

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Сибирский государственный индустриальный университет»



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

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

Доктор технических наук, профессор

Темлянцев Михаил Викторович

**Новокузнецк - 2018**

## Оглавление

Введение.....	4
1 Современное состояние производства и термической обработки рельсов и постановка задач исследования.....	10
1.1 Требования к качеству современных железнодорожных рельсов.....	10
1.2 Стали для производства рельсов.....	17
1.2.1 Классы сталей, применяемые для производства рельсов.....	17
1.2.2 Химический состав рельсовой стали перлитного класса.....	20
1.3 Технологии термической обработки рельсов.....	24
1.3.1 Влияние термической обработки на качество рельсов.....	24
1.3.2 Способы нагрева рельсов под термообработку.....	26
1.3.3 Дифференцированная термическая обработка рельсов в рас- творях полимеров.....	28
1.3.4 Дифференцированная термическая обработка рельсов в воздушной и водо-воздушной средах.....	29
1.4 Выводы и постановка задач исследования.....	31
2 Исследование влияния химического состава на кинетику распада аусте- нита и прокаливаемость рельсовой стали.....	33
2.1 Выбор химического состава сталей для исследований.....	33
2.2 Методика проведения экспериментальных исследований.....	34
2.3 Анализ результатов дилатометрических исследований.....	38
2.4 Анализ результатов исследования прокаливаемости и температур- но-временных условий охлаждения рельсовой стали.....	51
2.5 Выводы по главе.....	60
3 Моделирование процессов воздушоструйной термической обработки рельсов с использованием тепла печного нагрева и остаточного тепла предпрокатного нагрева .....	62
3.1 Методика экспериментальных исследований и применяемое обо- рудование.....	62

3.2	Исследование влияния давления воздуха на скорость охлаждения стали в различных участках по сечению головки рельсового профиля .....	66
3.3	Исследование влияния режимов воздушоструйной термической обработки с использованием тепла повторного (печного) нагрева на структуру и свойства рельсов .....	70
3.4	Исследование влияния режимов воздушоструйной термической обработки с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева на структуру и свойства рельсов .....	79
3.4.1	Исследование влияния режимов термообработки на свойства рельсов из стали марки Э76Ф.....	79
3.4.2	Исследование влияния режимов термообработки на свойства рельсов из низколегированной стали с хромом, кремнием и ванадием.....	84
3.5	Выводы по главе.....	93
4	Промышленное освоение воздушоструйной дифференцированной термической обработки рельсов длиной до 100 м с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева .....	96
4.1	Освоение промышленной технологии воздушоструйной дифференцированной термической обработки длинномерных рельсов.....	96
4.2	Освоение производства рельсов категории ДТ350 .....	99
4.3	Выводы по главе .....	106
	Заключение.....	107
	Список литературных источников.....	110
	Приложение А. Акт использования результатов диссертационной работы.....	130
	Приложение Б. Расчёт экономического эффекта от использования результатов диссертационной работы.....	131

## ВВЕДЕНИЕ

### 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&SumimotoMetallcorp.), 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 тепла прокатного 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. Скорректировано содержание химических элементов в экономнолегированной рельсовой стали, предназначенной 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 категорий ДТ350НН и ДТ370ИК.

### **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 об-

работки (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 dilatометре 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 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 процессов 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 «Инновацион-



ные 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**

По материалам диссертации опубликовано 22 печатных работы, в том числе 8 - в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК для опубликования результатов кандидатских диссертаций, 4 – в индексируемых научных журналах, индексируемых в базах 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.

# **1 Современное состояние производства и термической обработки рельсов и постановка задач исследования**

## **1.1 Требования к качеству современных железнодорожных рельсов**

В настоящее время, по данным [1] на долю железных дорог приходится до 85 % грузооборота и более 50 % пассажирских перевозок. Исходя из конъюнктуры железнодорожных перевозок в мировой практике по данным публикаций [2, 3] выделяют два направления развития отрасли - скоростное пассажирское и тяжеловесное грузовое движение, каждое из которых имеет специфические условия эксплуатации, определяющие, в свою очередь, текущие и перспективные требования к железнодорожным рельсам.

Дороги для грузового, тяжеловесного движения активно проектируют, строят и эксплуатируют по всему миру, примеры реализации подобных проектов можно встретить в Китае, Индии, Австралии, Германии, Швеции, Норвегии, Бразилии, Северной Америке и пр. [2, 4]. Для таких дорог характерны высокие осевые нагрузки, достигающие значений 30 – 40 т/ось [2, 5], масса поезда может составлять более 99 тыс. т [4]. Для работы в условиях тяжеловесного движения требуются рельсы, обладающие высокой прочностью, твердостью и износостойкостью. Следует отметить, что аналогичными характеристиками должны обладать и рельсы уложенные в кривых малого радиуса (протяженность таких участков в России порядка 17 тыс. км или 13 % развернутой длины сети железных дорог [6]), работающие в условиях высокоинтенсивного износа [6, 7].

Традиционно для повышения конструктивной прочности рельсов с ростом осевых нагрузок увеличивали погонную массу рельса [8, 9, 10]. В настоящий момент наибольшее распространение в мире получили рельсы Виньоля массой порядка 50 – 70 кг/м погонный, такие как, например рельсы профиля 60E1 (массой 60,21 кг/м [11]) и отечественные рельсы типа Р65 (массой 64,8 кг/м погонный [12]). Близкие значения имеет и наиболее тяжелый американский профиль 141RE [13] весом 69,79 кг/м. Следует отметить, что проблема создания оптимального

профиля рельсов до настоящего времени не решена, расчёты по оптимизации профиля рельсов для различных условий эксплуатации приведены в работах А.Ю. Абдурашитова (ОАО «ВНИИЖТ» [14 – 16]), Г.А. Галицына (ОАО «УИМ»), В.А. Рейхарта (ОАО «ВНИИЖТ») [17].

Как известно, износостойкость рельсов увеличивается с повышением содержания углерода в стали [18 – 20] поэтому для работы в условиях высокоинтенсивного износа в России и за рубежом были разработаны термоупрочненные рельсы из заэвтектоидных марок сталей [21, 22] с содержанием углерода до 0,9 – 1,0 %, обладающие твёрдостью 370 – 400 НВ и более, временным сопротивлением разрыву свыше 1300 Н/мм<sup>2</sup>. Испытания отечественных заэвтектоидных рельсов типа Р65К в кривых участках пути на Восточно-Сибирской и Южно-Уральской железных дорогах показали их явное преимущество для данных условий эксплуатации, относительно термоупрочненных рельсов доэвтектоидного и эвтектоидного состава [23 – 25]. Несмотря на высокие показатели прочностных свойств и износостойкости, рельсы из заэвтектоидных сталей, обладают в целом более низкой пластичностью, и кроме того, при повышении содержания углерода существует тенденция к снижению вязкости разрушения, что ограничивает применение таких рельсов только в условиях тяжеловесного движения и кривых участках малого радиуса. Альтернативным способом повышения стойкости рельсов к износу и контактной усталости является применение рельсов из бейнитной стали [9, 26 – 31], обладающих высокими показателями механических свойств, однако производство таких рельсов менее технологично, а стойкость в условиях реальной эксплуатации к настоящему моменту мало изучена, и поэтому вопрос их применения является дискуссионным. Кроме того, для таких рельсов нет единого мнения по устойчивости к износу – в одних источниках [29] приведены данные о большей износостойкости рельсов из бейнитной стали, в других [6], износостойкость бейнитных рельсов оценивается, на более низком уровне относительно рельсов со структурой перлита.

Другое перспективное направление развития железнодорожного сообщения – высокоскоростное движение со скоростями 200 – 400 км/ч, начало которому

было положено в Японии строительством линии Токайдо в 1964 г., на основе которой впоследствии была создана сеть высокоскоростного движения Синкасен [32, 33]. К настоящему моменту высокоскоростное движение получило широкое развитие не только в Японии, но также в Китае, странах Юго-Восточной Азии, в ряде Европейских государств [32, 34 – 38]. В России высокоскоростное движение со скоростями до 250 км/ч реализовано по направлению Москва – Санкт – Петербург, с продолжением маршрута до Хельсинки [39]. В стратегии развития железнодорожного транспорта до 2030 года представлены планы по строительству высокоскоростных железнодорожных магистралей со скоростью до 400 км/ч по направлениям Москва – Казань, Москва – Санкт Петербург, а также по ряду региональных направлений со скоростями движения до 160 км/ч [40 – 44]. Реализация столь высоких скоростей требует особых мер по обеспечению безопасности движения, и в связи с этим накладывает жесткие ограничения как к элементам инфраструктуры, подвижному составу, так и к элементам верхнего строения пути [33, 45 – 50]. В первую очередь к рельсам, предназначенные для высокоскоростного движения предъявляются повышенные требования по прямолинейности, допускам на геометрические размеры, точности изготовления профиля [51]. Кроме того рельсы для работы в условиях высоких скоростей движения должны обладать высокой износостойкостью, усталостной прочностью, иметь высокое сопротивление хрупкому разрушению, низкую загрязнённость неметаллическими включениями, низкие внутренние остаточные напряжения [46, 52, 53].

Важная роль в формировании качества современных рельсов отводится уровню остаточных напряжений. По результатам исследований [54] установлено, что увеличение остаточных напряжений в рельсах типа Р65 от условного уровня «0» до «+150» МПа приводит к снижению количества циклов до образования трещины в 2,7 раза, числа циклов при развитии трещины в – 4 раза. Учитывая, что внутренние остаточные напряжения в рельсах в значительной степени обуславливают их циклическую долговечность, чувствительность к поверхностным концентраторам напряжений, трещиностойкость и живучесть [54], требования по уровню растягивающих напряжений не более 250 МПа, гармонизированные с европей-

ским стандартом [11], были впервые в отечественной практике введены в качестве квалификационных испытаний в новый рельсовый ГОСТ Р 51685-2013 [12].

В связи с развитием бесстыкового пути, доля которого к 2014 г. достигла 70 % [55] от общей протяженности путей, современные рельсы должны обладать хорошей свариваемостью, которая с одной стороны определяется режимами сварки и состоянием рельсосварочного оборудования, с другой стороны химическим составом рельсов и параметрами их микроструктуры. Опыт эксплуатации рельсов японского производства [55, 56] показывает, что для рельсов дифференцированно термоупрочненных с прокатного нагрева требуется более тщательная отработка режимов сварки, а сварной стык является наиболее слабым местом в рельсовой плети – наибольшее количество дефектов, возникающих в таких рельсах, расположено в зоне сварных стыков и произошло по дефектам сварки. Исходя из соображений минимизации сварных стыков с неоднородной структурой к современным рельсам выдвигается требование по обеспечению максимально возможной их длины.

В целом ко всем современным рельсам для организации безопасного движения предъявляются повышенные требования по чистоте стали по неметаллическим включениям. Несмотря на различные методики оценки чистоты рельсовой стали применяемые в разных странах и подробно проанализированные в работах К.В. Григоровича (НИТУ «МИСИС», ЦНИИ «Чермет» им. А.А. Байкова), А.А. Дерябина, А.Б. Добужской (ОАО «УИМ»), Е.А. Шура и др. [57 – 60] общепризнанны наиболее опасными включения глинозема, карбидов и нитридов титана, которые по новому стандарту в рельсах не допускаются и включения хрупкоразрушенных сложных оксидов [58, 61 – 63], нормируемая допустимая величина которых за последние 15 лет сократилась в отечественных стандартах с 2 мм [64] до 705 мкм в рельсах общего назначения и до 353 мкм в рельсах специального назначения [12].

Железнодорожное движение в России имеет свои особенности. Во – первых на большей протяженности железных дорог России организовано смешанное пассажирское и грузовое движение, вследствие чего к рельсам, для укладки на эти

участки, предъявляются достаточно высокие требования по механическим свойствам, твёрдости, загрязнённости неметаллическими включениями с одной стороны и геометрическим параметрам с другой. Во-вторых, в виду географического положения, часть рельсов эксплуатируется на дорогах РЖД в условиях «холодного» и «очень холодного» климата, с абсолютным минимумом температур до  $-60^{\circ}\text{C}$  [65]. Как известно, с понижением температуры значительно возрастает вероятность хрупкого разрушения металлических конструкций [66]. Проведенный в работе [65] анализ одиночного изъятия рельсов в летний и зимний период показывает, что для рельсового пути, расположенного в районах «умеренного» климата с абсолютной минимальной температурой  $-28^{\circ}\text{C}$  количество отдельно смененных рельсов в зимние месяцы в 1,5 – 1,7 раза выше, чем в летние, для районов с «очень холодным» климатом частота изъятия в зимний период увеличивается до 3,5 раз. Для оценки склонности рельсового металла к хрупкому разрушению в отечественных рельсовых стандартах предусмотрено испытание рельсовых проб на копровую прочность (термоупрочненных рельсов при температуре  $-60^{\circ}\text{C}$ , горячекатаных при  $+20^{\circ}\text{C}$ ), а также испытание на ударный изгиб при температурах  $+20^{\circ}\text{C}$  и  $-60^{\circ}\text{C}$ . Приведенный в работе [67] обзор показывает, что ударная вязкость объемнозакаленных рельсов тесно связана с показателями трещиностойкости рельсов, их микроструктурой и показателями эксплуатационной стойкости. Известно [68], что ударная вязкость в значительной мере зависит от действительного размера зерна, в этом смысле объемнозакаленные рельсы, обладающие мелкозернистой структурой пластинчатого перлита и высоким уровнем ударной вязкости, выгодно отличаются от дифференцированно термоупрочненных рельсов, закаленных с прокатного нагрева, микроструктура которых состоит из крупнозернистого сорбитообразного перлита различной степени дисперсности, с низкими значениями ударной вязкости [69]. Несмотря на то, что нормирование величины ударной вязкости в мировой практике не получило большого распространения, в нашей стране, в силу суровых климатических условий, введение испытания на ударный изгиб, в качестве приемосдаточного является оправданным, и при разра-

ботке новых ресурсосберегающих технологий необходимо ориентироваться и на выполнение нормированного значения по ударной вязкости.

Высокая эксплуатационная стойкость рельсов прежде всего определяется их металлургическим качеством, а также условиями технического обслуживания и эксплуатации. В свою очередь высокое металлургическое качество рельсов формируется посредством применения следующих технологических операций [70]:

- обязательного вакуумирования рельсовой стали, исключаящее возникновение флокенов в готовых рельсах;
- применения комплексной обработки стали при внепечной обработке, для обеспечения минимальной доли неметаллических включений;
- десульфурации и дефосфорации рельсовой стали;
- непрерывной разливки рельсовой стали, включая системы электромагнитного перемешивания и мягкого обжата;
- нагрева под прокатку в методических печах с шагающими балками, отапливаемых природным газом, имеющих систему управления второго уровня;
- наличия нескольких гидросбивов печной и вторичной окалины при прокатке рельсовых раскатов;
- прокатки на станах, включающих универсальные группы клеток реверсивного действия типа тандем;
- использования чугунных валков для повышения качества поверхности рельсов;
- автоматической клеймовки штемпельной машиной с быстросменными клеймами;
- автоматического контроля геометрических параметров рельса;
- дифференцированной термообработки рельсов в линии стана с прокатного нагрева;
- правки на роликоправильном комплексе в вертикальной и горизонтальной плоскостях;

- автоматического неразрушающего контроля наличия внутренних дефектов рельсов ультразвуковым, зеркально теневым методами и качества поверхности вихретоковым методом.

