

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к выпускной квалификационной работе:

«Исследование влияния режимов сварки железнодорожных рельсов на  
структуру металла сварного соединения»

ОБУЧАЮЩИЙСЯ \_\_\_\_\_  
(подпись)

Алимарданов П. Э.  
(Фамилия, имя, отчество)

допущен к защите в государственной экзаменационной комиссии  
"\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2020 г.

Руководитель д.т.н., профессор \_\_\_\_\_  
(уч. степень, звание) (подпись)

Козырев Н.А.  
(ФИО)

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор \_\_\_\_\_  
(уч. степень, звание) (подпись)

Козырев Н.А.  
(ФИО)

Директор института ИМиМ д.т.н., профессор \_\_\_\_\_  
(уч. степень, звание) (подпись)

Галевский Г.В.  
(ФИО)

Новокузнецк  
2020 г.

Министерство науки и высшего образования РФ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»

Кафедра материаловедения, литейного и сварочного производства

УТВЕРЖДАЮ:

Заведующий кафедрой, профессор  
\_\_\_\_\_ Козырев Н.А.

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

## **ЗАДАНИЕ**

на выпускную квалификационную работу

обучающегося Алимарданова П. Э группы МСП-16

**Тема бакалаврской работы:** «Исследование влияния режимов сварки железнодорожных рельсов на структуру металла сварного соединения»

**Утверждена приказом** от 23.04.2020 г., № 411– об

**Характер работы** - экспериментальная разработка

**Срок сдачи студентом законченной бакалаврской работы** 20 июня 2020 г.

### **Исходные условия и данные к работе:**

Объект исследования – образцы дифференциально закаленной рельсовой электростали. Используемое оборудование – машина МС – 20.08. Проведение макро и микроисследований, а также механических свойств сварного шва. Материал - образцы, вырезанные из рельсов типа Р65 и сваренные на различных режимах.

Методы исследования - практические эксперименты по сварке.

**Цель, задачи работы.** Систематизация, закрепление и расширение теоретических и практических знаний по специальности, дальнейшее развитие расчетно-графических навыков, проверка степени подготовленности обучающегося для самостоятельного решения инженерных задач и в целом для самостоятельной работы.

Для этого необходимо решить конкретную инженерную задачу – изучить влияния режимов сварки и после сварочного подогрева на качество сварного шва. Задача исследования- разработка новых технических решений, позволяющих повысить ресурс железнодорожных рельсов

**Содержание работы.** Введение. Литературный обзор и постановка задач исследования. Методика проведения экспериментов. Результаты и обсуждение проведенных экспериментов. Заключение. Список используемых источников. Чертежи используемого оборудования.

**Предполагаемое использование результатов** Использование технологии при сварке железнодорожных рельсов на рельсосварочных предприятиях.

**Перечень графического материала.** Графически оформленные результаты исследований. Презентация не менее 12 слайдов

**Консультанты по работе с указанием относящихся к ним разделов работы**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**Нормоконтроль** \_\_\_\_\_

Руководитель \_\_\_\_\_

Задание к исполнению принял \_\_\_\_\_ «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

**Лист замечаний**



## Аннотация

Алимарданов П.Э. Исследование влияния режимов сварки железнодорожных рельсов на структуру металла сварного соединения. Выпускная квалификационная работа по специальности «Металлургия сварочного производства» (22.03.02). – Новокузнецк, 2020. – 74с. Табл.20 , Источников 41, ил.28. Исследовано влияние режимов сварки железнодорожных рельсов на структуру металла сварного соединения.

Произведена сварка образцов рельсовой стали на Стыковой сварочной машине типа МС-20.08

Резка образцов выполнялась на Электроэрозионном проволочно-вырезном станке с ЧПУ струйного типа ДК7732 М11

Шлифовка произведена с помощью Шлифовального станка FORCIPOL 2 и шлифовальной бумаги Mirka

Неметаллические включения и структура металла исследовалась на оптическом микроскопе OLYMPUS GX-51

Микротвердость измерялась на микротвердомере модели HVS-1000А

После применения технологии ожидается улучшение механических характеристик сварного шва

Исполнитель

Алимарданов П.Э

## Summary

Alimardanov P.E. Study of the effect of railway rail welding regimes on the structure of welded joint metal. Graduation qualification work in the specialty "Metallurgy of welding production" (,,,,,). - Novokuznetsk, 2020. - 74s. Table 20, Sources 41, il.28.

Influence of railway rail welding modes on welded joint metal structure was investigated.

Samples of rail steel were welded at the Butt Welding Machine type MC-20.08

Cutting of samples was carried out on an Electroerosion wire-cutting machine with NC jet type ДК7732 M11

Grinding is done using FORCIPOL 2 Grinding Machine and Mirka Grinding Paper

Non-metallic inclusions and metal structure were examined on an OLYMPUS optical microscope GX-51

Microhardness was measured on a microhardometer model HVS-1000A

After application of the technology, improvement of mechanical characteristics of the weld is expected

Performer

Alimardanov P E

## Содержание

1. Литературный обзор и постановка задач исследования .....	10
1.1 Классификация железнодорожных рельсов.....	10
1.2 Химический состав и механические свойства рельсовой стали.....	11
1.3 Способы сварки рельсов.....	16
1.3.1 Ручная дуговая сварка рельсов.....	16
1.3.2 Термитная сварка.....	17
1.3.3 Электродуговая сварка плавящимся мундштуком .....	20
1.3.4 Газопрессовая сварка .....	21
1.3.5 Контактно стыковая сварка.....	22
1.3.5.1 Контактно стыковая сварка непрерывным оплавлением.....	26
1.3.5.2 Контактно стыковая сварка пульсирующим оплавлением.....	28
1.4 Дефекты, образующиеся при контактнo стыковой сварке .....	29
2. Методика проведения эксперимента .....	33
2.1 Технология проведения экспериментов.....	33
2.2 Измерение химического состава .....	33
2.3 Оборудование, используемое для вырезки образцов.....	34
2.4 Сварка образцов на машине МСР 2008.....	35
2.5 Работа и изменение конструкции машины для контактнo стыковой сварки МС-20.08.....	38
2.6 Полировка образцов.....	42
2.7 Изучение неметаллических включений наплавленных образцов.....	43
2.8 Измерение твердости .....	45
3. Результаты проведенных экспериментов.....	47

3.1 Химический состав рельсов.....	47
3.2 Изучение микроструктуры и неметаллических включений наплавленных образцов.....	47
3.3 Результаты измерения твердости образцов .....	61
Заключения .....	69



## **Введение**

В техническом комплексе путевого хозяйства бесстыковой путь представляет собой сложнапряженную дорогостоящую конструкцию, на содержание и эксплуатацию которой затрачиваются большие экономические, технические и человеческие ресурсы. В основе нормального функционирования сети железных дорог, одним из важных факторов, является повышение эффективности эксплуатации бесстыкового пути.

Неотъемлемой составляющей бесстыкового пути являются рельсы и их сварные стыки. К качеству рельсовой стали предъявляются высокие требования, особенно в современных условиях неукоснительного роста грузонапряженности железных дорог, скорости движения и нагрузок на ось. К сварным стыкам рельсов предъявляются не менее жесткие требования. Выход из строя сварного стыка рельсов ведет к большим экономическим затратам.

Общий срок службы бесстыкового пути непосредственно зависит от долговечности элементов его конструкции, из которых одними из наиболее ответственных являются сварные стыки рельсов.

Количество острodefектных сварных стыков рельсов, обнаруживаемых в эксплуатации средствами дефектоскопии, с каждым годом увеличивается. Так же ежегодно увеличивается количество изломов рельсов в области сварных стыков по дефектам сварки.

В техническом комплексе путевого хозяйства бесстыковой путь представляет собой сложнапряженную дорогостоящую конструкцию, на содержание и эксплуатацию которой затрачиваются большие экономические, технические и человеческие ресурсы. В основе нормального функционирования сети железных дорог, одним из важных факторов, является повышение эффективности эксплуатации бесстыкового пути.

Неотъемлемой составляющей бесстыкового пути являются рельсы и их сварные стыки. К качеству рельсовой стали предъявляются высокие требования, особенно в современных условиях неукоснительного роста грузонапряженности

железных дорог, скорости движения и нагрузок на ось. К сварным стыкам рельсов предъявляются не менее жесткие требования. Выход из строя сварного стыка рельсов ведет к большим экономическим затратам.

Общий срок службы бесстыкового пути непосредственно зависит от долговечности элементов его конструкции, из которых одними из наиболее ответственных являются сварные стыки рельсов.

Количество остродефектных сварных стыков рельсов, обнаруживаемых в эксплуатации средствами дефектоскопии, с каждым годом увеличивается. Так же ежегодно увеличивается количество изломов рельсов в области сварных стыков по дефектам сварки.

В связи с этим важным является исследование технологии сварки железнодорожных рельсов и изучение влияния режимов сварки на структуру металла и качество сварного стыка.

## **1. Литературный обзор и постановка задач исследования**

### **1.1 Классификация железнодорожных рельсов**

В России производство железнодорожных рельсов, предназначенных для звеньевого и бесстыкового пути железных дорог и для производства стрелочных переводов, регламентируется ГОСТ Р. 51685–2013[1].

- Р50; Р65; Р65К (для наружных нитей кривых участков пути); Р75;
- В – рельсы термоупрочненные высшего качества; Т1, Т2 – рельсы термоупрочненные; Н – рельсы нетермоупрочненные;
- с отверстиями на обоих концах; без отверстий;
- М – из мартеновской стали; К – из конвертерной стали; Э – из электростали;
- из слитков; из непрерывно–литых заготовок (НЛЗ);
- из вакуумированной стали; прошедшие контролируемое охлаждение; прошедшие изотермическую выдержку [2].
- по назначению: л рельсы низкотемпературной надежности (НН); рельсы повышенной износостойкости и контактной выносливости (ИК); рельсы для скоростного совмещенного движения (СС); рельсы для высокоскоростного движения (ВС);
- по термическому упрочнению: термоупрочненные, подвергнутые дифференцированному упрочнению по сечению рельса (ДТ); термоупрочненные, подвергнутые объемной закалке и отпуску (ОТ); в) нетермоупрочненные (НТ)[3].
- по классу прочности (минимальной твердости): 370 (термоупрочненные) 350 (термоупрочненные); 320 (нетермоупрочненные); 300 (нетермоупрочненные); 260 (нетермоупрочненные);
- по классу точности изготовления профиля (классу профиля): Х; Y;
- по классу прямолинейности: А; В; С;
- по классу качества поверхности: Е; Р [4].

## 1.2 Химический состав и механические свойства рельсовой стали

Таблица 1.1 – Химический состав стали по ГОСТ Р. 51685-2013

Марка стали	Массовая доля элементов, %								
	углерод	марганец	кремний	ванадий	Азот	хром	фосфор	сера	алюминий
							не более		
90ХАФ	0,83- 0,95	0,75-1,25	0,25- 0,60	0,08- 0,15	0,010- 0,020	0,20- 0,60	0,020	0,020	0,004
76ХАФ	0,71- 0,82	0,75-1,25	0,25- 0,45	0,05- 0,15	0,010- 0,020	0,20- 0,80	0,020	0,020	0,004
76ХФ	0,71- 0,82	0,75-1,25	0,25- 0,60	0,03- 0,15	-	0,20- 0,80	0,020	0,020	0,004
76ХСФ	0,71- 0,82	0,75-1,25	0,30- 1,10	0,05- 0,15	-	0,50- 1,25	0,020	0,020	0,004
90АФ	0,83- 0,95	0,75-1,25	0,25- 0,60	0,08- 0,15	0,010- 0,020	-	0,020	0,020	0,004
76АФ	0,71- 0,82	0,75-1,25	0,25- 0,60	0,05- 0,15	0,010- 0,020	-	0,020	0,020	0,004
76Ф	0,71- 0,82	0,75-1,25	0,25- 0,60	0,03- 0,15	-	-	0,020	0,020	0,004

Примечание – К обозначению марки стали добавляют спереди букву. К для конверторная и букву. Э для электропечной стали.

Согласно ГОСТ Р. 51685–2013 флокены в рельсах не допускаются. При массовой доле водорода в жидкой стали перед разливкой не более 0,00015 % допускается не проводить противфлокенную обработку заготовок и рельсов; свыше 0,00015 % до 0,00025 % противфлокенная обработка заготовок или рельсов обязательна. При отсутствии контроля массовой доли водорода в жидкой стали или

при массовой доле водорода свыше 0,00025 % проведение противфлокеной обработки рельсов обязательно [5].

Низкое содержание кислорода в стали определяет ее высокую чистоту по неметаллическим включениям. При этом в нашей стране принимаются дополнительные технологические мероприятия (глубокое раскисление металла и шлака в печи, модификация силикокальцием в ковше и др.), позволяющие обеспечить минимальное загрязнение стали кислородом и соответственно неметаллическими включениями. Конечно, для получения требуемого низкого содержания водорода и кислорода в рельсовой стали необходимо вакуумирование, однако различные варианты раскисления и ведения плавки могут обеспечить требуемый эксплуатационный уровень содержания кислорода и водорода [6].

По ГОСТ Р 51685–2013 массовая доля кислорода не должна превышать 0,002 – в рельсах категории В, 0,004 % – в рельсах категории Т1, Т2 и Н из конверторной и электростали. Норма предельного содержания азота в некоторых зарубежных стандартах вполне выполнима, [7, 8, 9].

Классификация по категориям рельсов, изготавливаемых по настоящему стандарту, приведена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Категории рельсов

Обозначение категории	Характеристика категории рельсов
ДТ370ИК	Дифференцированно термоупрочненные с прокатного/отдельного нагрева повышенной износостойкости и контактной выносливости
ОТ370ИК	Объемно термоупрочненные повышенной износостойкости и контактной выносливости
ДТ350ВС	Дифференцированно термоупрочненные с прокатного/отдельного нагрева для высокоскоростного пассажирского движения
ДТ350СС	Дифференцированно термоупрочненные с прокатного/отдельного нагрева для скоростного совмещенного движения
ОТ350СС	Объемно термоупрочненные для скоростного совмещенного движения
ДТ350НН	Дифференцированно термоупрочненные с прокатного/отдельного нагрева низкотемпературной надежности
ОТ350НН	Объемно термоупрочненные низкотемпературной надежности

Продолжение таблицы 1.2

ДТ350	Дифференцированно термоупрочненные с прокатного/отдельного нагрева общего назначения
ОТ350	Объемно термоупрочненные общего назначения
НТ320ВС	Нетермоупрочненные для высокоскоростного пассажирского движения
НТ320	Нетермоупрочненные высокой прочности общего назначения
НТ300	Нетермоупрочненные повышенной прочности общего назначения
НТ260	Нетермоупрочненные обычной прочности общего назначения
Примечание - В обозначениях категорий рельсов использованы сокращения, указанные в 1.1.	

Таблица 1.3 – Категории рельсов в зависимости от марки стали и термической обработки рельсов

Марка стали	Категории рельсов по термическому упрочнению		
	ДТ	ОТ	НГ
90ХАФ	ДТ370ИК	-	-
90АФ	ДТ370ИК	ОТ370ИК	-
76ХАФ	ДТ350НН	-	-
76АФ	ДТ350НН	ОТ350НН	-
76ХФ	ДТ350ВС ДТ350СС ДТ350		НТ300
76ХСФ	–	–	НТ320ВС НТ320

Таблица 1.4 – Механические свойства рельсов при испытании на растяжение и ударный изгиб по ГОСТ Р 51685–2013

Категория рельсов	Временное сопротивление, Н/мм	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ , Н/мм	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, Дж/см
ОТ370ИК	1280	870	8,0	20,0	15
ДТ370ИК	1280	870	9,0	14,0	15

Продолжение таблицы 1.4

ОТ350 ОТ350НН ОТ350СС	1180	800	8,0	25,0	25
ДТ350 ДТ350НН ДТ350СС ДТ350ВС	1180	800	9,0	25,0	15
НТ320 НТ320ВС	1080	600	9,0	-	-
НТ300	980	510	8,0	-	-
НТ260	900	500	8,	-	-

Примечания

Ударную вязкость для рельсов категорий ОТ350НН и ДТ350НН определяют при температуре образцов минус 60 °С, а для рельсов остальных категорий - при комнатной температуре.

Ударная вязкость для рельсов категории ДТ350НН из стали марки 76АФ, дифференцированно термоупрочненных с повторного нагрева, должна быть не

Таблица 1.5 – Твердость термоупрочненных рельсов по ГОСТ Р 51685–2013

Методы определения	Твердость рельсов категорий			
	ОТ370ИК	ДТ370ИК	ОТ350 ОТ350НН ОТ350СС	ДТ350 ДТ350НН ДТ350СС ДТ350ВС
На поверхности катания головки (точка 1)	370-409	370-409	352-405	352-405
На глубине 10 мм от поверхности катания головки по вертикальной оси рельса (точка 2), не менее	363	363	341	341
На глубине 10 мм от поверхности выкружки рельса (точки 3 и 4), не менее				
На глубине 22 мм от поверхности катания головки по вертикальной оси рельса (точка 5), не менее	352	352	321	321
В шейке (точка 6), не более	388	352	388	341
В подошве (точки 7 и 8), не более		388		363

Таблица 1.6 – Высота падения груза и температура пробы при копровых испытаниях по ГОСТ Р 51685–2013

Категория рельсов	Р50	Р65, Р65К	Р75	Температура пробы, °С	Требуемый результат испытаний
ДТ370ИК, ОТ370ИК	–	4,2	–	Минус (60±5)	Отсутствие излома и трещин
ДТ350, ОТ350	4,0	5,0	6,0		
ДТ350СС, ДТ350ВС,	–	5,0	–		
ДТ350НН, ОТ350НН	–	9,0	–		
НТ320, НТ320ВС	–	7,3	–	От 0 до 40	



## **1.3 Способы сварки рельсов**

### **1.3.1 Ручная дуговая сварка рельсов**

Зазор между свариваемыми торцами рельсов должен составлять 15 – 18 мм. Чтобы скомпенсировать эффект усадки, концы рельсов необходимо приподнять на 1,5 – 2 мм. Выполнить предварительный подогрев на расстоянии 200 мм от концов рельсов.

Подкладку размером 200 × 60 × 13 мм устанавливают и фиксируют под зазором. Данная подкладка обеспечивает плавный переход между наплавляемым металлом и материалом рельса. Это очень важно, т.к. усталостная прочность сварного шва сильно зависит от его формы и отсутствия концентраторов напряжений.

Корневые валики наплавляются в соответствии со схемой, представленной на рисунке 1.6. Наплавляемые сверху валики на подошве должны образовывать максимально гладкий шов с плавными переходами к основному металлу. Подрезы не допускаются. Подкладка удаляется, и качество формирования корня шва контролируется визуально с помощью зеркала.

После контроля рабочей температуры, с обеих сторон рельса закрепляются медные башмаки. Далее, тем же электродом, промежуточных без обрывов дуги, шейка и головка рельса заправляются до полного заполнения. При заварке шейки рельса, электрод необходимо вести по прямоугольному контуру, образованному стенками рельса и башмаков с небольшими остановками в углах [10]

Удлинение дуги может вызвать образование пор в наплавленном металле. Длина дуги контролируется путем периодических кратковременных погружений конца электрода в сварочную ванну. Смену электродов надо выполнять очень быстро, пока шлак не успел затвердеть. Когда наплавленный металл достигнет головки рельса, движение электрода надо изменить на колебательное. Когда до конца наплавки останется 6 – 8 мм, необходимо перейти на сварку другим, более

мягким электродом, который будет обеспечивать твердость наплавленного слоя, соизмеримую с твердостью металла рельса.

После окончания сварки медные башмаки удаляются, а головка рельса проковывается, пока она не остыла. Пока стык не остыл ниже 350 °С, необходимо произвести термическое снятие напряжений, нагрев сварное соединение и околошовную зону на расстоянии 100 мм от стыка до 600 – 650°С с выдержкой при этой температуре в течение 10 мин. После этого нагретую зону надо обложить теплоизолирующей минеральной ватой, чтобы обеспечить ее плавное охлаждение.

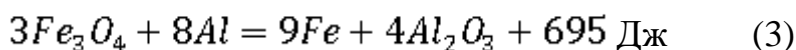
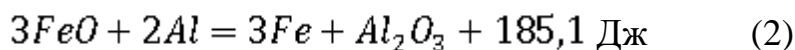
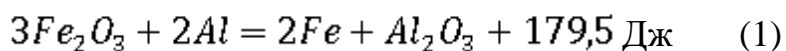
Головку и подошву рельса зачищают до придания сварному шву соответствующего профиля. Все концентраторы напряжений, такие, как подрезы на внешней поверхности подошвы, должны быть зачищены.[11]

### **1.3.2 Термитная сварка рельсов**

Термит, употребляемый для сварки рельсов, изготавливается из железной окалины – отходов сталепрокатного производства и металлического алюминия. Их размельчают до получения зёрен диаметром от 0,1 до 2,5 мм. Первичный алюминий должен содержать не менее 98 – 99 % чистого алюминия. Перед размолом окалина должна быть хорошо обожжена с целью удаления из неё влаги и масла [12-20].

