксплуатации и энергоэффективность позволит привлечь инновационную инфраструктуру ТПУ в дальнейших исследованиях, а также организационную поддержку со стороны производителей элементов ТВС для ядерных реакторов.</p>	<p>Сложности финансирования и большой срок поставки материалов необходимые для реализации проекта может привести к отказу в поддержке проекта со стороны производителей элементов ТВС для ядерных реакторов. Отсутствие рекомендации и необходимой литературы для точного подбора параметров режима сварки ведет к снижению качества сварных соединений.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Появление новых технологий.</p> <p>У2. Отсутствие спроса на новые технологии производства</p> <p>У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.</p>	<p>Появление новых технологий может привести к утрате энергоэффективности и снижению сравнительной производительности данной технологий.</p>	<p>Несвоевременное финансовое обеспечение исследования увеличивает срок разработки окончательного варианта технологии.</p>

4.2 Планирование управления научно-техническим проектом

4.2.1 План проекта

Таблица 4.9 – Календарный план проекта

№	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Утверждение темы	3	11.02	13.02	Руководитель
2	Подбор и изучение материалов по теме	11	14.02	24.02	Дипломник
3	Составление плана	4	25.02	28.02	Руководитель
4	Календарное планирование работ	3	1.03	3.03	Руководитель
5	Изучение литературы по теме	15	4.03	18.03	Дипломник
6	Изучение зарубежной литературы	11	19.03	29.03	Дипломник
7	Разработка методики многофакторного эксперимента	3	30.03	1.04	Руководитель, Дипломник
8	Проведение эксперимента, сварка образцов	24	2.04	25.04	Руководитель, дипломник
9	Статистическая обработка результатов эксперимента	15	26.04	10.05	Дипломник
10	Анализ качества и структуры сварных швов	15	11.05	25.05	Руководитель, Дипломник
11	Разработка методики прогнозирования качества сварных соединений	11	26.05	05.06	Руководитель, Дипломник
12	Вывод по цели	11	06.06	16.06	Руководитель, дипломник
Итого:		126			

Таблица 4.10 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№	Вид работ	Исполнители	Т _к , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				февр.		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Утверждение темы	Руководитель	3	///													
2	Подбор и изучение материалов по теме	Дипломник	11		■												
3	Составление плана	Руководитель	4		///												
4	Календарное планирование работ	Руководитель	3			///											
5	Изучение литературы по теме	Дипломник	15			■	■										
6	Изучение зарубежной литературы	Дипломник	11				■	■									
7	Разработка методики многофакторного эксперимента	Руководитель, Дипломник	3					///	■								
8	Проведение эксперимента, сварка образцов	Руководитель, дипломник	24						///	■	■						
9	Статистическая обработка результатов эксперимента	Дипломник	15									■	■				
10	Анализ качества и структуры сварных швов	Руководитель, Дипломник	15									///	■	■			
11	Разработка методики прогнозирования качества сварных соединений	Руководитель, Дипломник	11											///	■		
12	Вывод по цели	Руководитель, дипломник	11												///	■	

/// – руководитель, ■ – дипломник

4.2.2 Бюджет научно-технического исследования

Таблица 4.11 – Группировка затрат по статьям

Статьи						
№	Сырье, материалы, покупные изделия и покупные полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных работ (экспериментальных)	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Накладные расходы
1.	Листы толщиной 0,25 мм из циркониевого сплава Э110	Источник питания для сварочного комплекса ИПТКМ-10	Руководитель	Руководитель	Руководитель	Печать и ксерокопирование материалов исследования
2.	Листы толщиной 0,3 мм из нержавеющей стали 12Х18Н10Т	Контактная машина МТТ-02	Дипломник	Дипломник	Дипломник	Оплата услуг связи
3.	Электроды из сплава БрХЦр	Цифровой осциллограф RIGOL MSO 1074				Оплата электроэнергии
4.	Ножницы по металлу					
5.	Бумага					
6.	ПК					
7.	USB флеш-диск					
Итого руб.:	85135	2981300	295244,72	34829,36	68501,18	97522,22
Плановая себестоимость	Σ 3 562 532,48					

Расчет стоимости материальных затрат производилось по действующим прейскурантам и договорным ценам. В стоимость материальных затрат включили транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). Результаты по данной статье представлены в таблице 4.12.

В статью специальное оборудование для экспериментальных работ включили все затраты связанные с приобретением специального оборудования. Определение стоимости спецоборудования производили по действующим прейскурантам, а также учли доставку и монтаж в размере 15 % от его цены. Результаты по данной статье представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.12 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Единица измерения	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Лист толщиной 0,25 мм из циркониевого сплава Э110	кг	1	30240	30240
Лист толщиной 0,3 мм из нержавеющей стали 12Х18Н10Т	кг	1	315	315
Электроды из сплава БрХЦр диаметром 3 мм	комплект	1	210	210
Ножницы по металлу	штука	1	270	270
Бумага	пачка	3	270	810
ПК	штука	1	52000	52000
USB Флеш-диск	штука	1	1500	1500
Итого по статье				85135

Таблица 4.13 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1.	Источник питания для сварочного комплекса ИПТКМ-10	1	2300	2645
2.	Контактная машина МТТ-02	1	240	276
3.	Цифровой осциллограф RIGOL MSO 1074	1	52,4	60,3
Итого по статье				2981,3

Основная заработная плата

Таблица 4.14 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Исполнитель	Трудоемкость, чел.-дн.	Зарботная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.
1.	Руководитель	74	3486,04	257966,96
2.	Дипломник	116	321,36	32277,76
Итого по статье С _{осн}				295244,72

Таблица 4.15– Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Дипломник
Календарное число дней	126	126
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	24	42
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	102	84

Для руководителя:

$$З_{\text{м}} = 26300 \cdot 1,3 = 34190 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{дн}} = 34190 \cdot 10,4 / 102 = 3486,04 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{осн}} = 3486,04 \cdot 74 = 257966,96 \text{ руб.}$$

Для дипломника:

$$З_{\text{м}} = 1854 \cdot 1,3 = 2410,2 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{дн}} = 2410,2 \cdot 11,2 / 84 = 321,36 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{осн}} = 321,36 \cdot 116 = 32277,76 \text{ руб.}$$

Таблица 4.16 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	З _б , руб.	К _р	З _м , руб.	З _{дн} , руб.	Т _р , раб. дн.	З _{осн} , руб.
Руководитель	26300	1,3	34190	3486,04	74	257966,96
Дипломник	1854	1,3	2410,2	321,36	116	32277,76

Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Таблица 4.17 – Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Дипломник
Основная зарплата	257966,96	32277,76
Дополнительная зарплата	30956,03	3873,33
Зарплата исполнителя	288922,99	36151,09
Итого по статье $C_{зп}$	325074,08	

Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}})$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Таблица 4.18 – Отчисления на социальные нужды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Отчисления, руб.
Руководитель	257966,96	30956,03	78298,13
Дипломник	32277,76	3873,33	9796,94
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	27,1%		
Итого по статье $C_{\text{внеб}}$			68501,18

Накладные расходы

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}})$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 70%.

Таблица 4.19 – Накладные расходы

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Накладные расходы, руб.
Руководитель	257966,96	30956,03	86676,89
Дипломник	35992,32	3873,33	10845,32
Коэффициент накладных расходов	70 %		
Итого по статье $C_{\text{накл}}$			97522,22

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1ВМ61	Акболатов Елдос Жаннурулы

Школа	Неразрушающего контроля и безопасности	Отделение	Электронной инженерии
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Машиностроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является циркониевый сплав Э110 и нержавеющей сталь 12Х18Н10Т. Область применения – сварка тонкостенных деталей (микросварка)
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность	<p>Анализ выявленных вредных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> – отклонение параметров микроклимата в помещении; – отклонение напряженности магнитного поля в помещении; – отклонение концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны. <p>Анализ выявленных опасных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность; – выплеск расплавленного металла.
2. Экологическая безопасность:	<p>Анализ воздействия объекта на:</p> <ul style="list-style-type: none"> – атмосферу (выбросы); – литосферу (отходы).
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<p>Возможные чрезвычайные ситуации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – пожар; – ситуации природного характера.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	<ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева И.Л.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ61	Акболатов Елдос Жаннурулы		

5 Социальная ответственность

В данном разделе магистерской диссертации проанализированы основные аспекты социальной ответственности, необходимые в ходе исследования (экологические возможные негативные последствия и ущерб здоровью человека и окружающей среде, чрезвычайные ситуация, правовые нормы и др.).

5.1 Производственная безопасность

5.1.1 Анализ вредных и опасных факторов

Производственная безопасность представляет собой систему организационных мероприятий и технических средств, уменьшающих вероятность воздействия на персонал опасных производственных факторов, вредных воздействий технологических процессов, энергии, средств, предметов, условий и режимов труда до приемлемого уровня. В связи, с чем необходимо выявить вредные и опасные производственные факторы, которые могут возникать в процессе контактной точечной сварки циркониевого сплава Э110 и стали 12Х18Н10Т. Результаты проведенного анализа представлены в таблице 5.1 с учетом, что эксперименты проводились в учебной лаборатории.

