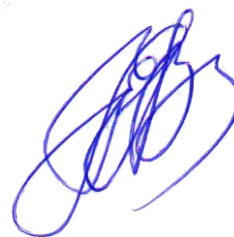


На правах рукописи



Полевой Егор Владимирович

**РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ
ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
ДЛИННОМЕРНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ**

Специальность

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новокузнецк – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» на кафедре теплоэнергетики и экологии

Научный руководитель: Темлянцев Михаил Викторович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:
Федин Владимир Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта
(МИИТ)», начальник научно – образовательного цен-
тра «Промышленные технологии и ресурсосбережение
на транспорте»

Борц Алексей Игоревич, кандидат технических наук,
АО «Научно-исследовательский институт железнодоро-
жного транспорта», заместитель директора научного
центра «Рельсы, сварка, транспортное материаловедение»

Ведущая организация: ФГБУН «Институт физики ме-
таллов имени М.Н. Михеева Уральского отделения
Российской академии наук»

Защита состоится «03» июля 2018 г. в 13-00 часов в аудитории 3П на заседа-
нии диссертационного совета Д 212.252.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государствен-
ный индустриальный университет» по адресу: 654007, г. Новокузнецк, Кемеров-
ская область, ул. Кирова, д. 42, СибГИУ.

Факс: 8(3843) 46-57-92.
E-mail: ds21225201@sibsiu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на
сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
www.sibsiu.ru.

Автореферат разослан «___»_____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.252.01,
д.т.н., профессор



О. И. Нохрина

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Развернутая длина главных путей ОАО «РЖД» является одной из самых протяженных в мире и составляет свыше 124 тыс. км, на которых уложено по разным оценкам от 21 до 24 млн. т рельсов, а доля стоимости рельсов в общем объеме работ по капитальному ремонту пути составляет от 40 до 70 %. Поэтому вопросам повышения качества и эксплуатационной стойкости рельсов посвящено большое количество исследований как в России, так и за рубежом.

Одним из наиболее эффективных способов повышения эксплуатационной стойкости рельсов является их термическая обработка. В настоящий момент лидерами в производстве рельсов, обеспечивающими наилучшие показатели эксплуатационной стойкости являются производители Японии (NipponSteel & Sumimoto-Metallcorp.), Франции (TataSteel) и Австрии (VoestalpineSchienen). Применяемые ими технологии отличаются по способу нагрева под закалку, химическому составу рельсовой стали, видам закалочных сред, но общим для всех ведущих мировых производителей является дифференцированная по сечению термическая обработка рельсов, которая обеспечивает получение закаленной головки и структуру горячекатаного металла в шейке и подошве рельсового профиля. Такое распределение оказывает положительное влияние на эпюру остаточных напряжений, которые, в свою очередь существенно влияют на эксплуатационную стойкость рельсов.

В последние годы в России произведено существенное обновление технологических мощностей по производству рельсов: проведена масштабная реконструкция рельсового производства на АО «ЕВРАЗ ЗСМК», построен новый рельсобалочный цех в ПАО «Челябинский металлургический комбинат». Новое оборудование указанных выше рельсовых производств учитывает современные тенденции и позволяет производить длинномерные (длиной до 100 м) дифференцированно термоупрочненные рельсы с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева и новых экологически чистых охлаждающих сред.

Коренное изменение технологии термической обработки на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» потребовало разработки новых экономнолегированных химических составов рельсовой стали и энергоэффективных режимов термической обработки рельсов. Несмотря на обширный накопленный опыт производства, эксплуатации и исследования термоупрочненных рельсов, отмечается отсутствие глубоких и системных исследований, посвященных термообработке рельсов непосредственно после прокатки, а зарубежные публикации по данному вопросу фактически не содержат практически значимых данных. В совокупности это затрудняет процессы освоения и совершенствования новой технологии термической обработки отечественных железнодорожных рельсов.

Цели и задачи

Цель работы: Разработка научно обоснованной ресурсосберегающей технологии воздушоструйной дифференцированной термической обработки железнодорожных рельсов из низколегированной стали с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева.

Для реализации поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Исследовать кинетику распада аустенита и прокаливаемость рельсовых сталей различного химического состава.

2. Разработать опытную установку для физического моделирования процессов воздушоструйной дифференцированной термической обработки рельсов.

3. Исследовать влияние параметров термической обработки на структурообразование и скорости охлаждения стали в различных участках по сечению головки рельса.

4. Исследовать влияние химического состава стали и параметров охлаждения рельсового профиля в воздушной среде с использованием тепла повторного печного нагрева и остаточного тепла предпрокатного нагрева на свойства металла.

5. Разработать ресурсосберегающие режимы дифференцированной термической обработки рельсов с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева, обеспечивающие снижение затрат и повышение эксплуатационных свойств готовых рельсов.

Научная новизна

1. Впервые получены данные о кинетике распада горячедеформированного аустенита рельсовой стали марки Э76ХФ. Показано, что деформация металла расширяет интервал перлитного превращения и снижает устойчивость переохлажденного аустенита.

2. Определены и научно обоснованы закономерности влияния углерода, марганца, хрома, кремния, ванадия и ниобия на структуру и свойства рельсовых сталей в условиях различных способов нагрева, а также влияния предварительной деформации перед термообработкой.

3. Получены новые данные, зависимости и закономерности влияния давления воздуха на скорость охлаждения стали в различных участках по сечению головки рельсового профиля.

Практическая значимость работы

1. Разработан химический состав экономнолегированной рельсовой стали, предназначенный для производства рельсов, дифференцированно термоупрочненных в воздушной среде.

2. Разработаны режимы дифференцированной термической обработки с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева, обеспечивающие достижение высокого комплекса физико-механических свойств рельсов.

3. Разработаны новые термокинетические диаграммы распада горячедеформированного аустенита рельсовой стали марки Э76ХФ.

4. Полученные данные позволили освоить производство дифференцированно термоупрочненных в воздушной среде с использованием остаточного тепла нагрева под прокатку рельсов общего назначения категории ДТ350 и рельсов специального назначения категории ДТ350НН.

Личный вклад автора

Автору принадлежит постановка задач исследования, проведение теоретических и экспериментальных исследований влияния химического состава (углерода, марганца, кремния, хрома, ванадия и ниобия) и параметров термической обработки (скорости охлаждения, давления воздуха, температуры) на структурообразование и

свойства дифференцированно термоупрочненных рельсов, в лабораторных и промышленных условиях, обработка и анализ полученных результатов, формулирование выводов по диссертационной работе.

Методология и методы исследования

Экспериментальные исследования кинетики распада аустенита выполнены на дилатометре BÄHR DIL 805 A/D в лабораторных условиях. Исследование скоростей охлаждения по сечению рельсов, а также параметров охлаждения и способов нагрева под термообработку выполнены с применением физического моделирования на опытной установке дифференцированной термообработки. Металлографические исследования рельсовой стали проводили с использованием средств оптической и сканирующей электронной микроскопии. Верификацию и промышленное освоение технологии термической обработки с использованием тепла прокатного нагрева производили на установках дифференцированной закалки рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК». При анализе экспериментальных данных использованы современные методы статистической обработки в том числе, множественный регрессионный анализ.

Основные положения выносимые на защиту

1. Совокупность результатов экспериментальных и теоретических исследований влияния углерода, марганца, кремния, хрома, ванадия, ниобия и режимов термической обработки на закономерности формирования структуры рельсовой стали и свойств железнодорожных рельсов.
2. Результаты исследования совместного влияния легирующих и микролегирующих элементов на кинетику распада горячедеформированного и недеформированного аустенита рельсовой стали марки Э76ХФ.
3. Разработанные ресурсосберегающие режимы воздушоструйной дифференцированной термической обработки с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева, обеспечивающие достижение необходимого комплекса свойств железнодорожных рельсов длиной до 100 м.
4. Установленные зависимости и закономерности влияния давления воздуха на скорости охлаждения стали в различных участках по сечению рельсового профиля.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов по пунктам: 1. Изучение взаимосвязи химического и фазового составов (характеризуемых различными типами диаграмм), в том числе диаграммами состояния с физическими, механическими, химическими и другими свойствами сплавов; 2. Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях; 3. Теоретические и экспериментальные исследования влияния структуры (типа, количества и характера распределения дефектов кристаллического строения) на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов; 6. Разработка новых и совершенствование существующих технологических процес-

сов объемной и поверхностной термической, химико-термической, термомеханической и других видов обработок, связанных с термическим воздействием, а также специализированного оборудования.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается совместным использованием современного оборудования для физического моделирования процессов дифференцированного термоупрочнения, апробированных методик статистической обработки экспериментальных данных, проведением сравнительного анализа с результатами опытно-промышленных исследований в условиях действующего рельсопрокатного производства и известными данными по тематике исследования, а также подтверждённой технико-экономической эффективностью предложенных технологических решений.