Пыль из размельчённой окалины и алюминия удаляется воздушным сепаратором. Окалина по своему химическому составу различна. Чем меньше в окалине кремния, тем она лучше для получения сварочного термита. Содержание в окалине кислорода не должно быть ниже 25 %. Железо с кислородом может образовать три окисла: FeO – закись железа; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – окись и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> – закись–окись. При нормальных условиях составляющие термитной смеси не вступают во взаимодействие, но если термитную смесь подогреть до 1100 – 1200 °С, то между её компонентами начинается химическая реакция. В результате этой реакции металлический алюминий соединяется с кислородом окалины и превращается в окись алюминия, а окалина, отдавая кислород алюминию, превращается в железо. Эта реакция идёт с большим выделением тепла, поэтому если она уже началась, то

далее продолжается произвольно, нарастающими темпами и прекратить её невозможно – она неуправляемая. Химическая реакция выражается следующим образом [13,14,15,16,]:



Термитная смесь содержит по весу 23,7 % алюминия и 76,3 % окислы. При сгорании 1,0 кг термитной смеси выделяет 762 ккал тепла, что позволяет получить температуру разогретого металла порядка 2700 – 3000 °С [17].

Окислы и алюминий могут содержать различные примеси. Поэтому процент содержания алюминия и окислы в термитной смеси рассчитывается с учётом чистоты алюминия и содержания кислорода в окисле. Практика термитной сварки показала, что окислы в термитной смеси должно быть на 7 – 8 % больше расчётного содержания. Тогда термитный металл получается плотнее и лучше сваривается с металлом рельса.

Чтобы лучше использовать образующееся при реакции тепло и увеличить выход металла, в термитную смесь для сварки рельсов при изготовлении добавляют мелко измельчённые кусочки стали – отходы гвоздильного производства. При расплавлении сталь увеличивает выход термитного металла и понижает начальную температуру продуктов реакции термита. В зависимости от веса порции термита в термитную смесь добавляют этих отходов (называемых обсечкой) от 12 до 20 % к весу предполагаемого выхода термитного металла. Для улучшения механических свойств металла сварного шва в термитную смесь вводят ферросплавы, в большинстве случаев ферромарганец, ферросилиций, ферромolibден, ферротитан, феррованадий. Ферросплавы обуславливают получение термитного металла с механическими свойствами, близкими к металлу свариваемых рельсов [18].

Для сварки рельсов в настоящее время применяется способ промежуточного литья [19], при котором из продуктов термитной реакции используется только расплавленный металл без шлака [20, 21].

Жидкий металл является одновременно источником тепла и присадочным материалом, соединяющим концы рельсов 1. Свариваемые концы рельсов при этом способе устанавливаются с зазором  $25 \pm 1$  мм и заключаются в соответствующие для данного способа сварки формы 2. Для сжигания термита при сварке способом промежуточного литья применяется конический тигель 3 с выпускным отверстием в дне. Расплавленный металл заливается из тигля в форму и заполняет оставленный между торцами рельсов зазор, начиная с подошвы рельсов, куда попадает через специальный литник 6. Постепенно заполняя зазор и свободное пространство между рельсами и стенками формы, металл вызывает расплавление соприкасающихся с ним стенок рельсов, а, застывая, образует с рельсами одно целое – сварное соединение. Вытекающий из тигля за металлом шлак стекает по жёлобу, оставляя над металлом лишь слой небольшой толщины.

Этот слой шлака предохраняет термитный металл от быстрого остывания, чем способствует более свободному выделению газов из жидкого металла и получению более плотного металла.

В середине XX в. стыковая контактная сварка вытеснила алюминотермитную. В настоящее время в России алюминотермитная сварка получила своё второе рождение, в первую очередь, при соединении рельсов в районе стрелочных переводов, так как контактные машины по ряду причин не могут быть применены в этих местах. В их числе невозможность подсоединения захватов контактных машин в ряде стыков стрелочного перевода и невозможность в стрелочном переводе сделать петлю из рельсов, требуемую при контактной сварке.

Алюминотермитная сварка железнодорожных рельсов должна выполняться в строгом соответствии с техническими условиями ТУ 0921–127–01124323–2005 [22]. Нарушение технологии сварки, использование некачественных сварочных материалов и т.п. приводит к дефектам в сварном соединении и может способствовать его разрушению.

### 1.3.3 Электродуговая сварка плавящимся мундштуком

Электродуговая сварка плавящимся мундштуком (ЭСМ) – новый технологический процесс, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона для соединения стальных деталей толщиной 16 – 250 мм [23]. Являясь разновидностью вертикальной электродуговой сварки с принудительным формированием, он отличается использованием специального электрода с изолирующим покрытием, размещаемого в зазоре между свариваемыми кромками и выполняющего роль плавящегося мундштука, через который в процессе сварки осуществляется подача сварочной проволоки (от одной до четырех). Сварка осуществляется в узкий зазор (8 – 20 мм) без разделки кромок, что обеспечивает высокую производительность процесса (коэффициент наплавки достигает 22 – 24 г/А·ч) при умеренном удельном тепло вложении (25 – 50 кДж/см<sup>2</sup>).

Применительно к сварке рельс разработан аппарат АРС (рисунок 1.12). Сварка осуществляется движущимся мундштуком, совершающим возвратно–поступательные перемещения переменной амплитуды, благодаря чему обеспечивается полный провар свариваемых кромок по всему сечению рельса.

Характеристики аппарата АРС приведены в таблице 1.7, механические свойства сварных соединений – в таблице 1.8.

Таблица 1.7 – Технические характеристики аппарата АРС

Номинальное напряжение питающей сети постоянного тока, В (Питание аппарата осуществляется от разъема источника сварочного тока ФОРСАЖ-500)	27/36
Мощность, потребляемая источником, кВА, не более	20 (3×380 В)
Номинальный сварочный ток, А при ПВ = 100%	400
Диаметр применяемой порошковой проволоки, мм	2,4
Пределы регулирования скорости подачи электродной проволоки, м/ч	50 – 300
Скорость перемещения электрода, м/ч	4 – 12
Ход электрода, мм	180
Частота колебаний электрода, Гц	0,5 – 2

Продолжение таблицы 1.7

Амплитуда колебаний конца электрода, мм	0 – 20
Габаритные размеры ДхШхВ, мм	1320×520×850
Масса аппарата без проволоки, кг, не более	60

Таблица 1.8 – Механические свойства сварного соединения рельс Р65

Твердость металла шва	280 – 320 НВ
Предел прочности металла шва	850 – 900 МПа
Результаты испытаний на статический изгиб: - разрушающая нагрузка - прогиб	1500–1650 кН 16 – 22 мм

### 1.3.4 Газопрессовая сварка рельс

При газопрессовой сварке мощные горелки, работающие на ацетилено–кислородной или пропано–кислородной горючей смеси, нагревают стыкуемые концы рельсов до пластического состояния, и затем осуществляют их сжатие. В процессе сжатия (удельное осевое давление – от 15 до 20 МПа) металл, находящийся в пластическом состоянии, выжимается, образуя по всему профилю рельса усиление, которое затем удаляется.

Для повышения качества сварки необходимы предварительная тщательная обработка торцов рельсов и их обезжиривание дихлорэтаном  $C_2H_4Cl_2$  или четыреххлористым углеродом  $CCl_4$ .

Контурная горелка, охватывающая профиль рельсов, в процессе сварки колеблется с амплитудой до 30 мм и частотой до 50 колебаний в мин. Перемещение пламени горелки необходимо для равномерного прогрева стыкуемых рельсов и устранения местного оплавления металла.

При сжатии рельсов пламя горелки создает газовую защиту от окисления. Осадка рельсов достигает 20 мм.

Средний расход газов на сварку рельсов Р50 составляет: для кислорода – 900 л на стык, для ацетилена – 950 л. Время сварки: 6 – 8 мин. на стык.

Для газопрессовой сварки характерно получение высокопрочного сварного соединения, по прочности приближающегося к целому рельсу. Нормализация производится горелкой, которой придается удвоенная амплитуда колебаний принятого режима сварки с нагревом стыка рельсов до 850 – 900 °С. Расход газа на нормализацию – 60 % от расхода на сварку [24].

Недостатками газопрессовой сварки являются:

- 1) громоздкость и сложность применяемого сварочного оборудования;
- 2) трудность сварки неравномерно изношенных рельсов;
- 3) необходимость осадки рельсов до 20 мм;
- 4) сложность равномерного подогрева стыка рельсов под сварку;
- 5) сложность определения момента наступления оптимальной температуры нагрева под сварку.

### 1.3.5 Контактно стыковая сварка

В путевом хозяйстве России и стран СНГ контактный способ сварки рельсов прочно занял ведущее место и практически вытеснил все остальные известные способы. Этим способом выполняется 95% общего объема работ по сварке рельсов .

Способы контактной сварки рельсов

Различают два основных метода нагрева металла при контактной стыковой сварке. Метод сварки сопротивлением состоит в том , что во время сварки ток проходит через плотно сжатые торцы деталей в месте будущего сварного соединения . В каждом элементарном объеме металла выделяется тепло , количество которого по закону Джоуля-Ленца пропорционально квадрату плотности тока, удельному сопротивлению металла и времени протекания тока (Рисунок 1.1 )

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (4)$$

где :  $Q$  - количество выделенного тепла, Дж;

$I$  - Сила тока в сварочной цепи , А ;

$R$  - сопротивление проводника или участка цепи , Ом;

$t$  - время прохождения тока, с.

Из формулы следует, что локализованный нагрев стыка возможен в том случае если величина сопротивления между свариваемыми деталями будет значительно превышать сопротивление на всем участке цепи .

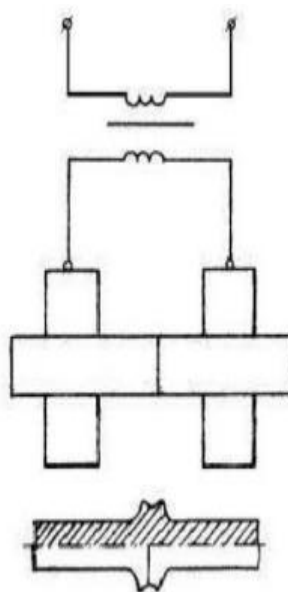


Рисунок 1.1 - Схема контактно стыковой сварки сопротивлением

Метод сварки оплавлением состоит в том, что во время сварки детали , к которым подведено напряжение, плотно не сжимаются , а лишь соприкасаются (рисунок 1.2). Благодаря большой плотности тока в местах соприкосновения металл быстро нагревается, элементарные контакты между деталями превращаются в жидкие перемычки, которые под действием электродинамических сил или в результате нагрева разрушаются. Необходимый для сварки разогрев торцов деталей можно получить перемещая их навстречу друг другу так, чтобы процесс возникновения и разрушения элементарных контактов был непрерывным.



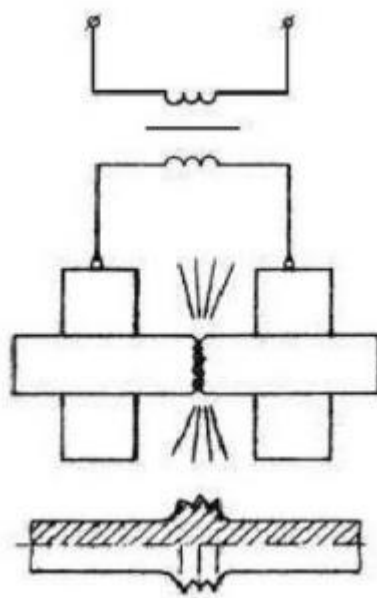


Рисунок 1.2 - Схема контактно стыковой сварки оплавлением

В заключительной фазе сварки сопротивлением и оплавлением разогретые торцы деталей подвергаются пластической деформации в осевом направлении, характеризующейся большой скоростью и значительными удельными давлениями. В результате такой осадки осуществляется формирование сварного соединения.

Зону сварки в большинстве случаев можно подразделить на пять характерных областей: область образования - контакт между свариваемыми деталями ; две области контакта электродов с деталями; части деталей находящиеся между указанными областями [25].

В соответствии с этим делением общее сопротивление участков зоны сварки можно представить в виде суммы

$$R = R_{эд1} + R_{д1} + R_k + R_{д2} + R_{эд2}$$

где  $R_{эд1}$  и  $R_{эд2}$  - переходные сопротивления электрод -деталь

$R_k$  - Переходные сопротивления между деталями

$R_{д1}$  и  $R_{д2}$  - сопротивления тех частей деталей по которым протекает ток

Разделение сварочного контакта на такие зоны условно, так как электрические поля в них взаимно связаны . В процессе сварки составляющие сопротивления значительно изменяются вследствие нагрева металла и его пластической деформации. Роль отдельных составляющих  $R$  в общем тепловом балансе сварочного контакта зависит от свойства материала и состояния

поверхностей торцов деталей , давления , размеров контакта и в большей мере от принятого способа нагрева металла .

При стыковой сварке детали нагреваются теплотой , которая выделяется сварочным током на контактном сопротивлении между деталями и на собственном сопротивлении деталей . Контактное сопротивление между электродами и свариваемыми деталями относительно мало и практически не влияет на нагрев зоны сварки. Общее количество теплоты, выделяемое на участке между электродами, можно выразить формулой

$$Q = \int (R_k(t) + R_{d1}(t) + R_{d2}(t)) I^2(t) dt \quad (5)$$

Сварка оплавлением имеет преимущества перед сваркой сопротивлением. В процессе оплавления выравниваются все неровности стыка, а оксиды и загрязнения удаляются, поэтому данный способ не требует особой подготовки места соединения. Можно сваривать заготовки с сечением, разнородные металлы

Наиболее распространенными изделиями изготавливаемые стыковой сваркой, служат элементы трубчатых конструкций, колеса и кольца, инструмент и самое главное рельсы.

Существует три вида сварки оплавлением: оплавление с предварительным прерывистым подогревом, непрерывное оплавление и пульсирующее оплавление. Оплавление с предварительным прерывистым подогревом

Отличается от других способов сварки методом оплавления тем, что оплавлению металла предшествует предварительные его подогрев.

Прерывистый подогрев получают либо подачей тока импульсации, либо разрывом контакта в месте сварки за счет перемещения подвижной системы сварочной машины. [26]

При прерывистом нагреве, когда изделие периодически находится под током, процесс нагрева складывается из ряда циклов. Торцы изделия нагреваются током неравномерно по всему сечению и на неодинаковую глубину; в момент прерыва тока вследствие теплопередачи происходит уравнивание разности температур в нагреваемой зоне. Таким образом повторяются несколько циклов подогрева, после

чего наступает непрерывное оплавление. Переход к непрерывному оплавлению осуществляется автоматически, по достижении необходимой температуры нагрева.

Для сварки рельсов типа Р65, Р75 необходимы мощности 450 -500 кВ·А. Сварочные машины (зарубежного производства) отличаются еще большей мощностью (более 700 кВ·А), что позволяет повысить производительность при сварке. Однако энергопотребление во всех случаях остается примерно одинаковым – 4,5-5,5 кВ·Ч/стык, что обусловлено идентичными характеристиками нагрева, присущими при сварке прерывистым подогревом, которая отличается низким термическим и электрическим КПД [27].

Низкие энергетические показатели – не единственный недостаток метода прерывистого подогрева. При относительно длинных коротких замыканиях, исчисляемых несколькими секундами, происходит неравномерный нагрев торцов, который появляется тем в большей степени, чем больше развита площадь сечения свариваемых деталей, что особенно заметно при сварке рельсов, имеющих резко выраженную разнотолщинность элементов сечения. Поэтому при выборе режимов сварки стремятся обеспечить такой общий нагрев концов рельсов, при котором обеспечивается необходимая пластичность металла торцов свариваемых деталей. В свою очередь это приводит к значительному увеличению зоны термического влияния, и как следствие, к снижению эксплуатационных свойств сварного стыка [28]

#### **1.3.5.1 Контактно стыковая сварка непрерывным оплавлением**

В отличие от технологии сварки рельсов оплавлением с предварительным прерывистым подогревом сопротивлением, используемой на большинстве рельсосварочных машин, при непрерывном оплавлении процесс нагрева рельсов происходит без длительных коротких замыкания и последующих за ними пауз. С момента возбуждения оплавления ток в сварочной цепи протекает непрерывно, а его величина в несколько раз ниже чем при коротких замыканиях

Возбуждение оплавления без предварительного подогрева сопротивлением стало возможным благодаря значительному (в 2 -3 раза) снижению сопротивления сварочной цепи машин и использованию в них регуляторов скорости и напряжения, которые автоматически изменяют мгновенные значения этих величин в функции сварочного тока. Кроме того получение нагрева, требуемого для качественной сварки рельсов при непрерывном оплавлении, достигается за счет программного регулирования напряжения, подводимого к свариваемым рельсам, и скорости оплавления [29].

Применяемые в машинах системы управления обеспечивают автоматическое выполнение заданных программ независимо изменения условий эксплуатации сварочных машин (точность обрезки концов рельсов, изменения напряжения электрической сети и сопротивления источника энергоснабжения, изменения усилия необходимого для перемещения свариваемой плети рельса).

В основу конструкции нескольких поколений рельсосварочных машин, разработанных ИЭС в течение последних 35 лет, положен метод сварки непрерывным оплавлением с регулированием параметров, обеспечивающим получение нагрева, требуемого для качественной сварки рельсов.

В отличие от технологии сварки рельсов с нагревом сопротивлением метод дает следующие преимущества: обеспечивается равномерный нагрев по всему сечению свариваемых рельсов; низкое сопротивление сварочной цепи и используемые регуляторы напряжения и скорости позволяют получать устойчивое оплавление при минимальных напряжениях, при этом соответственно уменьшается глубина кратеров на поверхности оплавления свариваемых рельсов и снижается вероятность появления в стыке различных дефектов; независимо от точности обрезки рельсов и частоты их зачистки гарантируется стабильное воспроизведение заданных температурных циклов и соответственно стабильное и высокое качество сварных соединений:

При оплавлении обеспечиваются высокие энергетические показатели процесса, т.к. практически вся энергия генерируется в контакте между деталями, и потери в сварочном контуре машины минимальны. Поэтому

представляется возможным значительно (3-4 раза) уменьшить мощность, потребляемую сварочной машиной [30].

Перечисленные преимущества позволили создать портативные машины на контактные сварки рельсов в полевых условиях, которые в настоящее время широко используются во всем мире.

### **1.3.5.2 Контактная стыковая сварка пульсирующим оплавлением**

В результате исследований, проведенных в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины в последние годы, были найдены способы значительного повышения эффективности процесса оплавления. Сущность этих способов, защищенных патентами, в том, что сопротивление между деталями в процессе оплавления непрерывно поддерживается на уровне, при котором обеспечивается максимально возможная полезная мощность, генерируемая в контакте между деталями

Стабильный процесс оплавления в режиме II возможен только благодаря использованию быстродействующих регуляторов напряжения, тока и производных от этих параметров. При одинаковой установленной мощности источника питания и напряжения в сварочной цепи величина тока при пульсирующем оплавлении выше в 1,8 - 2,5 раза чем при непрерывном оплавлении и поддерживается на постоянном уровне в течение всего периода сварки. При этом в 2 - 2,5 раза меньше припуски на оплавление и увеличивается скорость нагрева. в зависимости от установленных значений мощности качественную сварку рельсов при пульсирующем процессе можно получить при изменении длительности нагрева в широких пределах (рисунок 1.9). Это дает возможность выбирать наиболее оптимальные термические циклы при сварке рельсов с разным химическим составом и их свойствами [31].

Отличительной особенностью пульсирующего оплавления является возможность получения высококонцентрированного нагрева, при котором до высокой температуры нагреваются при контактных слоях металла при

относительно узкой общей зоне нагрева в отличие от сварки с подогревом. Благодаря этому качественную сварку можно получить при меньшей общей ширине зоны нагрева и величине осадки, т.к. большая часть деформации концентрируется в при контактном слое [32].

Процесс изменения скорости оплавления во время сварки регулируется по кривые тока. В компьютерной системе задается значение скорости оплавления и наклон кривой значениями тока  $I$ . Меняя эти параметры, можно изменить интенсивность нагрева стыка в зависимости от необходимого тепловложения в стык для разных марок сталей. Непрерывное регулирование напряжения и скорости, поддерживающее их оптимальное соотношение в период оплавления, предшествующее осадке, обеспечивает более ровную поверхность оплавления торцов рельсов и отсутствие на ней кратеров, в отличие от технологий, предусматривающих жестко заданные указанные параметры. Благодаря этому при сварке пульсирующим оплавлением значительно меньше вероятность появления по линии соединения различных оксидных включений. При сварке рельсов, отличающихся повышенным содержанием легирующих элементов, применение пульсирующего оплавления позволяет получить наиболее высокие показатели механических свойств. Протяженность раз упрочнённых участков минимальная [33].

#### **1.4 Дефекты, образующиеся при контактной стыковой сварке**

Сварные рельсы в изломе не должны иметь дефектов. Качественно сваренные и обработанные рельсы при испытании обычно сильно деформируются и имеют высокие показатели пластичности и прочности металла. При этом наблюдается кристаллический и волокнистый характер излома рельсов. В изломах могут встречаться также серые силикатные скопления [33].