Таблица 5.1 – Опасные и вредные факторы при контактной точечной сварке сплава Э110 и стали 12Х18Н10Т

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы		Нормативные документы	
	Вредные	Опасные	Вредные факторы	Опасные факторы
1) подготовка образцов к сварке (обезжиривание и удаление поверхностных загрязнений с деталей); 2) процесс сварки; 3) измерение сопротивления между электродами в процессе прохождения импульса сварочного тока.	Отклонение показателей микроклимата в помещении	Электрический ток	СанПиН 2.2.4.548-96 [123]	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ [125]
	Отклонение напряженности и магнитного поля в помещении	Выплеск расплавленного металла	СанПиН 2.2.4.1191-03 [124]	

5.1.2 Отклонение параметров микроклимата в помещении

Микроклимат производственных помещений – это климат внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха. Согласно [123], показателями, характеризующими микроклимат, являются: температура воздуха, относительная влажность воздуха, скорость движения воздуха, интенсивность теплового излучения.

Влияние микроклимата на самочувствие человека значимо и существенно, а переносимость температуры во многом зависит от скорости движения и влажности окружающего воздуха - чем выше показатель относительной влажности, тем быстрее наступает перегрев организма. Недостаточная влажность, в свою очередь, может негативно отражаться на организме, становясь причиной пересыхания и растрескивания кожи и слизистой, а также последующего заражения болезнетворными микроорганизмами. Длительное воздействие высокой температуры при повышенной влажности может привести к гипертермии, или накоплению теплоты и перегреву организма, а пониженные показатели температуры, особенно при повышенной влажности воздуха, могут быть причиной гипотермии, или переохлаждения.

Необходимые условия микроклимата различаются для теплого и холодного времени года. Они делятся на оптимальные, обеспечивающие полный тепловой комфорт, и допустимые, которые могут приводить к некоторому дискомфорту, но находятся в пределах адаптивных возможностей человека. Все категории работ разграничиваются на основе интенсивности энергозатрат организма в Вт.

Экспериментальная часть ВКР проводилась в лабораторных условиях, по энергозатратам ее следует отнести к категории Iб – работа легкая физическая, производимая сидя или связанная с ходьбой, но не требующая систематического физического напряжения или поднятия и переноса тяжестей.

Оптимальные и допустимые параметры микроклимата для категорий Ib на рабочем месте приведены в таблицах 5.2 и 5.3 [123].

Таблица 5.2 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений для категорий Ib [123]

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха не более, м/с
холодный	21 .. 23	20 .. 24	60 .. 40	0,1
теплый	22 .. 24	21 .. 25	60 .. 40	0,1

Таблица 5.3 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений для категорий Ib [123]

Период года	Температура воздуха, °С		Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с	
	Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин		Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин
холодный	19 .. 20,9	23,1 .. 24	15 .. 75	0,1	0,2
теплый	20 .. 21,9	24,1 .. 28	15 .. 75	0,1	0,3

Отопление лаборатории и корпуса в целом водяное с применением радиаторов, что обеспечивает постоянное и равномерное нагревание воздуха в холодное время года. В рабочем помещении имеется как естественная вентиляция, так и принудительная. Для обеспечения оптимальных и допустимых показателей микроклимата в холодный период года следует применять средства защиты рабочих мест от остекленных поверхностей оконных проемов, чтобы не было охлаждения. В теплый период года необходимо предусмотреть защиту от попадания прямых солнечных лучей.

5.1.3 Отклонение напряженности магнитного поля в помещении

Для большинства типов оборудования контактной сварки сварочный ток равен вторичному току сварочного трансформатора. В связи с этим основным источником магнитного поля при контактной сварке является вторичная цепь сварочного трансформатора контактной машины. Помимо этого в процессе контактной сварки применяются большие значения тока (могут достигать до

100 кА), что в свою очередь тоже создает магнитные поля. Согласно [126], длительное воздействие магнитного поля может оказывать неблагоприятное влияние на состояние здоровья человека, в частности вызывает расстройство нервной системы, отрицательно влияет на репродуктивную функцию организма. Критерием безопасности для человека, находящегося в электромагнитном поле, приняты допустимые напряженность магнитного поля в амперах или килоамперах на метр (А/м, кА/м).

В данной работе эксперименты проводились на контактной машине МТТ-02 с источником питания ИПТКМ-10 промышленной частотой 50 Гц. В связи с этим в таблице 5.4 приведены допустимые уровни напряженности магнитных полей частотой 50 Гц в зависимости от генерации [124]. Однако данный источник питания является безопасным с точки зрения излучения магнитных полей, что подтверждается паспортными данными [111].

К средствам коллективной защиты от электромагнитных полей обслуживающего персонала относятся стационарные экраны (различные заземленные металлические конструкции – щитки, козырьки, навесы сплошные или сетчатые, системы тросов) и съемные экраны. В качестве средств индивидуальной защиты от электромагнитных полей промышленной частоты служат индивидуальные экранирующие комплекты.

Таблица 5.4 – Допустимые уровни напряженности магнитных полей частотой 50 Гц в зависимости от генерации [124]

Время воздействия, ч	Напряженность МП, А/м		
	непрерывных и прерывистых с $\tau \geq 0,02$ с; $t_{п} \leq 2$ с	прерывистых с 60с $\geq \tau \geq 1$ с; $t_{п} > 2$ с	прерывистых с $0,02$ с $\leq \tau < 1$ с; $t_{п} > 2$ с
1,0	6000	8000	10000
1,5	5500	7500	9500
2,0	4900	6900	8900
2,5	4500	6500	8500

Продолжение таблицы 5.4

3,0	4000	6000	8000
3,5	3600	5600	7600
4,0	3200	5200	7200
4,5	2900	4900	6900
5,0	2500	4500	6500
5,5	2300	4300	6300
6,0	2000	4000	6000
6,5	1800	3800	5800
7,0	1600	3600	5600
7,5	1500	3500	5500
8,0	1400	3400	5400

Примечание – τ и t_n длительность импульса и паузы между импульсами, с

5.1.4 Отклонение концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны

Наиболее характерным вредным фактором практически для всех способов дуговой, электрошлаковой, газовой и в том числе контактной сварки является образование и поступление в воздух рабочей зоны сварочных аэрозолей, содержащие токсичные вещества. Причиной образования сварочных аэрозолей и вредных веществ в процессе контактной точечной сварки могут быть наличие масла и антикоррозионного покрытия (Zn, Cd, Cr) на поверхности свариваемых деталей. Помимо этого при сварке деталей из цветных металлов и в процессе применение медных электродов характерной для точечной сварки, также выделяются вредные вещества.

Токсичные включения, входящие в состав сварочного аэрозоля, и вредные газы при их попадании в организм человека через дыхательные пути могут оказывать на него неблагоприятное воздействие и вызывать ряд профзаболеваний (пневмокониоз, развития фиброзных изменений в легких). Мелкие частицы пыли (от 2 до 5 мкм), проникающие глубоко в дыхательные

пути, представляют наибольшую опасность для здоровья, пылинки размером до 10 мкм и более задерживаются в бронхах, также вызывая их заболевания.

В процессе контактной точечной сварки циркониевого сплава Э110, нержавеющей стали 12Х18Н10Т и с учетом применения электродов из сплава на основе меди (БрХЦр) могут выделяться следующие вредные вещества в воздухе рабочей зоны после сварочного нагрева в твердой фазе: диоксид циркония, оксид железа, оксид хрома и медь.

Согласно [127] предельно допустимые концентрации (ПДК) этих вредных веществ в воздухе рабочей зоны приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – ПДК вредных веществ в воздухе рабочей зоны [127]

Наименование вещества	Величина ПДК, мг/м ³	Преимущественное агрегатное состояние в условиях производства	Класс опасности
Диоксид циркония	6	А	IV
Железа оксид с примесью оксидов марганца (до 3%)	6	А	IV
Хрома оксид	1	А	III
Медь металлическая	1/0,5	А	II

Примечание

1 ПДК для атмосферного воздуха, указанные в числителе, являются максимально разовыми, а в знаменателе и без дроби среднесуточными

2 П - пары и/или газы, А - аэрозоли

Для эффективного улавливания сварочного аэрозоля при работе в помещении кроме общей приточной вытяжной вентиляции рекомендуется и местная вентиляция. Кроме этого в качестве индивидуальной защиты применяют фильтрующие противопылевые респираторы.

5.1.5 Электрический ток

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока [128]. В зависимости от индивидуальных показателей человека (масса, рост, строение тела, пол, род

занятий), его физического состояния (болезнь, наличие состояния алкогольного опьянения), параметров протекающего тока (сила тока и его частота), состояния окружающей среды зависит поражающее воздействие на организм.

Одним из наиболее опасных параметров являются переменный ток с частотой от 10 до 120 Гц. Наиболее безопасным напряжением для человека является до 12 В, условно безопасным до 36 В [125]. Опасной величиной считается ток, более 1 мА, а смертельным более 100 мА. Опасность поражения человека электрическим током существует во всех случаях, когда используются электрические установки и оборудование.