- низкого уровня остаточной намагниченности рельсов за счет применения специальных размагничивающих установок или применения немагнитных кранов.

Вторая составляющая жизненного цикла рельсов – условия эксплуатации так же очень важна, так как в неблагоприятных климатических условиях и при ненадлежащем содержании пути сроки работы рельсов могут быть сокращены в 2 – 3 раза. Так, по данным авторов [71] при эксплуатации рельсов японского производства в России их эксплуатационная стойкость оценивается в два раза ниже относительно эксплуатации их в условиях США. В этом направлении специалистами в сфере железнодорожного транспорта проводятся работы по анализу и совершенствованию условий содержания пути и соответствующей нормативной документации [72 – 77].

С целью увеличения эксплуатационной стойкости рельсов необходимо своевременное выявление дефектов, установление условий их образования и разработки мер по предотвращению их появления. Одними из наиболее часто встречающихся, как в России, так и за рубежом [78 – 80], являются дефекты, возникающие вследствие недостаточной контактно-усталостной прочности металла, причем характер этих дефектов коренным образом изменился за последнее десятилетие. Как показывают многочисленные исследования, выполненные в условиях ОАО «ВНИИЖТ» [6, 81 – 84] если раньше подобные дефекты возникали в основном за счет наличия неметаллических включений вытянутых в направлении прокатки [85], то качественные улучшения рельсового металла, достигнутые металлургами к 2005 г. [86], привели к тому, что в настоящее время дефект сходный по внешним признакам формируется в результате исчерпания пластичности, и развития дефекта в совершенно годном, с позиции выполнения требования норм стандартов, металле. Возможности по устранению этого дефекта металлургическим методом крайне ограничены, и сводятся в основном к минимизации доли струк-



турно-свободного феррита и увеличению дисперсности перлита, а основным методом борьбы с дефектом является профилактическая шлифовка [87 – 89].

Таким образом, подводя итог можно отметить, что современные рельсы должны обеспечивать безопасность железнодорожных перевозок в условиях постоянного увеличения грузонапряженности, скоростей движения и ужесточения других условий эксплуатации, для чего они должны быть произведены на современном сталеплавильном и прокатном оборудовании и обладать высокими показателями прочностных и пластических свойств дифференцированных по сечению, высокой твёрдостью, иметь высокое сопротивление к возникновению дефектов контактно-усталостного происхождения, высокие износостойкость, прямолинейность, хорошую свариваемость, низкие остаточную намагниченность, остаточные напряжения и загрязненность неметаллическими включениями. Для работы в климатических условиях РФ рельсы должны обладать достаточно высоким уровнем ударной вязкости (не менее  $15 \text{ Дж/см}^2$  для дифференцированно термоупрочненных рельсов и не менее  $25 \text{ Дж/см}^2$  для объемнозакалённых рельсов [12]), которая определяется для рельсов различного назначения при комнатной температуре или при  $-60^\circ\text{C}$ .

Передовой опыт производства рельсов свидетельствует о более высоких потребительских свойствах рельсов, дифференцированно термоупрочненных по сечению с использованием экологически чистых сред с прокатного нагрева, опыт производства которых до недавнего времени в нашей стране отсутствовал.

## **1.2 Стали для производства рельсов**

### **1.2.1 Классы сталей, применяемых для производства рельсов**

Выбор химического состава стали для производства рельсов во многом определяет потребительские свойства последних. Варьируя соотношение химических элементов можно подобрать оптимальный химический состав для каждого вида термической обработки, в результате формируется микроструктура, обеспечивающая получение необходимого комплекса свойств рельсов.

Вопрос оптимальной микроструктуры рельсов к настоящему моменту окончательно не решен [90]. Одни исследователи [9, 46], считают, что исторически сложившееся производство рельсов из сталей перлитного класса и прошедшее в своём развитии путь от малоуглеродистых сталей до сталей эвтектоидного состава, практически исчерпало себя, подойдя вплотную к пределу прочностных свойств, и видят наиболее перспективное направление в переходе к производству рельсов на бейнитной основе, с понижением содержания углерода до 0,2 – 0,4 % и введением легирующих элементов (Mn, Si, Cr, Mo, V) [91, 92]. Другие, напротив, перспективы развития связывают с повышением содержания углерода и развитием заэвтектоидных сталей с содержанием углерода 1 % и более [20 – 22]. Третьи связывают совершенствование производства термоупрочненных рельсов со структурой тонкопластинчатого перлита (сорбита), за счет совершенствования структуры металлической матрицы, уменьшения содержания и обеспечения благоприятной морфологии неметаллических включений, модифицирования рельсовой стали РЗМ, уменьшения газосодержания и другими металлургическими факторами [62, 93 – 97].

В работе [8] приводится аналитический обзор развития сталей для производства рельсов, согласно которому, авторы условно выделяют четыре поколения рельсовых сталей, каждому из которых соответствует знаковое событие, оказавшее существенное влияние на технологию производства рельсов и повлекшее изменение их свойств. К рельсам последнего четвертого поколения авторы относят рельсы из сталей бейнитного класса. Сочетание высокого уровня ударной вязкости, прочностных и пластических свойств, а также прогнозируемая высокая стойкость к возникновению контактно-усталостных дефектов бейнитных рельсов, привлекает внимание множества исследователей по всему миру [9, 26 – 30, 98–100], однако имеющиеся результаты службы таких рельсов достаточно противоречивы. С одной стороны в мировой практике имеется опыт положительной эксплуатации рельсов из бейнитной стали в тяжелогруженных участках с повышенными требованиями по контактно-усталостной прочности, с другой стороны, как правило, в качестве сравнения для бейнитных рельсов выбирают нетермоупроч-

ненные рельсы из стали марки R260 [99] или из стали марки 900 [99], которые уступают по эксплуатационной стойкости не только бейнитным рельсам, но и термоупрочненным рельсам из стали перлитного класса. Кроме того неоднозначны оценки бейнитных рельсов по износостойкости, относительно термоупрочненных рельсов перлитного класса [6, 99].

Первый опыт отечественного производства бейнитных рельсов из стали марки 30ХГ2САФМ [27 – 28], при достаточно высоких показателях механических свойств и положительных результатах стендовых испытаний, не обеспечил ожидаемого уровня эксплуатационной стойкости вследствие высокого уровня остаточных напряжений наведённых при правке и повышенной загрязнённости стали неметаллическими включениями. Кроме того, достижение оптимального комплекса свойств, обеспечивалось проведением сложной термической обработки – нормализации с последующим отпуском при 350 °С, что не отвечает современным требованиям по экономичности и ресурсосбережению.

Несмотря на различие во взглядах на оптимальную структуру рельсового металла, для обеспечения высокой эксплуатационной стойкости должен выполняться принцип однотипной структуры, сформулированный Е.А. Шуром [90, 100]: «Для обеспечения высокой работоспособности термически упрочнённых рельсов структура должна быть однородной и однотипной по всей глубине участков, где возможно образование повреждений рельсов (дефектов контактной усталости)». Впоследствии данный принцип был подтверждён при проведении металлографических исследований с привлечением средств электронной микроскопии рельсов различных производителей, показавших различную стойкость [101]. Отмечается [90, 100], что наибольшая конструктивная прочность достигается либо при однородной тонкопластинчатой структуре сорбита закалки максимальной дисперсности, либо при однородной структуре отпущенного мартенсита или бейнита. Следует отметить, что производство последних так и не вышло за стадию опытных партий, поэтому, по всей видимости, будет и в ближайшем будущем сбываться прогноз Ю.В. Грдины: «Рельсами массового производства останутся углеродистые рельсы, обработанные на сорбит» [102]. Исходя из изложенного

можно сделать вывод о том, что ресурс перлитных сталей для производства рельсов на данный момент не исчерпан, и для разработки промышленной технологии дифференцированной термообработки с прокатного нагрева следует сделать выбор в пользу сталей на перлитной основе.

### **1.2.2 Химический состав рельсовой стали перлитного класса**

Высокая работоспособность углеродистых рельсов достигается за счёт структуры тонкопластинчатого мелкодисперсного перлита, который формируется при повышении содержания углерода и других стабилизирующих аустенит элементов (Mn, Cr, Mo, Ni), а также вследствие повышения скорости охлаждения в процессе термической обработки. Для достижения наибольшей структурной однородности металла необходимо обеспечить минимальное количество структурно свободных фаз, выделяющихся по границам зёрен, – феррита в доэвтектоидной, и цементита в заэвтектоидной стали, данные о негативном влиянии которых на эксплуатационную стойкость представлены в работах [6, 90]. Уменьшения доли структурно свободных фаз можно добиться путем корректировки содержания углерода на близкое к эвтектоидному (0,80 %) значение, как, например это приведено в работе [103]. Помимо углерода, для повышения работоспособности и износостойкости рельсов сталь традиционно легируют марганцем и кремнием, т.е. теми элементами, которые наиболее сильно упрочняют феррит [104]. Кремний, кроме того, способствует более полному раскислению и обеспечивает более плотную структуру стали [6].

Количество марганца и кремния, а также других легирующих элементов в стали зависит от применяемой для термоупрочнения охлаждающей среды, и соответственно её охлаждающей способности, а также применяемого вида нагрева под термообработку. При низкой охлаждающей способности закалочной среды, такой, как например, воздух, в рельсовую сталь помимо более высокого содержания марганца (до 1 – 1,2 %) и кремния (до 0,4 – 1,0 %) дополнительно вводят хром в количестве до 0,4 – 0,7 % [105]. Применение для закалки водо-воздушной смеси [106] или водного раствора полимера [107, 108] в которых реализована возмож-

ность создания переменной охлаждающей способности, позволяет варьировать количество легирующих элементов в достаточно широких пределах и производить закалку от углеродистых до низколегированных сталей. В то же время применение закалочных сред с высокой, стабильной охлаждающей способностью, как например, при объемной закалке в масле с печного нагрева, в процессе которой рельсовая сталь охлаждается с достаточно высокой скоростью, не требует применения значительного количества легирующих элементов, в основном в таких рельсах содержится порядка 0,9 % марганца, и незначительное количество (порядка 0,30 – 0,35 %) кремния) [109].

Для повышения ударной вязкости, особенно при пониженных температурах в сталь рельсов, подвергаемых закалке с повторного нагрева целесообразно вводить карбидо- и нитридообразующие элементы (V, Nb), в сочетании с азотом, в результате достигается дисперсионное упрочнение за счет выделения мелкодисперсных карбидов и карбонитридов, происходит измельчение зерна стали, образование совершенной субзеренной структуры [110]. К настоящему времени легирование ванадием сталей транспортного назначения получило особенно широкое распространение в отечественном производстве. Однако вопрос оптимального содержания ванадия в рельсовой стали неоднозначен, одни исследователи [111] полагают что повышение содержания ванадия с 0,03 до 0,07 % практически не оказывает влияния на свойства рельсов, другие [112] считают, что оптимальное содержание ванадия в рельсовой стали должно находиться в пределах 0,07 – 0,10 %.

Схожее влияние на рельсовую сталь оказывает и ниобий. Однако в отличие от ванадия, карбиды которого полностью растворимы в аустените, карбиды и карбонитриды ниобия, растворимость которого в аустените гораздо ниже [90], стремятся выделиться из раствора при более высокой температуре. Что может быть полезно при освоении технологии закалки с прокатного нагрева. Кроме того, согласно [102] введение ванадия в рельсы, подвергаемые термообработке с прокатного нагрева может иметь негативный эффект, так как при высокой температуре окончания прокатки (980 – 1050 °C) ванадий не сдерживает рекристаллизацию зерна аустенита, а, выделяясь в виде дисперсных карбонитридов при более

низких температурах, может декарнировать границы крупного первичного зерна, тем самым сильно снижать ударную вязкость стали.

В работе [113] разработан способ микролегирования рельсов ниобием, обеспечивающий после термомеханической обработки (ТМО) значительное измельчение зерна, при уменьшении размеров неметаллических включений содержащих ниобий. Азот, связанный в таких сталях в карбонитриды, эффективно повышает температуру растворения и выпадения карбонитридов [90], и является благоприятным химическим элементом в стали.

Помимо азота в рельсовой стали содержатся газы кислород и водород, которые относятся к вредным газам и их содержание в стали стремятся минимизировать во избежание возникновения опасных дефектов флокенов или скопления неметаллических включений, которые могут повлечь за собой катастрофическое разрушение рельса при эксплуатации. Многочисленными исследованиями [114, 115] установлено, что не все неметаллические включения одинаково интенсивно влияют на возникновение дефектов при эксплуатации. Исследование фокуса продольных трещин [19, 116] показало, что наиболее частой причиной зарождения трещины являются включения глинозёма, нитридов и карбидов титана, а также хрупкоразрушенных оксидов сложного состава, которые создают вокруг себя опасные поля напряжений. Поэтому в рельсовых сталях современного производства ограничено содержание титана, алюминия, хотя последний, как известно [90; 95], благоприятно сказывается на ударной вязкости рельсовой стали за счёт измельчения зерна. Аналогичное, негативное влияние оказывает и цирконий [117]. Относительно более безопасными считаются включения пластичных силикатов, которые не нормируются в отечественной нормативной документации на производство рельсов [12, 63]. Мнения по поводу глобулярных включений в рельсовой стали разнятся. В работах [118, 119] утверждается, что «глобули самый благоприятный тип включений», в то время как в работе [95] приводятся данные о том, что глобули, могут служить причиной возникновения контактно усталостных дефектов наравне со строчками высокоглинозёмистых включений.

Для раскисления рельсовой стали и формирования в металле неметаллических включений благоприятной морфологии рельсовую сталь модифицируют ЩЗМ (Ba, Ca, Mg) [118, 120]. Кроме того, по некоторым данным введение бария препятствует росту аустенитного зерна при нагреве [121], в работе [120] также указывается на повышение пластичности горячекатаных рельсов при модифицировании стали барием. В работах [122, 123] напротив, для модифицирования стали предпочтение отдается редкоземельным металлам, которые, по сравнению с щелочноземельными металлами, воздействуют на металл не только в жидком состоянии, но и в процессе кристаллизации сталей.

Несмотря на достигнутые положительные результаты, в вопросах модифицирования рельсовой стали остаются открытыми ряд проблем. Например не выяснен механизм влияния бария на рельсовую сталь [124], отсутствует стройная теория легирования рельсовой стали, не до конца установлено влияние состава неметаллических включений и свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов, работающих в различных условиях и т.д.