Кристаллический излом имеет блестящую поверхность металла крупно- и мелкозернистого строения. В зависимости от схемы испытаний разрушение сварных

рельсов происходит путем отрыва зерен по слабым местам в подошве или головке. Поверхность излома состоит из мелких блестящих плоскостей (кристаллов), наклоненных друг к другу под любыми углами. Размер кристаллов зависит от степени перегрева [34].

Волокнистый излом характеризуется матовым цветом поверхности, мелкозернистым строением металла с вытянутыми зернами или срезом их под углом  $45^\circ$ . Такой излом получается у сварных рельсов, которые при испытании обычно сильно деформируются и имеют высокую пластичность металла. Характерен для сварных стыков после термической обработки. Цвет изменяется в зависимости от угла зрения: темно-серый или светло-матовый. Поверхность излома состоит из крутых выступов и впадин [35].

В изломе могут встречаться отдельные серые (матовые) участки, которые наблюдаются только в растянутой зоне. Силикатные скопления проявляются в виде цепочек и линз, деформированных между застывшими зернами и вытянутыми волокнами металла. Они не являются браком, если их насчитывается не более трех общей площадью до  $15 \text{ мм}^2$ . Если пятен более трех или площадь превышает  $15 \text{ мм}^2$ , то данный стык должен быть забракован [36].

Наличие в рельсах дефектов сварки, обработки стыков и основного металла может вызвать преждевременный выход их из строя с развитием усталостных трещин в подошве, шейке, головке. Изъятие из пути сварных рельсов по дефектам в подошве происходит в начальный период эксплуатации при пропуске 50–100 млн.т груза брутто и особенно при низких температурах [37,38,39].

Такие случаи разрушения бесстыковых плетей и длинных рельсов в пути в настоящее время встречаются очень редко и составляют меньшую часть общего выхода по дефектам сварки, обработки стыков и основного металла. Повреждения сварных рельсов по дефектам головки наблюдаются в эксплуатации позже, после прохода 100–250 млн.т груза брутто и более [40].

Эти дефекты сварки выявляются с помощью ультразвуковой дефектоскопии уже в пути только после появления и развития усталостной трещины. Дефекты и повреждения в головке сварных стыков рельсов при эксплуатации наблюдаются

значительно чаще, чем в шейке и подошве. При эксплуатации сварных стыков с усталостными трещинами в головке может произойти полный излом рельсов по всему сечению [41].

Нарушение технологии сварки стыков рельсов является недопустимым, так как оно приводит к появлению различных дефектов в сварном стыке.

К наиболее распространенным дефектам сварки, вызывающим разрушения рельсов в эксплуатации, относятся: продольное расслоение, рыхлости (пережог), неполная сварка, пузыри, не провары, кратерная усадка, медное скопление, поджог, силикатные скопления.



## Выводы по главе 1

1. Для соединения рельсов используется электродуговая, термитная, газопрессовая и контактная сварка. Электродуговая сварка рельсов используется в основном на промышленных и малоответственных путях, так как она малопроизводительна, качество получаемых соединений не соответствует современным требованиям. Термитная сварка, которая обеспечивает более надежное качество сварного соединения, чем электродуговая, широко распространена за границей. Все же она имеет относительно малую надежность сварных стыков рельсов и соответственно низкие технико–экономические показатели жизненного цикла, поэтому получила малое распространение в нашей стране. Газопрессовая сварка позволяет получить высокие механические свойства сварного соединения, однако у нее низкая производительность и она требует больших затрат.

2. Самое широкое распространение в России получила контактно стыковая сварка рельсов, благодаря надежности получаемых соединений, производительности, экономической эффективности. Но при появлении новых рельсовых сталей возникают трудности получения качественных сварных соединений: при быстром нагреве сварного стыка, которое обеспечивается методом пульсирующего оплавления, происходит интенсивное охлаждение З.Т.В. с формированием высокопрочного слоя со структурой мартенсита на месте микрообъемов с повышенным содержанием хрома, никеля и углерода. Участки мартенсита, играют роль концентраторов напряжения и приводят к образованию дефектов в сварных стыках (к развитию усталостных трещин в головке, шейке и подошве рельса с хрупким изломом).

## 2 Методика проведения исследования

### 2.1 Технология проведения экспериментов



Рисунок 2.1 – Технология проведения экспериментов

### 2.2 Изучение химического состава рельсов

Отбор проб для определения химического состава стали производился по ГОСТ 7565–81. Образцы вырезались из поперечного сечения головки рельса сечением 40 × 40 мм и толщиной 30 мм. Анализ проводился спектральным методом с фотографической регистрацией спектра по ГОСТ 22536.0 на рентгенофлуорисцентном спектрометре XRF – 1800 фирмы SHIMADZU.

## 2.3 Оборудование, используемое для вырезки образцов

Образцы разрезали перпендикулярно сварному шву на два образца методом EDM на канатно-отрезном станке EDM с ЧПУ струйного типа DK7732 M11.

Станки EDM серии DK77 с генератором ME11 - это металлорежущие станки с ЧПУ [46].

Благодаря возможности изменять параметры обработки путем передачи команд управления из системы ЧПУ в генератор без прерывания процесса EDM, металлорежущие станки серии DK77 с генератором ME11 имеют функцию многоходовой резки:

На первом проходе резания EDM станок выполняет прямой рез с учетом дальнейшей обработки (последующих проходов) для получения более низкой шероховатости поверхности. В случае резки детали пуансонного типа выходят из перемычки без завершения резки до конца прохода, чтобы пуансон не выпал.

На втором проходе резания EDM траектория контура резания перемещается к заданному эквидистанту (типичное значение 0,02 мм), система ЧПУ EDM меняет режимы EDM на более мягкие, и поверхность «очищается» после предыдущего прохода. Таким же образом можно выполнить несколько проходов вырезки EDM, достигая лучшего качества обработки [47]. Технические характеристики DK 7732 и ME11 представлены в таблице 2.3.

После резки цилиндрические образцы типа III № 6 с расчетной длиной рабочей части 30 мм были обработаны из одного образца по ГОСТ 1497–84. Вторым образцом был подготовлен для металлографического анализа неметаллических включений и микроструктуры сварного соединения.

Таблица 2.3 - Технические характеристики DK 7732 ME11

Характеристика	Значение
Перемещение рабочего стола X x Y, мм	320 x 400
Рабочий стол, мм	415 x 635
Максимальная толщина резания, мм	300 (500 - опция)
Максимальный угол наклона проволоки	$\pm 3^\circ / 100 \text{ мм}$ ( $\pm 15^\circ / 100 \text{ мм}$ - опция)
Максимальная нагрузка на стол, кг	400
Максимальная производительность, мм <sup>2</sup> /мин	160
Наилучшая шероховатость поверхности, мкм	Ra 2,5 - при однопроходной обработке Ra 1,2.. 1,5 - при многопроходной обработке
Диаметр проволоки, мм	Ø 0,12-0,25
Максимальный рабочий ток, А	6
Общая потребляемая мощность, кВт	2
Точность обработки, мм	не хуже $\pm 0,007$
Габаритные размеры	
ДхШхВ, мм	1450x1100x1600
Масса, кг	1600

## 2.4 Сварка образцов

Для сварки вырезаются образцы из рельсов сечением 10 мм × 30 мм и длиной 90 мм. Сечение образцов выбиралось из условий возможности ведения процесса сварки непрерывным оплавлением на машине МС – 20.08. Всего было сварено 9 образцов. В данной работе были изучены первые 4 образца

Исследование влияния различных термических циклов на структуру металла шва заключалось в том, что, сварка образцов производилась на оптимальном

режиме, после чего осуществлялся подогрев по заданным программам режимы подогрева, которые приведены в таблице 2.1. В дальнейшем образцы разрезались и производилось исследование микроструктуры сварного шва и зон термического влияния.

Таблица 2.1 – Режимы подогрева для машины стыковой сварки МС – 20.08

№ Опыта	X1 (Время осадки)	X3 (Промежуток импульса)	X4 (Количество импульсов)	X1 (Время осадки)	X3 (Промежуток импульса)	X4 (Количество импульсов)
0	-	-	-	-	-	-
1	+	+	+	30	15	4
2	+	+	-	30	15	2
3	+	-	+	30	10	4
4	+	-	-	30	10	2

Образцы соединялись контактной стыковой сваркой на машине типа МС – 20.08.

Машина сварочная типа МС – 20.08 (рисунок 2.1) предназначена для контактной стыковой сварки изделий компактного сечения из углеродистой стали.



Рисунок 2.5 – Общий вид машины сварочной типа МС – 20.08

Технические данные машины стыковой сварки МС – 20.08 приведены в таблице 2.

Таблица 2.2 – Технические данные машины стыковой сварки МС – 20.08

Номинальное напряжение питающей сети, В	380
Номинальная частота, Гц	50
Количество фаз:	
силовых цепей	2
вспомогательных цепей	3
Мощность при ПВ = 50 %, КВА	125
Наибольший вторичный ток, А	52 000 ± 10 %
Номинальное давление сжатого воздуха в сети, Па (кГс/см <sup>2</sup> )	617,4 · 10 <sup>3</sup> (6,3)
Номинальный длительный вторичный ток, А	9 000 ± 30 %
Наибольшая потребляемая мощность при коротком замыкании, КВА	455
Коэффициент мощности короткого замыкания на номинальной ступени при расстоянии между зажимами	
наибольшем, не более	0,42
наименьшем, не более	0,45
Число ступеней регулирования вторичного напряжения сварочного трансформатора	16
Номинальная ступень регулирования	15
Наибольшее свариваемое сечение при полуавтоматической сварке с предварительным подогревом концов свариваемых изделий, мм <sup>2</sup>	2 000
Наибольшее свариваемое сечение при автоматической сварке методом непрерывного оплавления, мм <sup>2</sup>	1 000
Номинальное усилие зажатия, кН (кГс)	98 (10 000)
Привод осадки	электромеханический
Номинальное усилие осадки, кН (кГс)	61,7 (6 300)
Расстояние между зажима, мм	от 22 ± 2 до 100 ± 2
Ход подвижного зажима при сварке непрерывным оплавлением, мм	20
Расход охлаждающей воды при давлении 0,15 Мпа (1,5 кГс/см <sup>2</sup> ), л/мин, не менее	10
20. Масса машины, кг, не более	2 160

## 2.5 Работа и изменение электрической цепи машины МС – 20.08

Система управления механизмами представлена на принципиальной схеме (рисунок 2.1). Перед началом сварки необходимо установить и зажать свариваемые детали. Зажатие детали в неподвижном зажиме производится нажатием кнопки КН1, в подвижном КН3. При неправильном зажатии зажимы можно выключить кнопками КН2 и КН4. Если детали зажаты правильно, включается сварка. Включение сварки производится кнопкой КН5. При нажатии на кнопку КН5 включается реле Р6 и контактор КТ, который в свою очередь включает сварочный трансформатор Т1. Одновременно через блок-контакт контактора КТ включается Р7, которое включает электродвигатель механического привода М.

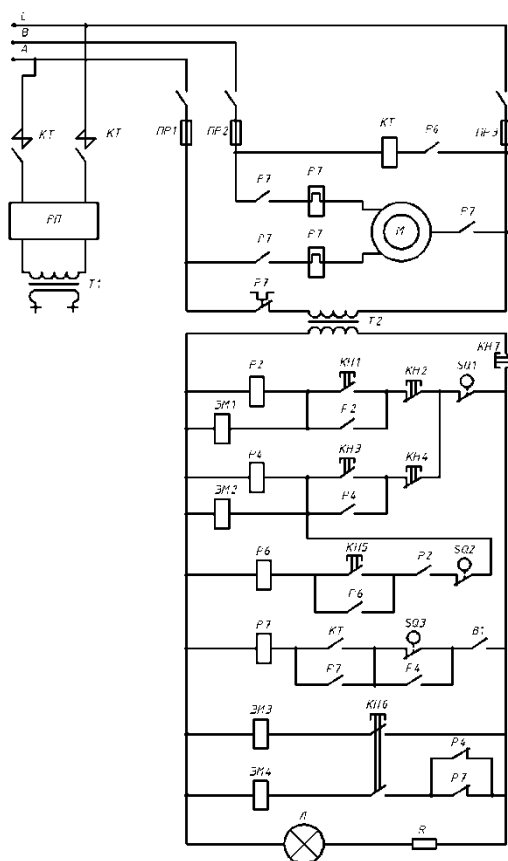


Рисунок 2.1 – Принципиальная электрическая схема машины типа МС – 20.08

Начинается процесс оплавления. По мере сближения концов свариваемых деталей в конце оплавления и в начале осадки срабатывает конечный выключатель SQ2, отключается Р6, следовательно, и контактор КТ. Осадка заканчивается без

тока. При дальнейшем сближении деталей в конце осадки срабатывает конечный выключатель SQ1, отключающий электропневматические клапаны. Происходит разжатие деталей и откат подвижного зажима в исходное положение. Двигатель продолжает работать и при подходе кулака к исходному положению нажимается конечный выключатель SQ3. Происходит остановка двигателя.

В аварийных случаях процесс сварки можно прекратить нажатием на кнопку КН 7.

Для настройки режимов сварки используется ступенчатое изменение вторичного напряжения. Значения величин вторичного напряжения даны в таблице 3.

Таблица 2.1 – Значения величин вторичного напряжения сварочного трансформатора машины МС – 20.08

Ступени	Положение ножей переключателя				U <sub>2</sub> 380	K <sub>тр</sub>
	№1	№2	№3	№4		
1	2	2	2	2	4,05	94
2	1				4,20	91
3	2	1			4,33	88
4	1				4,48	85
5	2	2	1		4,70	81
6	1				4,87	78
7	2	1			5,06	75
8	1				5,28	72
9	2	2	2	1	5,51	69
10	1				5,76	65
11	2	1			6,08	63
12	1				6,34	60
13	2	2			6,78	56
14	1				7,16	53
15	2	1			7,60	50
16	1				8,10	47

При автоматическом режиме с предварительным подогревом концов свариваемых деталей выключатель установить в положение «Выключено». Порядок включения на сварку с подогревом остается таким же, как и при автоматической сварке.



Подогрев производится в результате протекания тока при кратковременном замыкании свариваемых деталей.

Для того, чтобы замкнуть детали, нажимается кнопка КН6 на пульте кнопка «Подогрев» (рисунок 2.2), воздух подается в правые полости цилиндров (рисунок 2.2) в результате чего подвижный зажим перемещаясь сближает детали. При отпускании кнопки КН6 воздух подается в левые полости цилиндров и происходит откат подвижного зажима.

Сближение и разведение – подогрев концов свариваемых деталей производится до тех пор, пока подвижный зажим не переместится на 10 мм в сторону сближения свариваемых деталей.

На рисунке 2.2 представлена относительно временная диаграмма работы машины при сварке.

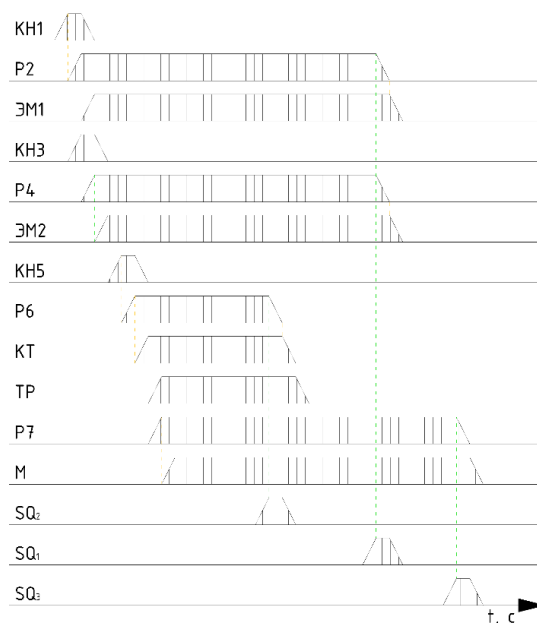


Рисунок 2.2 – Относительно временная диаграмма работы машины при сварке

Для возможности проведения экспериментов были изменены и доработаны некоторые элементы машины.

Работа измененной электрической цепи машины при сварке:

Для осуществления подогрева деталей после сварки, внесены изменения в принципиальную схему машины. Система управления механизмами представлена на принципиальной схеме (рисунок 2.3).

Перед началом сварки необходимо установить и зажать свариваемые детали. Зажатие детали в неподвижном зажиме производится нажатием кнопки КН1, в подвижном КН3. При неправильном зажатии зажимы можно выключить кнопками КН2 и КН4. Если детали зажаты правильно, включается сварка. Включение сварки производится кнопкой КН5. При нажатии на кнопку КН5 включается реле Р6 и контактор КТ, который в свою очередь включает сварочный трансформатор Т1. Одновременно через блок-контакт контактора КТ включается Р7, которое включает электродвигатель механического привода М.

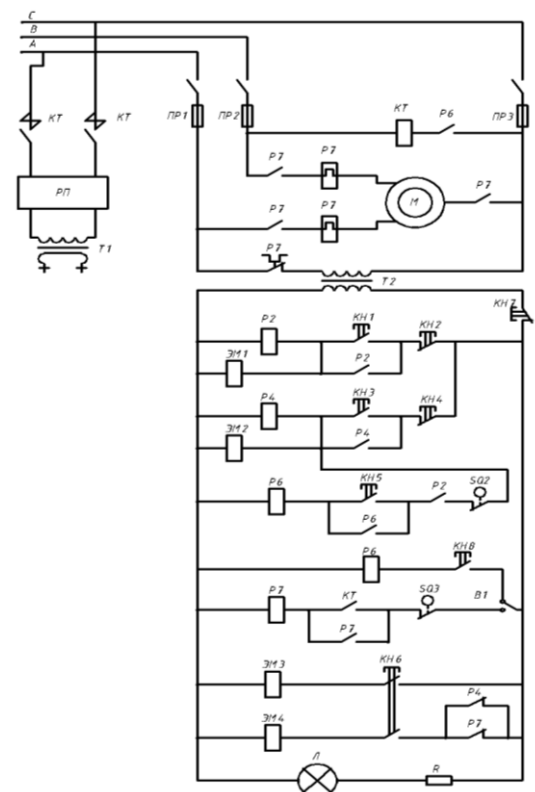


Рисунок 2.3 – Измененная принципиальная электрическая схема машины типа МС – 20.08

Начинается процесс оплавления. По мере сближения концов свариваемых деталей в конце оплавления и в начале осадки срабатывает конечный выключатель SQ2, отключается Р6, а, следовательно, и контактор КТ. Осадка заканчивается без тока. В конце осадки срабатывает конечный выключатель SQ3, происходит остановка двигателя. Нажатием кнопки КН8 производится подогрев детали, по заданной технологии. По завершению процесса сварки детали разжимаются

нажатием на кнопки КН2 и КН4. На рисунке 2.12 представлена относительно временная диаграмма работы машины при сварке.

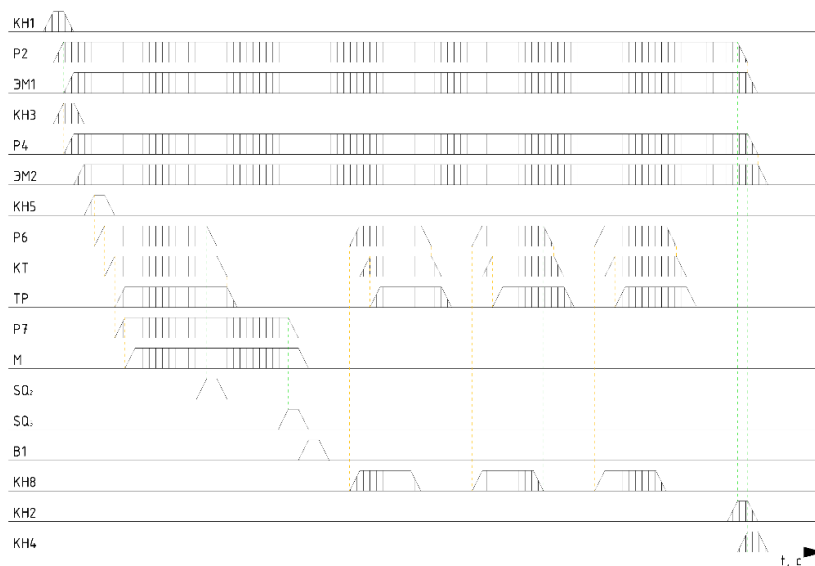


Рисунок 2.4 – Относительно временная диаграмма процесса сварки с измененной принципиальной схемой

## 2.6 Полировка образцов

Образцы зачищались на шлифовальном станке FORCIPOL 2 с применением шлифовальной шкурки Mirka (рисунок 20), с различным размером зерна покрытия (P400, P600, P800, P1000, P1500, P2000, P2500) до получения ровной поверхности без видимых царапин. После чего образцы полировались на войлочном покрытии, обрабатываемом специальной пастой для полировки металлических поверхностей. [24].