Основные результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: III Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении» (г. Пермь, 2016 г.); XIX Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2015 г.); 132-м заседании ежегодной межотраслевой Рельсовой комиссии (г. Иркутск, 2016 г.); 131-м заседании ежегодной межотраслевой Рельсовой комиссии (г. Челябинск, 2015 г.); 129 и 130-м заседаниях ежегодной межотраслевой Рельсовой комиссии (г. Новокузнецк, 2014 г.); Международной научно-технической конференции «Научное наследие роли И.П. Бардина в развитии отечественной металлургии» (ЦНИИчермет им И.П. Бардина, г. Москва, 2013 г.); 127-м заседании ежегодной межотраслевой Рельсовой комиссии (г. Анапа, 2012 г.); 125-м заседании ежегодной межотраслевой Рельсовой комиссии (г. Калуга, 2010 г.).

Публикации

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 22 печатных работах, в том числе в 8 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, а также в 4 статьях, в журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus. По результатам работы получено 2 патента на изобретение.

Структура и объем диссертационной работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 132 страницах машинописного текста, содержит 15 таблиц, 61 рисунок. Список использованных источников состоит из 151 наименования.

Основное содержание работы

Во **введении** изложены положения, выносимые на защиту, обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы, приведены научная новизна, практическая значимость полученных результатов.

В **первой главе** на основании данных отечественных и зарубежных литературных источников проанализированы тенденции развития рельсового производства в Российской Федерации и за рубежом, требования, предъявляемые к качеству современных рельсов для тяжеловесного и высокоскоростного движения. Проанали-

зирования классы сталей, применяемых для производства рельсов, влияние основных и легирующих элементов на качество рельсов. Проанализированы действующие технологии термической обработки рельсов в мировой практике, выделены их преимущества и недостатки. Рассмотрено влияние параметров термической обработки на качество рельсов. Проведен анализ перспективных направлений термообработки рельсов.

На основании выполненного аналитического обзора сделан вывод о недостаточной проработке в отечественной и зарубежной науке вопросов, касающихся распада горячедеформированного аустенита, влияния параметров охлаждения воздухом на скорость охлаждения по сечению рельсов, исследования свойств дифференцированно термоупрочненных с прокатного нагрева длинномерных железнодорожных рельсов, сформулированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям влияния химического состава на кинетику распада горячедеформированного аустенита и прокаливаемость рельсовых сталей перлитного класса различной степени легирования микролегированной ванадием и ниобием. Экспериментальные исследования проводили на закалочном-деформационном дилатометре «BÄHR DIL 805 A/D» путем испытаний образцов, вырезанных из головок рельсов четырех плавок, различного химического состава (таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав исследуемого рельсового металла

№ п/п	№ плавки	Марка стали	Массовая доля химических элементов, %										
			C	Mn	Si	Cr	P	S	Al	V	Nb	Ni	Cu
1	28551	Э76ХФ	0,79	1,09	0,43	0,57	0,016	0,009	0,003	0,04	0,035	0,07	0,13
4	28554	Э76ХФ	0,75	0,83	0,55	0,42	0,012	0,008	0,003	0,04	0,060	0,08	0,14
6	22376	Э76ХФ	0,79	0,78	0,55	0,46	0,014	0,015	0,002	0,07	–	0,08	0,14
7	22674	Э76ХФ	0,76	0,87	0,32	0,56	0,017	0,005	0,003	0,07	–	0,07	0,12
Требования ГОСТ Р 51685-2013 для стали марки Э76ХФ			0,72- 0,82	0,75- 1,25	0,20- 0,80	0,20- 0,80	не более			0,03- 0,15	не более		
							0,025	0,025	0,005		0,20	0,20	0,20

Схема эксперимента была составлена таким образом, чтобы она соответствовала реальным режимам термомеханической обработки при производстве длинномерных термоупрочненных рельсов. Общий порядок экспериментов, включал в себя следующие этапы:

1-2: Нагрев образца в вакууме со скоростью 10 град/с до температуры t 1200 °С в течение 120 с и последующая изотермическая выдержка при этой температуре в течение 300 с (рисунок 1) для гомогенизации аустенита, которая в условиях реального производства обеспечивается нагревом заготовки в методической печи.

3-4: Охлаждение до температуры 1050 °С со скоростью 10 град/с, деформация со степенью $\approx 30\%$ и скоростью 1с^{-1} , что имитировало деформацию в обжимной группе клетей.

5-6: Охлаждение до температуры 950 °С со скоростью 10 град/с, и изотермическая выдержка при температуре 950 °С (рисунок 1 а) или проведение деформации при температуре 950 °С со степенью $\approx 50\%$ и скоростью 1с^{-1} (рисунок 1 б), что ими-

тировало деформацию в чистовой группе клетей на рельсобалочном стане, при производстве рельсов Р65.

7: Немедленное охлаждение стали с температуры 950 °С со скоростями от 1 до 20 град/с, для построения ТКД распада горячедеформированного аустенита.

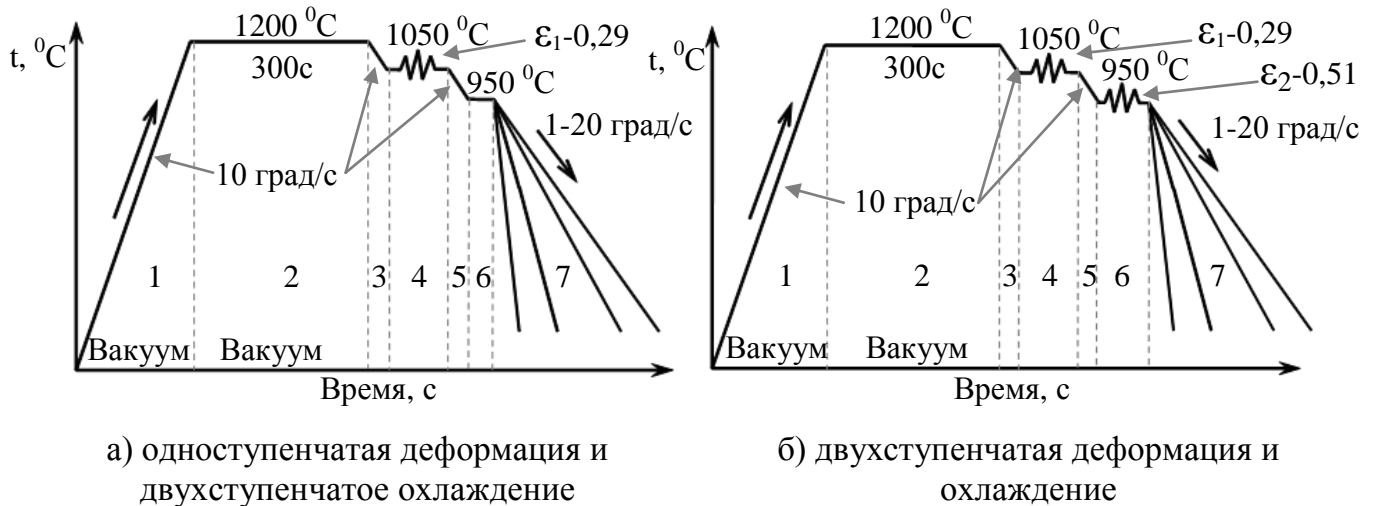


Рисунок 1 – Схема эксперимента

После охлаждения образцов исследовали микроструктуру с применением оптического микроскопа Olympus GX-71 при увеличениях до 1000 крат и методами электронной микроскопии на приборе QUANTA-200 Philips при увеличении до 40 000 крат, а также проводили измерение твёрдости по Виккерсу.

На основании дилатометрических измерений, металлографического анализа структуры и результатов измерения твердости были построены термокинетические диаграммы фазовых и структурных превращений для всех четырех плавок стали марки Э76ХФ и двух схем деформации в диапазоне скоростей охлаждения от 1 до 20 град/с (характерный вид представлен на рисунок 2), определены критическая скорость охлаждения ($V_{кр}$), критические точки $A_{г3}$, $A_{г1}$, M_n , структурные составляющие стали после охлаждения.

Анализ термокинетических диаграмм и структурных составляющих показал, что при скорости охлаждения до 3 град/с наиболее стабильная и однородная структура тонкопластинчатого перлита (рисунок 3) обеспечивается в пл. 22376 с умеренным содержанием хрома (0,46 %), марганца (0,78 %) при достаточно высоком содержании ванадия (0,08 %) и кремния (0,55 %) и близком к эвтектоидному содержании углерода (0,79 %).

В то время как в остальных исследованных сталях с более высоким содержанием хрома (пл.28551, 22674) или марганца и ниобия (пл.28554) обнаруживаются недопустимые участки бейнитной структуры при аналогичной или даже более низкой скорости охлаждения (рисунок 4).

Установлено, что деформация аустенита, приводит к существенному расширению температурного интервала превращения, что согласуется с литературными данными посредством влияния величины зерна на стабильность горячекатаного аустенита. С целью изучения прокаливаемости рельсовых сталей исследуемых хи-

мических составов, проведена закалка образцов Джомини, по результатам которой были построены кривые прокаливаемости, характерный вид которых представлен на рисунке 5.