Следует отметить, что большое влияние на распад переохлажденного аустенита и соответственно микроструктуру рельсов, помимо процессов легирования и модифицирования оказывает способ нагрева металла под термообработку. В процессе повторного нагрева в металле формируется мелкозернистая структура, обеспечивающая рельсам высокие показатели живучести. При этом, неизбежно выделение существенного количества феррита по границам зёрен, ухудшающего стойкость стали к зарождению и распространению трещин контактной усталости. При закалке рельсов с прокатного нагрева, имеющих более крупное аустенитное зерно, и соответственно обладающих более низким сопротивлением к распространению трещин, наиболее приоритетной задачей является обеспечение стойкости рельсов к зарождению трещин за счёт высокой чистоты стали по неметаллическим включениям [68].

Таким образом, разработку технологии производства дифференцированно термоупрочненных воздухом рельсов следует начать с рационализации химического состава стали, выбрав за основу низколегированную углеродистую сталь, с

близким к эвтектоидному содержанием углерода, легированную хромом, марганцем и кремнием. Требуется уточнения вопрос микролегирования рельсовой стали ванадием и ниобием, а также вопрос кинетики распада переохлажденного аустенита с изменением величины зерна.

### **1.3 Технологии термической обработки рельсов**

#### **1.3.1 Влияние термической обработки на качество рельсов**

Термическая обработка является признанным способом эффективного повышения свойств рельсов. Согласно оценкам, представленным в [10, 119] эксплуатационная стойкость рельсов после термического упрочнения увеличивается в 1,4 – 1,5 раза относительно горячекатаных рельсов. В работе [125] представлен расчет суммарных затрат жизненного цикла (LCC) рельсов различных типов, из которого видно, что за счет увеличения интервалов между очередными циклами работ по текущему содержанию и ремонту пути, LCC термоупрочнённых рельсов типа R350HT уменьшается на 35 %, относительно нетермоупрочнённых рельсов типа R260. В виду высокой эффективности, технологии термической обработки применяются практически на всех предприятиях, занимающихся производством рельсов.

На различных предприятиях процессы термической обработки рельсов различаются по виду охлаждающей среды, способу нагрева под термообработку и виду термического упрочнения. До недавнего времени в нашей стране наиболее распространенным был, внедренный в 60 – 70-х гг. прошлого века, метод объёмной закалки рельсов в масле с печного нагрева, что по оценкам, представленным в [126] позволило на момент внедрения занять лидирующие позиции в мировой практике производства рельсов. Индустриальное масло, обладая достаточно высокой охлаждающей способностью, обеспечивало закалку рельсов из углеродистой стали экономнолегированной марганцем и кремнием, с достижением высокого уровня механических свойств и твёрдости. Внедрение технологии микролегирования рельсовой стали ванадием и азотом позволило создать рельсы низко-



температурной надежности [8]. Однако, несмотря на обширное многолетнее изучение и оптимизацию процессов объемной закалки, основной критерий оценки потребительских свойств рельсов ( $T_{\gamma}$  - 80 %-ный гамма ресурс), партий объемно-закаленных рельсов на экспериментальном кольце, в отличие от рельсов зарубежного производства [101], как правило, не превышала 1 млрд. т брутто. По данным представленным в [127 – 129] в период 2001 – 2010 гг. на экспериментальном кольце были проведены полигонные испытания 16 опытных партий рельсов отечественного производства. По результатам испытаний только у одной партии рельсов 80 %-ный гамма ресурс составил 1220 млн. т брутто, в остальных случаях величина данной характеристики составила от 230 до 958 млн. т брутто. Анализ причин пониженной стойкости показал среди прочего наличие в металле локальных участков бейнита и повышенное количество избыточного феррита, в виде зернограницной сетки. Следует отметить, что при исследовании [101] металла рельсов японского и французского производства, показавших высокую эксплуатационную стойкость на экспериментальном кольце, бейнит не обнаружен, а феррит представлен в виде отдельных зёрен.

Помимо указанных факторов, большое влияние на качество рельсов оказывают внутренние остаточные напряжения, наводимые в процессе закалки и правки рельсов. Исследования, выполненные в [53] показали, что высокий уровень остаточных напряжений может значительно снизить живучесть рельсов (число циклов до образования и число циклов при развитии трещины). Процесс объемной закалки практически исключает контролируемое формирование остаточных напряжений, поэтому для создания благоприятной эпюры остаточных напряжений за рубежом была разработана технология дифференцированной термической обработки, предполагающая различную скорость охлаждения элементов профиля рельсов.

В связи с минимальным технологическим воздействием на параметры охлаждающей среды, процесс объемной закалки невозможно использовать для производства рельсов различного химического состава, а также рельсов увели-

ченной длины, потребность в которых в последнее время возрастает в связи с ростом протяженности линий высокоскоростного движения.

Перечисленные факторы, в совокупности с высокой пожароопасностью, канцерогенностью, эксплуатационными затратами обусловили выход на передний план более перспективных видов термической обработки с дифференцированной по сечению рельса скоростью охлаждения и использованием более экологичных и безопасных сред, таких как водные растворы полимеров, воздух и водовоздушные смеси.

### **1.3.2 Способы нагрева рельсов под термообработку**

В начале развития технологии термической обработки рельсов, все рельсы подвергали закалке с повторного нагрева, что было обусловлено необходимостью проведения обязательной противоблоксной обработки после прокатки, посредством замедленного охлаждения в коробах. На предприятиях использовали различные способы нагрева под термообработку: на Новокузнецком и Нижнетагильском металлургических комбинатах – печной нагрев [19], на предприятиях Азовсталь [130], Voest-AlpineSchienen [108], NipponSteel&SumimotoMetallCorp. [21] – индукционный. Наряду с достижением положительного эффекта за счёт измельчения зерна аустенита, повторный нагрев характеризуется низкой производительностью и энергоэффективностью установок для термообработки, а также недостаточной глубиной прокаливаемости в случае закалки токами высокой частоты [21]. Следует отметить, что компания Tata Steel остановилась на термообработке рельсов вне потока стана с использованием быстрого индукционного, повторного нагрева за счет чего достигается мелкое зерно и низкие остаточные напряжения [131].

Развитие процессов вакуумирования стали позволило контролировать остаточное содержание водорода в стали и решить проблему с возникновением флокенов, открыв перспективы для развития технологий термической обработки с

использованием более экономически выгодного тепла нагрева заготовок в методических печах под прокатку – тепла предпрокатного нагрева.

В 80 – 90-х гг. прошлого века за рубежом начали разрабатывать и внедрять технологии термического упрочнения рельсов с использованием тепла предпрокатного нагрева [19, 21, 108], который к настоящему моменту является основным на многих предприятиях, занимающихся производством термоупрочненных рельсов. Внедрение технологии термической обработки с использованием тепла предпрокатного нагрева позволило обеспечить высокие показатели энергоэффективности оборудования и высокую твердость на поверхности катания и по сечению головки. При этом неизбежно увеличение размеров зерна и снижение, тесно связанной с ним, величины ударной вязкости. Следует отметить, что несколько уменьшить размер зерна, можно путем проведения контролируемой прокатки.

Вопрос контроля ударной вязкости в рельсовом металле неоднозначен, в зарубежных стандартах, в отличие от российских, эта величина не является нормируемой [132]. В отечественной практике испытание на ударный изгиб проводится для рельсов всех категорий качества, так как это позволяет установить: способность материала выдерживать ударные нагрузки, склонность к хрупкому разрушению, чувствительность к надрезам [133].

В работе [66] представлены данные показывающие, что с увеличением размеров зерна, уменьшается ударная вязкость и трещиностойкость рельсовой стали. В работе [68] авторы считают, что при переходе на дифференцированную термическую обработку с прокатного нагрева будет безвозвратно потеряно достигнутое на объемнозакаленных рельсах преимущество по величине зерна и ударной вязкости. Таким образом, вопрос обеспечения минимального уровня ударной вязкости в рельсах, термоупрочненных с прокатного нагрева является особенно актуальным.

С другой стороны, увеличение размеров зерна, повышает стабильность переохлажденного аустенита, и может оказывать действие аналогичное влиянию хрома. Поэтому кинетика распада аустенита после прокатки может значительно отличаться от хорошо изученной кинетики распада аустенита рельсовой стали по-

сле нагрева под термическую обработку в диапазоне температур 850 – 900 °С [134, 135]. На недостаточную изученность вопроса распада аустенита при термообработке после прокатки указывает В.В. Павлов в работе [102].

### **1.3.3 Дифференцированная термическая обработка рельсов в растворах полимеров**

Первые растворы полимеров были разработаны в США и Франции в 50-х годах прошлого века и впоследствии получили широкое развитие [136]. Эти среды предназначены для замены промышленных масел с целью устранения их недостатков (возгораемость, дымность, загрязнение окружающей среды), а также для заполнения области между водой и маслом по охлаждающей способности, что расширяет возможности использования экономнолегированных марок сталей и увеличивает гибкость процесса закалки.

По сведениям, представленным в работах [90, 107] необходимость замены промышленного масла, обусловлена низкой его охлаждающей способностью и невозможностью получения твёрдости в рельсах из углеродистых сталей до ~ 400 НВ.

В работах [137, 138] показана возможность закалки рельсов и рельсовых скреплений из углеродистых сталей с использованием водного раствора неполной железной соли полиакриловой кислоты (ПК-2), нейтрализованной щёлочью до pH 7 – 8 и натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы (Na-КМЦ). Полученные в результате термической обработки свойства сопоставимы со свойствами рельсов термообработанных в масле.

В работах [8, 90, 107, 133, 137] в качестве альтернативы маслу для закалки рельсов представлены водополимерные растворы ПК-М на основе железосодержащей полиакриловой кислоты и БреоксТермо А на основе сополимеров этиленгликолей. Причем в данных работах, в отличие от работ [138, 139] рассматривается процесс дифференцированной закалки головки рельсов в водополимерах и одновременным охлаждением подошвы рельсов сжатым воздухом. Результаты проведенных экспериментов показывают, что указанные водополимерные среды

имеют существенное преимущество по сравнению с индустриальным маслом и обеспечивают в широком диапазоне концентраций высокий уровень механических свойств металла, копровой прочности, и благоприятные остаточные напряжения в рельсовом профиле. Вместе с тем, для обеспечения однородности перлитной структуры стали при использовании данных сред необходим жёсткий контроль температурно-временного режима закалки и концентрации раствора [8].

Вследствие достаточно жестких требований к процессу термической обработки, технология закалки в водных растворах полимеров получила довольно ограниченное применение и используется для производства дифференцированно термоупрочненных рельсов только на Voest-Alpiene [108] и Челябинском металлургическом комбинате [140, 141].

#### **1.3.4 Дифференцированная термическая обработка рельсов в воздушной и водо-воздушной средах**

Согласно приведенным в работах [8, 141] данным, воздух и водо-воздушные смеси получили достаточно широкое распространение и применяются для термической обработки рельсов на ряде предприятий по всему миру.

Хорошо изучен [19, 119, 134, 142 – 146] опыт термической обработки водо-воздушной смесью рельсов в упруго-изогнутом состоянии с нагрева токами высокой частоты на комбинате «Азовсталь». Эта технология обеспечивает получение высокой твёрдости, оптимальной структуры при минимальном короблении и низком уровне остаточных напряжений. При этом технологичность процесса ограничена необходимостью строгого соблюдения параметров процесса – обеспечением постоянства температуры нагрева рельсов, дозировки воды и воздуха, определенной скорости перемещения рельсов, постоянством зазора между соплами форсунок и поверхностью головки рельсов [142]. Близкую технологию термообработки использует компания TataSteel в которой рельсы с индукционного нагрева подвергаются закалке сжатым воздухом [131]. Эта технология позволяет обеспечить мелкое зерно и соответственно комплекс высоких показателей пластичности, прочности и ударной вязкости. Однако, при использовании нагрева ТВЧ, рельсы

отличаются небольшой глубиной прокаливаемости и градиентом свойств на границе закаленного слоя и основного нетермоупрочненного металла. Данного недостатка лишена закалка с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева.

В [147] представлены данные о разработке технологии дифференцированной закалки водо-воздушной смесью с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева, а также опыт промышленного внедрения данной технологии на комбинате Baotou Iron&Steel Co. Ltd.

Данные о применении воды для увлажнения воздуха и повышения его охлаждающей способности представлены в разработках ООО «Томская электронная компания» [148 – 150]. Опытные образцы рельсов из углеродистой стали, термообработанные по технологии ТЭК-ДТ с повторного нагрева показали высокие результаты механических и стендовых испытаний [83].

Применение предпрокатного нагрева решает проблему резкого градиента свойств по сечению головки, получаемого после закалки с нагрева ТВЧ, не снимает ограничений обусловленных использованием воды, в качестве составляющей водо-воздушной смеси. При уменьшении критической скорости охлаждения обусловленной более крупным зерном после прокатки, увеличение охлаждающей способности за счет снижения технологичности может быть не вполне оправдано. Именно поэтому в Японии [21] и США большое распространение получил способ термической обработки воздухом с использованием предпрокатного нагрева. Недостаток охлаждающей способности воздуха в данной технологии компенсируется повышенным содержанием легирующих элементов и более высокой технологичностью процесса – отсутствием необходимости водоподготовки, водо-, пароотведения, контроля соотношения воды и воздуха. Для обеспечения необходимого уровня свойств применяется контролируемая прокатка. Эксплуатационная стойкость данных рельсов составляет свыше 1 млрд. т брутто, а по некоторым данным [71] может достигать 3 млрд. т брутто.

Таким образом, наиболее технологически выгодной является ресурсосберегающая технология дифференцированной термической обработки воздухом железнодорожных рельсов с использованием тепла предпрокатного нагрева.

#### **1.4 Выводы и постановка задач исследования**

Проведенный аналитический обзор позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Современные тенденции производства рельсов направлены на развитие новых ресурсосберегающих технологий дифференцированной термообработки с использованием остаточного тепла предпрокатного, обеспечивающих высокие показатели работоспособности рельсов. Отсутствие опыта массового производства дифференцированно термоупрочненных рельсов в отечественной практике свидетельствует об актуальности исследований в данной области.

2. В специальной технической литературе отсутствуют данные о влиянии карбидообразующих элементов на свойства рельсовой стали, при их термообработке после прокатки, не разработаны термокинетические диаграммы (ТКД) распада аустенита рельсовых сталей, учитывающие изменение величины зерна при изменении схемы нагрева под термообработку и влияние горячей деформации, не определены оптимальные соотношения химических элементов, обеспечивающие достижение необходимого комплекса свойств дифференцированно термоупрочненных рельсов, что существенно осложняет разработку технологии их производства.