Подготовка образцов к изучению на микроскопе:

- 1) На шлифовально-полировочный диск устанавливается наждачная бумага с размером зернового покрытия P400;
- 2) На установке включается подача воды и образец шлифуется до момента, когда крупные видимые царапины будут удалены;

3) Перед замене шлифовальные покрытия на покрытие с более крупным зерном, с образца необходимо удалить все частицы влаги с помощью сухих салфеток, чтобы избежать появления окалины;

4) Далее процесс шлифования повторяется до тех пор, пока исследуемый образец не приобретет гладкую поверхность без видимых царапин;

5) Шлифовальное покрытие на полировочном диске заменяется на войлочное покрытие, на которое наносят пасту для полировки металлических поверхностей;

6) Включается подача воды, и образец полируется до получения зеркальной поверхности.

Шлифовальный станок FORCIPOL 2 представлен на рисунке 2.2



Рисунок 2.6 - Шлифовальная установка FORCIPOL 2

- Двухдисковый шлифовально-полировальный станок.
- Возможность использования дисков диаметром 200 или 250 мм.
- Стандартный интерфейс для автоматической головки FORCIMAT.
- Регулируемая скорость вращения дисков 50- 600 об/мин, двигатель - 0.75 л.с. с защитой от перегрузки.

## 2.7 Изучение неметаллических включений наплавленных образцов

Изучение микроструктуры проводилось с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 и программного обеспечения SIAMS Photolab после травления поверхности образцов в 2 %-ном растворе азотной кислоты на объективах (10х, 20х, 50х, 100х.)



Рисунок 2.7 - Оптический микроскоп OLYMPUS GX-51.

Характеристики оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 приведены в таблице

Таблица 2.3 - Характеристики оптического микроскопа OLYMPUS GX-51

Оптическая система	Скорректирована на бесконечность. Обеспечивает получение четких контрастных изображений.
Освещение	Интегрированный осветитель для светлого и темного поля. Галогенный осветитель 12В., 128Вт., ртутный осветитель 100Вт., ксеноновый осветитель 75В.
Фокусировка	Рукоятки грубой и точной настройки, полный ход: 25 мм, шаг точной фокусировки: 1 мкм.
Наблюдательный тубус	Широкопольный бинокляр или тринокляр F.N. 22; Широкопольный тринокляр F.N. 22; Суперширокопольный тринокляр F.N. 26.5.
Револьверная головка	Механическая или моторизированная четырехгнездная и шестигнездная
Методы наблюдения	Светлое и темное поле, поляризация, DIC
Объективы	Объективы 5x – 250x.

## 2.8 Измерение твердости

Изучение микро твёрдости проводилось с помощью твердомера digital display micro hardness tester HVS-1000A путем давления на образцы специальным наконечником, точка оставшаяся после этого через программу анализировалась и были получены данные .



Рисунок 2.5 - digital display micro hardness tester HVS-1000A

Таблица 2.4 - Характеристики твердомера digital display micro hardness tester HVS-1000A

Производитель	Time Group
Тип твердомера	стационарный, по микро-Виккерсу
Погрешность измерений	$\pm 2-3\%$
Общая нагрузка	0,09807 Н (10 г), 0,2452 Н (25 г), 0,4903 Н (50 г), 0,9807 Н (100 г), 1,961 Н (200 г), 2,942 Н (300 г), 4,904 Н (500 г), 9.80 Н (1 кг)
Горизонтальное пространство измерений	85 мм
Вертикальное пространство измерений	65 мм

## Выводы по главе 2

1. Приведен комплекс методик экспериментальных исследований влияния после сварочного подогрева на качество сварного шва (механических свойств, микро– и макроструктуры). Показано, что исследования проведены на оборудовании в лабораториях ЦКП «Материаловедение» ФГБОУ ВО «СибГИУ», НПЦ «Сварочные процессы и технологии».

2. Выбрано следующее оборудование для исследований

Для сварки образцов была использована стыковая сварочная машина типа МС-20.08.

Для вырезки и разрезки образцов был использован электроэрозионный проволочно-вырезном станок с ЧПУ струйного типа ДК7732 М11

Для шлифовки поверхности образцов были использованы шлифовальный станок FORCIPOL 2 и шлифовальная бумага Mirka

Для изучения неметаллических включени, макро и микро структуры был использован оптический микроскоп OLYMPUS GX-51

Для измерения твердости был использован микротвердомер модель HVS-1000A

### 3. Результаты проведенных экспериментов

#### 3.1 Химический состав рельсов

Таблица 3.1 – Химический состав рельсовых сталей.

№ образца	C	Mn	Si	Cr	V	P	S	Al	Ti
0	0,91	0,81	0,43	0,32	0,09	0,010	0,005	0,003	0,003
1	0,76	0,77	0,53	0,36	0,04	0,014	0,006	0,003	0,002
2	0,77	0,80	0,56	0,38	0,04	0,008	0,006	0,002	0,002
3	0,76	0,77	0,53	0,36	0,04	0,014	0,006	0,003	0,002
4	0,77	0,80	0,56	0,38	0,04	0,008	0,006	0,002	0,002

#### 3.2 Изучение микроструктуры и неметаллических включений наплавленных образцов

Макроструктура всех сварных швов образцов представлена на рисунке 4. Сварной шов представляет собой светлую полосу и зону термического влияния (ЗТВ) по обе стороны от нее, так же можно наблюдать основной металл.



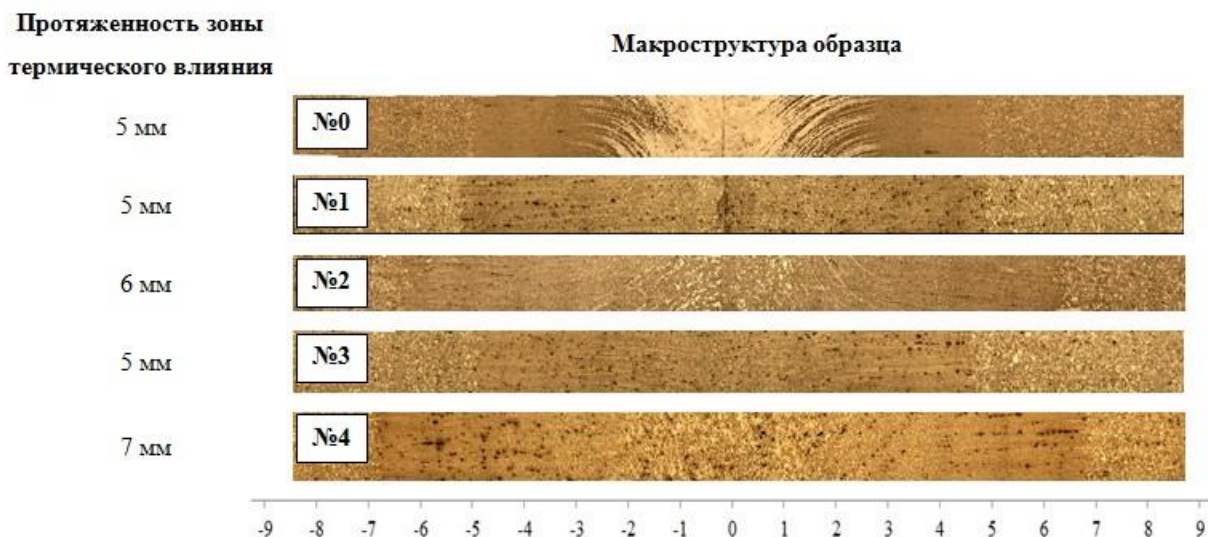
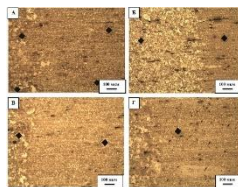


Рисунок 3.1 – Макроструктура сварного шва образца стали Э76ХФ

Из рисунка 3.1 видно, что наименьшая протяжённость зоны термического влияния наблюдается у сварных стыков, полученных по режимам №1, №0, №3 (около 5,0 мм), а наибольшая – у сварного стыка №4 (около 7,0 мм).

Исходя из полученных данных по макроструктуре, можно увидеть границу между основным металлом и зоной термического влияния (рисунок 3.2).

Этот переход обуславливается резким различием в размере зерна (или перлитной ячейки) между двумя областями.



А, Б, В, А – Переходная зона между зоной термического влияния и основным металлом образцов

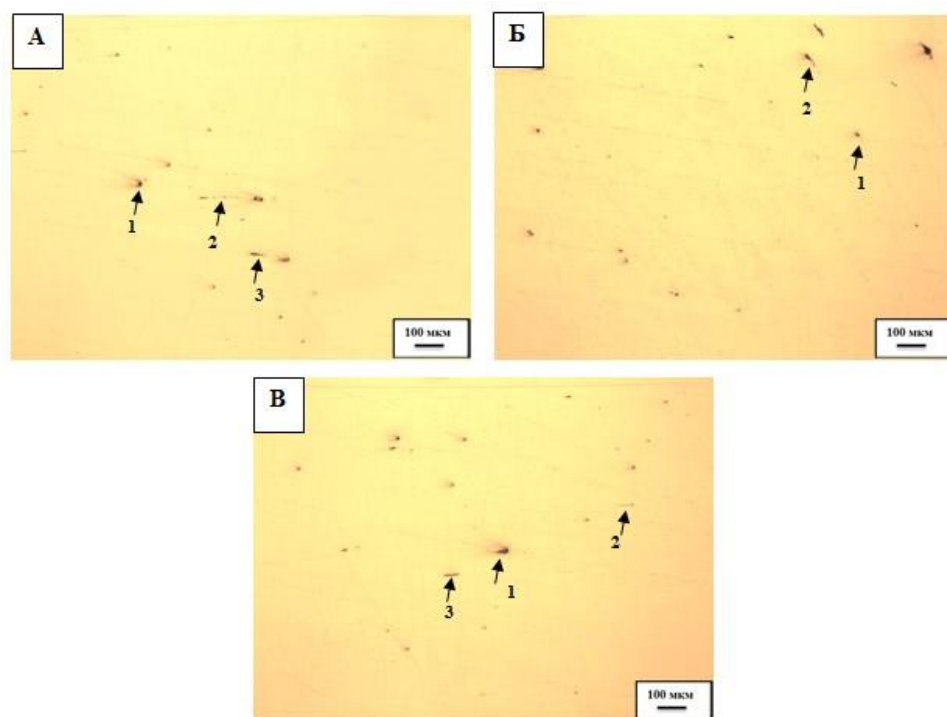
Рисунок 3.2 – Переходная область между зоной термического влияния (справа) и основным металлом (слева)

Изучение неметаллических включений проводилось на объективах (10х, 20х, 50х, 100х.)

Исследование образцов наплавленного слоя на загрязненность неметаллическими включениями осуществлялось в соответствии гост 1778-70 при увеличении  $x$  100, с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 и программного обеспечения SIAMS Photolab.

На рисунке 3.3 представлены типы неметаллических включений для режима №0. По данным рисунка видно, что большую часть включений составляют оксиды. В сварном шве так же, как и в основном металле рельсовой стали марки Э76ХФ было обнаружено небольшое количество точечных оксидов (балл №1а), пластинчатые силикаты (балл № 3а) и нитриды строчечные (балл № 2а). Данный образец является одними из самых чистых образцов по количеству неметаллических включений.

Проведенное исследование металла и установленный химический состав позволяют предположить, что среди неметаллических включений присутствуют преимущественно кремниевомарганцовистые, которые приводят к образованию трещин в эксплуатации.



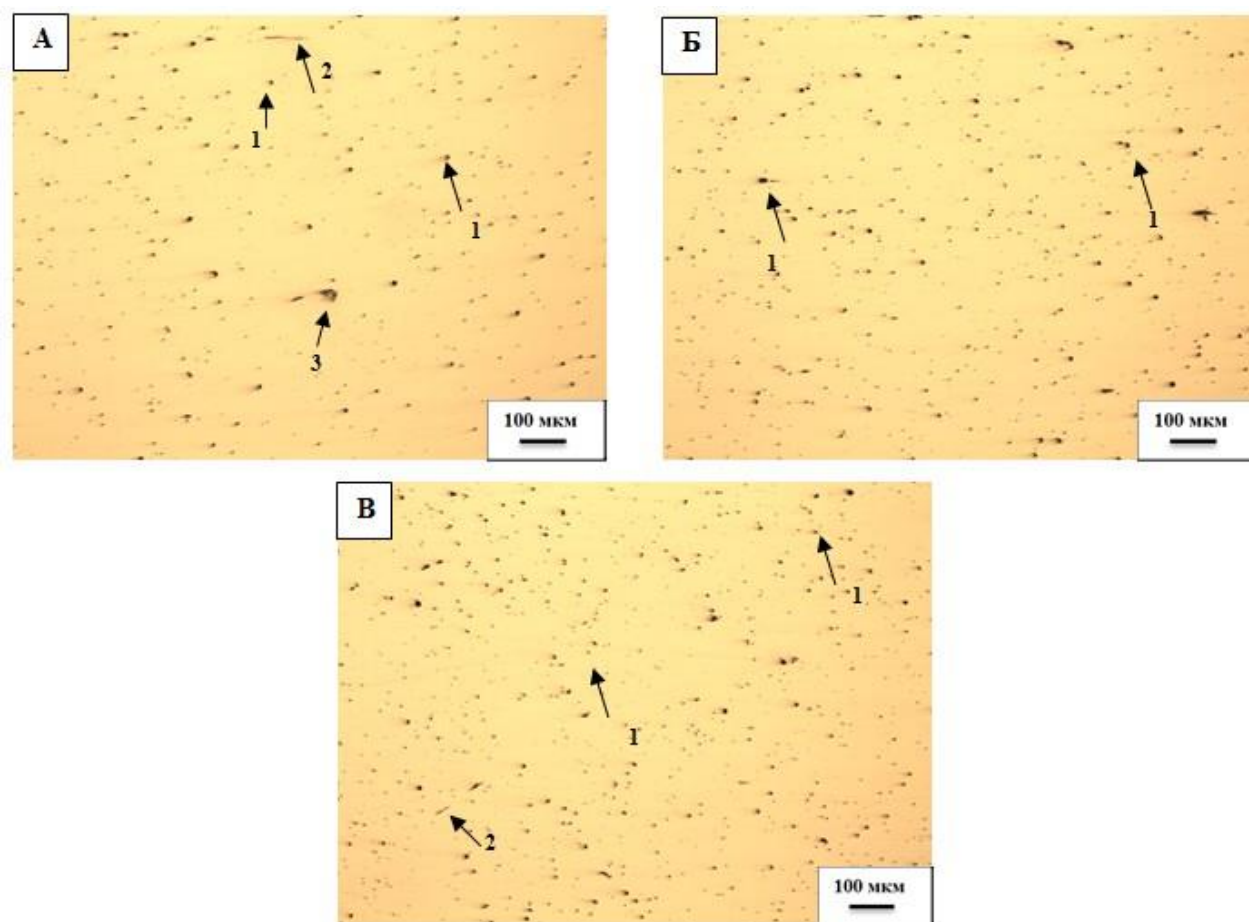
1 - точечные оксиды, 2 - нитриды строчечные  
3 - силикаты пластинчатые

а – основной металл; б – зона термического влияния; в – сварной шов

Рисунок 3.3 – Неметаллические включения образца стали Э76ХФ, полученного по режиму №0

В образце, полученному по режиму №1 (рисунок 3.4) в основном металле и в сварном шве наблюдалось присутствие точечных, недеформирующихся силикатов и пластинчатых силикатов. Данный образец является самым загрязненным из исследуемых образцов по количеству неметаллических включений.

Проведенное исследование металла и установленный химический состав позволяют предположить, что среди неметаллических включений присутствуют включения кремния и марганца, которые приводят к образованию трещин в эксплуатации.



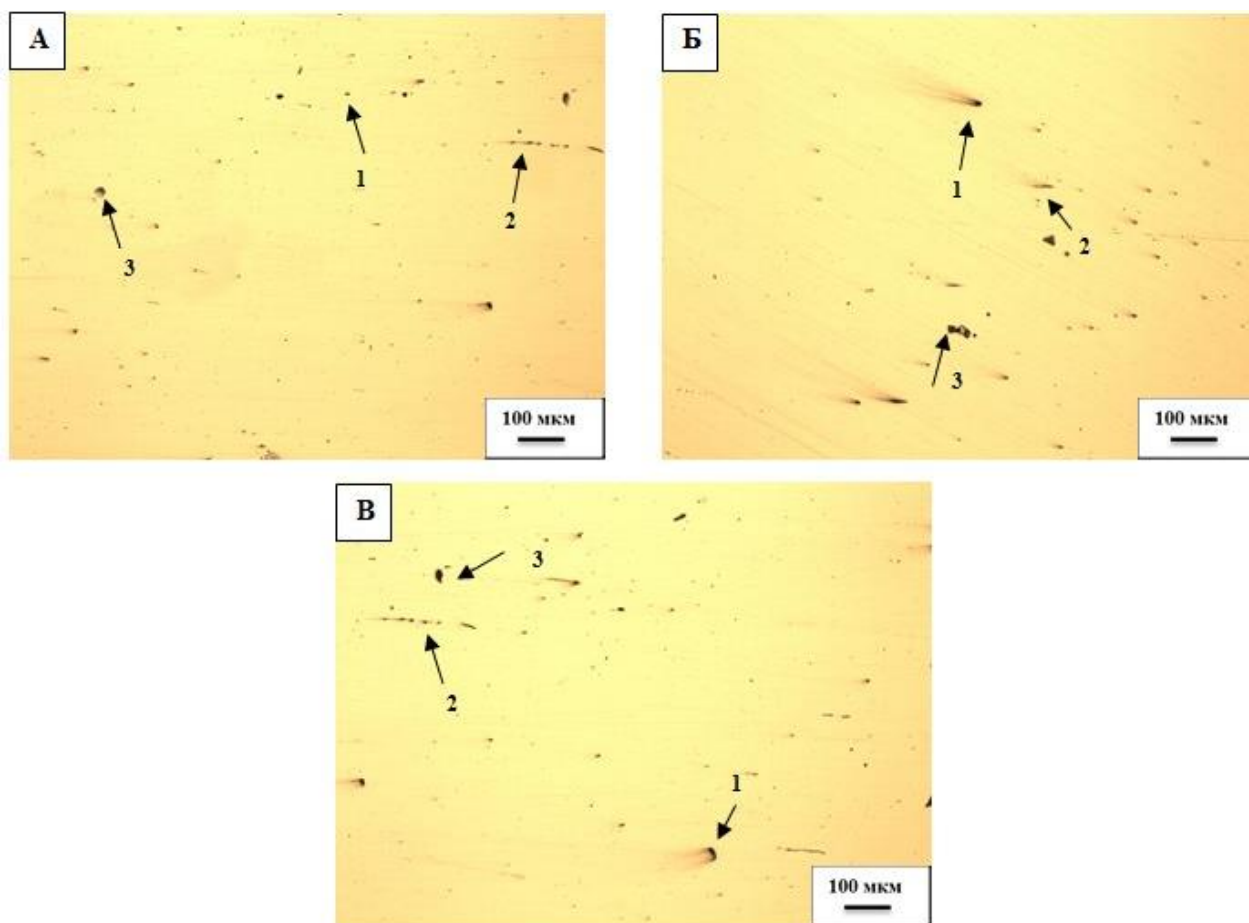
1 - точечные оксиды, 2 - силикаты пластинчатые, 3 - силикаты недеформирующиеся

А – основной металл; Б – зона термического влияния; В – сварной шов

Рисунок 3.4 – Неметаллические включения образца стали Э76ХФ, полученного по режиму №1

В образце, полученному по режиму №2 (рисунок 3.5) в основном металле и в сварном шве наблюдалось присутствие точечных, недеформирующихся силикатов и пластинчатых силикатов. При этом загрязненность перечисленными типами включений заметно ниже, чем в образце, полученном по режиму №1.

Проведенное исследование металла и установленный химический состав позволяют предположить, что среди неметаллических включений присутствуют включения кремния и марганца, которые приводят к образованию трещин в эксплуатации.