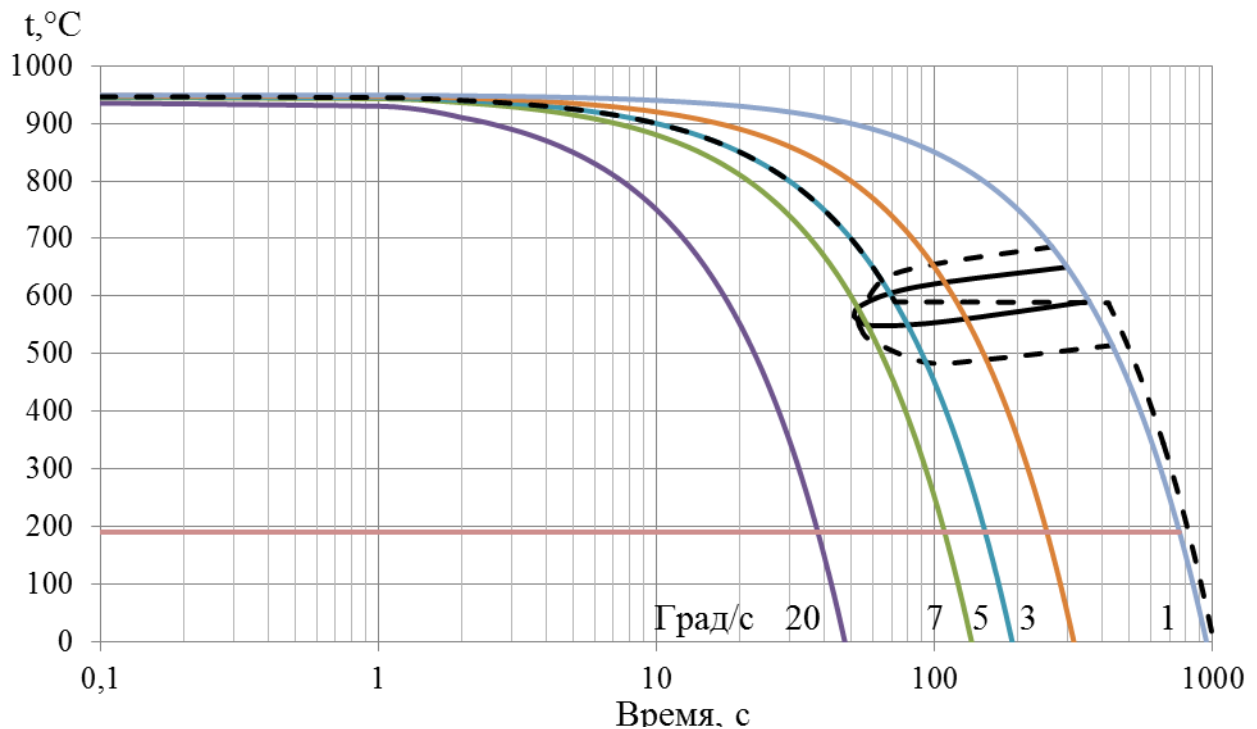


Рисунок 2 – Термокинетическая диаграмма распада аустенита рельсовой стали Э76ХФ плавки № 22376

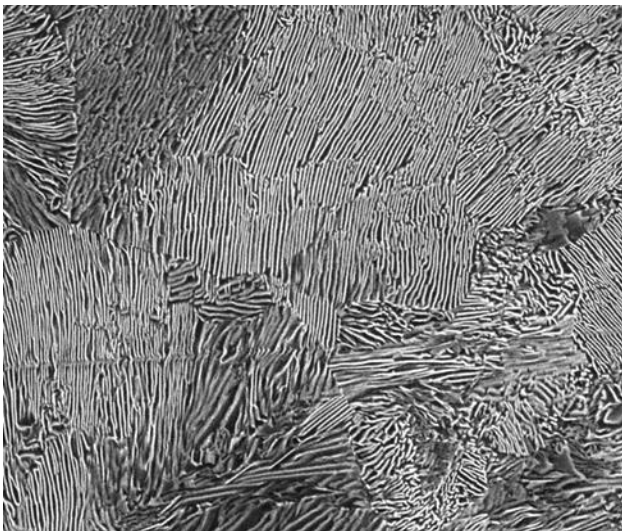
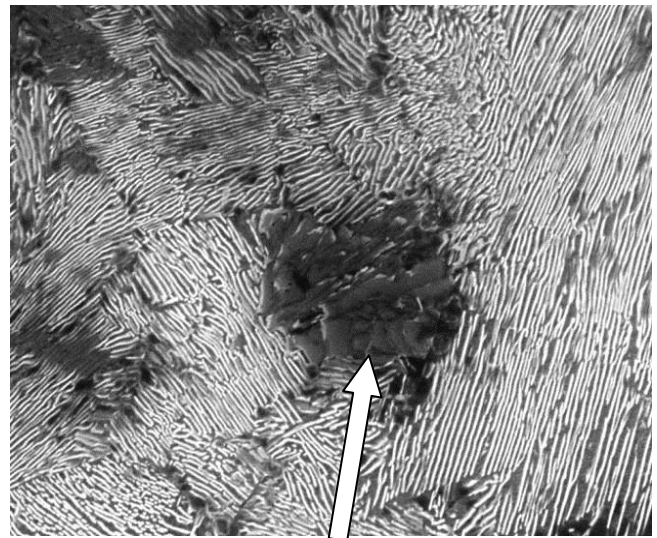


Рисунок – 3 Микроструктура перлита образца 22376, охлажденного со скоростью 3 град/с



бейнит

Рисунок 4 – Бейнит в микроструктуре металла плавки № 28554, охлажденного со скоростью 1 град/с

В процессе закалки проводили измерение температуры в двух - трех точках по длине, с двух сторон образца. Обработка данных, полученных с помощью системы измерений температуры, позволила определить скорость охлаждения металла в участках закрепления термопар. По результатам экспериментов определяли сред-

ную скорость в начальный период охлаждения – от температуры начала охлаждения до температуры начала превращения.

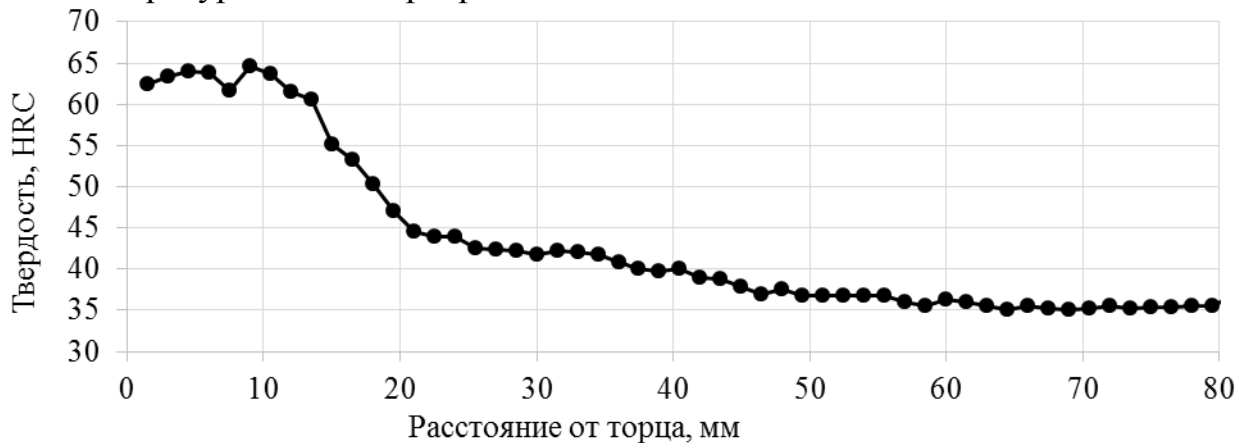


Рисунок 5 – Изменение твердости по длине образца из стали плавки № 22376

Результаты металлографического исследования и измерения твердости образцов Джомини из стали рельсов различных химических составов подтвердили вывод о наиболее однородной перлитной структуре рельсов пл. 22376 при скоростях охлаждения до 3,5 град/с.

В **третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований влияния параметров термической обработки на скорость охлаждения по сечению головки рельса, а также параметров термической обработки в зависимости от химического состава вида нагрева перед термообработкой на свойства рельсов. Исследования проводили на опытной установке (рисунок 6) конструкция которой имеет высокую степень соответствия промышленно применяемому оборудованию.

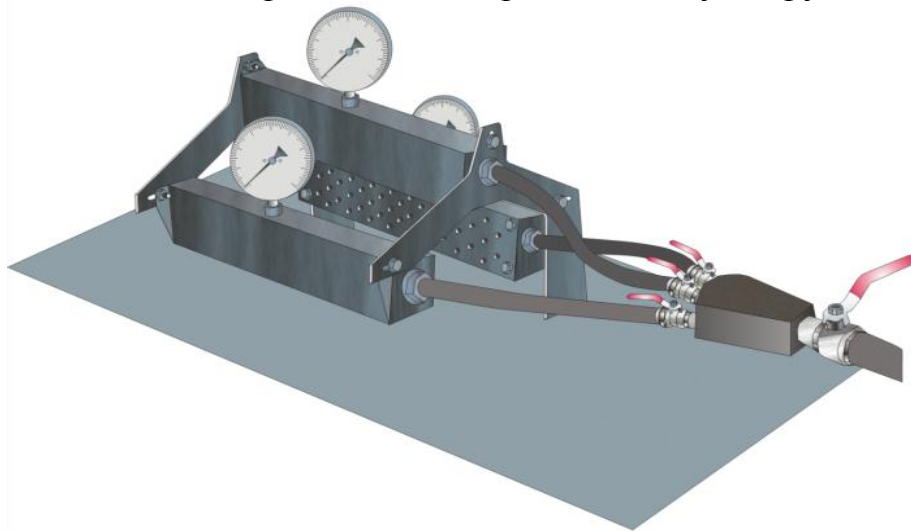


Рисунок 6 – Общий вид опытной установки для дифференцированной закалки рельсовых проб

Поскольку при проведении приемосдаточных испытаний, большинство свойств, характеризующих качество металла определяют на глубине 10 мм, а качество закалки, на глубине 22 мм, то исследование скорости охлаждения в зависимости от давления воздуха проводили путем зачеканивания термопар на расстоянии 10 мм и 22 мм от поверхности катания головки (ПКГ) рельсовых проб.