3. Наиболее достоверным способом разработки технологии промышленного производства дифференцированно термоупрочненных рельсов является поэтапное определение оптимального химического состава и рациональных режимов термообработки посредством исследования кинетики распада аустенита, прокаливаемости стали, проведение экспериментов по термической обработке рельсовых проб из сталей опытного химического состава, определения структуры и свойств опытных рельсов.

4. Имеющиеся литературные данные свидетельствуют о значительных перспективах по улучшению качества железнодорожных рельсов за счёт внедрения технологии дифференцированной термообработки и повышения комплекса свойств, микроструктуры.

С учётом сделанных выводов сформулированы следующие задачи диссертационного исследования:

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.



## **2 Исследование влияния химического состава на кинетику распада аустенита и прокаливаемость рельсовой стали**

### **2.1 Выбор химического состава сталей для исследований**

Традиционно для массового производства рельсов используются углеродистые стали близкого к эвтектоидному состава, легированные марганцем и кремнием, в количестве  $\sim 0,9 \%$  и  $\sim 0,3 \%$  соответственно, которые способствуют повышению прочностных свойств стали. Освоение нового вида термического упрочнения рельсов в воздушной среде, имеющей более низкую охлаждающую способность, относительно применявшегося ранее масла, требует дополнительного легирования рельсовой стали аустенит-стабилизирующими элементами, для достижения сбалансированного комплекса свойств, отвечающего требованиям нормативной документации.

Одним из наиболее доступных и широко распространенных элементов, повышающих прокаливаемость и закаливаемость стали, является хром. Для достижения необходимого комплекса свойств при умеренных режимах термообработки минимальный уровень содержания хрома ограничили на уровне  $0,35 - 0,40 \%$ . При этом следует отметить, что хром оказывает существенное влияние на свариваемость стали, что особенно важно в виду ежегодного увеличения протяженности бесстыкового пути на сети магистралей ОАО «РЖД», поэтому при разработке химического состава верхний предел содержания хрома ограничили на уровне  $0,50 - 0,60 \%$ . Кроме того, для определения оптимального химического состава варьировали содержание марганца в пределах от  $0,78$  до  $1,09 \%$  и кремния в пределах  $0,32 - 0,55 \%$ .

Помимо указанных элементов для производства рельсовой стали в отечественной металлургии широко распространено применение ванадия. В виду того, что при изменении способа нагрева под термообработку, условия формирования первичной аустенитной структуры и окончательной перлитной структуры будут значительно отличаться, при этом роль карбидообразующих элементов на форми-

рование структуры также изменится, при разработке химического состава было опробовано введение ванадия в количестве 0,07 % и совместное введение ванадия и ниобия. В качестве сравнительной базы в опытах использовали сталь марки Э76Ф текущего производства.

Стали для исследований, выплавляли в 100-т электродуговых печах ДСП-100Н10. Разливку вакуумированного металла проводили на машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) на заготовки сечением 300х330 мм. Нагрев непрерывнолитых заготовок (НЛЗ) проводили в печи с шагающими балками (ПШБ), а прокатку – по действующей технологии производства рельсов типа Р65. Химический состав металла текущего производства стали марки Э76Ф и опытного металла стали марки Э76ХФ, в том числе ряд плавов микролегированных ниобием, по результатам ковшевого спектрального анализа представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав металла

№ п/п	№ плавки	Нагрев	Марка стали	Массовая доля химических элементов, %										
				C	Mn	Si	Cr	P	S	Al	V	Nb	Ni	Cu
1	28551	Печной	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	Печной	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	Печной	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	Печной	Э76ХФ	0,75	0,83	0,55	0,42	0,012	0,008	0,003	0,04	0,060	0,08	0,14
5	Э76Ф	Печной	Э76Ф	0,77	0,82	0,32	0,08	0,012	0,007	0,003	0,04	–	0,10	0,14
6	22376	Прокатный	Э76ХФ	0,79	0,78	0,55	0,46	0,014	0,015	0,002	0,07	–	0,08	0,14
7	22674	Прокатный	Э76ХФ	0,76	0,87	0,32	0,56	0,017	0,005	0,003	0,07	–	0,07	0,12
8	22668	Прокатный	Э76ХФ	0,79	0,88	0,33	0,56	0,015	0,006	0,003	0,07	–	0,08	0,13
9	22677	Прокатный	Э76ХФ	0,77	0,91	0,31	0,42	0,015	0,008	0,003	0,08	–	0,07	0,12
10	22675	Прокатный	Э76ХФ	0,76	0,88	0,32	0,55	0,014	0,007	0,002	0,07	–	0,07	0,12
11	T1	Прокатный	Э76Ф – T1	0,76	0,88	0,31	0,09	0,012	0,008	0,003	0,04	–	0,07	0,13
12	В	Прокатный	Э76Ф – В	0,79	0,92	0,33	0,08	0,015	0,009	0,002	0,07	–	0,08	0,14
13	НЭ	Прокатный	Э76Ф – НЭ	0,78	0,89	0,31	0,08	0,012	0,007	0,003	0,07	–	0,07	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

## 2.2 Методика проведения экспериментальных исследований

Комплекс исследований по изучению кинетики распада горячедеформированного аустенита был выполнен на образцах рельсовой стали четырёх опытных плавов электростали (№№ 22376, 22674, 28551, 28554 – таблица 2.1) с различ-

ным содержанием основных химических элементов – углерода, марганца, кремния, хрома, а также микролегирующих элементов – ванадия и ниобия.

Кинетику распада горячекатаного аустенита исследовали на цилиндрических образцах диаметром 5 мм и длиной 10 мм, вырезанных из головок нетермоупрочненных рельсов вышеуказанных плавок.

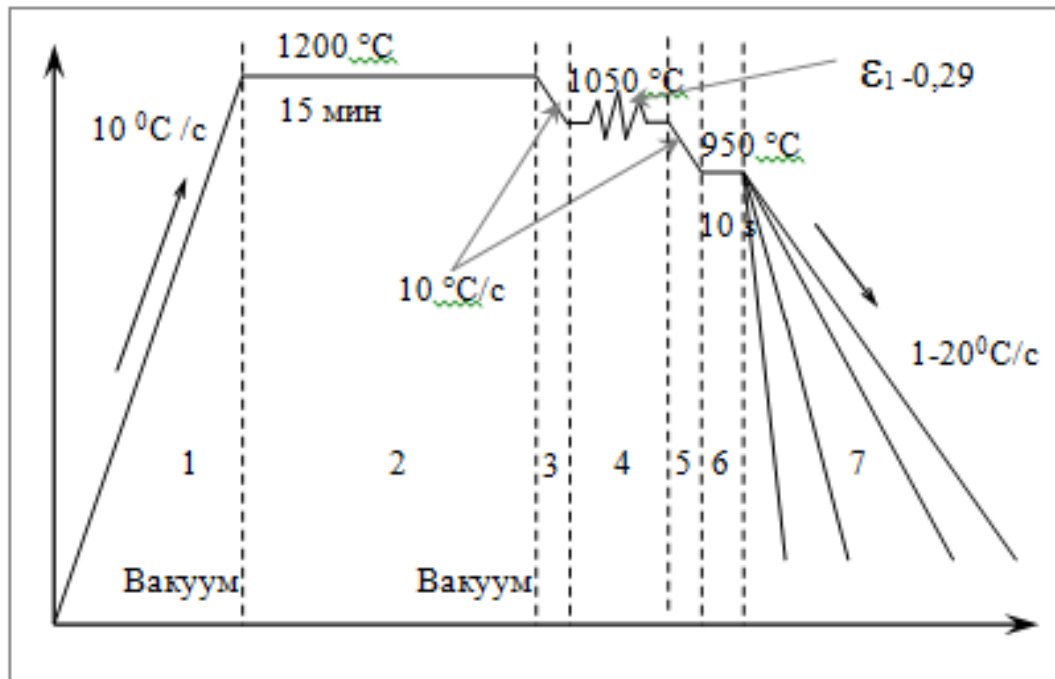
Общая схема производства длинномерных рельсов включает в себя нагрев заготовок в методической печи до температуры 1200 – 1250 °С, реверсивную прокатку в обжимной и черновой клетях с суммарной деформацией 0,84 и 0,75 соответственно, далее прокатку в группе клетей тандем в составе двух универсальных и одной вспомогательной с суммарной деформацией 0,6 и последеформационное ускоренное дифференцированное охлаждение рельсов ( $T_{\text{нач}} \approx 950 - 900$  °С,  $V_{\text{охл max}} \approx 6 - 7$  град/с).

Кинетику превращения переохлажденного горячедеформированного аустенита исследовали с помощью дилатометрических измерений и с использованием закально-деформационного дилатометра BÄHR DIL 805 A/D на образцах, вырезанных из головок нетермоупрочненных рельсов всех четырех плавок. Схема проведения эксперимента на дилатометре была составлена таким образом, чтобы она соответствовала реальными режимами ТМО при производстве длинномерных термоупрочненных рельсов. Схема эксперимента представлена на рисунке 2.1.

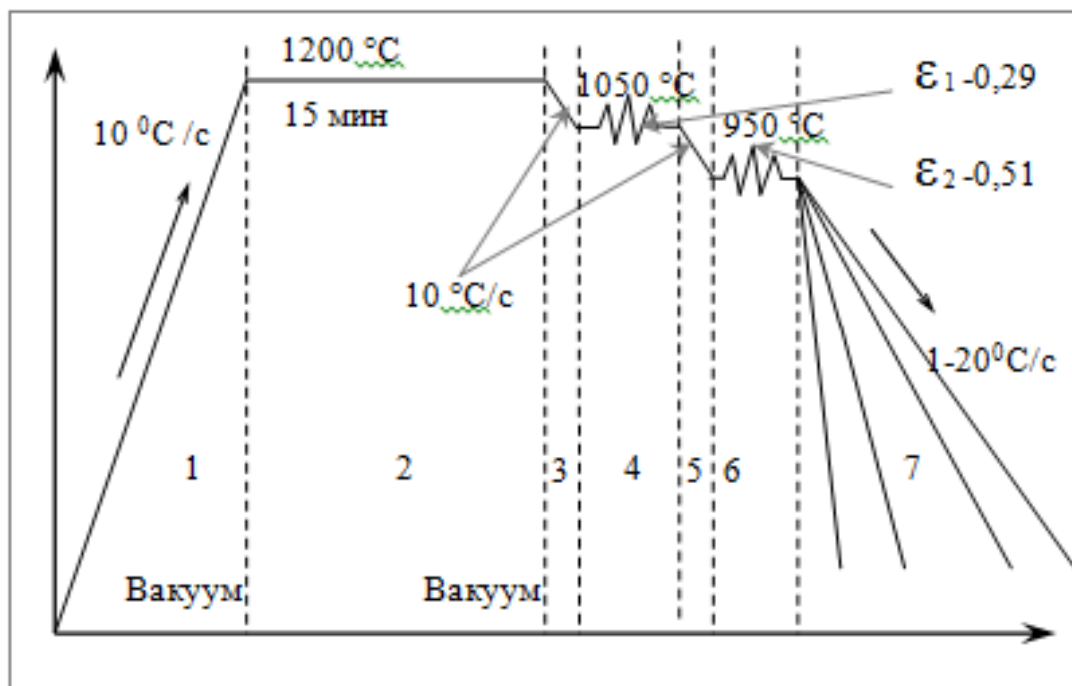
Общий порядок экспериментов, включал в себя следующие этапы:

1-2: Нагрев образца в вакууме со скоростью 10 град/с до температуры 1200 °С в течение 120 с и последующая изотермическая выдержка при этой температуре в течение 300 с (рисунок 2.1) 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  $1\text{с}^{-1}$ , что имитировало деформацию в обжимной группе клетей.



а



б

а – одноступенчатая деформация и двухступенчатое охлаждение;

б – двухступенчатая деформация и охлаждение

Рисунок 2.1 – Схема эксперимента

5-6: Охлаждение до температуры 950 °С со скоростью 10°С/с, и изотермическая выдержка при температуре 950 °С (рисунок 2.1 а) или проведение деформации при температуре 950 °С со степенью  $\approx 50\%$  и скоростью  $1\text{с}^{-1}$  (рисунок 2.1 б), что имитировало деформацию в чистовой группе клеток 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.

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.

С целью определения прокаливаемости и исследования закономерностей формирования структуры в процессе охлаждения с различной скоростью, проведена торцевая закалка образцов Джоини по методике ГОСТ 5657. Образцы изготовлены из рельсов плавок 22376, 22674, 28551 и 28554.

Термообработка каждого образца включала в себя нагрев до температур прокатки, выдержку, подстуживание до температуры начала закалки рельсов и торцевую закалку. Для отработки режима охлаждения по продольной оси образцов были приварены термопары и соединены с компьютерной системой многоканальных температурных измерений, которая предназначена для измерений температуры с накоплением результатов в виде цифровой или графической базы данных.

Термообработку каждого образца проводили по следующему режиму: образец помещали в печь в безокислительной атмосфере, нагретую до 1000 °С, выдерживали при этой температуре 30 мин, подстуживали до 820 °С в течение 4 – 5 мин, выдерживали 2 мин при этой температуре и далее помещали в установку торцевой закалки струей воды. Температура начала закалки (820 °С) была выбрана с учетом предполагаемой температуры начала закалки рельсов на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» после реконструкции с учётом продолжительности транспортирования их до закалочного устройства, а также в связи с тем, что закалка непосредственно от

температуры конца прокатки (950 °С), способствует возникновению неблагоприятных игольчатых структур.

По указанному режиму закаливали по два образца от каждой плавки. После закалки на каждом образце шлифовали две диаметрально противоположные площадки и проводили на них замеры твердости методом Роквелла с интервалом 1,5 мм по всей длине образцов. Исследование микроструктуры образцов на прокаливаемость проводили на сканирующей электронном микроскопе QUANTA-200 Philips при увеличении до 10 000 крат.

### **2.3 Анализ результатов дилатометрических исследований**

На основании дилатометрических измерений, металлографического анализа структуры и результатов измерения твердости по методике изложенной ранее в 2 разделе диссертации были построены термокинетические диаграммы фазовых и структурных превращений для всех четырех плавов стали марки Э76ХФ и двух схем деформации в диапазоне скоростей охлаждения от 1 до 20 град/с (рисунки 2.2 – 2.5), определены критическая скорость охлаждения ( $V_{кр}$ ), критические точки  $A_{г3}$ ,  $A_{г1}$ ,  $M_n$ , структурные составляющие стали после охлаждения.

Установлено, что для различных схем и степеней деформации кинетика распада переохлаждённого аустенита различается. При схеме эксперимента с двухступенчатой деформацией температурный интервал перлитного превращения существенно увеличивается, в отдельных случаях в 2 – 3 раза. При схеме эксперимента с одноступенчатой деформацией температурный интервал перлитного превращения находится в интервале температур 600 – 540 °С, а при схеме двухступенчатой деформации – составляет 630 – 510 °С.