Сварочный контур данной контактной машины МТТ-02 и источника питания ИПТКМ-10 не опасны, в смысле возможности поражения электрическим током, так как напряжение на концах вторичного витка трансформатора не превышает 36 В [111]. Такое напряжение недостаточно для того, чтобы через тело человека прошел опасный ток, величина которого превышает допустимого (1 мА). Ток, который может вызвать травму, появляется в сварочном контуре только при повреждении (пробое) первичной обмотки, когда вторичный виток или корпус машины (электрически соединенный со сварочным контуром) оказываются под напряжением питающей сети (220, 380 В).

Для исключения поражения электрическим током сварщику на контактной машине необходимо выполнять следующие правила:

- систематически проверять надежность заземления станины и одного конца вторичного витка сварочного трансформатора;
- не допускать попадания воды, масла, грязи пыли и металлических предметов на обмотку трансформатора и вспомогательных электрических устройств;
- запрещается открывать дверки машины при включенном напряжении;
- следить за тем, чтобы изоляция проводов и рукояток переключателя не были повреждены;

- пользоваться резиновым ковриком или сухой деревянной решеткой, находящимся перед машиной.

Согласно ПУЭ (7-е изд.) [128] данная лаборатория относится к категории помещения – без повышенной опасности. Так как в ней учтены все необходимые правила по электробезопасности, это сухое помещение без повышенного напыления, температура воздуха нормальная, пол покрыт изоляционным материалом. Влажность воздуха не превышает 75%, отсутствует токопроводящая пыль, температура не превышает 35°C. Все сотрудники проходят первичный инструктаж по электробезопасности.

Основными техническими средствами защиты человека от поражения электрическим током, используемыми отдельно или в сочетании друг с другом, являются (ПУЭ): защитное заземление, защитное зануление, защитное отключение, электрическое разделение сети, малое напряжение, электрозащитные средства, уравнивание потенциалов, двойная изоляция, предупредительная сигнализация, блокировка, знаки безопасности.

Искусственное заземление – это преднамеренное электрическое соединение какой-либо точки электрической сети, электроустановки или оборудования с заземляющим устройством. Источник питания ИПТКМ-10 снабжена контуром заземления, включающего в себя защитный проводник (заземляющий проводник, нулевой защитный проводник, защитный проводник системы уравнивания потенциалов).

5.1.6 Выплеск расплавленного металла

Наиболее опасным фактором неблагоприятно воздействующий на здоровье человека в процессе контактной точечной сварки является выплеск расплавленного металла из зоны сварки. Это явление также может быть причиной местных ожогов. Причиной появления выплеска является использование жестких режимов (большое значение тока при относительно малом времени сварки) и небольшого усилия сжатия электродов, а также плохо очищенные свариваемые детали, сильный износ электродов [63]. Согласно [52],

при контактной точечной сварке тонкостенных деталей (толщиной менее 0,5 мм) циркониевого сплава Э110 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т, рекомендуется использовать усилия сжатия электродов не менее 200 Н и сварочного тока не более 4000 А, во избежание выплеска расплавленного металла.

К средствам защиты от выплеска расплавленного металла из зоны сварки относится защитный экран [63], которым оборудована данная контактная машина МТТ-02, также от ожогов применяются защитные очки с простыми прозрачными стеклами, рукавицы и брезентовая спецодежда.

5.2 Экологическая безопасность

Экологическая безопасность – это допустимый уровень негативного воздействия со стороны природных и антропогенных факторов экологической опасности на окружающую среду и человека.

Согласно [63] в процессе контактной точечной сварки, в частности циркониевого сплава Э110 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т не выделяется и не выбрасывается в воду, атмосферу, вентиляцию или в рабочую зону каких-либо вредных веществ, газов, аэрозолей, дымов и т.д., превышающих допустимые уровни ПДК.

Соответственно, негативное влияние на атмосферу будет заключаться только в скоплении пыли на рабочем месте, а воздействие на литосферу будет характеризоваться утилизацией твердых бытовых отходов (бумага, бракованные образцы и т.п.).

Решения по обеспечению экологической безопасности:

1. для литосферы – вывоз твердых бытовых отходов, с последующей переработкой [129].

2. для атмосферы – проведение ежедневной влажной уборки на рабочем месте и проветривание помещения.

5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.3.1 Пожарная безопасность

Пожарная безопасность предусматривает обеспечение безопасности людей и сохранения материальных ценностей предприятия на всех стадиях его жизненного цикла. Основными системами пожарной безопасности являются системы предотвращения пожара и противопожарной защиты, включая организационно-технические мероприятия [130].

Помещение лаборатории по степени пожароопасности относится к классу В-4, так как в нем отсутствует выделение пыли и волокон во взвешенном состоянии.

Возникновение пожара в процессе контактной точечной сварки может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера. Причины возникновения пожара неэлектрического характера: брызги расплавленного металла, искры в процессе сварки, халатное неосторожное обращение с огнем (курение, оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня). Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, статическое электричество и т. п. Для недопущения возникновения пожара в процессе контактной точечной сварки необходимо соблюдать следующие правила:

- перед сваркой привести в порядок свое рабочее место, убрать легко воспламеняющие предметы из зоны сварки в радиусе 2 м;
- проверить наличие и исправность предохранительных и блокировочных устройств машины контактной сварки, шкафов управления, заземления, исправность изоляции;
- проверить наличие и исправность защитных штор и откидывающихся прозрачных экранов или щитков;

- произвести пробный пуск машины контактной сварки и убедиться в исправной работе всех ее узлов и возможности регулирования цикла сварки;
- в процессе сварки следить за тем, чтобы провода не соприкасались с водой, а также чтобы на них не падали брызги расплавленного металла;
- по окончании работы отключить питание электроэнергией контактной машины.

Для устранения причин возникновения пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

- использование только исправного оборудования;
- проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- назначение ответственного за пожарную безопасность помещений;
- издание приказов по вопросам усиления пожарной безопасности
- отключение электрооборудования, освещения и электропитания по окончании работ;
- курение в строго отведенном месте;
- содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В. Кроме того, порошковые применяют для тушения документов. Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например, ОП-5.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует

располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м.

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, порошковых огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к эвакуационному выходу.

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

К выполнению сварочных работ на машинах контактной сварки допускаются лица не моложе 18 лет, прошедший медицинское освидетельствование, техническое обучение по данной специальности и инструктаж, сдавшие экзамен, имеющие практические навыки проведения работ по сварке и удостоверение на право проведения работ по сварке.

Контактная точечная сварка является одним из самых безопасных способов получения неразъемного соединения по сравнению с дуговыми способами сварки. В частности при контактной сварке циркониевого сплава Э110 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т в окружающую атмосферу не выделяются какие-либо вредные пары или газы, кроме возможных выплесков расплавленного металла из-за нерационального режима. Поэтому условия труда на контактной машине являются оптимальными.

Расположение контактной машины должна обеспечивать безопасные условия труда и удобства при эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте, при этом установки контактной сварки монтируют на полу без возведения специального фундамента. Однако контактная машина МТТ-02 имеет малые габаритные размеры, поэтому необходимо устанавливать на специальном столе с учетом высоты для удобной работы на данной машине.

6 Заключение

В результате исследования была выявлена степень влияния изменения тока, усилия сжатия электродов и их радиуса сферы рабочей поверхности на величину общего сопротивления металла между электродами для подогревающего этапа контактной точечной микросварки и оценена возможность его прогнозирования.

На основании экспериментальных данных была определена наиболее верно предсказывающая формула значения начального сопротивления. Однако для проверки этой гипотезы необходимы дальнейшие исследования корректности расчетов для других материалов. Помимо этого, свойства свариваемого материала оказывают решающее значение на воздействие каждого из входных параметров (алгоритм модуляции подогревающего импульса, усилия сжатия и радиуса сферы рабочей поверхности электродов) многофакторного эксперимента. Из анализа результатов, в качестве оптимальных параметров режима подогревающего этапа сварки для циркониевого сплава Э110 можно использовать следующие значения: усилие сжатия 250 ... 300 Н, радиус сферы рабочей поверхности электродов 20 ... 25 мм и ступенчатое повышение тока до 1,5 кА.

Результаты работы в полной мере показывают необходимость продолжения исследований по данной теме. В частности это проведение аналогичного эксперимента для этапа сварки, с использованием оптимальных параметров подогревающего этапа.

Список публикаций

1. Акболатов Е. Ж. Управление процессом контактной точечной микросварки циркониевых сплавов // Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы (МНТ-2017). Избранные доклады IV Международной научной конференции студентов и молодых ученых. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2017. – С. 5-9.
2. Слободян М. С., Киселев А. С., Акболатов Е. Ж. Многофакторная оптимизация параметров режима для стабилизации тепловыделения при контактной точечной микросварке // Сварка и диагностика на транспорте: сборник материалов докладов форума С24 – Екатеринбург, 2017. – С. 59-60.
3. Slobodyan M.S., Kiselev A.S., Akbolatov E. Zh. Prediction and stabilization of resistances between electrodes for small scale resistance spot welding // Welding in the World (отправлено в редакцию 18.05.2018 г., номер рукописи WITW-D-18-00144).