На основании обработки полученных экспериментальных данных получены уравнения регрессии, позволяющие определять скорости охлаждения стали $V_{\text{охл}10}$ и $V_{\text{охл}22}$, мм на глубине 10 и 22 мм от ПКГ соответственно в зависимости от давления охлаждающей среды (воздуха) $P_{\text{ос}}$, кПа:

- на глубине 10 мм:

$$V_{\text{охл}10} = 1,4279 + 0,0324 P_{\text{ос}} + 8 \cdot 10^{-4} P_{\text{ос}}^2, \quad (1)$$

- на глубине 22 мм:

$$V_{\text{охл}22} = 0,7264 + 0,0343 P_{\text{ос}} + 3 \cdot 10^{-4} P_{\text{ос}}^2 \quad (2)$$

На рисунке 7 показано изменение скорости охлаждения металла головки рельсов на глубине 10 и 22 мм от поверхности катания в интервале перлитного превращения $700 - 600^\circ\text{C}$ в зависимости от давления воздуха.

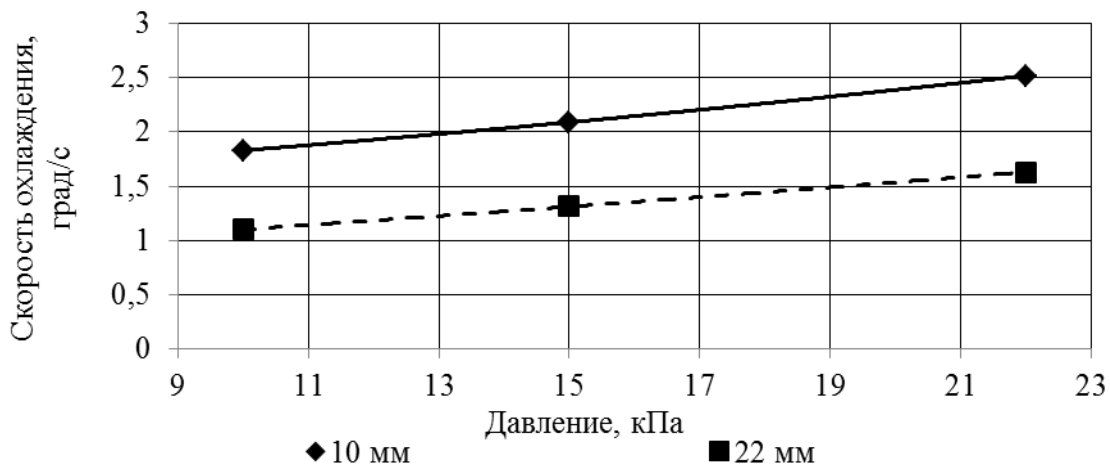


Рисунок 7 – Зависимость скорости охлаждения стали на глубине 10 мм и 22 мм от ПКГ от давления воздуха

Эксперименты по термической обработке на экспериментальной установке проводили в два этапа. На первом этапе исследовали влияние параметров охлаждения после отдельного печного нагрева рельсовых проб длиной 400 мм на структуру и свойства металла. На втором этапе исследовали пробы, отобранные от рельсов непосредственно после прокатки и термообработанные с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева.

При проведении опытов с повторного нагрева использовали рельсовую сталь марки Э76ХФ с различным содержанием ванадия и ниобия (таблица 2).

Таблица 2 – Химический состав металла плавок рельсовых проб, термообработанных с повторного нагрева

№ п/п	Номер плавки	Марка стали	Массовая доля химических элементов, %										
			C	Mn	Si	Cr	P	S	Al	V	Nb	Ni	Cu
1	28551	Э76ХФ	0,79	1,09	0,43	0,57	0,016	0,009	0,003	0,04	0,035	0,07	0,13
2	28552	Э76ХФ	0,79	1,12	0,43	0,58	0,014	0,008	0,003	0,04	0,042	0,10	0,14
3	28553	Э76ХФ	0,79	1,10	0,42	0,59	0,015	0,009	0,003	0,04	0,048	0,10	0,15
4	28554	Э76ХФ	0,75	0,83	0,55	0,42	0,012	0,008	0,003	0,04	0,060	0,08	0,14
Требования ГОСТ Р 51685-2013 для ста- ли марки Э76ХФ			0,72- 0,82	0,75- 1,25	0,20- 0,80	0,20- 0,80	не более			0,03- 0,15	не более		
							0,025	0,025	0,005		0,20	0,20	0,20

Охлаждение рельсового металла при давлении 10 кПа в течение 90 с от температур 815 – 820 °С (пробы № 1 плавки №№ 28551, 28552) не обеспечивает выполнение требований к термоупрочненным рельсам. Уровень механических свойств при растяжении и твердости металла этих проб сопоставим со значениями, получаемыми на нетермоупрочненных рельсах.

Повышение продолжительности термообработки до 150 с, при этом же давлении и повышение температуры начала термообработки до 845 – 860 °С существенно повышает твердость рельсов на поверхности катания, однако прочность их недостаточна (пробы № 2 плавки №№ 28551, 28552, проба № 1 плавка № 28554). Удовлетворительные результаты при закалке по этому режиму получены только на пробе № 1 плавки № 28553.

Повышение давления до 15 и 21 кПа и увеличение продолжительности термообработки свыше 150 с на пробах плавки №№ 28551, 28552, 28553 приводят к существенному увеличению твердости на поверхности катания – свыше 390 НВ, при этом в микроструктуре рельсовых проб с поверхности на глубину до 2 мм и до 5 мм с поверхности выкружки имеются недопустимые участки бейнитной структуры, характерный вид которой представлен на рисунке 8. В микроструктуре металла всех проб плавки № 28554 бейнит не выявлен.

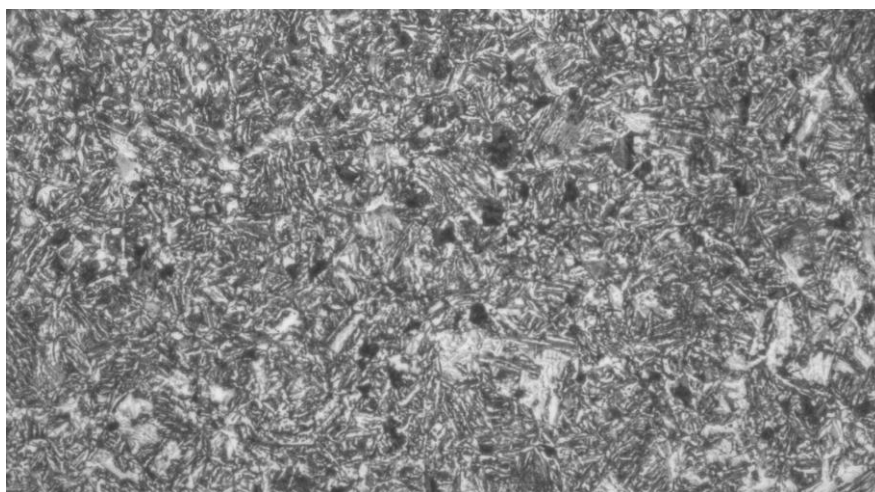


Рисунок 8 – Участки бейнита в микроструктуре опытного металла плавки 28551, $\times 500$

Более низкие значения прочностных свойств проб термообработанных от температур ниже 800 °С обусловлены образованием неоднородного аустенита и проведением неполной закалки.

Таким образом, по соотношению уровня механических свойств, твердости, ударной вязкости и микроструктуре, а также технологичности в широком интервале режимов термообработки оптимальным комплексом свойств обладает металл плавки № 28554, что позволяет рассматривать данный состав в качестве базового при его дальнейшей оптимизации в процессе отработки режимов при закалке с использованием тепла прокатного нагрева.

При проведении экспериментов по термической обработке рельсовых проб с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева был выбран температурный режим соответствующий производственным условиям (рисунок 9), для этого рельсовые пробы отбирали на пилах горячей резки при температурах $\sim 950 - 1000$

°С, подстуживали до температуры начала заковки 750 – 900 °С, и подвергали ускоренному охлаждению в среде сжатого воздуха.