Установлено, что для металла менее легированной плавки № 28554 и отличающейся комплексным микролегированием и максимальным содержанием V и Nb при схеме эксперимента с двухступенчатой деформацией температурный интервал перлитного превращения целиком сместился вверх на  $\approx 70$  °С и стал шире на 20 °С.

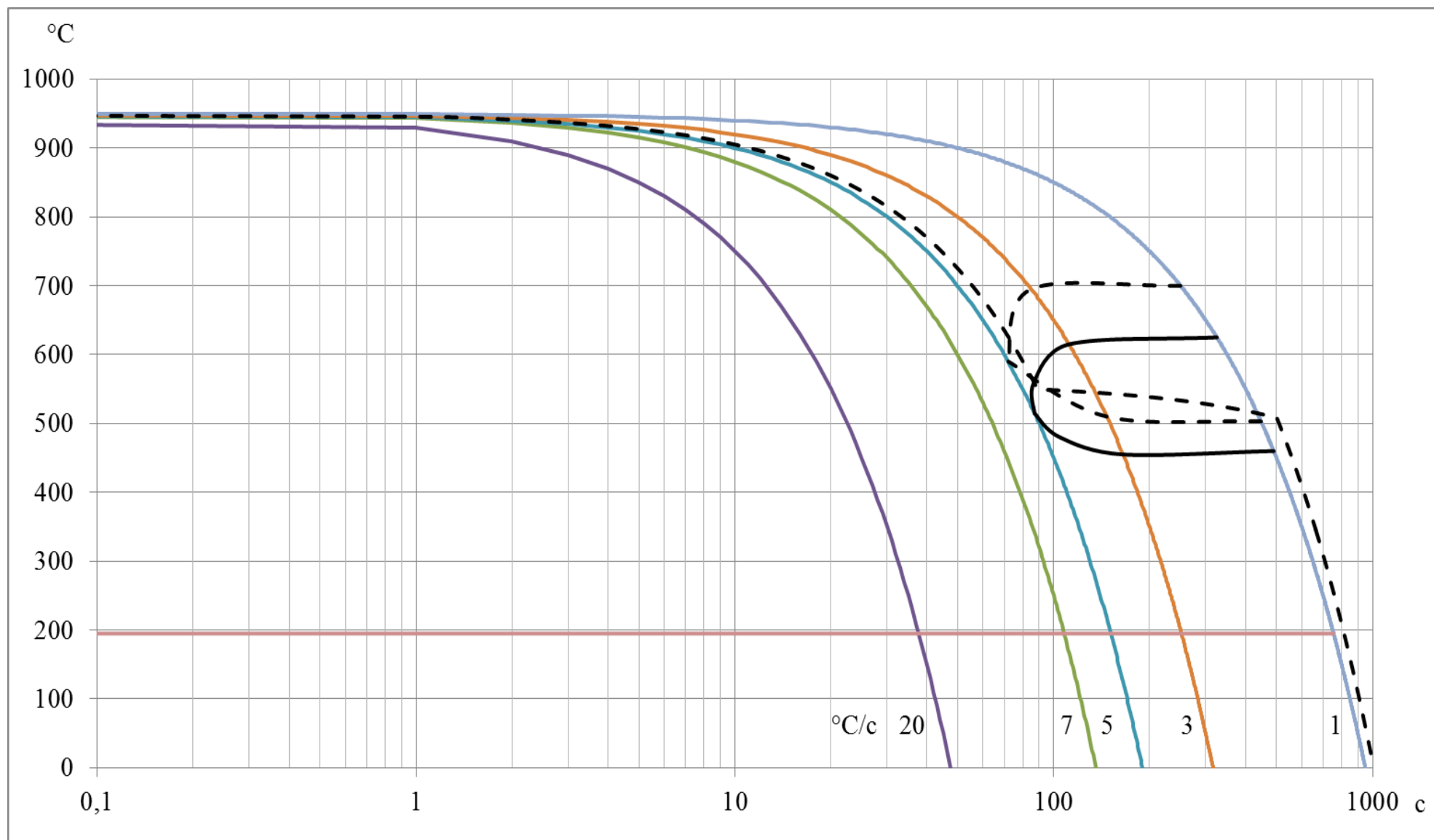


Рисунок 2.2 – Термокинетическая диаграмма распада аустенита рельсовой стали Э76ХФ плавки № 28554 с максимальным комплексным легированием V и Nb

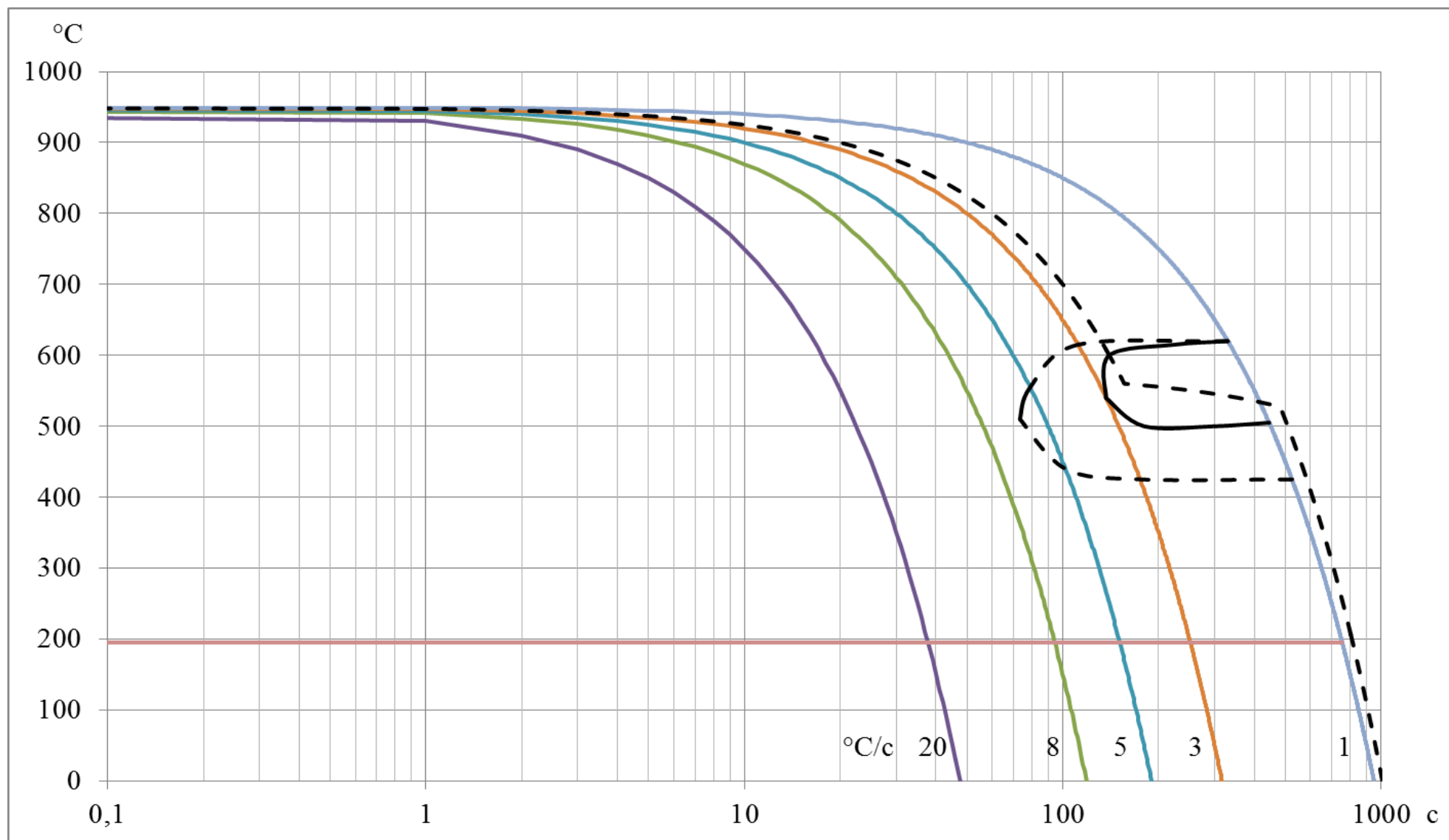


Рисунок 2.3 – Термокинетическая диаграмма распада аустенита рельсовой стали Э76ХФ плавки № 28551 с минимальным комплексным легированием V и Nb



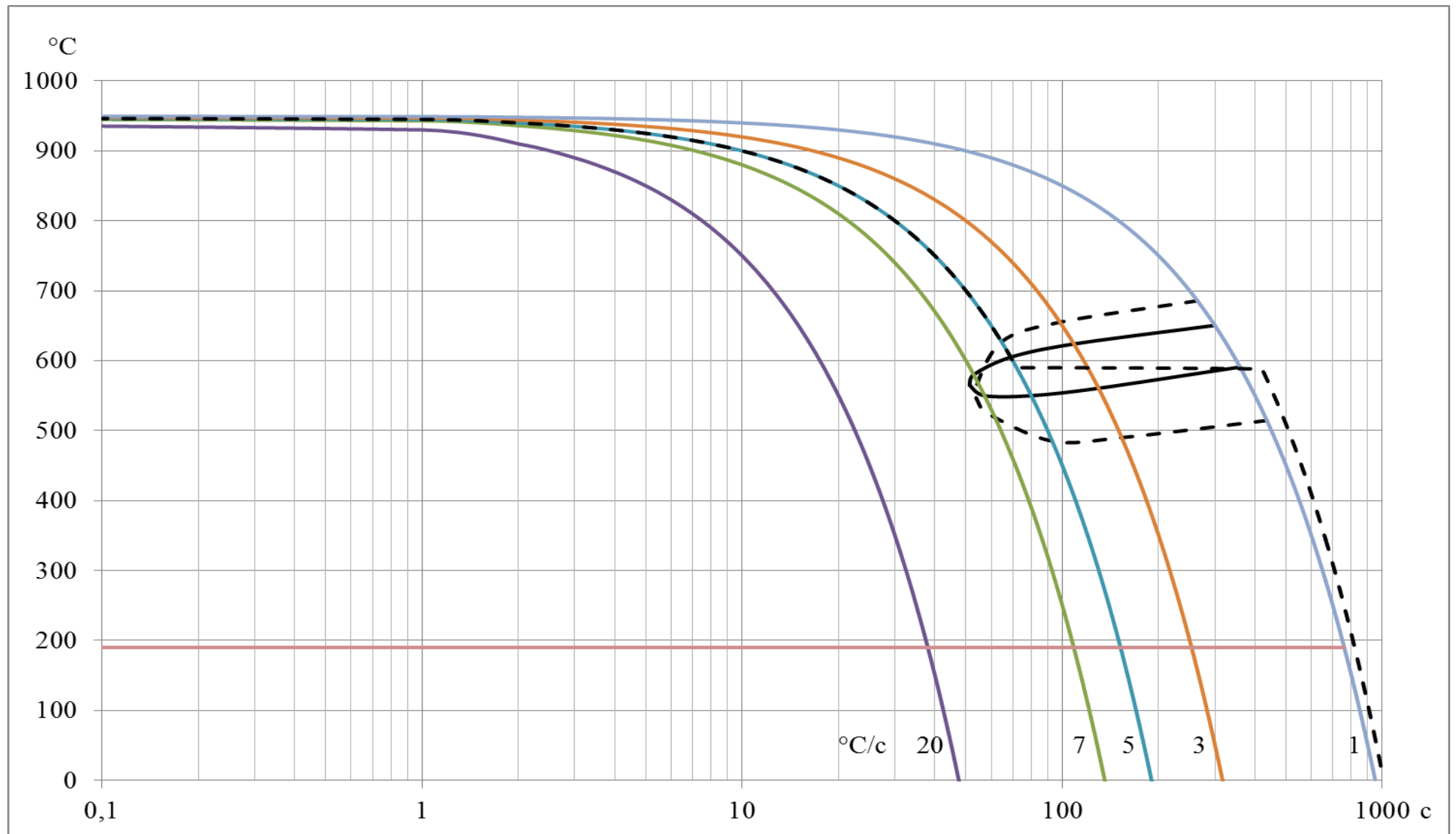


Рисунок 2.4 – Термокинетическая диаграмма распада аустенита рельсовой стали Э76ХФ плавки № 22376 с V

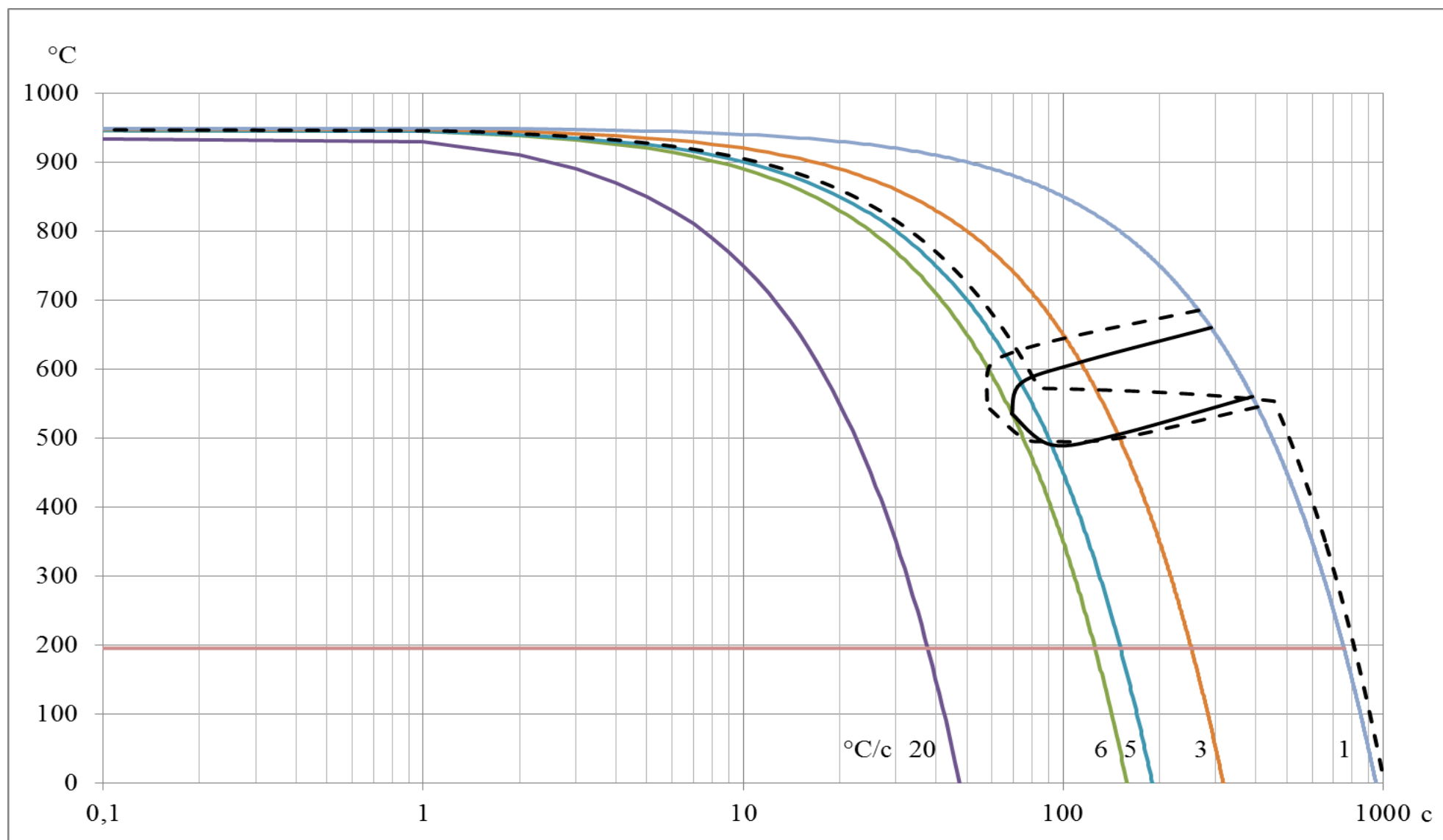


Рисунок 2.5 – Термокинетическая диаграмма распада аустенита рельсовой стали Э76ХФ плавки № 22674 с V

Максимальный эффект влияния деформации был установлен для металла с более высоким содержанием легирующих элементов плавки № 28551 с комплексным микролегированием V и Nb. При схеме эксперимента с двухступенчатой деформацией, температурный интервал перлитного превращения стал шире в 3 раза. При этом верхняя граница температурного интервала перлитного превращения сместилась вверх всего на 10 °С, однако нижняя граница опустилась на 100 °С.