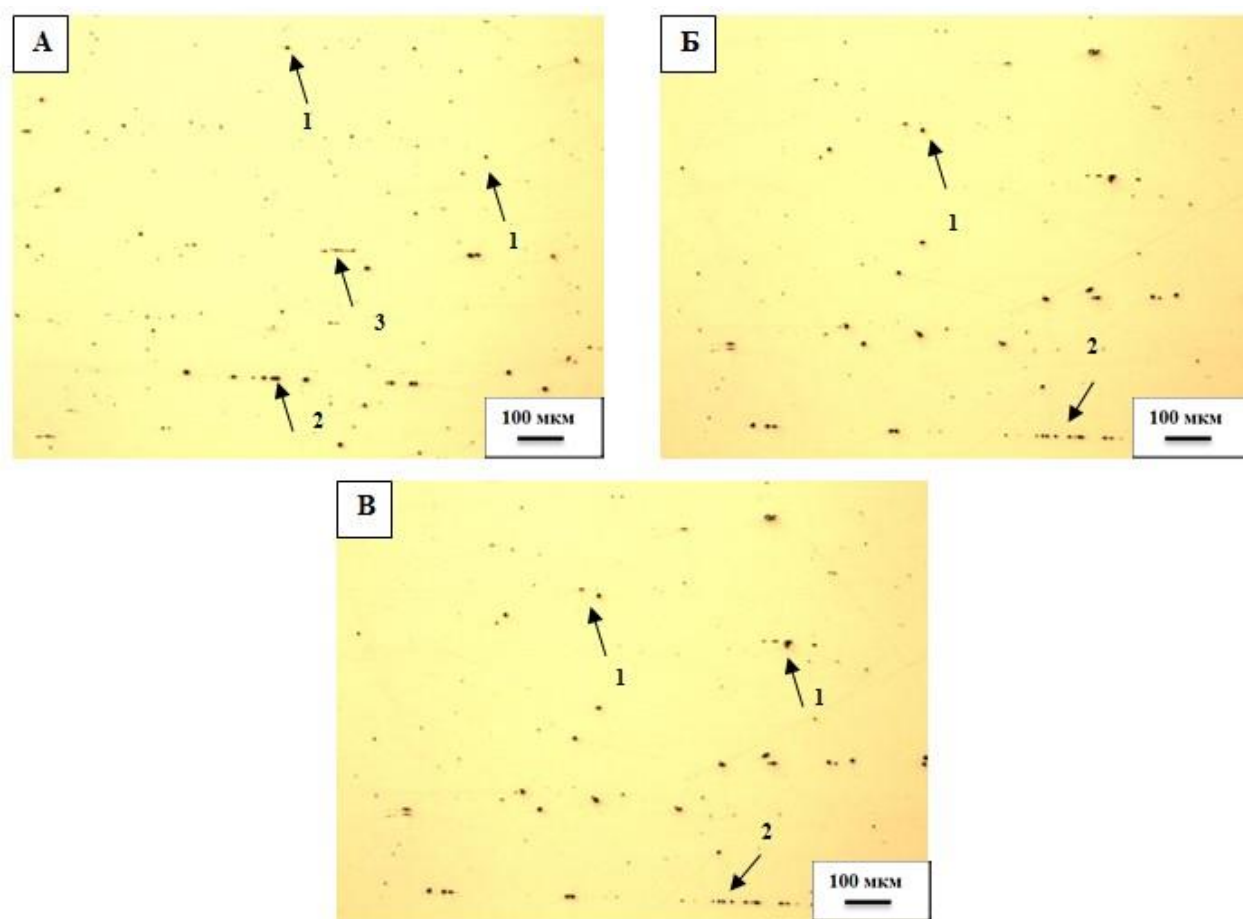
1 - точечные оксиды, 2 - силикаты пластинчатые,  
3 - силикаты недеформирующиеся

А – основной металл; Б – зона термического влияния; В – сварной шов

Рисунок 3.5 – Неметаллические включения образца стали Э76ХФ,  
полученного по режиму №2

На рисунке 3.6 представлены типы неметаллических включений для режима №3. В основном металле было выявлено присутствие малого количества точечных оксидов, хрупкие силикаты и нитриды строчечные. В сварном шве образца № 3 присутствуют точечные оксиды, хрупкие силикаты и нитриды строчечные.

Проведенное исследование металла и установленный химический состав позволяют предположить, что среди неметаллических включений присутствуют включения кремния и марганца, которые приводят к образованию трещин в эксплуатации.



1 - оксиды точечные, 2 - нитриды строчечные,  
3 - силикаты хрупкие

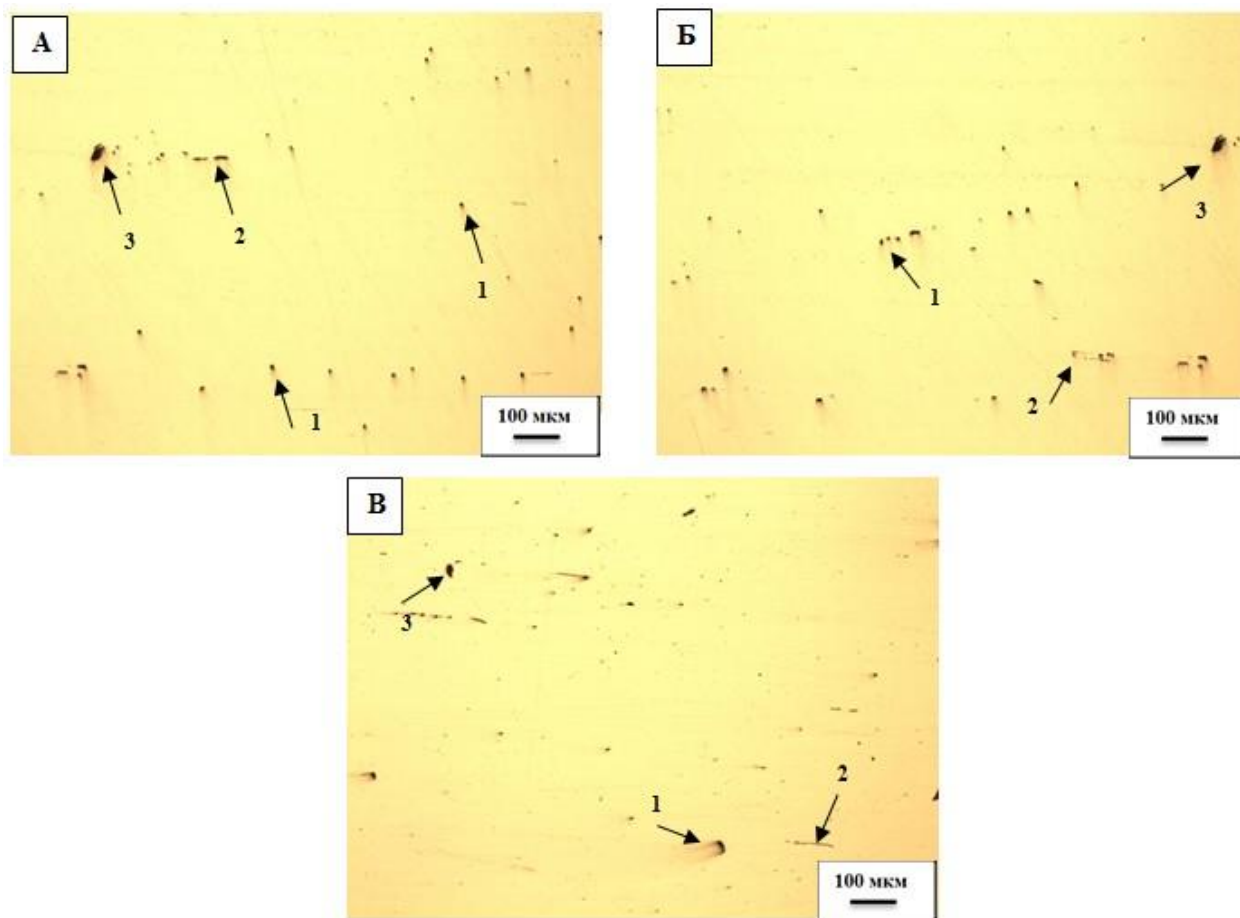
А – основной металл; Б – зона термического влияния; В – сварной шов

Рисунок 3.6 – Неметаллические включения образца стали Э76ХФ,  
полученного по режиму №3

Образцы рельсовой стали марки Э76ХФ №4 (рисунок 3.7) являются одними из самых чистых образцов по количеству и видам неметаллических включений. В данных образцах были выявлены силикаты недеформирующиеся, оксиды точечные и силикаты пластинчатые. Основной металл образца содержит следующие неметаллические включения: силикаты недеформирующиеся, оксиды точечные и силикаты пластинчатые. Данный образец является одним из наименее загрязненных образцов по количеству неметаллических включений.

Проведенное исследование металла и установленный химический состав позволяют предположить, что среди неметаллических включений присутствуют

включения кремния и марганца, которые приводят к образованию трещин в эксплуатации.



1 - точечные оксиды, 2 - силикаты пластинчатые

3 - силикаты недеформирующиеся

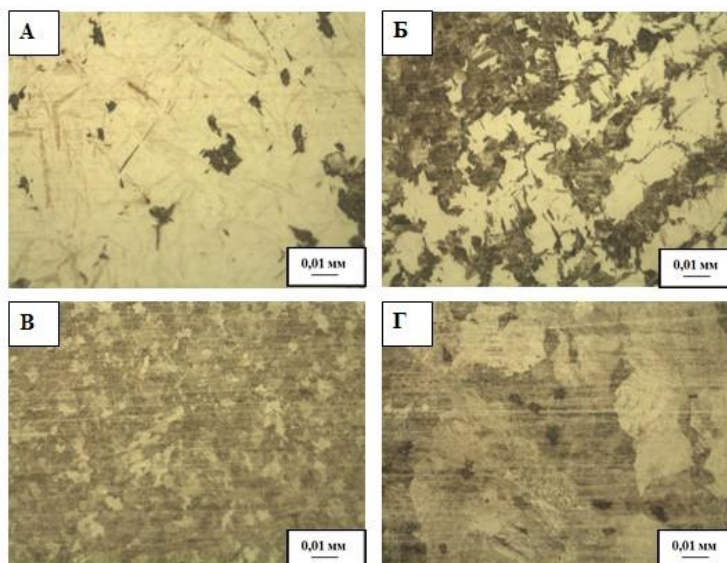
Рисунок 3.7 – Неметаллические включения образца стали Э76ХФ,  
полученного по режиму №4

Исследование микроструктуры образцов рельсовой стали проводилось на металлографическом микроскопе OLYMPUS GX-51 при увеличении в 1000 крат после травления поверхности образцов в 2 %-ном растворе азотной кислоты в соответствии ГОСТ 8233-56. Микроструктура образца стали Э76ХФ после сварки контактно-стыковым методом по режиму №0 представлена на рисунке 3.8.

Анализ микроструктуры позволил выделить на исследуемом образце наиболее характерные области, которые, в зависимости от режима сварки, заметно отличаются друг от друга, как структурой, так и протяженностью:

1. Сварной шов;

2. Зона крупного зерна;
3. Участок нормализации;
4. Основной металл.



А – зона сварного шва, Б, В – ЗТВ, Г – основной металл

Рисунок 3.8 – Микроструктура различных областей, полученная при режиме №0

Результаты оценки микроструктуры на бальность в зоне сварного шва представлены в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Оценка микроструктуры образца. Полученного по режиму №0

Зона	Протяженность зоны, мм	Объемная доля мартенсита/троостита, % (Балл)	Степень дисперсности пластинчатого перлита, балл
Сварной шов	0,45	95/5 (4)	-
Зона крупного зерна	1,35	95/5 (4)	-

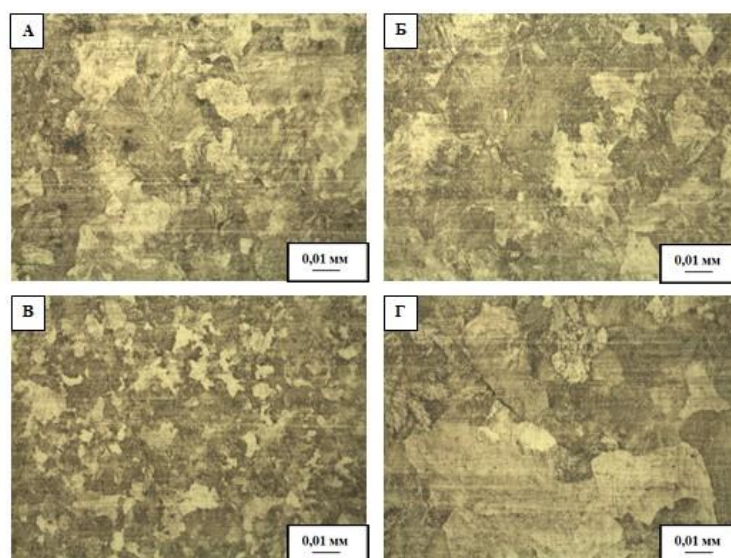
В сварном шве образцов, полученных по режиму № 0 присутствует структура игольчатого мартенсита. Размеры игл для режима №0 оцениваются баллом 7 шкалы 3 ГОСТ 8233 и относится к типу крупноигольчатого мартенсита с наибольшей длиной игл 12 мкм. Наличие таких структур недопустимо в рельсовом металле. Для режимов №0 мартенсит оценивается баллом 8 шкалы 3 ГОСТ 8233. Данный тип



мартенсита относится к крупноигольчатому мартенситу с размером игл 16 мкм. Дефектов металлургического происхождения в структуре материала в виде пор, трещин, расслоений не обнаружено.

Исследование микроструктуры образцов рельсовой стали проводилось на металлографическом микроскопе OLYMPUS GX-51 при увеличении в 1000 крат после травления поверхности образцов в 2 %-ном растворе азотной кислоты в соответствии ГОСТ 8233-56.

Микроструктура образца стали Э76ХФ после сварки контактно-стыковым методом по режиму №1 представляет собой перлит различной степени дисперсности (рисунок 3.9).



А – зона сварного шва, Б, В – ЗТВ, Г – основной металл

Рисунок 3.9 – Микроструктура различных областей, полученная при режиме №1

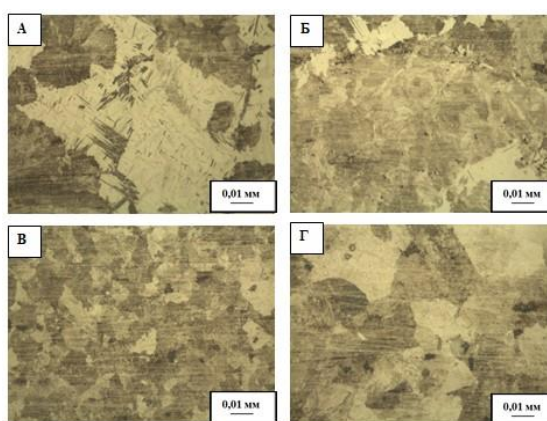
Результаты оценки микроструктуры на бальность в зонах сварного шва и крупного зерна представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Оценка микроструктуры образца. Полученного по режиму №1

Зона	Протяженность зоны, мм	Объемная доля мартенсита/троостита, % (Балл)	Степень дисперсности пластинчатого перлита, балл
Сварной шов	0,45	-	2
Зона крупного зерна	1,35	-	1

По результатам проведенного анализа, представленным в таблице 3.2, установлено, что в зоне сварного шва в образце, полученного по режиму №1 преобладает структура скрытопластинчатого перлита с межпластинчатым расстоянием 0,3 мкм. В зоне крупного зерна преобладает структура пластинчатого сорбитообразного перлита с межпластинчатым расстоянием менее 0,2 мкм. Дефектов металлургического происхождения в структуре материала в виде пор, трещин, расслоений не обнаружено.

Анализ микроструктуры позволил выделить на образце, полученному по режиму №2 области, идентичные установленным на вышеупомянутых образцах: сварной шов, зона крупного зерна, зона мелкого зерна и основной металл (рисунок 3.10).



А – зона сварного шва, Б, В – ЗТВ, Г – основной металл

Рисунок 3.10 – Микроструктура различных областей, полученная при режиме №2

Результаты оценки микроструктуры на бальность в зонах сварного шва и крупного зерна представлены в таблице 3.3.

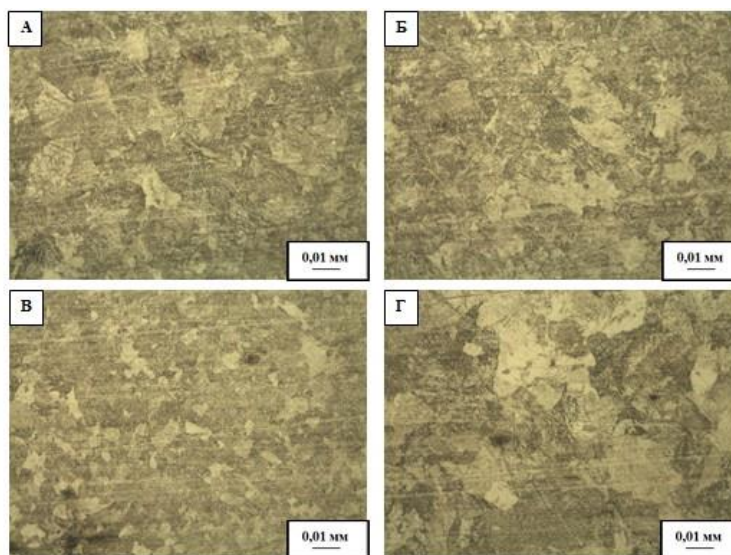
Таблица 3.4 – Оценка микроструктуры образца. Полученного по режиму №2

Зона	Протяженность зоны, мм	Объемная доля мартенсита/троостита, % (Балл)	Степень дисперсности пластинчатого перлита, балл
Сварной шов	0,45	>75/<25 (7,5)	-
Зона крупного зерна	2,54	25/75 (9)	-

По результатам проведенного анализа, представленным в таблице 3.3, установлено, что в зоне сварного шва в образце, полученного по режиму №2 преобладает структура мартенсита и соответствует баллу 6 шкалы 3 ГОСТ 8233. Такой тип мартенсита относится к среднеигльчатому мартенситу, где наибольший размер игл составляет 10 мкм. В зоне крупного зерна мартенсит оценивается баллом 8 шкалы 3 ГОСТ 8233. Данный тип мартенсита относится к крупноигльчатому мартенситу с размером игл 16 мкм. Дефектов металлургического происхождения в структуре материала в виде пор, трещин, расслоений не обнаружено.

Микроструктура образца стали Э76ХФ после сварки контактно-стыковым методом по режиму №3 представляет собой перлит различной степени дисперсности (рисунок 3.11).

На образце, полученному по режиму №3, анализ микроструктуры позволил выделить области, идентичные установленным на вышеупомянутых образцах: сварной шов, зона крупного зерна, зона мелкого зерна и основной металл.



А – зона сварного шва, Б, В – ЗТВ, Г – основной металл

Рисунок 3.11 – Микроструктура различных областей, полученная при режиме №3

Результаты оценки микроструктуры на бальность в зонах сварного шва и крупного зерна представлены в таблице 3.5.

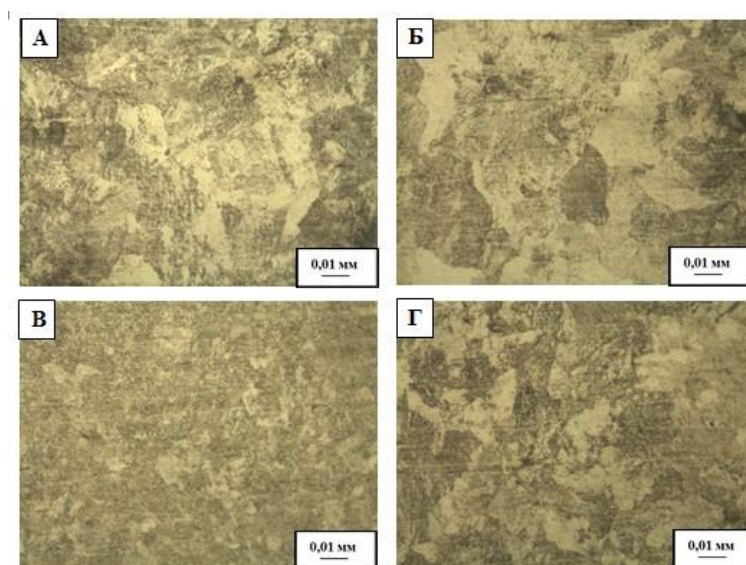
Таблица 3.5 – Оценка микроструктуры образца, полученного по режиму №3

Зона	Протяженность зоны, мм	Объемная доля мартенсита/троостита, % (Балл)	Степень дисперсности пластинчатого перлита, балл
Сварной шов	0,45	-	1
Зона крупного зерна	1,35	-	1

По результатам проведенного анализа, представленным в таблице 3.4, установлено, что в зоне сварного шва для режимов №3 в сварном шве преобладает сорбитообразный перлит с межпластинчатым расстоянием менее 0,2 мкм. В зоне

крупного зерна преобладает структура пластинчатого сорбит образного перлита с межпластинчатым расстоянием менее 0,2 мкм. Дефектов металлургического происхождения в структуре материала в виде пор, трещин, расслоений не обнаружено. Микроструктура образца стали Э76ХФ после сварки контактно-стыковым методом по режиму №4 представляет собой перлит различной степени дисперсности (рисунок 3.12).

На образце, полученному по режиму №4, анализ микроструктуры позволил выделить области, идентичные установленным на вышеупомянутых образцах: сварной шов, зона крупного зерна, зона мелкого зерна и основной металл.



А – зона сварного шва, Б, В – ЗТВ, Г – основной металл

Рисунок 3.12 – Микроструктура различных областей, полученная при режиме №4

Результаты оценки микроструктуры на бальность в зонах сварного шва и крупного зерна представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Оценка микроструктуры образца. Полученного по режиму №4

Зона	Протяженность зоны, мм	Объемная доля мартенсита/троостита, % (Балл)	Степень дисперсности пластинчатого перлита, балл
Сварной шов	0,45	-	4
Зона крупного зерна	2,35	-	3-4

Для режима №4 в зоне сварного шва преобладает мелкопластинчатый перлит с межпластинчатым расстоянием 0,4 мкм. Для зоны крупного зерна обнаружен тонко- и мелко пластинчатый перлит с межпластинчатым расстоянием до 0,6 мкм. Дефектов металлургического происхождения в структуре материала в виде пор, трещин, расслоений не обнаружено.