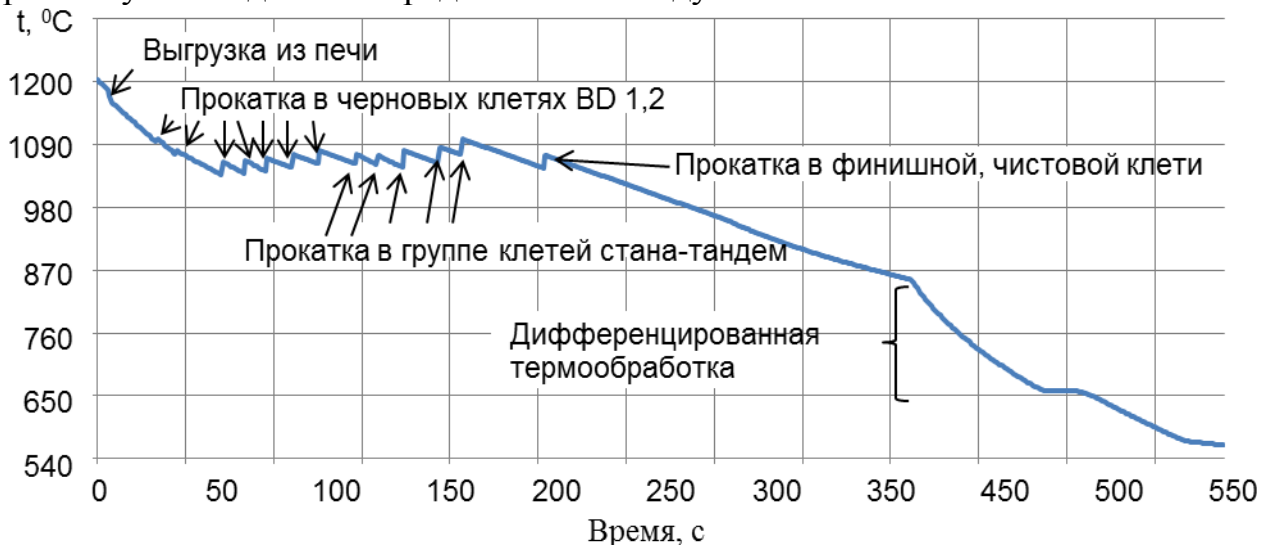


Рисунок 9 – Температурный режим прокатки и термической обработки рельсовых проб

С целью оценки возможности производства рельсов из углеродистой стали дифференцированно термоупрочненных воздухом с прокатного нагрева без дополнительного легирования хромом, была проведена закалка проб, отобранных от рельсов типа Р65 из стали марки Э76Ф текущего производства.

На рисунке 10 представлена динамика изменения свойств с увеличением температуры начала термической обработки при постоянном давлении 20 кПа, из которой видно, что для рельсового металла из стали марки Э76Ф оптимальная температура начала термической обработки находится в области температур 805 – 810 °С. При этом, в целом для данных рельсов характерен достаточно низкий уровень механических свойств.

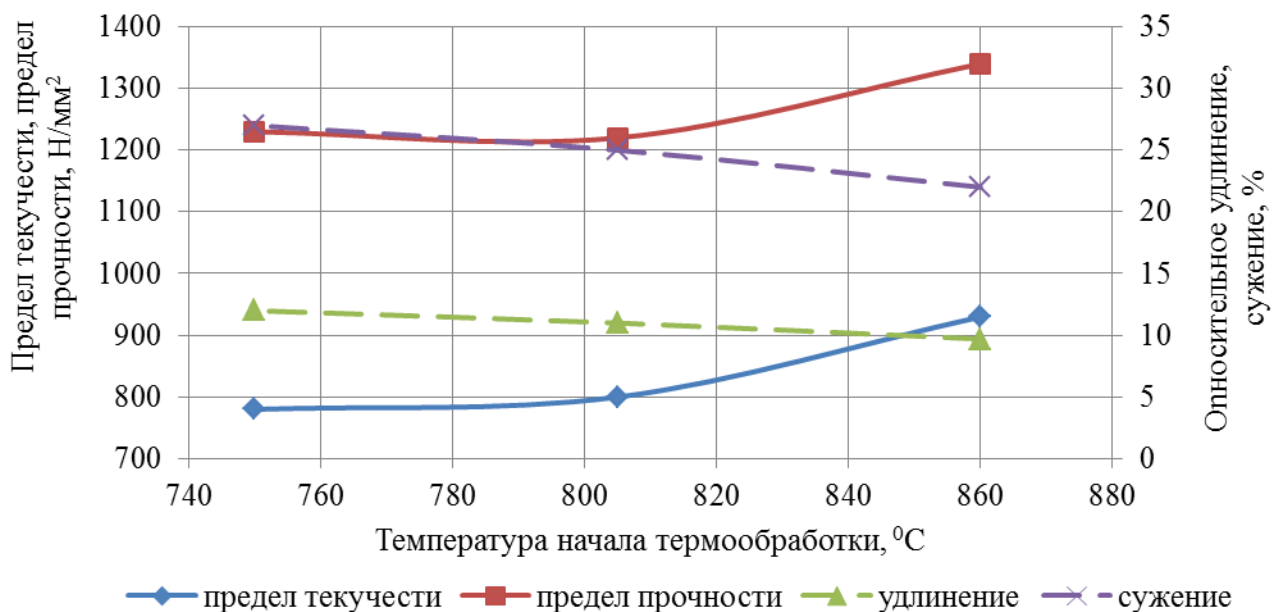


Рисунок 10 – Динамика изменения свойств стали с увеличением температуры начала термической обработки

Повышение давления до 30-50 кПа позволило существенно повысить прочностные свойства и твердость, однако величина относительного сужения оказалась на низком уровне, зачастую не соответствующем требованиям стандарта.

Опытную термообработку с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева рельсов из стали марки Э76ХФ проводили на пробах рельсов трех плавов с различным содержанием кремния и хрома (таблица 3).

Таблица 3 – Химический состав металла плавов рельсовых проб, термообработанных с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева

№ п/п	Номер плавки	Марка стали	Массовая доля химических элементов, %										
			C	Mn	Si	Cr	P	S	Al	V	Nb	Ni	Cu
1	22674	Э76ХФ	0,76	0,87	0,32	0,56	0,017	0,005	0,003	0,07	–	0,07	0,12
2	22677	Э76ХФ	0,77	0,91	0,31	0,42	0,015	0,008	0,003	0,08	–	0,07	0,12
3	22376	Э76ХФ	0,79	0,78	0,55	0,46	0,014	0,015	0,002	0,07	–	0,08	0,14
Требования ГОСТ Р 51685-2013 для стали марки Э76ХФ			0,72-0,82	0,75-1,25	0,20-0,80	0,20-0,80	не более			0,03-0,15	не более		
							0,025	0,025	0,005		0,20	0,20	0,20

Термическая обработка металла пл. 22674 с содержанием хрома на уровне 0,56 % и при пониженном содержании кремния (0,32 %) при давлении от 15 до 22 кПа в течение 105 – 125 с и от температуры 700 – 850 °С показала в целом удовлетворительные значения механических свойств (рисунок 11), за исключением пробы термоупрочненной от температуры 700 °С, поэтому для стали данного химического состава минимально возможной температурой закалки следует считать температуру 750 °С.

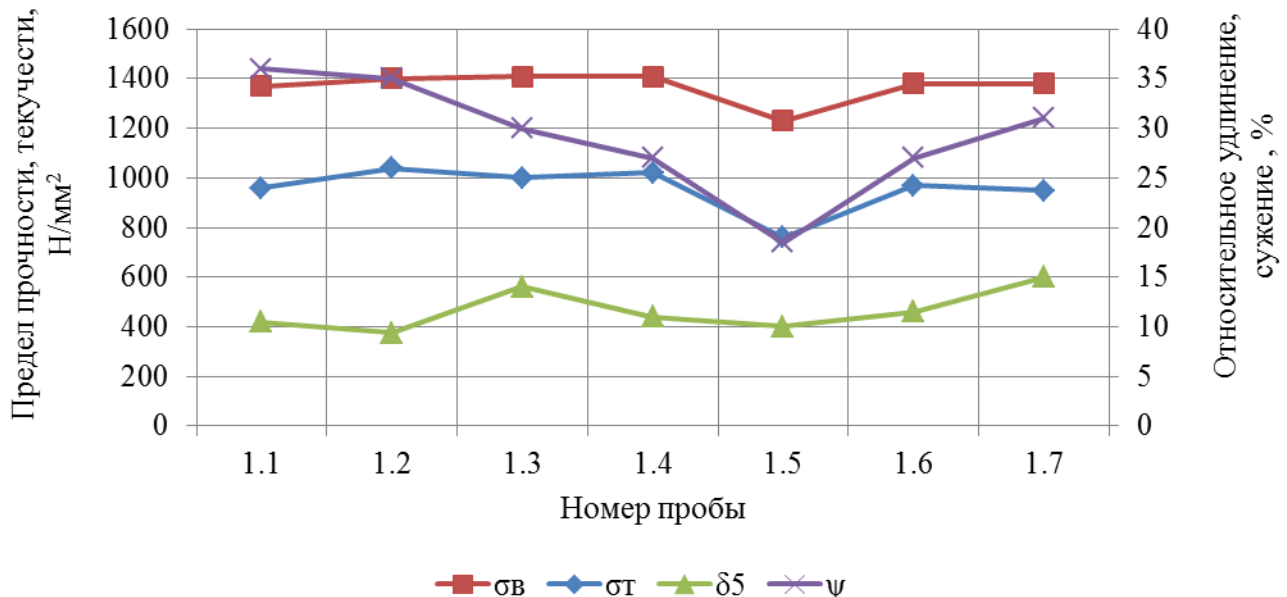


Рисунок 11 – Механические свойства проб от рельсов пл. 22674

Микроструктура металла опытных плавов содержит участки бейнита (рисунок 12), что не удовлетворяет требованиям стандарта.