Для умеренно легированного металла плавок № 22376 и № 22674, где в качестве микролегирующего элемента был использован только ванадий, влияние деформации на температурный интервал перлитного превращения одинаково. Верхняя граница температурного интервала перлитного превращения сместилась вверх всего на 10 °С и 30 °С, а нижняя граница опустилась на 60 °С и 20 °С соответственно.

При проведении экспериментальных исследований и анализа полученных результатов было установлено, что кинетика распада переохлаждённого аустенита различается при различных скоростях охлаждения.

При непрерывном охлаждении из аустенитной области со скоростями выше 7 – 8 град/с характерна полностью мартенситная структура.

Образцы, охлажденные со скоростями 1, 3 и 5 град/с исследовали при увеличении до 40000 крат после химического травления шлифов в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты.

Результаты исследования микроструктуры образцов представлены в таблице 2.2 и на рисунках 2.6 – 2.15. Из представленных данных видно, что полностью перлитная структура сформировалась только в образцах плавки № 22376, охлажденных со скоростью 1 и 3 град/с, и в одном образце плавки № 22851, охлажденном со скоростью 1 град/с (рисунок 2.6).

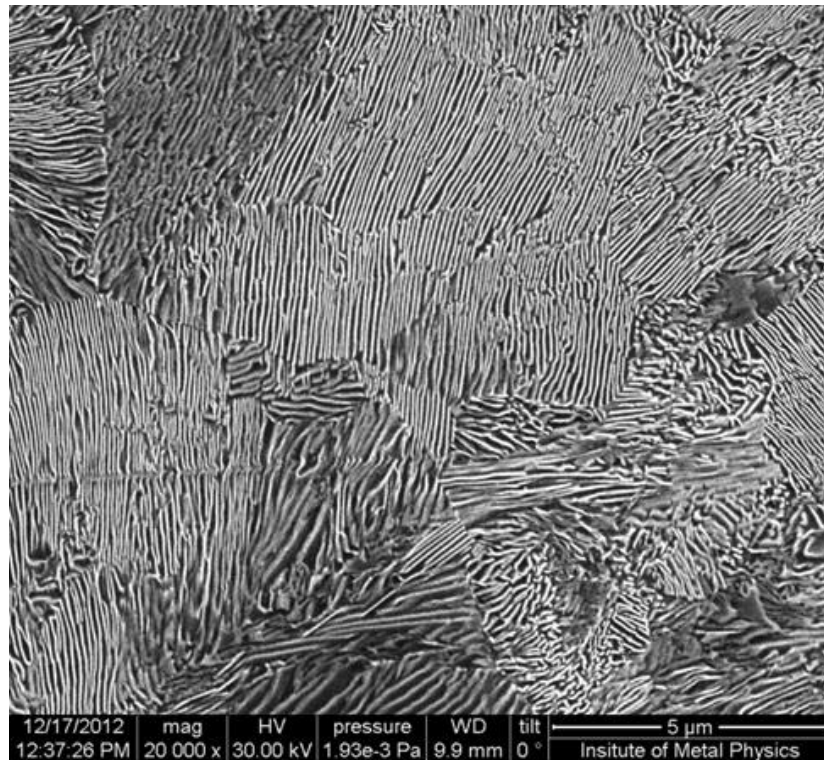
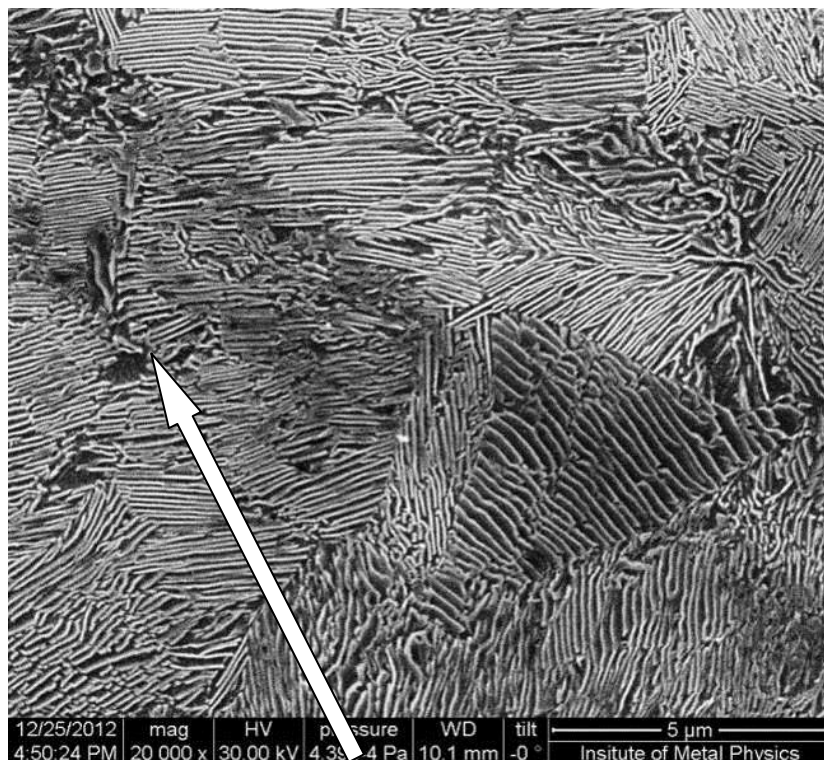
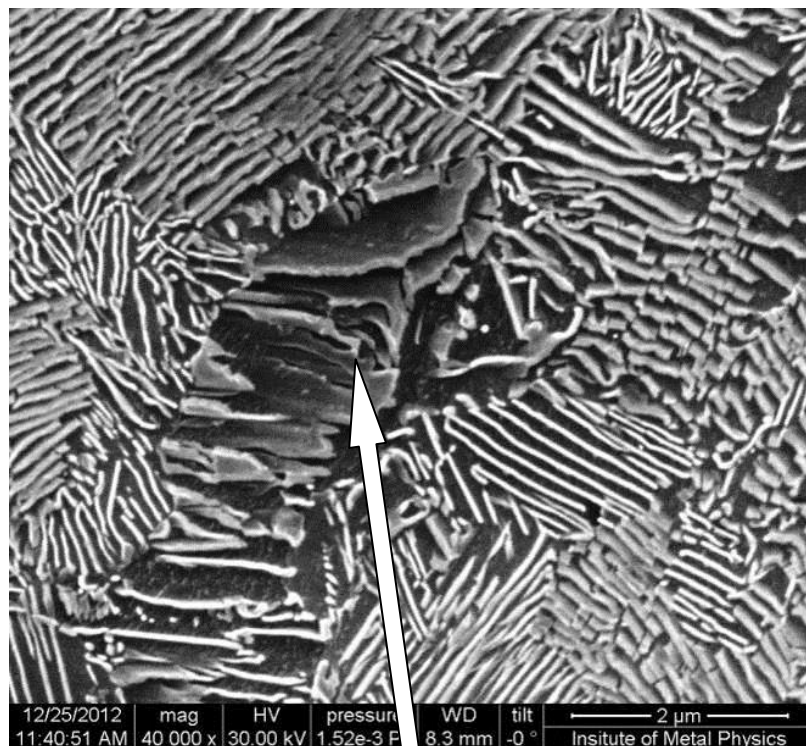


Рисунок 2.6 – Перлит в микроструктуре металла плавки № 22376  
(скорость охлаждения 3 град/с)



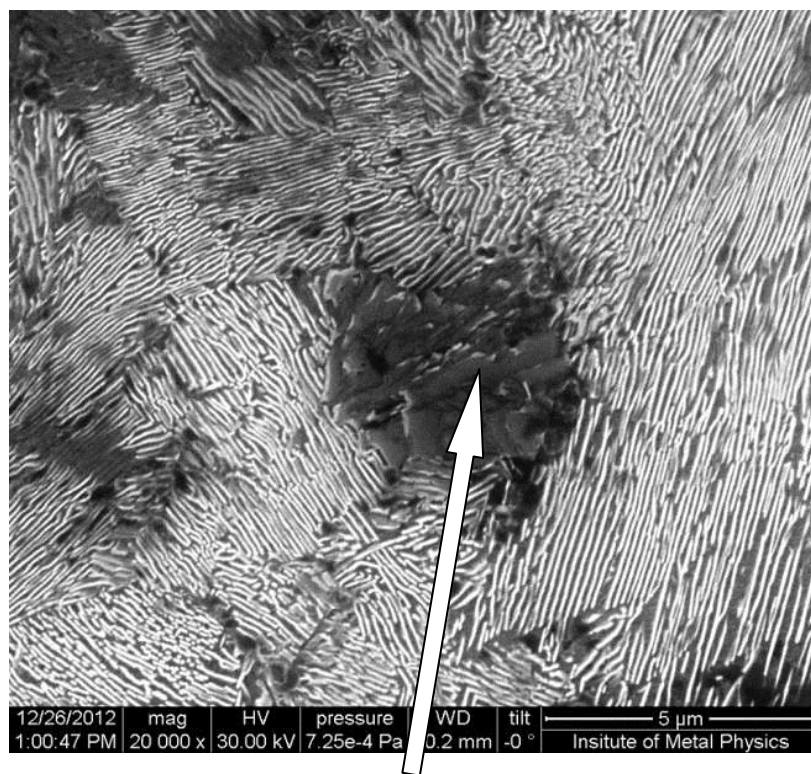
ферритная сетка

Рисунок 2.7 – Перлит в микроструктуре металла плавки № 22851  
(скорость охлаждения 1 град/с)



бейнит

Рисунок 2.8 – Бейнит в микроструктуре металла плавки № 22674  
(скорость охлаждения 3 град/с)



бейнит

Рисунок 2.9 – Бейнит в микроструктуре металла плавки № 22854  
( скорость охлаждения 3 град/с)

В образцах плавки № 22674, охлажденных со скоростью 1 и 3 град/с (рисунок 2.8), и в образце плавки № 22854, охлажденном со скоростью 3 град/с (рисунок 2.9), в структуре присутствует 1 – 3 % верхнего бейнита.

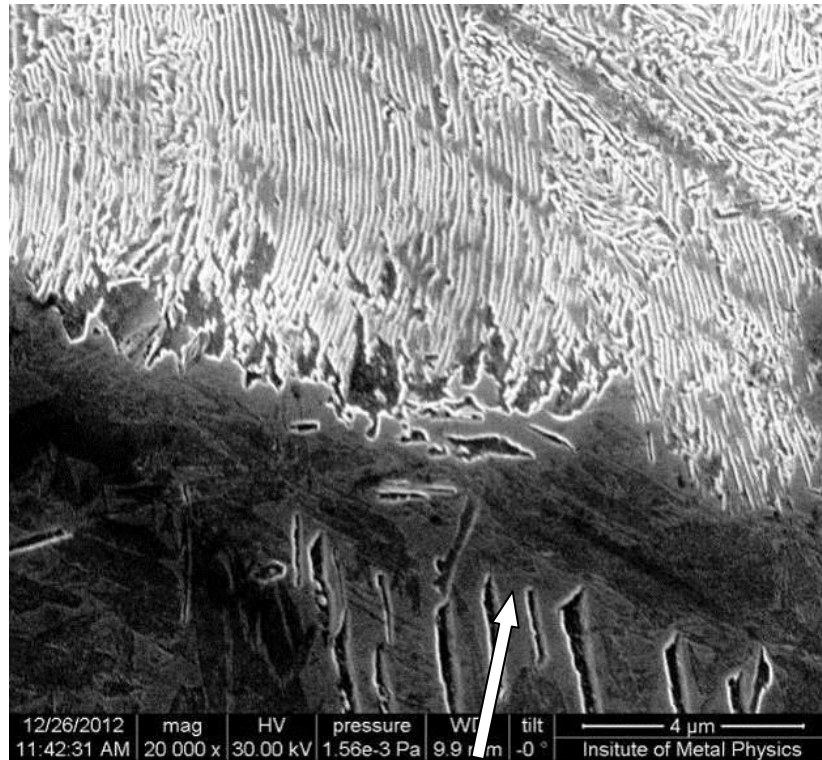
Следует отметить, что при исследовании микроструктуры в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685 с использованием оптического микроскопа определить 1 – 3 % бейнита невозможно, поэтому такая микроструктура будет оценена как удовлетворительная. Однако согласно результатам работы Е.А. Шура, эксплуатационная стойкость металла с более однородной структурой (т.е. в отсутствие локальных участков бейнита) будет выше.

В образцах плавок № 22376 (рисунок 2.10) и № 22674 (рисунок 2.11) значительное количество бейнита (преимущественно нижнего) и мартенсита образуется при скорости охлаждения 5 град/с.

В случае плавок № 22851 и № 22854 при охлаждении со скоростью 3 град/с около 50 % структуры – бейнит и мартенсит (рисунок 2.12), а при охлаждении со скоростью 5 град/с – игольчатые структуры являются основными (рисунок 2.13).