Микроструктура в зоне мелкого зерна представляет собой пластинчатый и зернистый перлит в различной стадии коагуляции. Дисперсность пластинчатого перлита оценивается баллом 1 шкалы 1 ГОСТ 8233, и соответствует сорбитообразный перлит с межпластинчатым расстоянием менее 0,2 мкм. Дисперсность зернистого перлита оценивается баллом 1 шкалы 1 ГОСТ 8233. Данный тип зернистого перлита относится к точечному со средним диаметром зерен цементита до 0,25 мкм. Протяженность данной зоны для исследуемых образцов варьируется от 3 до 5 мм. Режим №1 имеют наименее протяженную область мелкого зерна, равную 3 мм, режим №4 наибольшую, равную 5 мм.

Структура основного металла исследуемых образцов представляет собой пластинчатый перлит 1 – 2 балла по шкале 1 ГОСТ 8233, что характерно для структуры нетермоупрочненных рельсов.

### **3.3 Исследование микротвердости**

Исследование микротвердости проводилось в соответствии с ГОСТ 9450-76 на микро твердомере HVS-1000.

На рисунке 3.13 изображен график, характеризующий изменение значений микротвердости в зависимости от зоны, соответствующие режиму №0. Из представленных данных видно, что показатели микротвердости резко возрастают по мере приближения к центру сварного шва. В зоне сварного шва ее максимальное значение составляет 591,9 HV. Зона крупного зерна так же имеет высокие значения микротвердости, среднее значение которой составляет 560 HV. Высокие значения микротвердости в этих зонах подтверждают преобладание в них мартенситных структур. Среднее значение микротвердости в зоне мелкого зерна 385,7 HV.

Падение величины значений микротвердости в этой области объясняется преобладанием зернистого перлита в различной стадии коагуляции. Далее на расстоянии свыше 5 мм от сварного шва наблюдается имеют довольно постоянную твердость, близкую 370 HV.

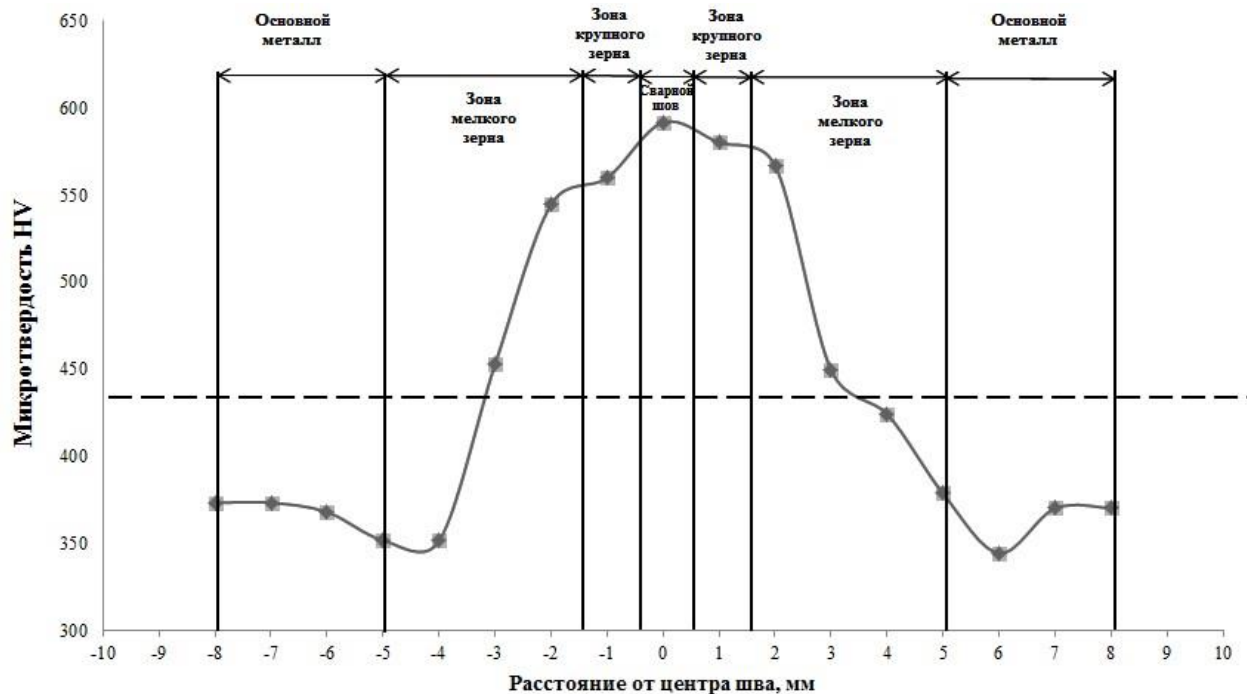


Рисунок 3.13 –Микротвердость стали Э76ХФ в различных зонах после проведения контактно–стыковой сварки по режиму №0

На рисунке 3.14 изображен график, характеризующий изменение значений микротвердости в зависимости от зоны, соответствующие режиму №1. Максимальное значение микротвердости соответствуют зоне сварного шва и составляют 356,4 HV. В зоне мелкого зерна наблюдается снижение микротвердости и среднее значение в это области составляет 316,3 HV. Падение величины значений микротвердости в этой области так же объясняется преобладанием зернистого перлита в различной стадии коагуляции. На расстоянии свыше 5 мм среднее значение микротвердости составляет 320,6 HV.

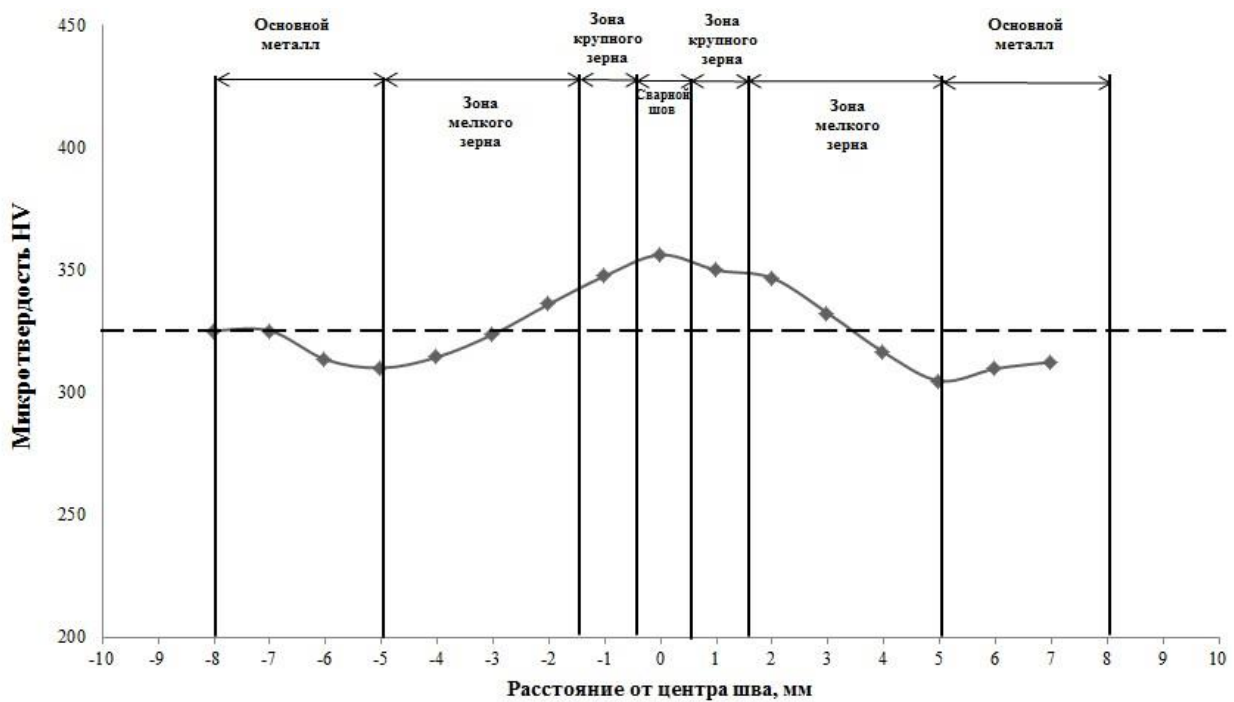


Рисунок 3.14 –Микротвердость стали Э76ХФ в различных зонах после проведения контактно–стыковой сварки по режиму №1

Пунктирной линией указано среднее значение микротвердости образца

На рисунке 3.15 изображен график, характеризующий изменение значений микротвердости в зависимости от зоны, соответствующие режиму №2. Из представленных данных видно, что максимальное значение твердости находится по месту сварного шва и составляет 413 HV. В зона крупного зерна наблюдается снижение значений микротвердости, среднее значение которой составляет 362,5 HV. Падение величины значений микротвердости в этой области, по сравнению с областью сварного шва, объясняется снижением объемной доли мартенсита. Среднее значение микротвердости в зоне мелкого зерна 329,1 HV. Падение величины значений микротвердости в этой области объясняется преобладанием зернистого перлита в различной стадии коагуляции. Далее на расстоянии свыше 6 мм от сварного шва наблюдается имеют довольно постоянную твердость, близкую 330 HV.



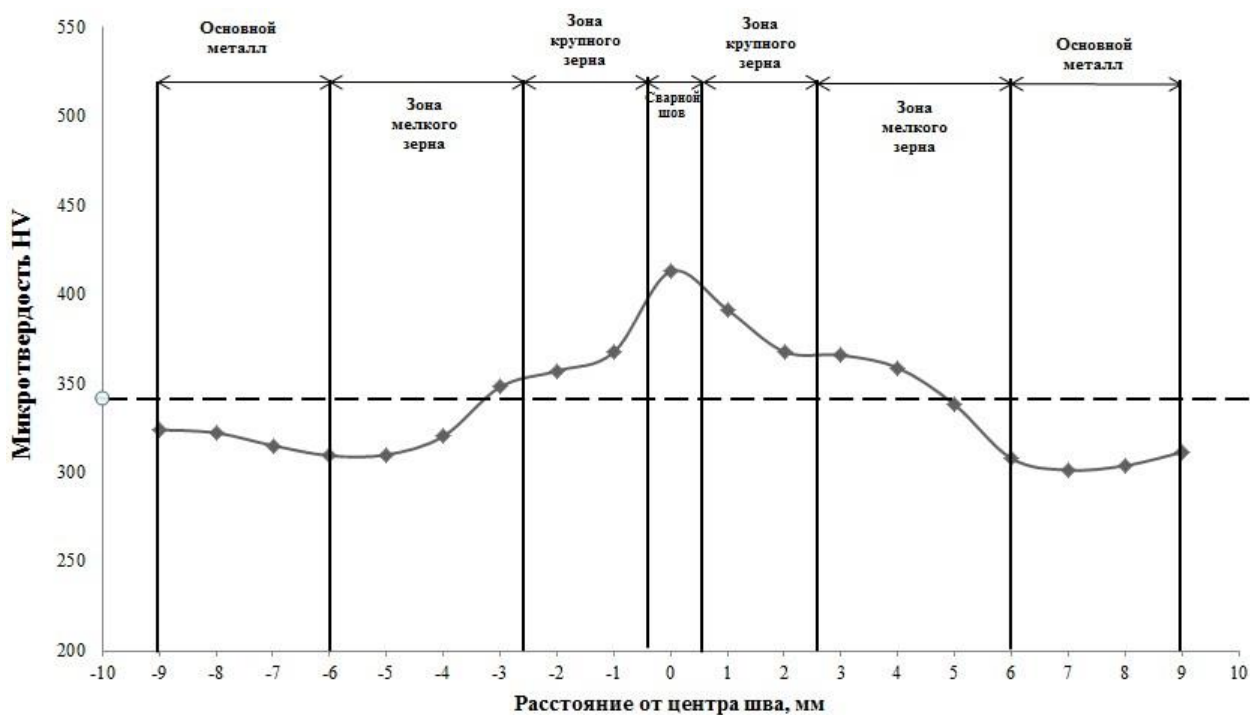


Рисунок 3.15 –Микротвердость стали Э76ХФ в различных зонах после проведения контактно–стыковой сварки по режиму №2

Пунктирной линией указано среднее значение микротвердости образца

На рисунке 3.16 изображен график, характеризующий изменение значений микротвердости в зависимости от зоны, соответствующие режиму №3. Максимальное значение микротвердости соответствуют зоне сварного шва и составляют 350,8 HV. В зоне мелкого зерна наблюдается снижение микротвердости и среднее значение в этой области составляет 306,8 HV. Падение величины значений микротвердости в этой области объясняется преобладанием зернистого перлита в различной стадии коагуляции. На расстоянии свыше 5 мм среднее значение микротвердости составляет 320,6 HV. Полученные значения в сварном шве и в зоне крупного зерна близки по величине, что объясняется схожестью структуры в этих зонах.

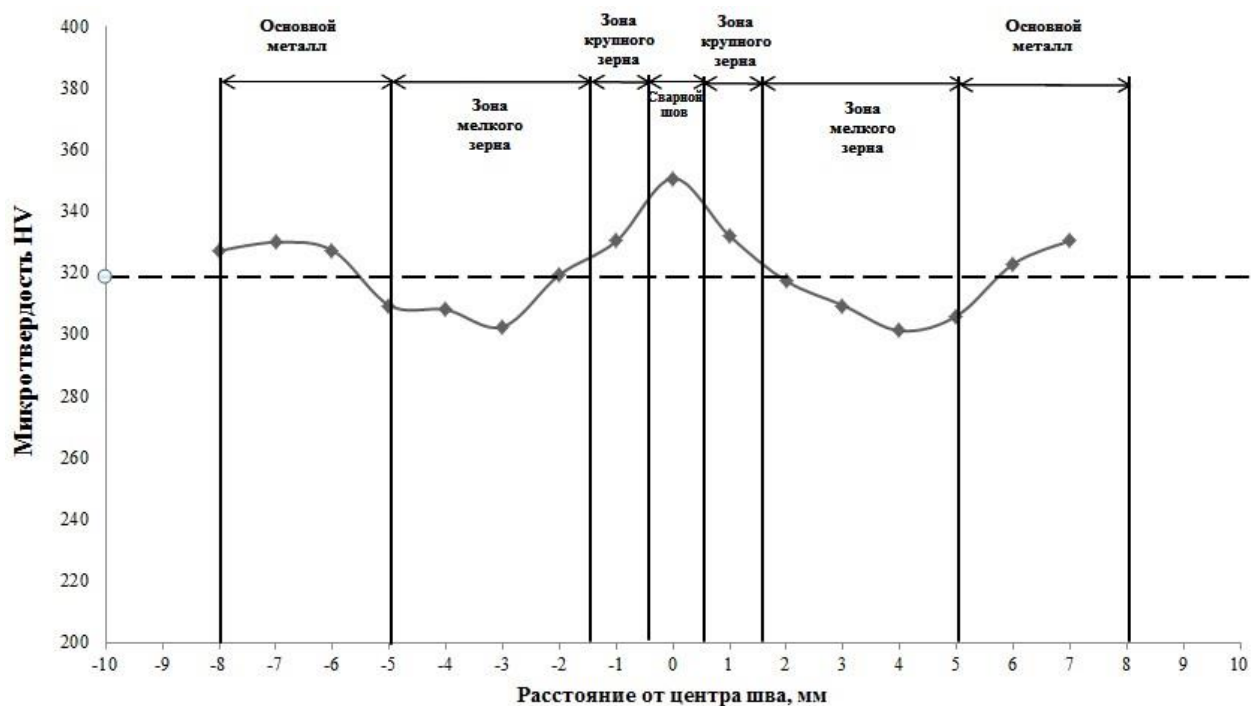


Рисунок 3.16 – Микротвердость стали Э76ХФ в различных зонах после проведения контактно–стыковой сварки по режиму №3

Пунктирной линией указано среднее значение микротвердости образца

На рисунке 3.17 изображен график, характеризующий изменение значений микротвердости в зависимости от зоны, соответствующие режиму №3. Максимальное значение микротвердости соответствуют зоне сварного шва и составляют 320,1 HV. В зоне мелкого зерна наблюдается снижение микротвердости и среднее значение в этой области составляет 290,7 HV. Падение величины значений микротвердости в этой области объясняется преобладанием зернистого перлита в различной стадии коагуляции. На расстоянии свыше 7 мм среднее значение микротвердости составляет 318,1 HV. Полученные значения микротвердости в сварном шве и в зоне крупного зерна близки по величине, что объясняется схожестью структуры в этих зонах.



Рисунок 3.17 – Микротвердость стали Э76ХФ в различных зонах после проведения контактно–стыковой сварки по режиму №4

Пунктирной линией указано среднее значение микротвердости образца

### Выводы по главе 3

1. При режиме сварки:  $U_2 = 5,76$  В,  $I_2 = 11,7$  кА,  $V_{\text{опл}} = 1$  мм/с,  $\Delta_{\text{опл}} = 10$  мм. Режим контактного подогрева: нет. микротвердость в зоне термического влияния имеет повышенные значения. В структуре был обнаружен игольчатый мартенсит, наличие этой структуры в металле рельсов приводит к развитию усталостных трещин и хрупкому излому. Преобладающим типом неметаллических включений являются точечные оксиды. ЗТВ составляет 5 мм. Данный образец является самым чистым по наличию не металлических включений.

2. При режиме сварки:  $U_2 = 5,76$  В,  $I_2 = 11,7$  кА,  $V_{\text{опл}} = 1$  мм/с,  $\Delta_{\text{опл}} = 10$  мм. Режим контактного подогрева: время охлаждения после осадки 30 с, время подогрева 0,6 с, время охлаждения после подогрева 15 с, количество импульсов подогрева 4 с. Распределение микротвердости в зоне термического влияния в целом имеет удовлетворительные значения, сопоставимые с основным металлом. ЗТВ составляет 5 мм. Получена оптимальная структура, удовлетворяющая требованиям ГОСТ Р 51685-2013. Преобладающим типом неметаллических включений являются точечные оксиды. Данный образец является самым загрязнённым по наличию не металлическим включениям.

3. При режиме сварки:  $U_2 = 5,76$  В,  $I_2 = 11,7$  кА,  $V_{\text{опл}} = 1$  мм/с,  $\Delta_{\text{опл}} = 10$  мм. Режим контактного подогрева: время охлаждения после осадки 30 с, время подогрева 0,6 с, время охлаждения после подогрева 15 с, количество импульсов подогрева 2 с. Микротвердость в зоне термического влияния имеет повышенные значения. В структуре был обнаружен игольчатый мартенсит наличие этой структуры в металле рельсов приводит к развитию усталостных трещин и хрупкому излому. Преобладающим типом неметаллических включений являются точечные оксиды. ЗТВ составляет 6 мм.

4. При режиме сварки:  $U_2 = 5,76$  В,  $I_2 = 11,7$  кА,  $V_{\text{опл}} = 1$  мм/с,  $\Delta_{\text{опл}} = 10$  мм. Режим контактного подогрева: время охлаждения после осадки 30 с, время подогрева 0,6 с, время охлаждения после подогрева 10 с, количество импульсов подогрева 4 с. Микротвердость в зоне термического влияния имеет повышенные значения. Получена оптимальная структура, удовлетворяющая требованиям ГОСТ Р

51685-2013. Преобладающим типом неметаллических включений являются точечные оксиды. ЗТВ составляет 5 мм.

5. При режиме сварки:  $U_2 = 5,76$  В,  $I_2 = 11,7$  кА,  $V_{\text{опл}} = 1$  мм/с,  $\Delta_{\text{опл}} = 10$  мм. Режим контактного подогрева: время охлаждения после осадки 30 с, время подогрева 0,6 с, время охлаждения после подогрева 10 с, количество импульсов подогрева 2 с. Микротвердость в зоне термического влияния имеет повышенные значения. Получена оптимальная структура, удовлетворяющая требованиям ГОСТ Р 51685-2013. Преобладающим типом неметаллических включений являются точечные оксиды. ЗТВ составляет 7 мм что является наибольшей ЗТВ всех образцов.

6. Оптимальными параметрами контактного подогрева после контактной стыковой сварки с точки зрения полученной микроструктуры, протяженности зоны термического влияния и значений микротвердости являются параметры, использованные при режиме:

Режим сварки:  $U_2 = 5,76$  В,  $I_2 = 11,7$  кА,  $V_{\text{опл}} = 1$  мм/с,  $\Delta_{\text{опл}} = 10$  мм. Режим контактного подогрева: время охлаждения после осадки 30 с, время подогрева 0,6 с, время охлаждения после подогрева 15 с, количество импульсов подогрева 4 с.

Данный режим позволяет получить сварное соединение из рельсовой стали типа Р65 марки Э76ХФ в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685-2013 по структуре, механическим свойствам. Так же данный режим имеет минимальную протяженность зоны с пониженной твердостью. Этот режим рекомендован к применению для сварки рельсов для получения повышенных эксплуатационных показателей надежности стыкового соединения.