Список используемых источников

1. Займовский А. С., Никулина А. В., Решетников Р. Г. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 256 с.
2. Самойлов А. Г. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 400 с.
3. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для контактной сварки. Элементы теории. – М.: Машиностроение, 1969. – 440 с.
4. Моравский В. Э., Ворона Д. С. Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки. – Киев: Наук. думка, 1985. – 272 с.
5. Никулин С. А. Циркониевые сплавы для ядерных энергетических реакторов: Жаропрочные и радиационностойкие материалы. – М.: МИСиС, 2007. – 92 с.
6. Малыгин В. Б. Эксплуатационные свойства материалов для обоснования проектов твэлов энергетических реакторов. – М.: МИФИ, 2007. – 124 с.
7. Выговский С. Б., Рябов Н. О., Семенов А. А. и др. Физические и конструкционные особенности ядерных энергетических установок с ВВЭР. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 376 с.
8. Azarenkov N. A., Neklyudov I. M., Voyevodin V. N. Reactor materials – modern status // Journal of Kharkiv National University. Phys. Ser. «Nuclei, Particles, Fields». – 2012. – Vol. 1017. – Iss. 3(55). – P. 4-18.
9. Ма Б.М. Материалы ядерных энергетических установок / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 408 с.
10. V. Fidleris. The creep strength of quenched and aged Zr-2.5wt.Nb alloys // J. Nucl. Mater. – 1974. – Vol. 54. – No. 2. – P. 199-211.
11. Герасимов В. В., Монахов А. С. Материалы ядерной техники. – М.: Энергоиздат, 1982. – 200 с.
12. Ажажа В. М., Бутенко И. Н., Борц Б. В. и др. Сплав Zr1Nb для атомной энергетики Украины // Ядерная Физика в энергетике. – 2007. – №3(21). – С. 67-75.

13. Никулин С. А. Перспективные конструкционные сплавы для атомной энергетики // Новые материалы: Учеб. пособие. – М.: МИСиС, 2002. – С. 360-371.
14. Воеводин В. Н. Конструкционные материалы ядерной энергетики – вызов 21 века // Вопросы атомной науки и техники. – 2007. – №2. – С. 10-22.
15. Воеводин В. Н., Неклюдов И. М. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов. Киев: Наукова думка, 2006. – с. 378.
16. Миллер Г. А. Цирконий: пер. с англ. / Под ред. С. Г. Глазунова, А. А. Киселева. М.: Изд.-во иностранной литературы, 1955. – 392 с.
17. Металлургия циркония: пер. с англ. / Под ред. Г. А. Меерсона, Ю. В. Гагаринского. М.: Изд.-во иностранной литературы, 1959. – 419 с.
18. Справочник по редким металлам / пер. с англ., под ред. В. Е. Плющева – М.: Мир, 1965.
19. Материалы для ядерных реакторов: пер. с англ. / Под ред. Ю. Н. Сокурского. – Москва: Госатомиздат, 1963. – 386 с.
20. Ferrill D. A. Technical note: fatigue crack propagation in zircaloy-2 weld metal // Welding Journal. – 1971. – Vol. 50. – No. 5. – P. 206-234.
21. Патон Б. Е., Гвоздецкий В. С. Микроплазменная сварка. Киев: Наука думка, 1979. – 248 с.
22. Ривкин Е. Ю., Родченков Б. С., Филатов В. М. Прочность сплавов циркония. М.: Атомиздат, 1974. – 168 с.
23. Тюрин В. Н., Парфенов Б. Г., Евстюхин А. И. и др. Исследование структурных превращений в сварных соединениях сплавов циркония с ниобием при термической обработке // Цирконий и его сплавы. – М.: Энергоиздат, 1982. – С. 55-70.
24. Гуревич С. М. Сварка химических активных и тугоплавких металлов и сплавов. М.: Машиностроение, 1982. – 95 с.

25. Решетников Ф. Г., Бибилашвили Ю. К., Головнин И. С. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Книга 2. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 336 с.
26. Гончаров А. Б., Нероденко М. М., Ткаченко Л. М. и др. Влияние режимов термообработки на структуру и коррозионное разрушение сварных соединений сплава циркония с 2,5% ниобия в агрессивных средах // Сварочное производство. – 1990. - №5. - С. 16-17.
27. Komuro K. Welding of zirconium alloys // Welding International. – 1994. – Vol. 8. – No. 2. – P. 141-148.
28. Coleman C. E., Doubt G. L., Fong R. W. L. et al. Mitigation of harmful effects of welds in zirconium alloy components. Proceedings of “zirconium in the Nuclear Industry: Tenth International Symposium”. – Philadelphia, 1994. – P. 264-284.
29. Блащук В. Е., Поляков С. Г. Коррозионное растрескивание сварных соединений циркониевого сплава Э125 // Автоматическая сварка. – 1997. – №4. – С. 30-33.
30. Бачин В. А., Квасниц В. Ф, Котельников Д. И. и др. Теория, технология и оборудование диффузионной сварки. – М.: Машиностроение, 1991. – 352 с.
31. Бабаков А. А. Нержавеющие стали, свойство и химическая стойкость в различных агрессивных средах. – М.: Госхимиздат, 1956. – 130 с.
32. Литвинов А. П. Развитие сварки в инертных газах (обзор) // Автоматическая сварка. – 2009. – № 3(671). – С. 39-44.
33. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. акад. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 767 с.
34. Химушин Ф. Ф. Нержавеющие стали. – М.: Metallurgy, 1967. – с. 800
35. Закс И. А. Сварка разнородных сталей. – Л.: Машиностроение, 1973. – 208 с.
36. Думов С. И. Технология электрической сварки плавлением. – Л.: Машиностроение, 1987. – 461 с.
37. Кошкарев Б. Т. Металлы и их свариваемость / учебное пособие. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2013. – 378 с.

38. Дедюх Р. И. Материаловедение и технологии конструкционных материалов. Технология сварки плавлением / учебное пособие для прикладного бакалавриата. – М.: Изд-во «Юрайт», 2016. – 169 с.

39. Yang R., Cheng B., Deshon J. et al. Fuel R & D to improve fuel reliability // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2006. – Vol. 43. – No. 9. – P. 951-959.

40. Ravi Shankar A., Raju V. R., Narayana Rao M. et al. Corrosion of Zircaloy-4 and its welds in nitric acid medium // Corrosion Science. – 2007. – Vol. 49. – P. 3527-3538.

41. Белаш Н. Н., Чернов И. А., Татаринцов В. Р. и др. Исследование сварных соединений в перспективных поглощающих элементах энергетических реакторов // Вопросы атомной науки и техники. – 2009. – № 4(2). – С. 226-231.

42. Сиренко С. А. Исследование сварных соединений концевых деталей твэлов с трубами из сплава $Zr1Nb$, выполненных различными видами сварки // Вопросы атомной науки и техники. – 2003. – № 5(13). – С. 182-185.

43. Carr D. G., Ripley M. I., Brown D. W. et al. Residual stress measurements on a stress relieved Zircaloy-4 weld by neutron diffraction // Journal of Nuclear Materials. – 2006. – Vol. 359. – P. 202-207.

44. Muransky O., Holden T. M., Kirstein O. et al. Evaluation of residual stresses in electron-beam welded $Zr_{2,5}Nb_{0,9}Hf$ Zircadyne flange mock-up of a reflector vessel beam tube flange // Journal of Nuclear Materials. – 2013. – Vol. 438. – P. 154-162.

45. Неклюдов И. М., Борц Б. В., Лопата А. Т. и др. Разработка композитов на основе циркония и нержавеющей стали для изготовления переходников к конструкциям АЭС // Автоматическая сварка. – 2010. – № 8 (688). – С. 52-57.

46. Гнюсов С. Ф., Киселев А. С., Слободян М. С. и др. Формирование соединения при точечной микросварке // Сварочное производство. – 2005. – №4. – С. 37-41.

47. Гнюсов С. Ф., Киселев А. С., Слободян М. С., Советченко Б. Ф. Стабилизация контактных сопротивлений при точечной микросварке // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 312. – №1. – С. 130-133.

48. Гнюсов С. Ф., Киселев А. С., Слободян М. С., Советченко Б. Ф. Влияние состояния рабочей поверхности электродов на стабильность качества соединений при точечной микросварке // Сварка в Сибири. – 2005. – №1 – С. 60-62.

49. Слободян М. С. Управление свойствами соединений сплавов циркония: Монография. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 108 с.

50. Слободян М. С., Киселев А. С., Гнюсов С. Ф., Советченко Б. Ф. Стабилизация контактных сопротивлений при точечной микросварке // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 312. – №1. – С. 130-133.

51. Гнюсов С. Ф., Киселев А. С., Слободян М. С. и др. Управление параметрами режима при точечной микросварке // Компьютерные технологии в соединении материалов: Тез. докл. IV Всеросс. научно-технической конф. – Тула, 2003. – С. 111–113.

52. Слободян М. С., Киселев А. С., Гнюсов С. Ф. Влияние энергозатрат при точечной микросварке на формирование неразъемного соединения одноименных деталей из стали 12Х18Н10Т и циркониевого сплава Э110 // Новые материалы. Создание, структура, свойства – 2003: Труды регион. школы-семинара. – Томск, 2003. – С. 60–61.