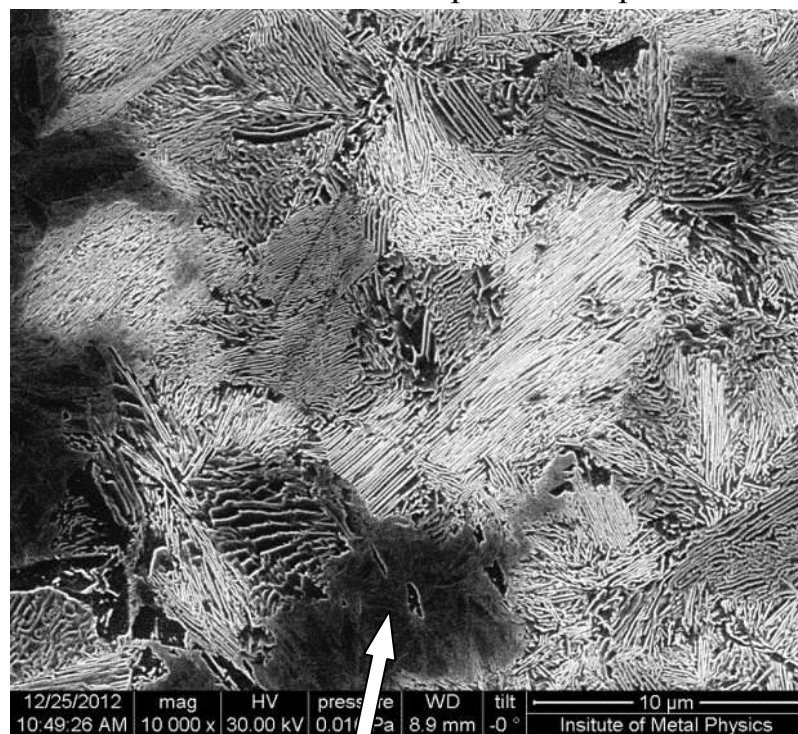
Образование значительного количества бейнитной и мартенситной структур в некоторой степени связано с высокой температурой начала охлаждения – 950 °С, что привело к значительной степени переохлаждения аустенита. При снижении температуры начала термообработки до ~ 800 – 850 °С будут созданы более благоприятные условия для формирования перлита.

Измерение параметров структуры (таблица 2.2.) показало, что межпластиночное расстояние и величина колоний перлита изменяются в достаточно узких пределах. Средняя величина межпластиночного расстояния изменяется в пределах 0,09 – 0,13 мкм, что сопоставимо с параметрами структуры рядовых рельсов отечественного и зарубежного производства – 0,08 – 0,12 мкм. С увеличением скорости охлаждения от 1 до 3 град/с и при формировании однородной перлитной структуры или до 50 % перлитной структуры отмечено уменьшение на 0,01 – 0,02 мкм среднего значения межпластиночного расстояния. С увеличением скорости охлаждения уменьшаются максимальные размеры перлитных колоний.



мартенсит и бейнит

Рисунок 2.10 – Микроструктура металла плавки № 22376, охлажденного со скоростью 5 град/с



мартенсит

Рисунок 2.11 – Микроструктура опытного металла плавки № 22674, охлажденного со скоростью 5 град/с



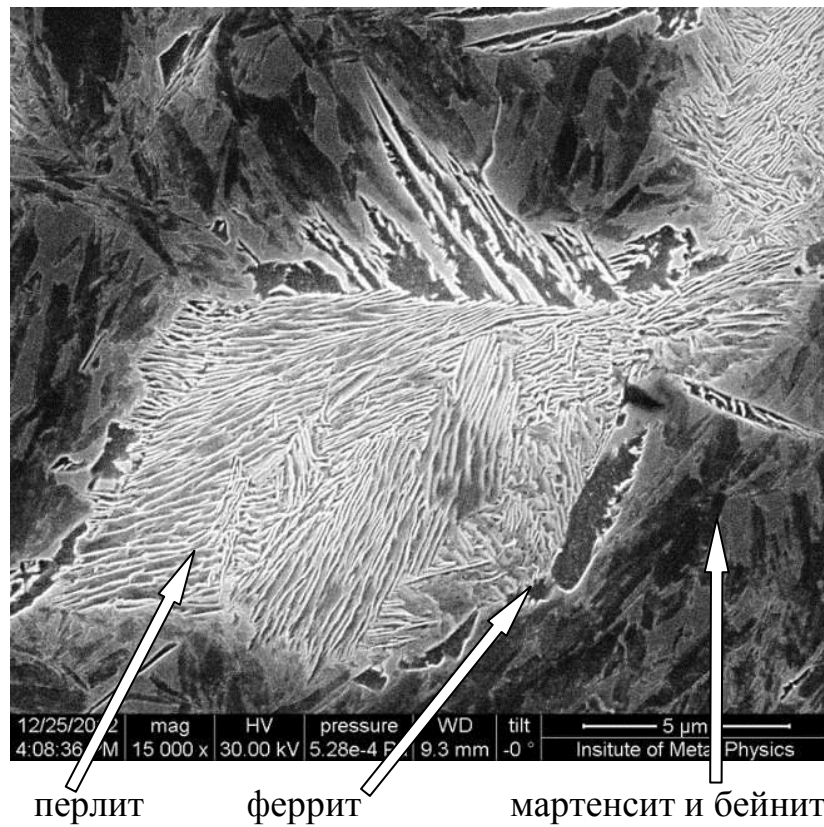


Рисунок 2.12 – Участки бейнита и мартенсита в микроструктуре металла плавки № 22851 (скорость охлаждения 3 град/с)

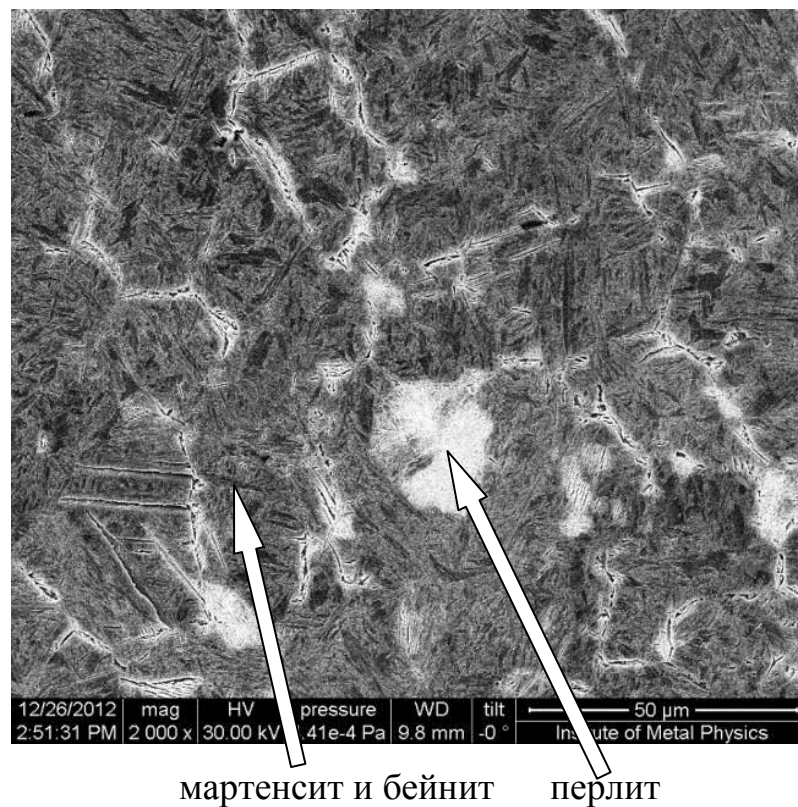
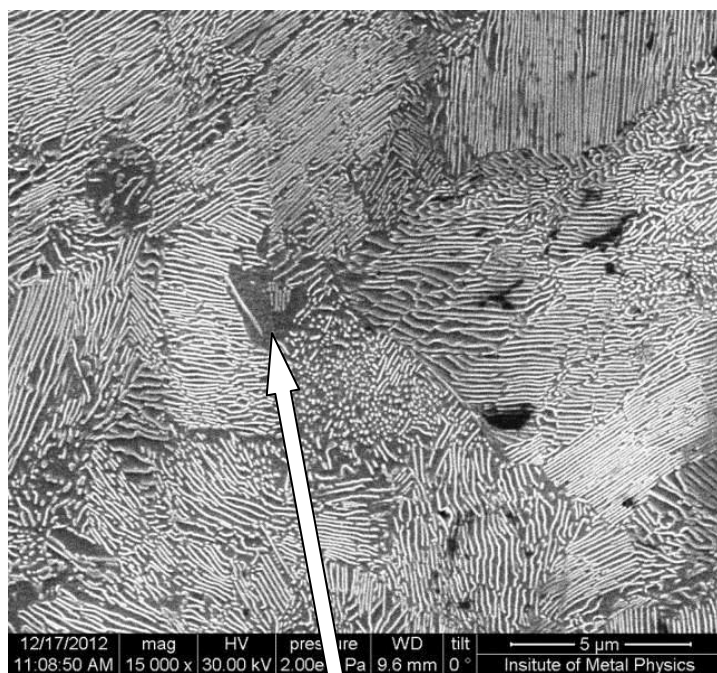


Рисунок 2.13 – Участки бейнита и мартенсита в микроструктуре металла плавки № 22854 (скорость охлаждения 5 град/с)

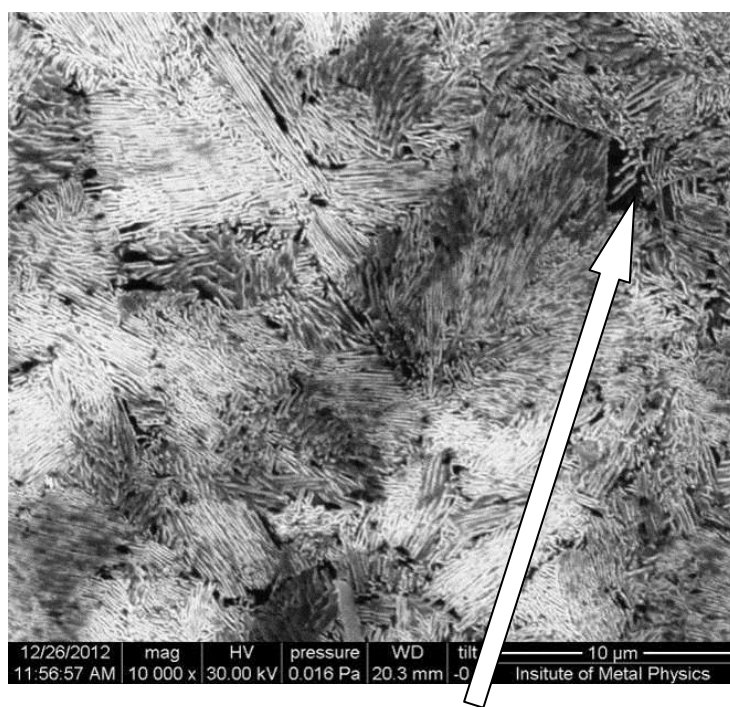


Феррит в исследуемых образцах опытных сталей представлен в виде отдельных зёрен (рисунок 2.14) и (или) в виде сетки по границам аустенитного зерна (рисунок 2.15).



зерно феррита

Рисунок 2.14 – Феррит в микроструктуре металла плавки № 22376 (скорость охлаждения 1 град/с)



ферритная сетка

Рисунок 2.15 – Феррит в микроструктуре металла плавки № 22854 (скорость охлаждения 5 град/с)

Таблица 2.2 – Параметры микроструктуры дилатометрических образцов

Номер плавки	Скорость охлаждения, град/с	Межпластиночное расстояние, мкм	Величина колони перлита, мкм	Наличие бейнита, мартенсита	Наличие избыточного феррита
22376	1	0,11(0,04 – 0,31)	3(0,5 – 13,8)	нет	Зерна и редко тонкая сетка
	3	0,10(0,06 – 0,16)	2(0,3 – 9,5)	нет	Тонкая сетка
	5	0,09(0,05 – 0,19)	2(0,1 – 10,5)	мартенсит и бейнит (30%)	Сетка
22674	1	0,12(0,05 – 0,24)	3(0,2 – 19)	бейнит (1 – 3 %)	Зерна и тонкая сетка
	3	0,10(0,06 – 0,24)	2(0,2 – 9,7)	бейнит (1 – 3 %)	Тонкая сетка
	5	0,10(0,04 – 0,25)	2(0,2 – 11,9)	мартенсит и бейнит (10 %)	Сетка
22851	1	0,10(0,07 – 0,18)	2(0,2 – 12)	Нет	Сетка
	3	0,09(0,06 – 0,22)	2(0,14 – 8,6)	мартенсит и бейнит (50 – 60 %)	Зерна и сетка
	5	0,09(0,07 – 0,11)	1(0,2 – 4,5)	мартенсит и бейнит (95 %)	Зерна вокруг редких колоний перлита
22854	1	0,13(0,09 – 0,21)	3(0,2 – 13,9)	бейнит (1 – 3 %)	Тонкая сетка
	3	0,10(0,06 – 0,16)	2(0,2 – 10,7)	мартенсит и бейнит (50 %)	Сетка
	5	0,12(0,04 – 0,33)	2(0,3 – 9,2)	мартенсит и бейнит (95 %)	Сетка

Таким образом, наиболее однородная микроструктура в более широком диапазоне скоростей охлаждения (1 – 3 град/с) обеспечивается в металле плавки № 22376 экономнолегированной хромом, марганцем, кремнием, ванадием в количестве 0,46, 0,78, 0,55 и 0,07 % соответственно.

На следующем этапе провели исследование прокаливаемости рельсовой стали, указанных выше четырёх опытных плавок стали.

#### 2.4 Анализ результатов исследования прокаливаемости и температурно-временных условий охлаждения рельсовой стали

Кривые прокаливаемости стали плавок №№ 22376, 22674, 28551, 28554 приведены на рисунках 2.16 – 2.19 (твёрдость представляет собой среднее значение замеров на 4 поверхностях). По результатам исследований было определено, что наибольшей прокаливаемостью обладает сталь плавки № 28551 с наиболее высоким содержанием марганца и содержанием хрома 0,57 %.