## Заключение

1. На основании литературного обзора для соединения рельсов используется электродуговая, термитная, газопрессовая и контактная сварка. Электродуговая сварка рельсов используется в основном на промышленных и малоответственных путях, так как она малопроизводительна, качество получаемых соединений не соответствует современным требованиям. Термитная сварка, которая обеспечивает более надежное качество сварного соединения, чем электродуговая, широко распространена за границей. Все же она имеет относительно малую надежность сварных стыков рельсов и соответственно низкие технико–экономические показатели жизненного цикла, поэтому получила малое распространение в нашей стране. Газопрессовая сварка позволяет получить высокие механические свойства сварного соединения, однако у нее низкая производительность, и она требует больших затрат.

2. Самое широкое распространение в России получила контактно стыковая сварка рельсов, благодаря надежности получаемых соединений, производительности, экономической эффективности. Но при появлении новых рельсовых сталей возникают трудности получения качественных сварных соединений: при быстром нагреве сварного стыка, которое обеспечивается методом пульсирующего оплавления, происходит интенсивное охлаждение З.Т.В. с формированием высокопрочного слоя со структурой мартенсита на месте микрообъемов с повышенным содержанием хрома, никеля и углерода. Участки мартенсита, играют роль концентраторов напряжения и приводят к образованию дефектов в сварных стыках (к развитию усталостных трещин в головке, шейке и подошве рельса с хрупким изломом).

3. Приведен комплекс методик экспериментальных исследований влияния после сварочного подогрева на качество сварного шва (механических свойств, микро– и макроструктуры). Показано, что исследования проведены на оборудовании в лабораториях ЦКП «Материаловедение» ФГБОУ ВО «СибГИУ», НПЦ «Сварочные процессы и технологии».

4. В процессе исследований было установлено, что преобладающим типом

неметаллических включений образцов являются точечные оксиды , а именно оксиды кремния и марганца. При этом самым чистым в зоне сварного шва и основного металла по количеству и видам неметаллических включений является образец № 0, а самым загрязненным образец №1

5. Оптимальными параметрами контактного подогрева после контактной стыковой сварки с точки зрения полученной микроструктуры протяженности зоны термического влияния и значений микротвердости являются параметры, использованные при режиме :

Режим сварки:  $U_2 = 5,76$  В,  $I_2 = 11,7$  кА,  $V_{\text{опл}} = 1$  мм/с,  $\Delta_{\text{опл}} = 10$  мм. Режим контактного подогрева: время охлаждения после осадки 30 с, время подогрева 0,6 с, время охлаждения после подогрева 15 с, количество импульсов подогрева 4 с.

Данный режим позволяет получить сварное соединение из рельсовой стали типа Р65 марки Э76ХФ в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685-2013 по структуре, механическим свойствам. Так же данный режим имеет минимальную протяженность зоны с пониженной твердостью.

Этот режим рекомендован к применению для сварки рельсов для получения повышенных эксплуатационных показателей надежности стыкового соединения.

## Список литературы

1. Стенд бесстыкового пути./ Н.П. Виногоров, В.А. Крапивный.// Путь и путевое хозяйство, 2002, № 10 - С. 32-34.
2. Альбрехт В.Г., Виногоров Н.П., Зверев Н.Б. и др. Бесстыковой путь. // М. Транспорт. 2000, - С. 408.
3. Золотарский А.Ф., Раузин Я.Р., Шур Е.А., Великанов А.В. и др. Термически упрочненные рельсы.// М. Транспорт. 1976. - С. 263.
4. Служба объемно закаленных углеродистых рельсов/ Михалев М.С. Литвинов В.Я. // Вестник ВНИИЖТ, 1968, № 4. - С.40-43.
5. Генкин И.З. Сварные рельсы и стрелочные переводы.// М. Интекст. 2003 - С. 93 .
6. Перспективы развития парка путевых рельсосварочных машин/ Николин А. И., Гудков А. В., Федин В. М., Беляев Д. И. и др. // Вестник ВНИИЖТ, 2002, № 2. – С. 40-44.
7. Азот в металлах / В.В. Аверин, А.В. Рвякин, В.И. Федорченко, Л.Н. Козина. – М.: Металлургия, 1976. – С. 224.
8. Свяжин А.Г. Легированные стали азотом / А.Г. Свяжин // Черная металлургия. Бюллетень ЦНИИ и ТЭИ ЧМ. – 1990. – Вып. 6 (1094). – С. 37-42.
9. Опыт и перспективы легирования стали газообразным азотом / В.П. Немченко, В.А. Козьмин, В.И. Довгопол и др. // Сталь. – №10. С. 829-896.
10. <http://www.esab.ru>
11. Воронин, Н.Н. Технология алюминотермитной сварки рельсов: учеб. пособие / Н.Н. Воронин, В.В. Засыпкин, В.И. Коненков, Э.В. Воробьев, О.Н. Трынкова; под ред. Н.Н. Воронина. - М.: МИИТ, 2008. - С. 117 .
12. Воронин, Н.Н. Алюминотермитная сварка рельсов: учеб. пособие [Текст]. / Н.Н. Воронин, В.В. Засыпкин, В.И. Коненков, Э.В. Воробьев, О.Н. Трынкова; под ред. Н.Н. Воронина. - М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. - С.195.
13. Шепелев В.Н. Термитная сварка рельсов / В.Н. Шепелев - М.: Транспорт, 1963. - С. 56.



14. Малкин, Б.В. Термитная сварка рельсов / Б.В. Малкин, А.А. Воробьев - М.: Транспорт, 1963. - С.272.

15. Сварка рельсов алюминотермитная методом промежуточного литья. Технические условия ТУ 0921-127-01124323-2005. - М.: ВНИИЖТ, 2005. - С. 16.

16. <http://stc-paton.com/ukr/equipment/aw01>

17 Классификатор дефектов сварных стыков рельсов, Открытое акционерное общество «научно–исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ»), Москва 2008.

18 Гудков А.В Николин А.И Курс обучения специалистов сварщиков на контактных рельсосварочных машинах. Учебно-методическое пособие. Санкт Петербург, 2008, - С. 122.

19 Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением: монография / С. И. Кучук-Яценко, В. К. Лебедев; – Киев.: «Наукова думка», 1976. – С.216.

20 Технология и оборудование контактной сварки: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / М. Д. Банов. – 3-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – С. 224.

21 Кучук–Яценко С.И. Технология и новое поколение оборудование для контактной сварки высокопрочных рельсов современного производства при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей / С.И. Кучук–Яценко, В. Г. Кривенко, А.В. Дидковский, В.И. Швец // Автоматическая сварка. – 2012. – № 6. – С. 32 – 37.

22 Основы сварки давлением / Гельман А. С. М.: «Машиностроение», 1970 г, - С.312 .

23 Кучук–Яценко С.И. Технология и оборудование для контактной сварки высокопрочных рельсов / С.И. Кучук–Яценко, А.В. Дидковский, В.И. Швец // Автоматическая сварка. – 2008. – № 11. – С. 129 – 138.

24. ГОСТ Р 51045-97 «Рельсы железнодорожные типов РП50, РП65 и РП75 для путей промышленного железнодорожного транспорта. Общие технические условия»

25 Разработка новой технологии сварки рельсов для высокоскоростного движения / Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А. // Черная металлургия: Бюл. ин-та “Черметинформация”. — 2018. — № 8. — С. 50–56.

26 Анализ и оптимизация параметров контактной стыковой сварки рельсов / Шевченко Р.А., Филиппова А.А., Патрушев А.О., Тюрин А.А., Тюрин Г.А. // В сборнике: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2018. – С. 226-230.

27 Совершенствование технологии контактной сварки железнодорожных рельсов / Шевченко Р.А. // В сборнике: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2018. – С. 218-221.

28 Современные технологии сварки железнодорожных рельсов / Н. А. Козырев, Р. А. Шевченко, А. А. Усольцев, Р. Е. Крюков, С. В. Князев // Черная металлургия : Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2018. – № 2. — С. 62–68.

29 Современные методы сварки рельсов нового поколения / Козырев Н.А., Усольцев А.А., Шевченко Р.А., Крюков Р.Е., Шишкин П.Е. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2017. – т. 60. № 10. – С. 785-791.

30 Способы получения качественного сварного соединения железнодорожных рельсов / Шевченко Р. А., Козырев Н. А., Усольцев А. А., Крюков Р. Е., Патрушев А. О. // Сборник трудов XX Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество». – 2017. С.254 – 257

31 Выбор оптимальных режимов сварки железнодорожных рельсов / Шевченко Р. А., Козырев Н. А., Крюков Р. Е., Патрушев А. О., Усольцев А. А. // Сборник трудов XX Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество». – 2017.- С.332 – 336

32 Кучук–Яценко С. И. Технология и новое поколение оборудование для контактной сварки высокопрочных рельсов современного производства при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей / С. И.

Кучук–Яценко, В. Г. Кривенко, А.В. Дидковский, В.И. Швец // Автоматическая сварка. – 2012. – № 6. – С. 32 – 37.

33 Гудков А. В. Машина МСР – 6301 для контактной сварки рельсов в стационарных условиях / А. В. Гудков, Д. И. Беляев, Б. Б. Сальников, С. В. Хлебников // Сварочное производство. – 2003. – № 2. – С. 43 – 45.

34 Кучук–Яценко С.И. Технология и оборудование для контактной сварки высокопрочных рельсов / С.И. Кучук–Яценко, А.В. Дидковский, В.И. Швец // Автоматическая сварка. – 2008. – № 11. – С. 129 – 138.

35 Классификатор дефектов сварных стыков рельсов, Открытое акционерное общество «научно–исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ»), Москва 2008.

36 Гуляев А.П. Металловедение: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1986. – С.544 .

37 Козырев, Н. А. Железнодорожные рельсы из электростали / Н .А. Козырев, В. В. Павлов, Л. А. Годик, В. П. Дементьев. – Новокузнецк, 2006. – С. 387.

38 Типовой технологический процесс изготовления и ремонта сварных рельсов в рельсосварочных предприятиях. // ВНИИЖТ 2000. - С. 27.

39 Эксплуатация бесстыкового пути в условиях Сибири / Николаенко А. А., Величко Д. В., Прудников А. В. – Новосибирск : Сибпринт, 2010. – С. 133.

40 Краслоу Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Краслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – С. 487 .

41 Рыкалин Н. Н. Тепловые основы сварки. / Н. Н. Рыкалин – М. – Л.: Изд. АН СССР, 1947. – С. 271 .

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»

Кафедра материаловедения, литейного и сварочного производства  
(наименование кафедры)

## ГРАФИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

выпускной квалификационной работы:

Исследование сварки железнодорожных рельсов и изучение влияния режимов сварки  
на структуру металла и качество сварного стыка  
(тема)

ОБУЧАЮЩИЙСЯ \_\_\_\_\_  
(подпись)

Алимарданов П Э  
(фамилия, имя, отчество)

допущен к защите в государственной экзаменационной комиссии «\_\_» \_\_ 2020 г.

Руководитель \_\_\_\_\_ д.т.н., профессор \_\_\_\_\_ Козырев Н.А  
(уч. степень, звание) (подпись) (фамилия, имя, отчество)

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ д.т.н., профессор \_\_\_\_\_ Козырев Н.А  
(уч. степень, звание) (подпись) (фамилия, имя, отчество)

Директор института \_\_\_\_\_ д.т.н., профессор \_\_\_\_\_ Галевский Г.В.  
МиМ (наименование института) (уч. степень, звание) (подпись) (фамилия, имя, отчество)

Нормоконтроль \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_  
(уч. степень, звание) (подпись) (фамилия, имя, отчество)

Новокузнецк  
2020 г.



# Исследование сварки железнодорожных рельсов и изучение влияния режимов сварки на структуру металла и качество сварного стыка

Выполнил обучающийся гр. МСП-16  
Алимарданов П.Э

Руководитель:  
д.т.н., профессор  
Козырев Н.А

					СибГИУ 2020 22.03.02 16120ВКР						
Изм.	Лист	№ докум.	Под	Дата	Тема выпускной квалификационной работы						
Разраб.	Алимарданов П.Э								Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Козырев Н.А.								У	3	16
Консульт.									Кафедра материаловедения,		
Н. контр.	Князев С.В								литейного и сварочного		
Зав. каф.	Козырев Н.А				производства Гр.МСП-16						

# ЦЕЛЬ И ЗАДАЧА ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

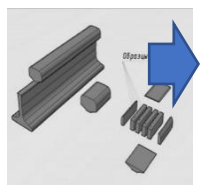
Цель ВКР – Исследование влияния режимов сварки железнодорожных рельсов на структуру металла сварного соединения.

## Задача ВКР:

Разработка новых технических решений, позволяющих повысить ресурс железнодорожных рельсов

					СибГИУ 2020 22.03.02 16120ВКР						
Изм.	Лист	№ докум.	Под	Дата	Цель и задача выпускной квалификационной работы						
Разраб.		Алимарданов П.Э							Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Козырев Н.А.							У	4	16
Консульт.									Кафедра материаловедения, литейного и сварочного производства Гр.МСП-16		
Н. контр.		Князев С.В									
Зав. каф.		Козырев Н.А									

# ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ



Вырезка образцов

Анализ химического состава по ГОСТ 22536.0



Сварка образцов



Резка образцов



Изучение микроструктур образцов ГОСТ 8233-56

Травление образцов в 2%-ном растворе азотной кислоты в соответствии с ГОСТ 8233-56



Изучение неметаллических включений образцов ГОСТ 1778-70



Полировка образцов



Измерение микротвердости образцов ГОСТ 9450-76



Построение графиков для нахождения среднего значения микротвердости в образце

					СибГИУ 2020 22.03.02 16120ВКР					
Изм.	Лист	№ докум.	Под	Дата	Технология проведения экспериментов			Лит.	Лист	Листов
Разраб.	Алимарданов П.Э							У	5	16
Руковод.	Козырев Н.А.							Кафедра литейного и сварочного производства Гр.МСП-16		
Консульт.										
Н. контр.	Князев С.В									
Зав. каф.	Козырев Н.А									



# Оборудование



- Стыковая сварочная машина типа МС-20.08
- Электроэрозионный проволочно-вырезном станок с ЧПУ струйного типа ДК7732 M11
- Шлифовальный станок FORCIPOL 2
- Шлифовальная бумага Mirka
- Оптический микроскоп OLYMPUS GX-51
- Микротвердомер модель HVS-1000A

					СибГИУ 2020 22.03.02 16120ВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Под	Дата	Оборудование	Лит.	Лист	Листов
Разраб.		Алимарданов П.Э				У	6	16
Руковод.		Козырев Н.А.				Кафедра литейного и сварочного производства Гр.МСП-16		
Консульт.								
Н. контр.		Князев С.В						
Зав. каф.		Козырев Н.А						

## Химический состав и режимы после сварочного подогрева образцов

Режим сварки:  $U_2 = 5,76$  В,  $I_2 = 11,7$  кА,  $V_{\text{опл}} = 1$  мм/с,  $\Delta_{\text{опл}} = 10$  мм

Таблица 1 Химический состав образцов

№ образца	C	Mn	Si	Cr	V	P	S	Al	Ti
0	0,91	0,81	0,43	0,32	0,09	0,010	0,005	0,003	0,003
1	0,76	0,77	0,53	0,36	0,04	0,014	0,006	0,003	0,002
2	0,77	0,80	0,56	0,38	0,04	0,008	0,006	0,002	0,002
3	0,76	0,77	0,53	0,36	0,04	0,014	0,006	0,003	0,002
4	0,77	0,80	0,56	0,38	0,04	0,008	0,006	0,002	0,002

Таблица 2 Режимы послесварочного подогрева

№ Опыта	X1 (Время осадки)	X3 (Промежуток импульса)	X4 (Количество импульсов)	X1 (Время осадки)	X3 (Промежуток импульса)	X4 (Количество импульсов)
0	-	-	-	-	-	-
1	+	+	+	30	15	4
2	+	+	-	30	15	2
3	+	-	+	30	10	4
4	+	-	-	30	10	2

					СибГИУ 2020 22.03.02 16120ВКР					
Изм.	Лист	№ докум.	Под	Дата	Химический состав и режимы после сварочного подогрева образцов					
Разраб.	Алимарданов П.Э							Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Козырев Н.А.							У	7	16
Консульт.								Кафедра материаловедения, литейного и сварочного производства Гр.МСП-16		
Н. контр.	Князев С.В									
Зав. каф.	Козырев Н.А									

# Оценка макроструктуры

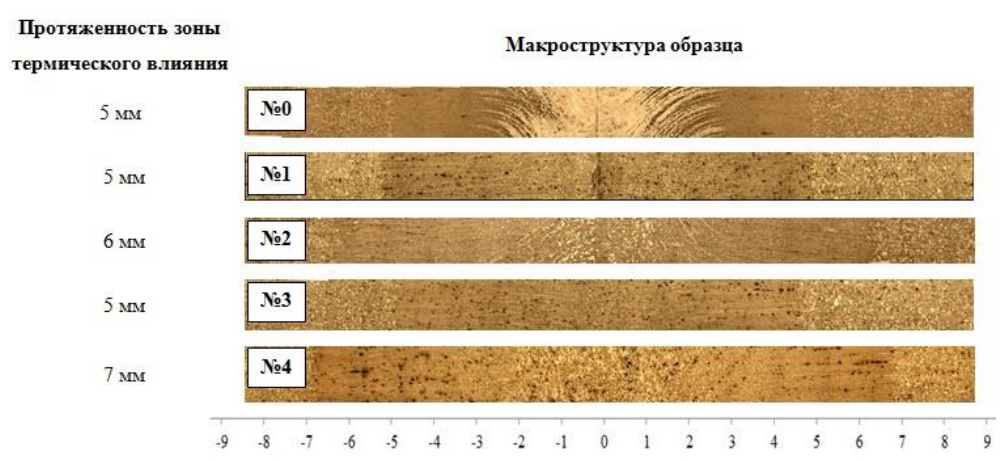
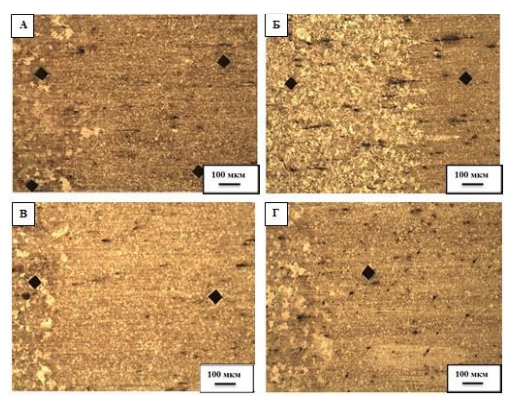


Рисунок 1 – Макроструктура сварного шва образца стали Э76ХФ

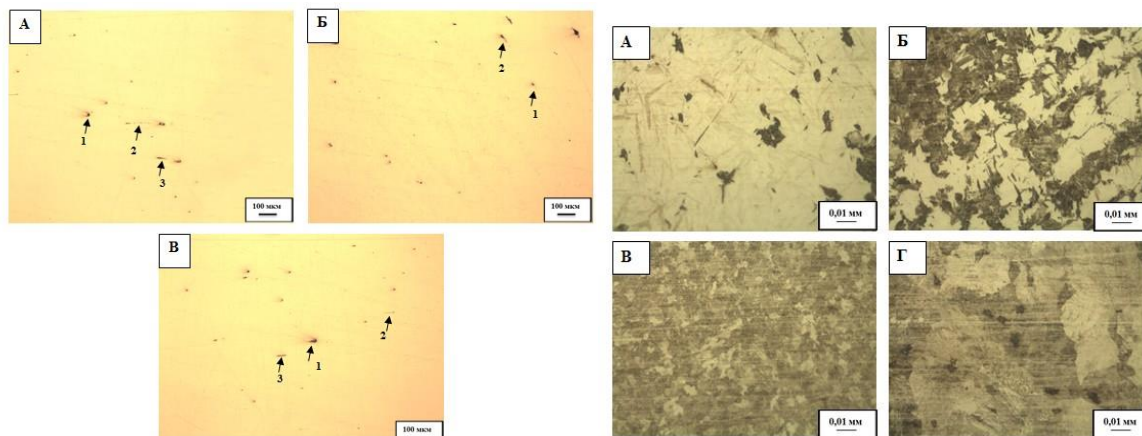


А – Переходная зона между зоной термического влияния и основным металлом образца №1, Б - Переходная зона между зоной термического влияния и основным металлом образца №2, В - Переходная зона между зоной термического влияния и основным металлом образца №3, А – Переходная зона между зоной термического влияния и основным металлом образца №4

Рисунок 2 – Переходная область между зоной термического влияния (справа) и основным металлом (слева)

					СибГИУ 2020 22.03.02 16120ВКР					
Изм.	Лист	№ докум.	Под	Дата	Тема выпускной квалификационной работы					
Разраб.	Алимарданов П.Э							Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Козырев Н.А.							У	8	16
Консульт.								Кафедра литейного и сварочного производства Гр.МСП-16		
Н. контр.	Князев С.В									
Зав. каф.	Козырев Н.А									