53. Слободян М. С., Киселев А. С., Гнюсов С. Ф. Влияние скорости ввода энергии на формирование неразъемного соединения одноименных деталей из стали 12Х18Н10Т и циркониевого сплава Э110 // Современная техника и технологии: Труды X юбил. Междунар. научно-практ. конф. студентов и молодых ученых. – Томск: 2004. – С. 208–210.

54. Зуев Л. Б., Псахье С. Г., Оришич А. М. и др. Структура и свойства сварных соединений, выполненных лазерной и точечной сваркой // Физическая мезомеханика. – 2005. – т. 8. – С. 87–90.

55. Kim S. S., Lee Ch.-Yu., Yang M. S. Investigation on Nd: YAG laser weldability of Zircaloy-4 end cap closure for nuclear fuel elements // Journal of the Korean Nuclear Society. – 2001. – Vol. 33. – No. 2. – P. 175-183.

56. Une K., Ishimoto S. Crystallographic measurement of the β to α phase transformation and δ -hydride precipitation in a laser-welded Zircaloy-2 tube by electron backscattering diffraction // Journal of Nuclear Materials. – 2009. – Vol. 389. – P. 436-442.

57. Han Q., Kim D., Kim D. et al. Laser pulsed welding in thin sheets of Zircaloy-4 // Journal of Material Processing Technology. – 2012. – Vol. 212. – P.1116-1122.

58. Tao W., Cai C., Li L. et al. Pulsed laser spot welding of intersection points for Zircaloy-4 spacer grid assembly // Materials and Design. – 2013. – Vol. 52. – P. 487-494.

59. Кочергин В., Лернер А., Ляхов Д. и др. Лазерные и оптические технологии в производстве компонентов энергетических ядерных реакторов // Фотоника. – 2015. – №4(34). – С. 22-29.

60. Chuang Cai, Wang Tao, Liqun Li. Weld bead formation and corrosion behavior of pulsed laser welded zirconium alloy // Manufacturing Technology. – 2015. – No. 77. – P. 621-628.

61. Chuang Cai, Liqun Li, Wang Tao. Weld Bead Size, Microstructure and Corrosion Behavior of Zirconium Alloys Joints Welded by Pulsed Laser Spot Welding // Journal of Materials Engineering & Performance. – 2016. – No. 25. – P. 3783-3792.

62. Кочергин К. А. Контактная сварка. – Л.: Машиностроение, 1987. – 240 с.

63. Технология и оборудование контактной сварки / Под ред. Орлова Б. Д. – М.: Машиностроение, 1975. – 536 с.

64. Чулошников П. Л. Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 1974. – 231 с.

65. ГОСТ 15878-79 Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры.

66. ГОСТ 25142-92 Шероховатость поверхности. Термины и определения.

67. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.

68. Пугачев А. М., Демкин Н. Б., Рязанцев Е. И. Размеры начального контакта при точечной сварке лёгких сплавов // Сварочное производство. – 1968. – № 4. – С. 13-15.
69. Гельман А. С. Технология и оборудование контактной электросварки. – М.: Машиностроение, 1960. – 367 с.
70. Козловский С. Н. Основы теории и технологии программированных режимов контактной точечной сварки: монография. – Красноярск: СибГАУ, 2006. – 260 с.
71. Орлов Б. Д., Чулошников П. Л., Берденский В. Б. и др. Контроль точечной и роликовой электросварки – М.: Машиностроение, 1973. – 304 с.
72. Кочергин К. А. Сварка давлением. – Л.: Машиностроение, 1972. – 216 с.
73. Гельман А. С. Основы сварки давлением. – М: Машиностроение, 1970. – 310 с.
74. Гуляев А.И. Технология и оборудование контактной сварки. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
75. Гельман А. С. Начальное электрическое сопротивление при точечной сварке // Автоматическая сварка. – 1961. – №7. – С. 12-15.
76. Абрамов В. В., Шоршоров М. Х., Дрюнин С. С. и др. О характере изменения и расчете площади контакта между разнородными материалами при сварке давлением с нагревом // Сварочное производство. – 1995. – №1. – С. 11-16.
77. Стемковский Е. П., Иоран Н. Л., Ворона Д. С. и др. Измерение быстроменяющегося омического сопротивления зоны точечной контактной сварки // Автоматическая сварка. – 1973. – №10. – С. 61-63.
78. Чуларис А. А. Технология сварки давлением. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 221 с.
79. Козловский С. Н., Яшметов Е. Г. О механизмах образования выплесков при точечной сварке // Сварка и контроль – 2005: Матриалы докладов 24-й научно-технической конф. сварщиков Урала и Сибири. – Челябинск: Изд-во ЮурГУ, 2005. – С. 58–66.

80. Кабанов Н. С. Сварка на контактных машинах. – М.: Высш. школа, 1973. – 255 с.
81. Федюкин В. К. Метод термоциклической обработки металлов. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. – 192 с.
82. Соколов Н. М. Микросварка в массовом производстве радиоламп. – Саратов: Приволжское книжное издательство, 1971. – 176 с.
83. Xiaodong W., Yuanxun W., Dawei Z. Quality monitoring based on dynamic resistance and principal component analysis in small scale resistance spot welding process Received // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 86. – No. 9(12). – P. 3443-3451.
84. Dawei Z., Yuanxun W., Suning S. et al. Multi-objective optimal design of small scale resistance spot welding process with principal component analysis and response surface methodology // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2014. – No. 6. – P. 1335-1348.
85. Xiaodong W., Yuanxun W., Dawei Z. Multi-response optimization in small scale resistance spot welding of titanium alloy by principal component analysis and genetic algorithm // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 83. – No. 1(4). – P. 545-559.
86. Chang B. H., Li M. V., Zhou Y. Comparative study of small scale and ‘large scale’ resistance spot welding // Science and Technology of Welding and Joining – 2001. – Vol. 6. – No. 5. – P. 1-10.
87. Ely K. J., Zhou Y. Microresistance spot welding of Kovar, steel, and nickel // Science and Technology of Welding and Joining. – 2001. – Vol. 6. – Iss. 2. – P. 63-72.
88. Dawei Z., Yuanxun W., Xiadong W. et al. Process analysis and optimization for failure energy of spot welded titanium alloy // Materials & Design. – 2014. – Vol. 60. – P. 479-489.
89. Feng C., Tong G. Q., Zhenwu Ma. et al. The effects of welding parameters on the small scale resistance spot weldability of Ti-1Al-1Mn thin foils // Materials & Design. – 2016. – Vol. 102. – P. 174-175.

90. Dong S. J., Kelkar G. P., Zhou Y. Electrode sticking during micro-resistance welding of thin metal sheets // IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing. – 2002. – Vol. 25. – P. 355-361.
91. Полис У. Ю., Рудзит Я. А., Атауш В. Е. Расчет исходного контактного сопротивления при точечной микросварке // Сварочное производство. – 2000. – №1. – С. 24-28.
92. Филиппов А. В., Рудзит Я. А., Атауш В. Е. Расчет исходного контактного сопротивления проволока-пластина при контактной микросварке // Сварочное производство. – 2000. – №5. – С. 17-20.
93. Кислюк Ф.И. Курс электрической сварки сопротивлением. – М.: Машгиз, 1940. – 396 с.
94. Гельман А. С. Контактная электросварка. – М.: Машгиз, 1949. – 499 с.
95. Ерофеев В. А., Кудинов Р. А. Компьютерная модель контактной точечной сварки для анализа качества соединений // САПР и экспертные системы в сварке. – Тула: ТулГТУ, 1995. – С. 84–92.
96. Greenwood J. A. Temperatures in spot welding. British // Welding Journal. – 1961. – Vol. 8(6). – P. 316-322.
97. Zwolsman J. O. Quality in resistance welding. // Woodhead Publishing Ltd. – 1991.
98. Song Q. Testing and Modeling of Contact Problems in Resistance Welding: PhD Thesis. – Tech University of Denmark, 2003. – 172 p.
99. Hamedi M., Atashparva M. A review of electrical contact resistance modeling in resistance // Welding in the World. – 2017. – Vol. 61. – Iss. 2. – P. 269-290.
100. Слободян М. С. Сравнительный анализ методов расчета значений начальных сопротивлений цепи электрод-электрод при контактной точечной сварке // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – №2. – С. 162-166.
101. Дуглас Д. Металловедение циркония. – М.: Атомиздат, 1975. – 360 с.
102. Добромыслов А. В., Талуц Н. И. Структура циркония и его сплавов. – Екатеринбург: Институт машиноведения УрО РАН, 1997. – 225 с.