Наиболее стабильная перлитная структура (рисунок 13), не содержащая участков бейнита при термообработке с давлением до 30 кПа была получена на образцах рельсов пл. 22376.

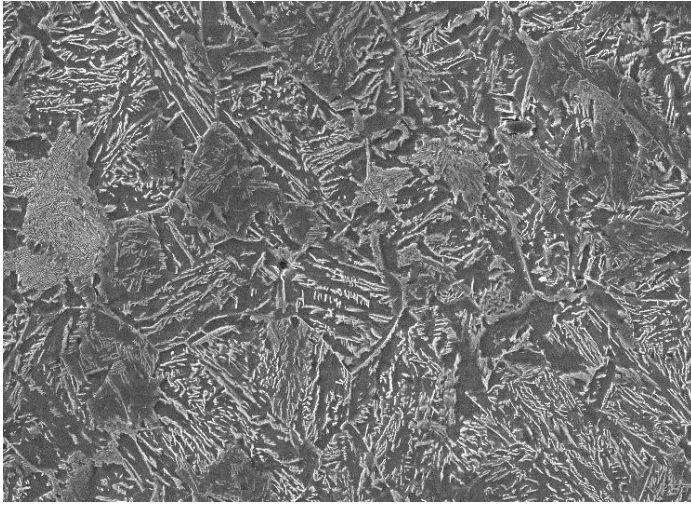


Рисунок 12 – Участки бейнита в микроструктуре металла пл. 22674, увеличение $\times 4590$

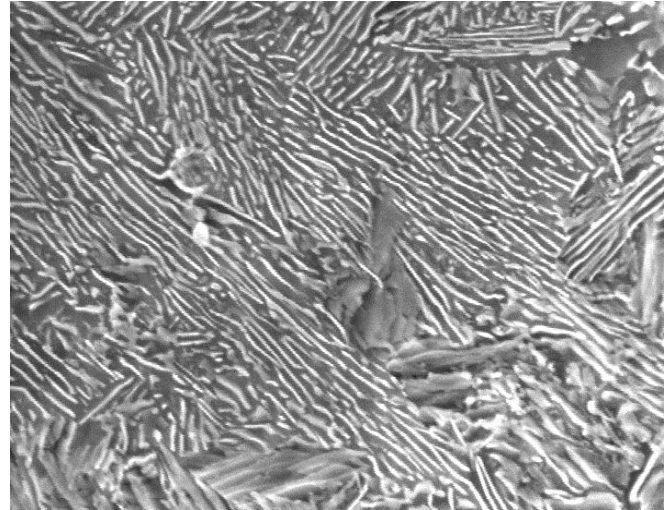


Рисунок 13 – Микроструктура металла пл. 22376, увеличение $\times 32100$

Анализ свойств металла рельсовых проб плавки 22376 (рисунок 14) показал, что удовлетворительные значения могут быть достигнуты при всех рассматриваемых диапазонах давлений, однако при минимальном давлении (10 кПа) температура начала заковки должна составлять не менее 800°C .

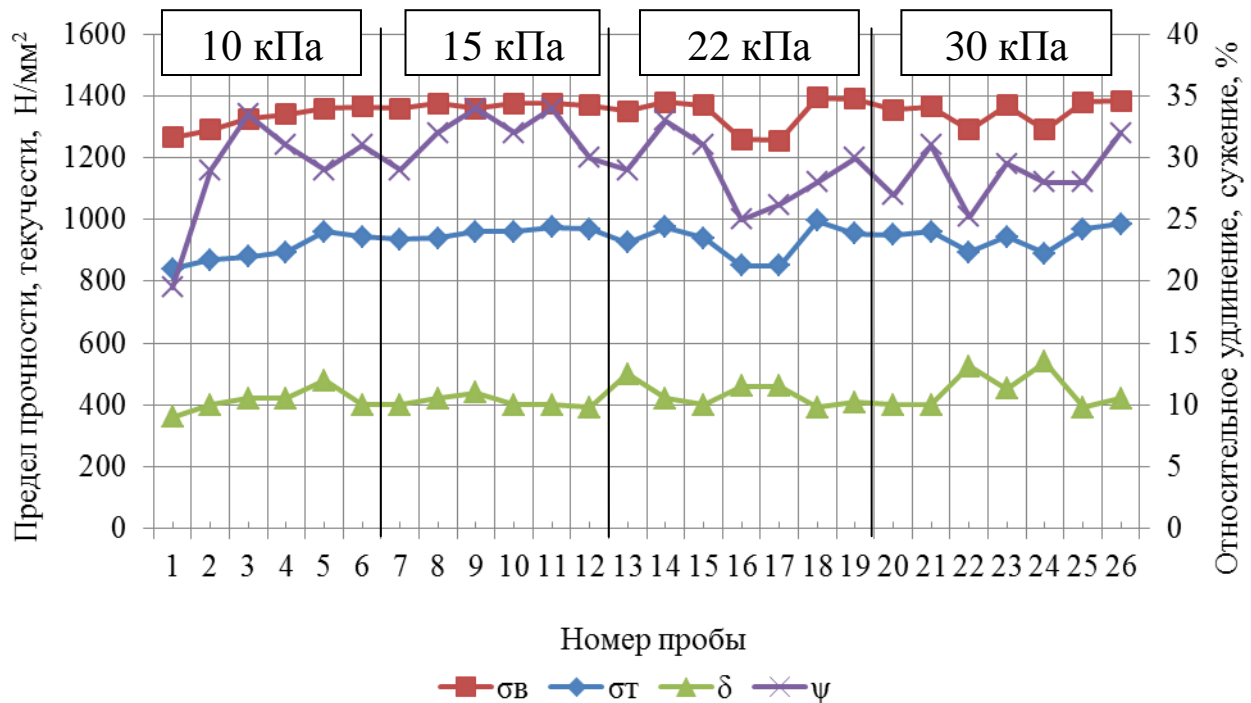


Рисунок 14 – Механические свойства проб от рельсов пл. 22376

Таким образом, на основании проведенных исследований, для промышленного освоения рекомендуется сталь, с содержанием хрома 0,38-0,43 %, кремния 0,54-0,60 %, марганца 0,80-0,90 %, ванадия 0,03-0,04 %.

При промышленном освоении рекомендуется термообработку проводить при температурах свыше 800 °С, давление воздуха обеспечить 10-15 кПа, продолжительность охлаждения 90-110 с.

В четвертой главе представлены результаты промышленного освоения технологии дифференцированной термообработки воздухом железнодорожных рельсов длиной 100 м с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева в условиях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» на основании разработанных в ходе выполнения диссертационной работы рекомендаций по оптимизации химического состава и режимам термической обработке. Согласно разработанным в данной диссертации рекомендациям впервые в России была изготовлена и поставлена на экспериментальное кольцо АО «ВНИИЖТ» партия дифференцированно термоупрочненных рельсов категории ДТ350 стали марки Э76ХФ. Химический состав металла двух плавок по результатам ковшевого и проверочного анализа представлен в таблице 4, из которой следует, что по содержанию химических элементов металл сертификационной партии соответствует требованиям ГОСТ Р 51685-2013 для стали марки Э76ХФ и отвечает рекомендованному составу.

Дифференцированную термообработку рельсовых раскатов проводили в соответствии с разработанными рекомендациями по режиму: температура начала термообработки 850 °С; давление воздуха 10 – 11 кПа; продолжительность охлаждения 110 с. Значения механических свойств и твердости рельсов сертификационной партии определенных по длине раската представлены в таблицах 5 и 6 соответственно.

Таблица 4 – Химический состав рельсов сертификационной партии

Номер плавки	Массовая доля химических элементов											
	%											ppm
	C	Mn	Si	Cr	P	S	Ni	Cu	Al	V	Ti	H
26891	0,73	0,76	0,60	0,42	0,010	0,008	0,07	0,13	0,003	0,04	0,002	1,8
26892	0,72	0,76	0,59	0,43	0,012	0,006	0,07	0,14	0,004	0,04	0,003	1,6
Рекомендации по результатам исследований	0,72-0,78	0,75-0,85	0,54-0,60	0,38-0,43	–	–	–	–	–	–	–	–
Требования ГОСТ Р 51685-2013 для стали марки Э76ХФ категории ДТ350	0,71-0,82	0,75-1,25	0,25-0,60	0,20-0,80	не более 0,020	0,020	Ni, Cu ≤ 0,20 Σ (Ni + Cu) ≤ 0,27%		Не более 0,004	0,03-0,15	Не более 0,010	Не более 2,0

Таблица 5 – Механические свойства и ударная вязкость рельсов сертификационной партии

Номер плавки	Механические свойства при растяжении				Ударная вязкость при +20 °С	
	σ _т	σ _в	δ ₅	ψ	KCU	
	МПа		%		Дж/см ²	
26891	840-870	1250-1280	12,5-13	37-40	25-31	26-29
26892	810-820	1240	12,5-13	37-38	27-35	18-30
Требования ГОСТ Р 51685-2013 для рельсов категории ДТ 350	не менее					
	800	1240	9	25	15	

Таблица 6 – Механические свойства и ударная вязкость рельсов сертификационной партии

Номер плавки	Твердость, НВ							
	ГОЛОВКИ					шейки	ПОДОШВЫ	
	на по- верхно- сти ка- тания	на глубине					1	2
		10 мм по оси	22 мм по оси	10 мм от выкружек				
				1	2			
26891	375-378	375-385	354-370	368-375	368-378	335-341	339-345	333-345
26892	370-375	370-383	347-359	366-375	363-375	321-341	331-345	329-350
Требования ГОСТ Р 51685-2013 для рельсов категории ДТ 350	Не менее					Не более		
	363-401	341	341				363	

Из представленных данных видно, что рельсы отвечают всем требованиям ГОСТ Р 51685-2013 для рельсов категории качества ДТ350. Микроструктура рельсов удовлетворительная и представляет собой пластинчатый перлит с разрозненными участками феррита по границам зёрен (рисунок 15, 16).