# Исследуемый образец №0



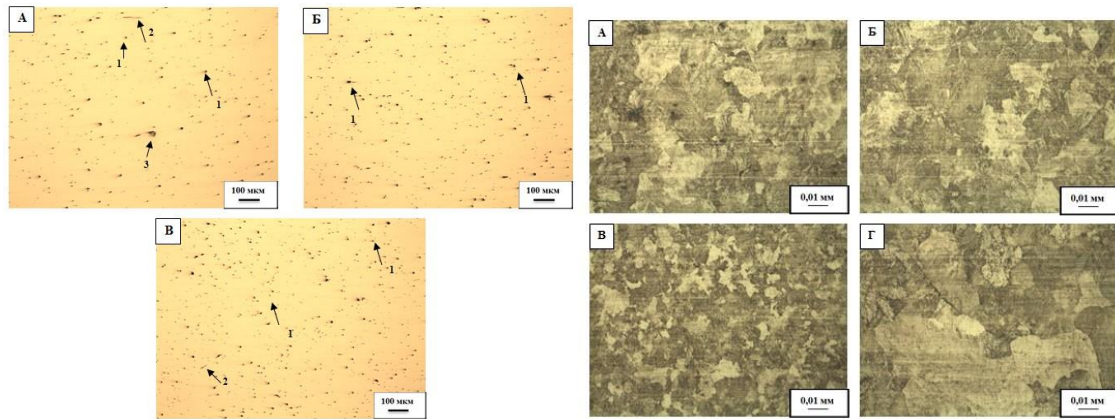
1 - точечные оксиды, 2 - нитриды  
 строчечные  
 3 - силикаты пластинчатые  
 а – основной металл; б – зона  
 термического влияния; в – сварной шов  
 Рисунок 2 – Неметаллические  
 включения образца стали Э76ХФ,  
 полученного по режиму №0

А – зона сварного шва, Б, В –  
 ЗТВ, Г – основной металл

Рисунок 3 – Микроструктура  
 различных областей, полученная при  
 режиме №

					СибГИУ 2020 22.03.02 16120ВКР					
Изм.	Лист	№ докум.	Под	Дата	Исследуемый образец №0					
Разраб.	Алимарданов П.Э							Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Козырев Н.А.							У	9	16
Консульт.								Кафедра материаловедения, литейного и сварочного производства Гр.МСП-16		
Н. контр.	Князев С.В									
Зав. каф.	Козырев Н.А									

# Исследуемый образец №1



1 - точечные оксиды, 2 - силикаты пластинчатые, 3 - силикаты недеформирующиеся  
 А – основной металл; Б – зона термического влияния; В – сварной шов

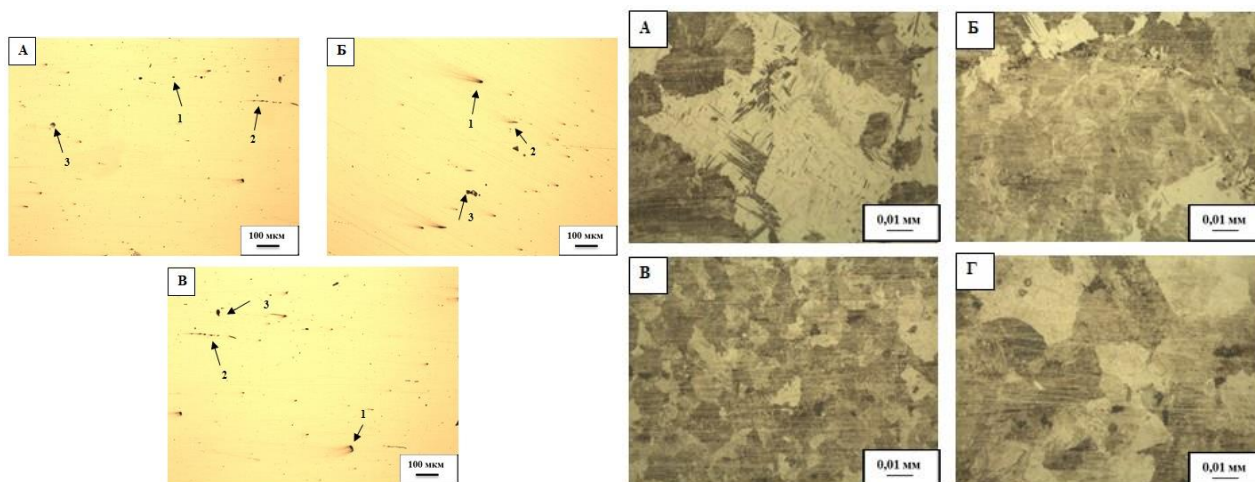
Рисунок 4 – Неметаллические включения образца стали Э76ХФ, полученного по режиму №1

А – зона сварного шва, Б, В – ЗТВ, Г – основной металл

Рисунок 5 – Микроструктура различных областей, полученная при режиме №1

					СибГИУ 2020 22.03.02 16120ВКР					
Изм.	Лист	№ докум.	Под	Дата	Исследуемый образец №1			Лит.	Лист	Листов
Разраб.	Алимарданов П.Э							У	10	16
Руковод.	Козырев Н.А.							Кафедра материаловедения, литейного и сварочного производства Гр.МСП-16		
Консульт.										
Н. контр.	Князев С.В									
Зав. каф.	Козырев Н.А									

# Исследуемый образец №2



1 - точечные оксиды, 2 - силикаты пластинчатые,  
3 - силикаты недеформирующиеся  
А – основной металл; Б – зона термического влияния; В – сварной шов

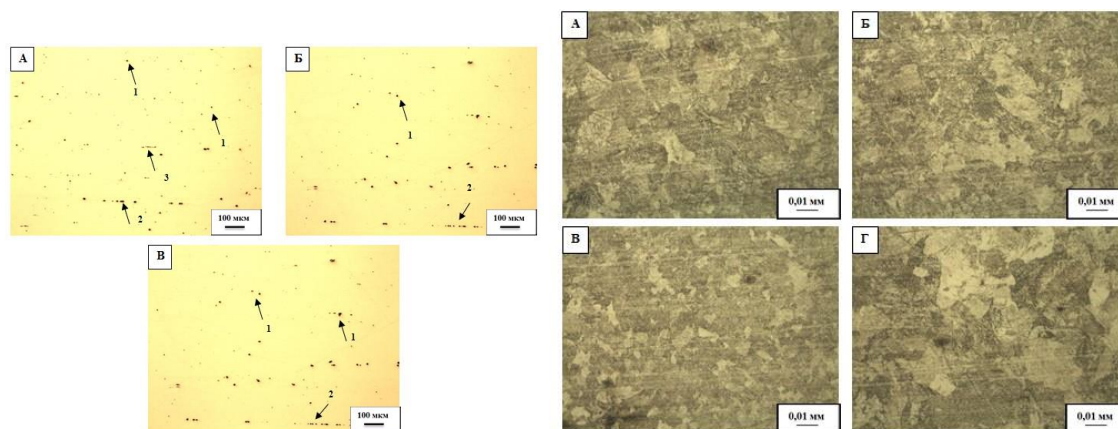
Рисунок 6 – Неметаллические включения образца стали Э76ХФ, полученного по режиму №2

А – зона сварного шва, Б, В – ЗТВ, Г – основной металл

Рисунок 7 – Микроструктура различных областей, полученная при режиме №2

					СибГИУ 2020 22.03.02 16120ВКР					
Изм.	Лист	№ докум.	Под	Дата	Исследуемый образец №2					
Разраб.	Алимарданов П.Э							Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Козырев Н.А.							У	11	16
Консульт.								Кафедра материаловедения, литейного и сварочного производства Гр.МСП-16		
Н. контр.	Князев С.В									
Зав. каф.	Козырев Н.А									

# Исследуемый образец №3



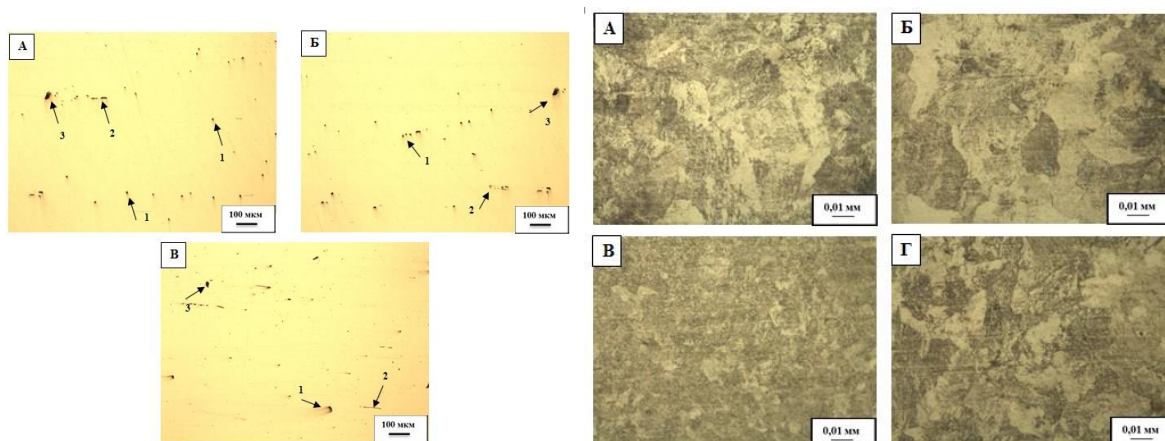
1 - оксиды точечные, 2 - нитриды  
строчечные,  
3 - силикаты хрупкие  
А – основной металл; Б – зона  
термического влияния; В – сварной  
шов

Рисунок 8 – Неметаллические  
включения образца стали Э76ХФ,  
полученного по режиму №3

А – зона сварного шва, Б, В –  
ЗТВ, Г – основной металл  
Рисунок 9 – Микроструктура  
различных областей, полученная  
при режиме №3

					СибГИУ 2020 22.03.02 16120ВКР					
Изм.	Лист	№ докум.	Под	Дата	Исследуемый образец №3					
Разраб.	Алимарданов П.Э							Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Козырев Н.А.							У	12	16
Консульт.								Кафедра материаловедения,		
Н. контр.	Князев С.В							литейного и сварочного		
Зав. каф.	Козырев Н.А				производства Гр.МСП-16					

# Исследуемый образец №4



1 - точечные оксиды, 2 - силикаты пластинчатые  
 3 - силикаты недеформирующиеся  
 Рисунок 10 – Неметаллические включения образца стали Э76ХФ, полученного по режиму №4

А – зона сварного шва, Б, В – ЗТВ, Г – основной металл  
 Рисунок 11 – Микроструктура различных областей, полученная при режиме №4

					СибГИУ 2020 22.03.02 16120ВКР					
Изм.	Лист	№ докум.	Под	Дата	Исследуемый образец №4					
Разраб.	Алимарданов П.Э							Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Козырев Н.А.							У	13	16
Консульт.								Кафедра материаловедения, литейного и сварочного производства Гр.МСП-16		
Н. контр.	Князев С.В									
Зав. каф.	Козырев Н.А									



# Исследование микротвердости

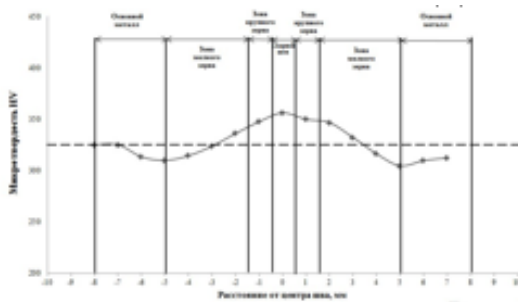


Рисунок 13 – Микротвердость стали Э76ХФ в различных зонах после проведения контактно-стыковой сварки по режиму №1

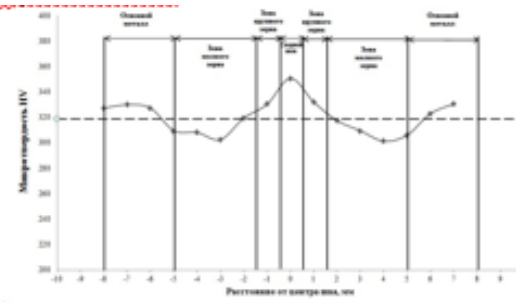


Рисунок 15 – Микротвердость стали Э76ХФ в различных зонах после проведения контактно-стыковой сварки по режиму №3

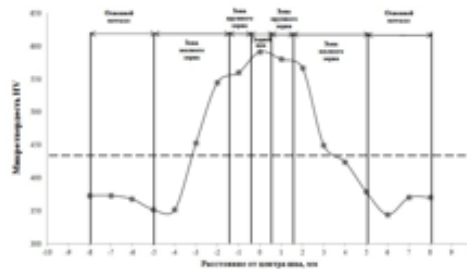


Рисунок 12 – Микротвердость стали Э76ХФ в различных зонах после проведения контактно-стыковой сварки по режиму №0

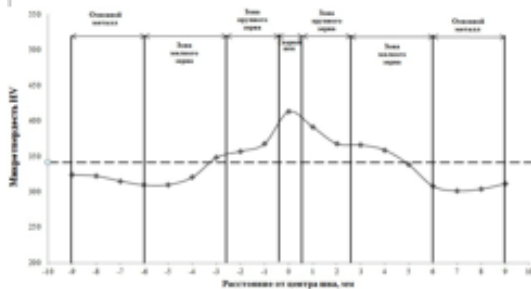


Рисунок 14 – Микротвердость стали Э76ХФ в различных зонах после проведения контактно-стыковой сварки по режиму №2

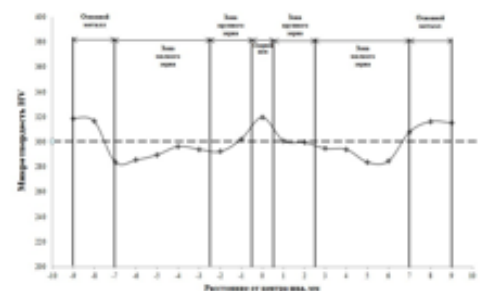


Рисунок 16 – Микротвердость стали Э76ХФ в различных зонах после проведения контактно-стыковой сварки по режиму №4

					СибГИУ 2020 22.03.02 16120ВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Под	Дата	Исследование микротвердости			
Разраб.	Алимарданов П.Э							
Руковод.	Козырев Н.А.							
Консульт.								
Н. контр.	Князев С.В							
Зав. каф.	Козырев Н.А				Лит.	Лист	Листов	
						У	14	16
						Кафедра материаловедения, литейного и сварочного производства Гр.МСП-16		

## Данные полученных результатов

Название	Режим №0	Режим №1	Режим №2	Режим №3	Режим №4
ЗТВ	5	5 мм	6 мм	5 мм	7 мм
<u>Неметаллические включения</u>	1 - точечные оксиды, 2 - силикаты пластинчатые, 3 - силикаты недеформирующиеся	1 - точечные оксиды, 2 - силикаты пластинчатые, 3 - силикаты недеформирующиеся	1 - точечные оксиды, 2 - силикаты пластинчатые, 3 - силикаты недеформирующиеся	1 - точечные оксиды, 2 - силикаты пластинчатые, 3 - силикаты недеформирующиеся	1 - точечные оксиды, 2 - силикаты пластинчатые, 3 - силикаты недеформирующиеся
Структура	Мартенсит тростит (балл) Сварной шов 4 Зона крупного зерна 4	Степень дисперсности пластинчатого перлита, балл Сварной шов 2 Зона крупного зерна 1	Мартенсит тростит (балл) Сварной шов 7,5 Зона крупного зерна 9	Степень дисперсности пластинчатого перлита, балл Сварной шов 1 Зона крупного зерна 1	Степень дисперсности пластинчатого перлита, балл Сварной шов 4 Зона крупного зерна 3-4
<u>Микротвердость</u>	560HV	356,4 HV.	413 HV	350,8 HV.	320,1 HV.

					СибГИУ 2020 22.03.02 16120ВКР											
Изм.	Лист	№ докум.	Под	Дата	Данные полученных результатов											
Разраб.	Алимарданов П.Э										Лит.	Лист	Листов			
Руковод.	Козырев Н.А.										У	15	16			
Консульт.											Кафедра материаловедения, литейного и сварочного производства Гр.МСП-16					
Н. контр.	Князев С.В															
Зав. каф.	Козырев Н.А															

# Выводы по проведённым экспериментам

1. Режим сварки:  $U_2 = 5,76 \text{ В}$ ,  $I_2 = 11,7 \text{ кА}$ ,  $V_{\text{опл}} = 1 \text{ мм/с}$ ,  $\Delta_{\text{опл}} = 10 \text{ мм}$ . Режим контактного подогрева: нет. Микротвердость в зоне термического влияния имеет повышенные значения. В структуре был обнаружен игольчатый мартенсит, наличие этой структуры в металле рельсов приводит к развитию усталостных трещин и хрупкому излому. Преобладающим типом неметаллических включений являются точечные оксиды. ЗТВ составляет 5 мм. Данный образец является самым чистым по наличию не металлических включений.
2. Режим сварки:  $U_2 = 5,76 \text{ В}$ ,  $I_2 = 11,7 \text{ кА}$ ,  $V_{\text{опл}} = 1 \text{ мм/с}$ ,  $\Delta_{\text{опл}} = 10 \text{ мм}$ . Режим контактного подогрева: время охлаждения после осадки 30 с, время подогрева 0,6 с, время охлаждения после подогрева 15 с, количество импульсов подогрева 4 с. Распределение микротвердости в зоне термического влияния в целом имеет удовлетворительные значения, сопоставимые с основным металлом. ЗТВ составляет 5 мм. Получена оптимальная структура, удовлетворяющая требованиям ГОСТ Р 51685-2013. Преобладающим типом неметаллических включений являются точечные оксиды. Данный образец является самым загрязнённым по наличию не металлическим включениям.
3. Режим сварки:  $U_2 = 5,76 \text{ В}$ ,  $I_2 = 11,7 \text{ кА}$ ,  $V_{\text{опл}} = 1 \text{ мм/с}$ ,  $\Delta_{\text{опл}} = 10 \text{ мм}$ . Режим контактного подогрева: время охлаждения после осадки 30 с, время подогрева 0,6 с, время охлаждения после подогрева 15 с, количество импульсов подогрева 2 с. Микротвердость в зоне термического влияния имеет повышенные значения. В структуре был обнаружен игольчатый мартенсит наличие этой структуры в металле рельсов приводит к развитию усталостных трещин и хрупкому излому. Преобладающим типом неметаллических включений являются точечные оксиды. ЗТВ составляет 6 мм.
4. Режим сварки:  $U_2 = 5,76 \text{ В}$ ,  $I_2 = 11,7 \text{ кА}$ ,  $V_{\text{опл}} = 1 \text{ мм/с}$ ,  $\Delta_{\text{опл}} = 10 \text{ мм}$ . Режим контактного подогрева: время охлаждения после осадки 30 с, время подогрева 0,6 с, время охлаждения после подогрева 10 с, количество импульсов подогрева 4 с. Микротвердость в зоне термического влияния имеет повышенные значения. Получена оптимальная структура, удовлетворяющая требованиям ГОСТ Р 51685-2013. Преобладающим типом неметаллических включений являются точечные оксиды. ЗТВ составляет 5 мм.
5. Режим сварки:  $U_2 = 5,76 \text{ В}$ ,  $I_2 = 11,7 \text{ кА}$ ,  $V_{\text{опл}} = 1 \text{ мм/с}$ ,  $\Delta_{\text{опл}} = 10 \text{ мм}$ . Режим контактного подогрева: время охлаждения после осадки 30 с, время подогрева 0,6 с, время охлаждения после подогрева 10 с, количество импульсов подогрева 2 с. Микротвердость в зоне термического влияния имеет повышенные значения. Получена оптимальная структура, удовлетворяющая требованиям ГОСТ Р 51685-2013. Преобладающим типом неметаллических включений являются точечные оксиды. ЗТВ составляет 7 мм что является наибольшей ЗТВ всех образцов.
6. Установлено, что оптимальными параметрами контактного подогрева после сварки с точки зрения значений микротвердости являются параметры, использованные в режиме Режим сварки:  $U_2 = 5,76 \text{ В}$ ,  $I_2 = 11,7 \text{ кА}$ ,  $V_{\text{опл}} = 1 \text{ мм/с}$ ,  $\Delta_{\text{опл}} = 10 \text{ мм}$ . Режим контактного подогрева: время охлаждения после осадки 30 с, время подогрева 0,6 с, время охлаждения после подогрева 15 с, количество импульсов подогрева 4 с.
- Этот режим дает возможность получить сварное соединение из рельсовой стали марки Э76ХФ в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685-2013 по механическим свойствам. Зона ЗТВ в данном образце равняется 5 мм.

					СибГИУ 2020 22.03.02 16120ВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Под	Дата				
Разраб.	Алимарданов П.Э				Выводы по проведённым экспериментам	Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Козырев Н.А.					У	16	16
Консульт.						Кафедра материаловедения,		
Н. контр.	Князев С.В					литейного и сварочного		
Зав. каф.	Козырев Н.А					производства Гр.МСП-16		