103. Стукалов А. И. Структурно – фазовое состояние сплава Zr – 2,5%Nb после СВЧ-обработки // Вопросы атомной науки и техники. – 2000. – №4. – С. 105-117.
104. Пузанов Д. Н., Сатин А. А. Анализ и обобщение данных по свойствам циркониевых сплавов, применяющихся в качестве конструкционных материалов // материалы конференции ОКБ «Гидропресс». – 2011.
105. Балакирев А. А. Разработка конечно-элементной модели тепловыделяющей сборки реактора ВВЭР-440 // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – №6(6). – С. 3-12.
106. Гусев М. П., Данилов В. Л., Яковлев В. Ю. Определение времени полной релаксации контактного взаимодействия между оболочкой ТВЭЛа упругим элементом дистанционирующей решетки в тепловыделяющей сборке реактора ВВЭР // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 2015. – №5. – С. 62-71.
107. Драгунов Ю. Г., Зубченко А. С., Каширский Ю. В. И др. Марочник сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 2015. – 1216 с.
108. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя, в трех томах / Под редакцией И. Н. Жестоковой. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 2. – 912 с.
109. Кириллов П. Л., Терентьева М. И., Денискина Н. Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М.: ИздАт, 2007. – 200 с.
110. Рубый С. В. Расчет параметров стружкообразования и сил резания пластичных материалов // Машины и Установки: проектирование, разработка и эксплуатация. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. – 2017. – №01. – С. 25-37.
111. А. с. 2236333, МКИ В23К 11/24. Способ контактной сварки и источник питания для его реализации. / Оpubл. 20.09.04, Бюл. №26 // Открытия. Изобретения. 2004.
112. Короткова Е. И. Планирование и организация эксперимента: учебное пособие. – Томск: Томский политехнический университет, 2010. – 122 с.

113. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий: учебное пособие. – М.: Наука, 1976. – 278с.
114. Мерл Вильгельм. Электрический контакт. Теория и применение на практике (перевод с немецкого). – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 80 с.
115. Осинцев О. Е., Федоров В. Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки. – М.: Инновационное машиностроение, 2016. – 360 с.
116. Слиозберг С. К., Чулошников П. Л. Электроды для контактной сварки. – М.: Машиностроение, 1972. – 96 с.
117. Брюханов А. А., Бобров В. М., Тарасов А. Ф. Интегральные характеристики текстуры и анизотропия свойств поликристаллического циркония, деформированного холодной прокаткой // Физика металлов и металловедение. – 1996. – т. 82. – №6. – С. 71-75.
118. Сидоров И. И., Градович А. А., Кислицкий А. А. и др. Агрегат для контактной сварки тепловыделяющих элементов атомных реакторов // Автоматическая сварка. – 2002. – №3. – С. 50-52.
119. Справочник по электротехническим материалам, в трех томах / Под редакцией Ю. В. Корицкого и др. – М.: Энегатоиздат, 1987. – Т. 2. – 464 с.
120. Физико-химические свойства окислов / Г. В. Самсонов, А. Л. Борисова, Т. Г. Жидкова и др. – М.: Metallurgy, 1978. – 472 с.
121. Белоус В. А., Носов Г. И., Хороших В. М. и др. Изменение твердости и модуля упругости поверхности сплава Э110 после облучения ионами металлов // ФИП PSE. – 2010. – Т. 8. – №2. – С. 138-142.
122. Муратов В. С., Сахаров В. В. Улучшение обрабатываемости резанием нержавеющей сталей // Успехи современного естествознания. – 2005. – № 7. – С. 73-75.
123. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
124. СанПиН 2.2.4.3359-16 Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах.

125. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

126. МУ 3207-88 Методические указания по гигиенической оценке основных параметров магнитных полей, создаваемых машинами контактной сварки переменным током частотой 50 Гц

127. ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

128. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. – СПб.: ДЕАН, 2013. – 704с.

129. ГОСТ 17.4.3.04-85 Охраны природы. Почвы. Общие требования к контролю и охране от загрязнения.

130. ГОСТ 12.1.033-81 ССБТ Пожарная безопасность. Термины и определения

Приложение А

Раздел (1) Обзор литературы

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ61	Акболатов Елдос Жаннурулы		

Консультант отделения электронной инженерии ИШНКБ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Слободян М. С.	К. Т. Н.		

Консультант – лингвист отделения электронной инженерии ИШНКБ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Игна О. Н.	Д. П. Н.		

1 Literature review

1.1 Specificity of materials used in reactor building

Thermal neutron reactors are the basis of modern nuclear power engineering in Russia and all over the world, where zirconium alloys and austenitic stainless steels are used as a structural material for the production of fuel assemblies in the active zones.

The development of zirconium alloys for AR (Atomic Reactor) core products began practically at the same time both in the US and the USSR around 50s of the last century. Within the framework, alloys based on the use of electrolytic zirconium and alloying it with niobium were created in the USSR, while the US it was based on sponge zirconium obtained by the Kroll method, by alloying tin. Thus, alloys as "Zirkaloy" type for the shells of fuel elements and other elements of the PWR (Pressurized water reactor) and BWR (Boiling Water Reactor) reactors were created in the USA in the 1950s [5]. Then there were experiments for the use of Zirkaloy alloys in the fuel tube envelopes and the channel tubes of the CANDU (Canada Deuterium Uranium), BWR and PWR reactors in Canada, England, Sweden, France, and Japan in the 60s and 70s. However, during the experience there was revealed a major drawback in alloys while using the products from the Zirkaloy in reactors: significant absorption of hydrogen, leading to embrittlement of products during long-term operation [6-8]. In order to reduce the absorption of hydrogen, Zirkaloy with a reduced content of nickel (Zirkaloy-4) was developed. The most widely used for the shells of TVELs (Fuel element) and channel tubes have found alloys of Zirkaloy-2 and Zirkaloy-4 [9].

The results of studies of binary compositions based on doping of zirconium with niobium conducted in the USSR in the 1950s demonstrated that the introduction of up to 2.5% niobium could significantly increase the strength and provide low absorption of hydrogen. Niobium additives somewhat increased not only corrosion in water at high temperature, but also sufficiently dense and strong oxide layers were formed on the surface of the samples. Thus, zirconium alloys were created for the

first WWER (Water-Water Energetic Reactor) and RBMK (Pressurized Tube Reactor) reactors with 1.0 and 2.5% niobium based on the research results in the USSR (hereinafter, with the use of electrolytic zirconium, they were given the E110 and E125 grades) [1, 10-12].

The binary alloys E110 and E125 created by Soviet scientists have been the main industrial alloys for WWER and RBMK reactors for more than 50 years. In addition, they are also widely used in foreign reactors in Canada and South Korea (Zr-2.5% Nb alloy in CANDU reactors), in France (alloy with 1% Nb M5 grade in PWR reactors) and other countries. Under operating conditions in the form of shells in WWER and PWR reactors, the E110 alloy exceeds the Zircaloy for corrosion resistance and absorbs 5-10 times less hydrogen [5].

Multicomponent alloy complexly doped with 1% Nb, 1.0 .. 1.3% Sn, and 0.3 ... 0.5% Fe was produced in the USSR by group of researchers operated by A. V. Nikulina in the 1970s. The E635 brand was assigned [5]. The E635 alloy and later modifications thereof are currently the most promising materials for operation in the core of water-cooled reactors. The complex alloying of the alloy with tin, niobium and iron increases the corrosion resistance in water and steam, niobium provides increased resistance to hydrogenation and corrosion upon irradiation, tin reduces the harmful effect of impurities on corrosion resistance, and iron improves resistance to corrosion over a wide range of water and steam temperatures.

Currently, the development of production of alloys in Russia, the United States, France, Japan and other countries is proceeding along the path of improving the already existing alloys. In particular, the program for the development of nuclear energy in Russia tends to increase the efficiency of fuel use in WWER reactors, with an average burnup of up to 65 .. 75 MW·day / kg U and 6-7 summer campaigns. Binary alloys with niobium do not have the necessary margin of properties in new operating conditions. Therefore, hard intensions are being targeted to improve these alloys. In particular, as for the alloy E110, it is the optimization of the chemical composition for alloying elements and impurities [13, 14].

For the production of fuel assemblies other than zirconium alloys, is used austenitic chromium-nickel steels stabilized with titanium of the grade 0.01%C-18%Cr-10%Ni-1%Ti, 0.08%C-18%Cr-10%Ni-1%Ti, 0.12%C-18%Cr-10%Ni-1%Ti (Russia), AISI 304, AISI 321, D9 (USA), 15 / 15Ti (France), 1.4987 (Germany) and PNC 316 (Japan) [2, 6, 7, 9, 11]. Despite of higher value of the thermal neutron absorption cross section ($2.9 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$ compared to $0.19 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$ in zirconium alloys), they have important advantages over zirconium alloys: high heat resistance and heat resistance up to 600 °C, good corrosion resistance in water up to critical parameters and superheated high-pressure steam up to 600 °C, good weldability and low cost in production [11].

Depending on the composition of the steels, their structure and the presence of impurities, stainless austenitic steels could be subjected to different types of corrosion: general, local and intergranular [2, 11]. The most dangerous for AR is intergranular corrosion where the essence is that aging of these steels at a temperature of 500-850 °C leads to the precipitation of chromium carbides along the grain boundaries. Hence, the maximum temperature and duration of operation of the fuel assemblies are limited. The main way to prevent this type of failure is the maximum possible reduction in carbon (less than 0.03%), and also the carbon binding to strong titanium or niobium carbides that produce carbides with carbon that do not dissociate even in the case of austenitizing steels at 1500-1600 °C. Therefore, chromium-nickel steels with titanium and niobium, which differ in the content of carbon, nickel and in the ratio of titanium to carbon, were widely used in the reactor industry.