Таким образом, изготовленная в соответствии с результатами проведенных исследований, первая в России партия дифференцированно термоупрочненных рельсов показала удовлетворительное качество по результатам приемосдаточных, а впоследствии стендовых и полигонных испытаний (таблица 7). В настоящее время в АО «ЕВРАЗ ЗСМК» произведена повторная сертификация рельсов категории ДТ350 с присвоением литеры О.

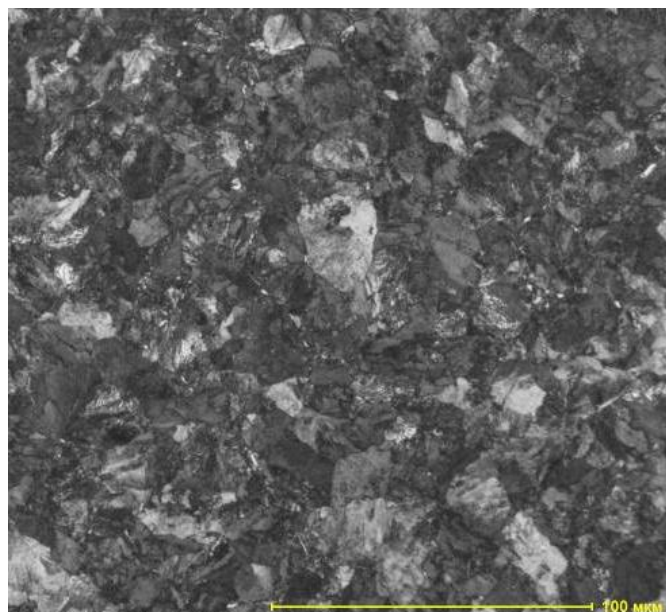


Рисунок 15 – Микроструктура металла рельса плавки № 26891 на расстоянии 2 мм от поверхности, $\times 500$

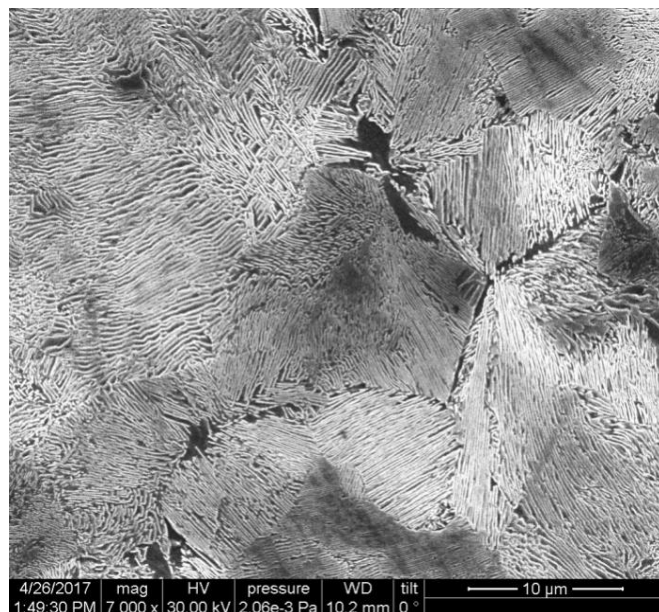


Рисунок 16 – Микроструктура рельсовой стали, тонкопластинчатый перлит $\times 7000$

Таблица 7 – Результаты стендовых и полигонных испытания рельсов сертификационной партии

Материал	Предел выносливости R , МПа	Трещиностойкость		Скорость роста усталостной трещины		Остаточные напряжения подошве, Н/мм ²	Пропущенный тоннаж, млн. т. брутто (на 01.09.2017 г.)
		Циклическая	Статическая	$\Delta K=10$, МПа·м ^{1/2}	$\Delta K=13,5$, МПа·м ^{1/2}		
		K_{fc} , МПа·м ^{1/2}	K_{IC} , МПа·м ^{1/2}				
Пл. 26891	453,9	38; 37; 36; 45; 37; 44	35,5; 34,4; 36,1	12,2	27,9	185,5	1035,30
Требования ТУ 0921-276-011324323-2012 и ГОСТ Р 51685-2013	Не менее			Не более			–
	370	32	32	17	55	250	

На основе проведенных исследований в течение 2013, 2014 гг. выполнена корректировка химического состава рельсовой стали, технологии дифференцированной термической обработки, что позволило освоить производство и сертифицировать впервые в России рельсы специального назначения – категорий ДТ370ИК и ДТ350НН.

Рельсы ДТ350НН, термоупрочненные с прокатного нагрева, выдерживающие норму ударной вязкости при температуре –60 °С, предназначены для эксплуатации в условиях холодного и крайне холодного климата и не имеют мировых аналогов. По результатам проведенных работ получено два патента: RU № 2601847 «Способ изготовления рельсов низкотемпературной надежности» и RU № 2487178 «Способ термической обработки рельсов».

Внедрение новой ресурсосберегающей технологии дифференцированной термической обработки с применением экологически чистой среды – воздуха, с использованием тепла прокатного нагрева позволило отказаться от устаревшей технологии объемной закалки рельсов в пожароопасной и канцерогенной среде индустриального масла после отдельного печного нагрева. Внедрение результатов работы в технологический процесс производства рельсов на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» позволило получить экономический эффект свыше 118 млн. руб. /год при долевом участии автора 30 %. В приложениях приведены: Акт использования результатов диссертационной работы на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и Расчет экономического эффекта от использования результатов диссертационной работы.

Заключение

1. Проведено исследование кинетики распада аустенита и прокаливаемости рельсовых сталей различного химического состава с содержанием основных легирующих и микролегирующих элементов в пределах: 0,75 – 0,79 % С, 0,78 – 1,09 % Мп, 0,32 – 0,55 % Si, 0,42 – 0,57 % Cr, 0,04 – 0,07 V и 0,000 – 0,060 % Nb. На основании результатов дилатометрических измерений, металлографического анализа структуры и результатов измерения твердости построены термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. Установлено влияние деформации на

расширение области распада переохлажденного аустенита рельсовой стали. Показано, что увеличение степени микролегирования ниобием и ванадием увеличивает устойчивость переохлажденного аустенита. Мартенситное превращение для рельсовой стали марки Э76ХФ находится в интервале температур 195 – 225 °С, однако комплексное микролегирование Nb и V, снижает температуру начала мартенситного превращения на 10 – 15 °С.

2. Установлено, что наиболее стабильная перлитная структура в диапазоне скоростей охлаждения до 3 град/с обеспечивается в рельсовой стали близкой к эвтектоидному составу, легированной хромом до 0,40 – 0,45 %, кремнием 0,54 – 0,58 %, марганцем 0,75 – 0,80 % и микролегированной ванадием 0,04 – 0,07 %.

3. На основе результатов экспериментальных исследований, физического моделирования и статистической обработки данных получены соотношения, позволяющие определить скорости охлаждения рельсовой стали на глубине 10 и 22 мм от поверхности катания в области головки рельсового профиля в зависимости от давления воздуха. Установлено, что при охлаждении головки рельсов воздухом при давлении 15 – 22 кПа скорость охлаждения стали в интервале температур перлитного превращения на глубине 10 и 22 мм от поверхности катания изменяется в пределах 1,83 – 2,52 и 1,1 – 1,6 град/с соответственно.

4. Установлено, что при термической обработке с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева оптимальный комплекс свойств для рельсов типа Р65 категории ДТ350 соответствующий требованиям ГОСТ Р 51685-2013 из стали марки Э76ХФ достигается при ускоренном охлаждении в течение не менее 110 с от температур свыше 825 °С при давлении воздуха 15 – 22 кПа; увеличение содержания элементов повышающих устойчивость аустенита (хрома, марганца свыше 0,45 и 0,83 % соответственно) нецелесообразно, так как приводит к появлению в микроструктуре нежелательных бейнитной и мартенситной структур и достижению уровня твердости на поверхности катания и по сечению выше допустимых стандартом значений; при охлаждении рельсов типа Р65 из стали марки Э76Ф от температуры 845 °С, давлении воздуха 40 кПа и выше, в течение 90 – 105 с рельсовая сталь удовлетворяет требованиям ТУ 0921-276-01124323-2012 для рельсов категории ДТ350 по уровню механических свойств (за исключением относительного сужения), ударной вязкости, твердости по сечению головки и на поверхности катания, а также микроструктуре. Рациональная температура начала термической обработки составляет 800 – 860 °С. С увеличением давления воздуха свыше 30 кПа происходит резкое увеличение прочностных свойств и твердости при сохранении пластичности.

5. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований, скорректирован химический состав стали, предназначенной для производства дифференцированно термоупрочненных рельсов, определены основные параметры режима воздушоструйной дифференцированной термической обработки с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева, обеспечивающие получение оптимального комплекса свойств рельсов: температура начала термообработки 800 – 850 °С; давление воздуха 10 – 15 кПа; продолжительность охлаждения 110 – 130 с. Разработанные режимы термической обработки внедрены в технологию производства дифференцированно термоупрочненных рельсов общего назначения категории

ДТ350 и рельсов специального назначения – категорий ДТ370ИК и ДТ350НН. Нарботка первой в России партии дифференцированно термоупрочненных рельсов на Экспериментальном кольце превысила 1,1 млрд. т пропущенного груза, с показателем γ - ресурса 96,6 %. Технология дифференцированной термической обработки с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева позволила отказаться от закалочной среды в виде индустриального масла, дополнительного нагрева под термообработку и связанных с этим затрат на природный газ, что существенно снизило экологическую нагрузку и позволило получить экономический эффект свыше 118 млн. руб. /год при долевом участии автора 30 %.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в изданиях, входящих в Web of Science или Scopus:

1. **Полевой, Е. В.** Разработка и промышленное освоение технологии дифференцированной термической обработки железнодорожных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева / Е.В. Полевой, Г.Н. Юнин, М.В. Темлянцева // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия – 2016.– Т.59 – №10. – С. 704-714.

Polevoj E.V. Differential heat treatment of rails by means of rolling heat / **E.V. Polevoj**, G.N. Yunin, M.V. Temlyantseva // Steel in translation. – 2016. – Т.46. – №10. – P. 692-700.

2. Дементьев, В. П. Результаты эксплуатации рельсов импортного производства на восточно-сибирской железной дороге / В.П. Дементьев, С.В. Фейлер, Д.В. Бойков, Н.А. Козырев, **Е.В. Полевой** // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия – 2016.– Т.59 – №6. – С. 402-408.

Dement'ev, V.P. Operation of imported rail on the east siberian railroad / V.P. Dement'ev, S.V. Feiler, N.A. Kozyrev, D.V. Boikov, E.V. Polevoi // Steel in translation. – 2016. – Т.46. – №6. – P.395-400.

3. **Полевой, Е. В.** Разработка технологии дифференцированной термической обработки рельсов / **Е.В. Полевой**, К.В. Волков, Е.П. Кузнецов, Е.Н. Чудов, А.М. Юнусов // Сталь. – 2014. – №7. – С. 89-90.

Polevoi, E.V. Differential heat treatment of rails / **E.V. Polevoj**, K.V. Volkov, E.P. Kuznetsov, E.N. Chudov, A.M. Yunusov // Steel in translation. – 2014. – Т.44. – №7.– P. 550-552.

4. Корнева, Л. В. Сравнительный анализ показателей качества рельсов ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат» и зарубежных производителей / Л.В. Корнева, Г.Н. Юнин, Н.А. Козырев, О.П. Атконова, **Е.В. Полевой** // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия – 2010. – №12. – С.38-42.

Korneva, L. V. Quality comparison of OAO NKMK and imported rails / L.V. Korneva, G.N. Yunin, N.A. Kozyrev, O.P. Atkonova, **E.V. Polevoj** // Steel in translation. – 2010. – Т.40. – №12. – P. 1047-1050.

Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ:

5. **Полевой Е. В.** Резервы технологии рельсового производства / **Е.В. Полевой**, Г.Н. Юнин, А.В. Головатенко // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – №3. – С. 7-9.

6. Симачёв, А. С. Исследование высокотемпературной пластичности различных зон кристаллизации рельсовой электростали марки Э90ХАФ / А.С. Симачёв, М.В. Темлянцев, Т.Н. Осколкова, **Е.В. Полевой**, А.В. Головатенко // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – №5. – С.45-48.

7. **Полевой, Е. В.** Определение скорости охлаждения по сечению головки железнодорожных рельсов при термической обработке воздухом / **Е.В. Полевой**, М.В. Темлянцев, А.Ю. Сюсюкин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т.59. – №8. – С. 543-546.

8. Юрьев, А. Б. Разработка и внедрение первой в России технологии производства дифференцированно-термоупрочненных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева / А.Б. Юрьев, Г. Н.Юнин, А.В. Головатенко, В.В. Дорофеев, **Е.В. Полевой** // Сталь. – 2016. – №11. – С.33-35.

9. **Полевой Е. В.** Влияние скорости охлаждения на формирование структуры рельсовой стали, микролегированной ванадием и ниобием / **Е.В. Полевой**, А.Б. Добужская, М.В. Темлянцев // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т.18. – №4. – С.7-20.

10. Громов В. Е. Дифференцированная закалка рельсов: структура, фазовый состав и дефектная субструктура поверхностного слоя / В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, А.М. Глезер, К.В. Морозов, К.В. Волков, **Е.В. Полевой** // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – №5. – С.42-46.

11. Иванов, Ю.Ф. Формирование внутренних полей напряжений в рельсах / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, А.М. Глезер, А.Б. Юрьев, К.В. Волков, К.В. Морозов, **Е.В. Полевой**, К.В. Алсараева // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2014. – №1. – С.79-84.

12. **Полевой, Е. В.** Совершенствование технологии производства рельсов на ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» / **Е.В. Полевой**, К.В. Волков, А.В. Головатенко, О.П. Атконова, А.М. Юнусов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2013. – №4. – С. 26-28.

Научные статьи, опубликованные в периодических изданиях и труды научно-практических конференций:

13. **Полевой, Е. В.** Разработка технологии производства дифференцированно термоупрочненных рельсов на ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» / Е.В. Полевой, К.В. Волков, Е.П. Кузнецов, **А.В. Головатенко**, О.П. Атконова, А.М. Юнусов // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: Сборник научных докладов – Екатеринбург: ОАО «УИМ». – 2014. – С.93-100.

14. **Polevoy, E. V.** Rational chemical composition and heat treatment models of rails made from E76HF steel using the heat of rolling heating / **E.V. Polevoy**, М.В. Temlyantsev // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 19, Technologies, Innovation, Quality. Сер. "XIX International Scientific Conference on Metallurgy: Technologies, Innovation, Quality, Metallurgy 2015". – 2016. – P. 012030.

15. **Полевой, Е. В.** Внедрение экологически чистой среды для закалки железнодорожных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева / **Е.В. Полевой** // В

сборнике: Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве сборник докладов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2016) с международным участием. – 2016. – С.86-91.

16. **Полевой, Е. В.** Сравнительный анализ микроструктуры и свойств дифференцированно и объемнотермоупрочненных рельсов // **Е.В. Полевой**, А.Б. Добужская, М.В. Темлянцев // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2016. – №2(16). – С.18-22.

17. **Полевой, Е. В.** Анализ качественных показателей рельсов производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» по результатам приемосдаточного контроля / **Е.В. Полевой**, Г.Н. Юнин, Е.П. Кузнецов // Статья в сборнике: Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: Сборник научных докладов. – Екатеринбург: ОАО «УИМ». – 2016. – С.24-38.

18. **Полевой, Е. В.** Совершенствование химического состава и режимов термической обработки рельсов с использованием тепла прокатного нагрева / **Е.В. Полевой**, М.В. Темлянцев // В сборнике: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией М.В. Темлянцева. – 2015. – С.68-74.

19. **Полевой, Е. В.** Опыт воздушоструйной термической обработки головки железнодорожных рельсов стали марки Э76Ф с использованием тепла прокатного нагрева // **Е.В. Полевой**, М.В. Темлянцев, А.М. Юнусов, О.П. Атконова // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2015. – №1(11). – С.5-10.

20. **Полевой, Е. В.** Текущее состояние и перспективные направления развития технологии термической обработки железнодорожных рельсов в условиях ЕВРАЗ ЗСМК / **Е.В. Полевой**, В.В. Могильный, Г.Н. Юнин, К.В. Волков, Е.П. Кузнецов // Статья в сборнике: Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: Сборник научных докладов. – Санкт-Петербург: ОАО «УИМ». – 2015. – С. 47-55.

21. Волков, К. В. Моделирование воздушоструйной закалки с печного нагрева железнодорожных рельсов / К.В. Волков, **Е.В. Полевой**, М.В. Темлянцев, О.П. Атконова, А.М. Юнусов, А.Ю. Сюсюкин // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2014. – №3(9). – С.17-23.

22. Громов, В. Е. Формирование структуры, фазового состава и дефектной субструктуры в дифференцированно закаленных рельсах / В.Е. Громов, К.В. Волков, К.В. Морозов, Ю.Ф. Иванов, К.В. Алсараева, **Е.В. Полевой** // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2014. – №4(10). – С.4-7.

Подписано в печать «28» апреля 2018 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,2 Тираж 100 экз. Заказ №

Сибирский государственный индустриальный университет

654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,

Издательский центр СибГИУ