Except stabilizing titanium and niobium, the resistance of austenitic stainless steels to intergranular corrosion significantly depends on the heat treatment. After a long operation at a temperature of 1000-1500°C, these steels tend to be intergranular corrosion. In order to eliminate this phenomenon, the steel is subjected to austenitization with subsequent stabilization [11].

The behavior of austenitic steels under irradiation is characterized by radiative swelling and high-temperature embrittlement [2, 11, 14]. Radiation swelling is the result of complex structural-phase transformations upon irradiation, which is largely

related to temperature and dose [15]. For a sample, for WWER-1000 reactors, at temperatures of 335 °C and doses above 75, the swelling of austenitic steels is 10%, as a result of which plasticity falls sharply. Unfortunately, radiation swelling is the main factor limiting the use of austenitic stainless steels as a construction material for future-generation reactors up to now [15]. In this case, high-temperature embrittlement is explained by the acceleration of diffusion processes caused by irradiation, as a result of which gas cavities, bubbles, etc., are formed along the grain boundaries from gas fragments of fission material [2]. Despite these negative factors, with the right choice of the steel grade and the technology for manufacturing fuel assembly elements and operating conditions, the austenitic stainless steels are reliable materials for the elements of the core of water-cooled reactors [2, 6, 7, 11].

Thus, despite the considerable efforts of researchers, zirconium alloys and stainless austenitic steels still remain the basic materials for the fabrication of elements of the active zone of the AR to date.

1.2 Welded joints of zirconium alloys and stainless steels

The operational reliability of the fuel assemblies of nuclear reactors largely depends on the quality of the welded joints. Also it is directly related to the weldability of the structural materials that are used, the design of the joints, the technological processes of their implementation, and the variability of the properties during operation under the influence of temperature, the neutron flux, stresses, and the medium.

According to one of the first monograph [16] which was devoted to the industrial use of zirconium as a structural material, the work on obtaining an all-in-one compound from zirconium began already in the 1940s with the help of arc and contact welding. At the same time, the welds were made plastic, (but without specifying any quantitative parameters), and also it was mentioned the protection of the metal when it is heated above 650 °C. In the same paper, data are given on the soldering of zirconium in vacuum or argon used as Ag and Cu as solder.

The paper [17] provides the data on good weldability of zirconium by arc welding. The justification for this was a slight warpage of the metal in the welding process due to the low coefficient of thermal expansion. In addition, there was found porosity in the weld, but as authors stated this could be eliminated by increasing the current, reducing the welding speed, or using preheating. However, the main problem encountered in the welding of zirconium which it is the contamination of weld metal with oxygen and nitrogen of air. The solution to this was to protect the inert gas welding zone that led to more complicated equipment and reduced productivity.

In papers published in the 1960s [18, 19] it is also found that good weldability of zirconium and advises welding in an inert atmosphere avoids harmful contamination with atmospheric gases. Argon-arc welding with tungsten electrodes is recommended as the main method. In addition, successful use of pressure welding for a zirconium-aluminum compound was mentioned there [18].

In addition to arc [20] and contact welding, microplasma welding was used to join zirconium in the 1970s [21]. Also, the bimetallic compound of zirconium with stainless steel was of particular relevance [22], since it was assumed that these materials could be used simultaneously for the production of core elements for nuclear reactor. However, the main problem of the bimetallic compound was the deterioration of the strength properties at elevated temperatures together with the formation of brittle intermetallic interlayers at the metal interface.

Heat treatment of welded joints of zirconium alloys of the Zr-Nb system was one of the important areas of research in the 1980s. According to the study [23], the decrease in mechanical and corrosion properties in such compounds happens due to the presence of polymorphic α - β transformation, monotectoid decomposition, as well as variable solubility of niobium in zirconium in alloys, which causes the weld and the heat-affected zone (HAZ) structural and phase inhomogeneity. In order to improve the corrosion resistance of welded joints of alloys, Zr-Nb recommends annealing in the temperature range ($\alpha + \beta$) Nb-region of the phase diagram in number of papers which are summarized as monograph [1]. However, the necessary holding

time with this annealing is 50-100 hours which is uneconomical. Therefore, based on the results of the study [23], the authors suggest the most rational solution, preheating to 700-800 °C, cooling to the ($\alpha + \beta$) Nb-region temperature at a speed of 5-100 °C/s and holding in ($\alpha + \beta$) Nb-regions for 20-25 hours. In addition, according to the author [24], a significant decrease in ductility, viscosity and corrosion resistance of welded joints is associated with saturation of weld metal and HAZ with nitrogen and carbon, rather than nitrogen and oxygen as previously thought. Therefore, their content in the joints was limited to the following amounts (% by weight): N₂ – 0.003; C – 0.03. In addition, special attention was paid to hydrogenation of surface layers and steel to use mechanical methods for cleaning edges before welding instead of chemical. One of the main methods for fusion welding of zirconium and their alloys was electron beam which provided a good formation of joints without defects. At the same time, spot, seam and diffusion welding were widely used.

The main research areas for welding zirconium and its alloys were associated with optimization of process parameters and subsequent heat treatment, as well as modernization of equipment during 1990s [2, 25-29]. Actual in the reactor industry was the sealing of fuel elements where the solution of which was the automation of the welding process [25]. The main methods used arc welding with a tungsten electrode in argon and helium [26-29], electron-beam in vacuum, contact - point, seam and butt [2, 25], magnetic impulse, diffusion in vacuum or inert gas [30] and laser radiation [27]. The main problems in obtaining a non-removable joint were the reduction of corrosion resistance and porosity of weld metal and HAZ, local non-melting, hot cracks of all kinds - crystallization, phase separation and arising in solid phase, tendency of HAZ to hydride cracking and embrittlement.

Welding of austenitic stainless steels began to develop in the 1940s that was due to the emerging need to manufacture high-quality critical structures. The initial and widely used welding method was arc welding in inert gases [31]. Further development of the welding of austenitic stainless steels in the 1960s and 1970s was associated with the creation of the fundamentals of nuclear power engineering, rocket and space technology, the success of chemical production and supersonic aviation,

where the use of new structural materials for the manufacture of parts operating under extreme conditions was required as well [32].

According to numerous of studies [33-38] stainless austenitic steels can be attributed to well-welded materials despite of its complex chemical composition. However, welding these steels and ensuring the required properties of welded joints often require special measures. The main difficulties in welding are related to the tendency to form hot cracks in the weld metal and the HAZ, as well as to the appearance after welding in the high-temperature zone of δ -ferrite, with the release of carbides from austenite, which reduces the resistance to intergranular corrosion.

The thermophysical property characteristics of austenitic steels determine certain features of their welding. The thermal conductivity of these steels is about 4 times lower, and the coefficient of linear expansion is 1.5 times higher than that of low-carbon steels. When welding, this leads to an increase in the depth of propagation of the base metal and an increase in deformations and stresses at equal linear energies. Therefore, to reduce the warpage of articles from austenitic steels, use welding regimes characterized by a 10 .. 30% reduction in the value of the welding current as compared to the current in the welding of carbon steels. Therefore, it is advisable to use those types of welding, in which the thermal effect on the welded metal will be the least. Currently, the most widely used arc in shielding gases, electron beam and various methods of welding with pressure [38].

Two main types of heat treatment are mainly used for welded joints of austenitic steels: stabilizing tempering and austenization (quenching) with the aim to [35]:

- remove of residual welding stresses if it is necessary to maintain the exact dimensions of the products;
- resist to intergranular corrosion during operation in corrosive environments;
- increase of heat resistance and resistance against local disruptions during operation in high-temperature conditions.

According to author [37], for the production of parts and assemblies operating in the core of a nuclear reactor in order to maintain the resistance to intergranular corrosion, the welds are subjected to stabilizing annealing at 850-950 °C. The residual stresses, which are the main cause of stress-corrosion cracking, are almost completely removed when heated to these temperatures.

Despite more than half a century of welding zirconium alloys and stainless austenitic steels in the reactor industry, the number of studies has increased significantly in recent years. This is largely due to the increase in the nuclear fuel campaign and the ever-increasing demands for reliability and other performance characteristics of fuel assemblies. Also, the number of fuel cells with factory defects in welded joints does not decrease [39]. Therefore, currently most of the studies are aimed to investigate and modernize the technologies used to seal fuel elements. In particular, it is welding with non-consumable electrodes in argon and helium [40-43], electron-beam [40, 42, 44] and contact butt [42, 43]. In addition, work is continuing to produce a bimetallic zirconium compound with stainless steel, using an interlayer (of nickel, niobium and vanadium) in the solid phase [45].

Currently, another important direction is the manufacture of distance lattice by laser and contact spot welding [46-54]. However, because there is small number of studies [55-61] about the use of laser welding and majority of all published works devoted to Zircaloy alloys. There is practically no research on laser welding of domestic alloys (E110, E125, E635). Therefore, for the production of distance lattice at this time remains preferable to point contact welding. Also, the introduction of modern power sources for contact machines [20], with software control, which allows setting the necessary amplitude-time parameters of the current pulse, opens new possibilities in improving the quality of welded joints and the reliability of the structures produced.

1.3 Features of the formation of welded joints in contact spot welding

The technology of contact spot welding produced by passing an electric current through parts compressed with conductive electrodes was developed over a

century ago and found wide application in many industries. One of the characteristics of process is short welding time at high forces and currents that ensure the melting of the metal. At the same time, the formation of a common zone of melting in a given size (cast core) belongs to the necessary conditions for the formation of the compound which provides the most important operational properties-the strength and tightness of the joint [4, 62-64].

According to [24], the formation of a joint in spot welding occurs largely in a single scheme consisting of the following three stages.

The first stage begins with the moment of compression of the parts that cause a plastic deformation of the microroughness in the contact surfaces (electrode-component, component-component). Subsequent switching of the current and heating facilitate the alignment of the microrelief and in a result the contact is electrically will be formed [63].

The second stage is characterized by the melting of the metal and the formation of a nucleus that grows to its maximum dimensions, in height and diameter according to the need. At the same time, metal is stirred, the surface films are destroyed, and metal bonds are formed in the liquid phase.

The third stage begins with the switching off of the current accompanied by cooling and crystallization of the metal where the result is the cast core.

Thus, the initial condition for the implementation of the process of spot welding is the presence of electrical contact (the first stage) between the surfaces of the electrode-component and component-component. However, the real surfaces of the parts always have microscopic irregularities because they are formed not only during machining of surfaces, but even during crystallization or recrystallization processes in metals. These roughnesses in mechanical engineering are characterized by roughness and waviness, parameters and terminology, which are governed by GOST [66, 67].

Therefore, during compression, the welded parts contact each other and the electrodes only in individual sections that are distributed unevenly over the entire contact surface. The summary of literature review shows that there was introduced

the concept of "actual contact area". The actual area before the heating of the parts is much less than the contour area of the contact, which is determined by the diameter of the electrode or the diameter of the sealing band [63]. The authors of [68] credit that the actual contact area is 1 .. 25% of the contour area. However, in the case of compression of parts by electrodes with a flat working surface, the spots of single microcontacts are distributed almost uniformly throughout the contour area. In the case of compression of parts by electrodes with a spherical working surface, the density of single contacts grows to its periphery.

Yet the formation of mechanical microcontacts in the contour area of the contact does not guarantee the presence of electrical conductivity in it. This happens because the real surfaces of the welded parts are always covered with an oxide film [62, 69-73]. According to the author [62], the formed oxide layer is continuously exchanged with a metal by electric charges, which is a special physical system and any mechanical treatment creates in this layer a completely destroyed and disoriented crystal structure. The depth of such layers depends on the method of machining: after fine grinding it is - 2 .. 25 mkm; after turning and coarse grinding - 75 .. 250 mkm; after polishing - 0.2 .. 0.5 mkm. According to the authors [69, 73], the oxidation process is mainly diffusional, but at the welding temperature it proceeds so intensively so that oxidation has practical importance. In addition, adsorbed gases, moisture and organic substances, and other layers that have low electrical conductivity are possible on the oxide surfaces [62, 63, 69, 73]. Stripping of such layers under normal conditions from the surface of the welded parts is practically impossible by any chemical, physical and mechanical means [62]. Even the most thorough cleaning of metal surfaces can only reduce to a minimum thickness all the oxide and adsorption layers. Nevertheless, before welding it has become practical for the surfaces of the parts with etching followed by passivation or mechanical stripping [63, 70].

The electrical conductivity of the contact surfaces is characterized by electrical resistance. As mentioned before, the presence of contact resistances is due to a relatively small area of electrical contact compared to the nominal area of the

contacting surfaces, the magnitude is affected by uneven surfaces of parts and electrodes, various non-conductive layers. In turn, the initial value and stability of contact resistance significantly affects the thermal processes in the welding zone, hence, the quality of the finished joint. This is confirmed by numerous results of studies that are proved by the process of contact spot welding [62-64, 72, 74, 75].

From the above, we can conclude that the formation of an electrical contact is a complex task with the approach “electrode-component” and “component–component” since it depends on a large number of variables (macro- and microgeometry of the parts surfaces, electrode compression forces and their geometry working surface, the presence of surface films, etc.), which are often random.

When the welding current is turned on the most unstable period of formation of the molten core begins. According to the study [62], under any mode the compression forces of electrodes are not able to significantly change the electrical resistance of micro pyramids against the value that was originally determined. The authors [76] assume that under conditions of compression of electrodes at low temperatures and contact surfaces, deformation hardening of micro-pyramids (in 1.6 .. 2.4 times) occurs, the softening of which occurs only after heating to a temperature above 1/2 of the melting point of the metal. In addition, because of the different size and degree of deformation of the micro-pyramids, the curvature of the current lines, causing the grid conductivity, increases even more, which in turn significantly affects the value of the contact resistance [4, 62, 63, 77].

As the welding current passes through the contacting micro-pyramids heating occurs and intensively formation of a common melting zone happens: this begins from the center of the joint and expands to the periphery. All non-metallic substances are partially extruded to the periphery in the initial stage of heating, and some of them are distributed throughout the volume of the cast core. Simultaneously with melting, a significant amount of heat (more than 50%) is diverted into electrodes, welded parts and the environment.

The magnitude of the contact resistance after turning on the current at certain critical temperatures (characteristic for the weld metal) is sharply reduced. This is due

to the heating of the microcontacts and the decrease in the plastic deformation resistance of the metal and in turn it leads to a simplification of the condition for the destruction of the surface film. The further resistance between the electrodes is mainly determined by the resistance of the parts themselves that increases with heating, due to an increase in the specific electrical resistance of the metal. However, this increase does not compensate for the overall resistance between the electrodes. Thus, the kinetics of the change in the total resistance usually has a falling characteristic [63, 64, 78].

The volume of metal melting increases sharply as it is known from the process. In the conditions of spot welding, due to the uneven temperature field, the increase in the volume of the metal occurs predominantly in the direction of the axis of the electrodes, since in the direction of the periphery it is restrained by the colder metal of the welded parts. As a result of the volumetric changes, additional forces arise within the emerging cast core, which considerably exceeds the compression force of the electrodes. This thermal expansion of the metal causes the electrodes to move apart. As the author of the paper [63] asserts, a noticeable movement of the electrodes is observed from the moment the current is turned on, and the maximum value is reached at the moment of switching-off.

Together with the heating process plastic deformation continues simultaneously in the joint zone due to the force of the electrodes. As a result, a sealing belt is formed around the perimeter of the detail-detail contact. The sealing belt keeps the liquid metal in the core and seals it from the interaction with the atmosphere also protecting the metal from splashes. According to the study [79], the main reason for the appearance of the splash is due to the delay in the rate of deformation from the rate of heating. Initial splashes are due to overheating of individual sections (local contacts) of relatively small area due to distortion of electrodes and poor preparation of surfaces. The probability of their appearance increases with the use of rigid welding regimes and small efforts.

The main physical processes that happen in the molten core are described most fully in this study [63]. The molten metal of the cast core under the action of

electromagnetic forces arising from the interaction of the welding current with its own electromagnetic field begins to be mixed, thereby destroying the oxide films. Such bulk forces reach a maximum value at the periphery of the nucleus and decrease to zero at the center. In most cases, the cast core has the shape of an ellipsoid, so pressure gradients arise in the molten metal not only in the horizontal but also in the vertical directions. Due to the action of these gradients the liquid layers circulate to the periphery of the nucleus, and then along the boundary of the nucleus returns to the center.

After turning off the welding current or reducing it to a certain value, the molten core is cooled and subsequent crystallization, which is accompanied by a decrease in the volume of the molten metal. Residual stresses occur in the welding zone, after metal shrinkage occurs. In order to reduce the level of these stresses and prevent the formation of shrinkage cracks and shells, after the current is turned off, the applied compressive forces of the electrodes are left for a while or increased to forge the joint [4, 62-64].

According to numerous studies [62-64, 80], the cast core has a dendritic structure due to high cooling rates after crystallization. In the case of dendritic crystallization, the plasticity of the metal decreases, the cause of which is the accumulation of brittle, low-melting alloys in the center of the nucleus [63]. To obtain a more homogeneous nucleus and a strong compound, a structure in the form of equiaxed crystals is preferred [63]. Dimensions of dendrites and HAZ are directly dependent on the welding regime. Since prolonged exposure to high temperatures leads to grain growth and thermal embrittlement of the HAZ [81].

To sum up, the quality of the joint in contact spot welding is largely determined by the initial conditions: the state of the surfaces to be welded (which vary from batch to batch of parts, oxide films, various surface layers), the magnitude and stability of the initial contact resistance (which is determined by the thermophysical properties of the parts to be welded, the macro and microgeometry of the surfaces, the compression force of the electrodes, and their geometry quality). The warming current pulse is most widely used to stabilize the initial conditions and

further heat release [4, 62]. This especially works for contact spot welding of parts of small thicknesses (less than 0.5 mm), where the values of the initial resistances have the most critical effect on the characteristics of the compounds [47-53].