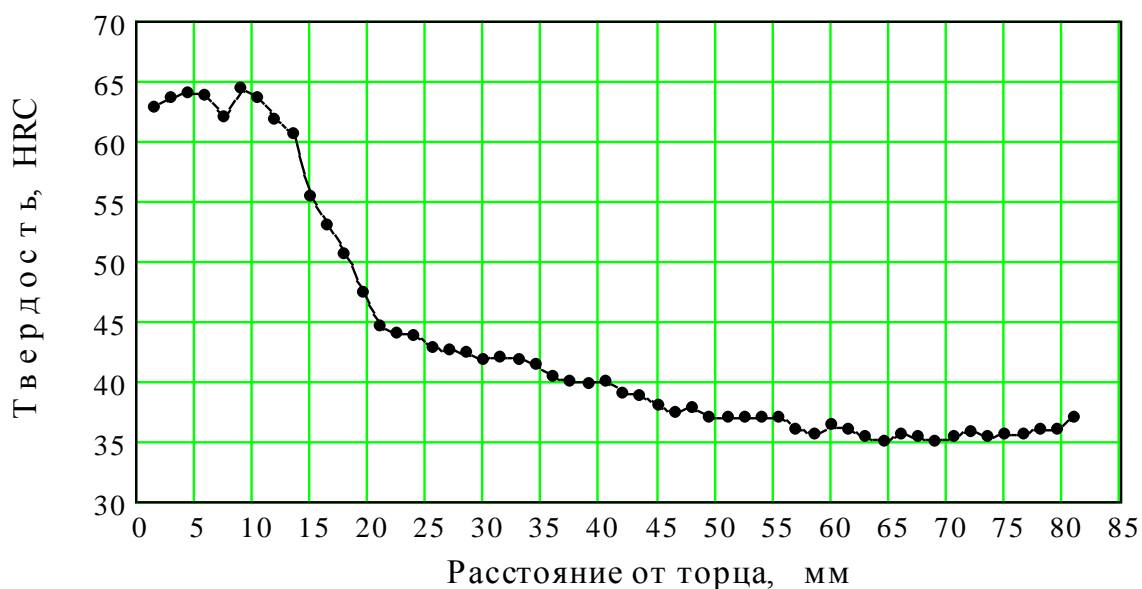


Рисунок 2.16 – Изменение твердости по длине образца из стали плавки № 22376

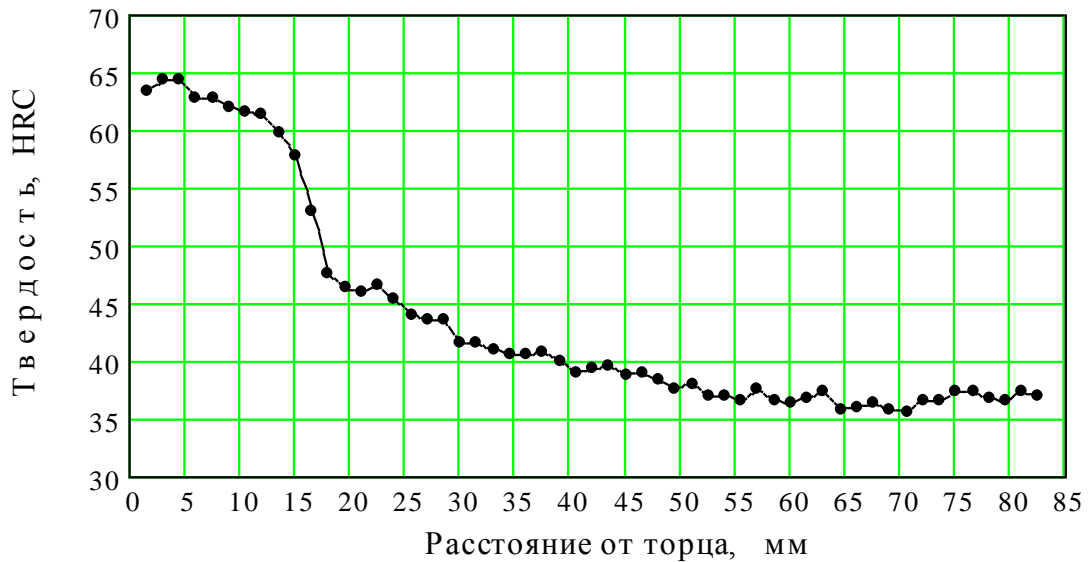


Рисунок 2.17 – Изменение твердости по длине образца из стали плавки № 22674

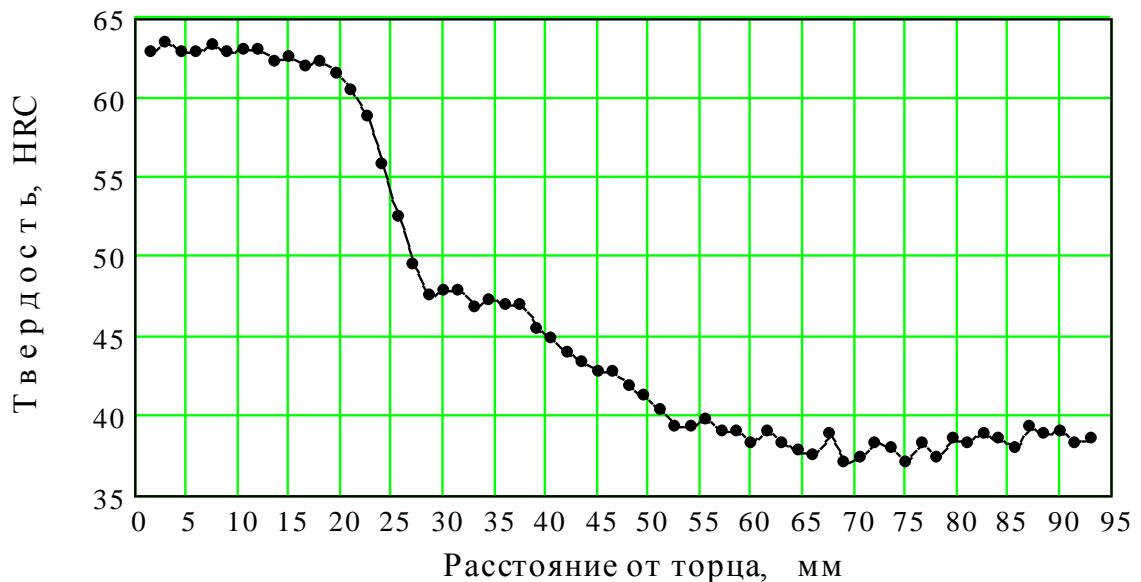


Рисунок 2.18 – Изменение твердости по длине образца из стали плавки № 28551

На основании проведенных измерений по длине образцов выбраны участки, твердость которых меньше твердости, требуемой от термоупрочненных рельсов, соответствует ей и превышает её. Учитывали ориентировочные соотношения твердости по Роквеллу и по Бринеллю: 352 HB ~ соответствует 38 HRC, 401 HB – 42 HRC, 429 HB – 45 HRC [151].

На аналогичных незакаленных образцах в выбранных участках по оси образцов приварены термопары, соединены с системой измерения температуры и проведено термометрирование в характерных точках. К каждому образцу прива-

ривали по 3 термопары так, чтобы расстояние между контролируемыми точками было не менее 10 мм. Расстояние от охлаждаемого торца до контролируемых точек приведено в таблице 2.3.

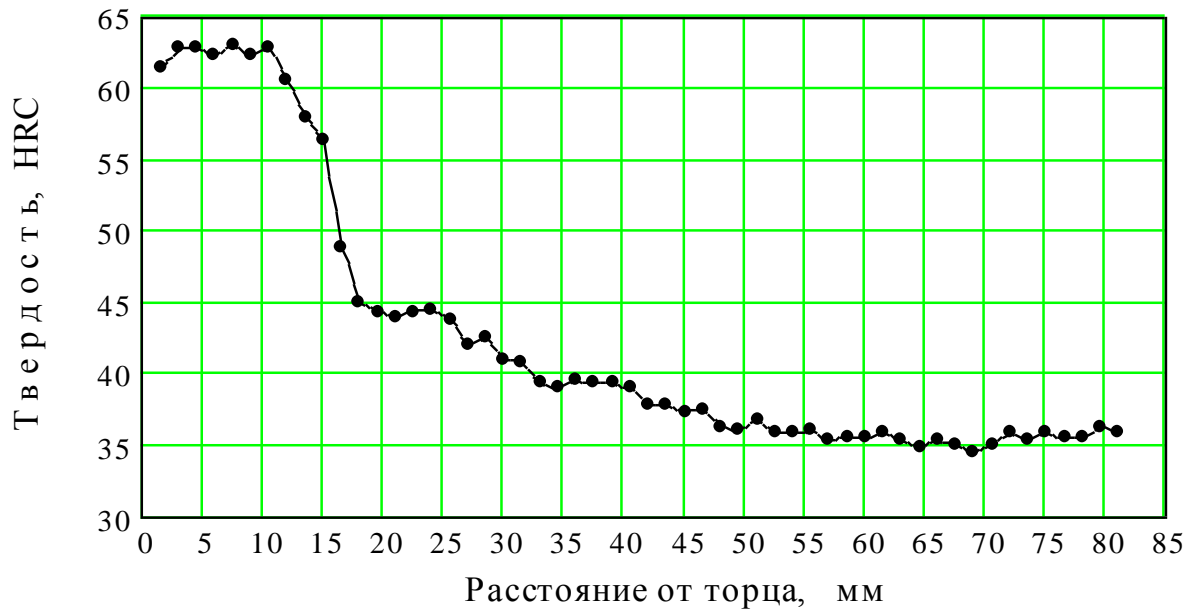


Рисунок 2.19 – Изменение твердости по длине образца из стали плавки № 28554

По представленному выше режиму проведена закалка образцов. На рисунке 2.20 на примере плавки № 28554 представлен режим охлаждения – изменение температуры в трех контролируемых по длине образца точках при охлаждении от температуры 1000 °С.

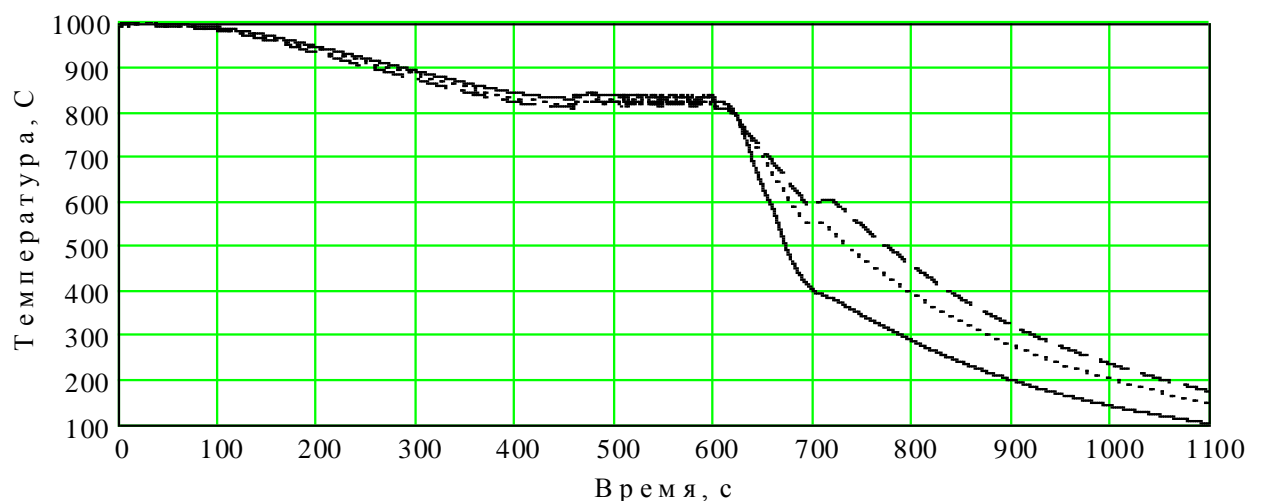


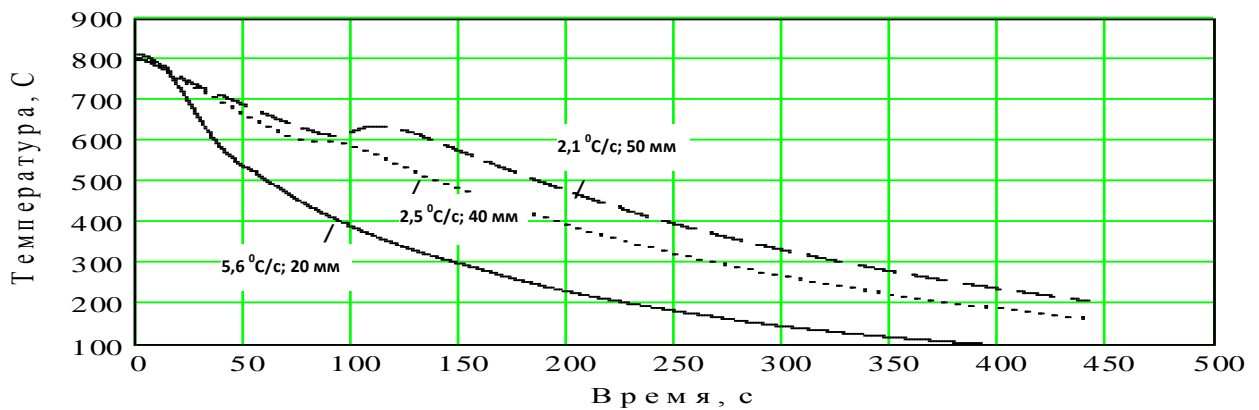
Рисунок 2.20 – Изменение температуры в трех точках по длине образца из стали плавки № 28554

Таблица 2.3 – Микроструктура и твердость, соответствующие различным скоростям охлаждения

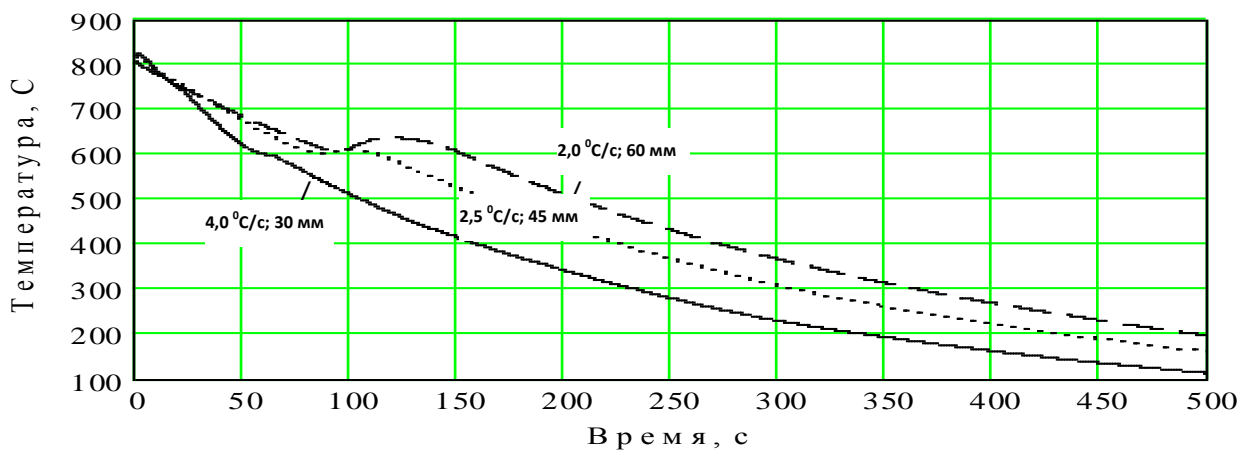
Номер плавки	Расстояние от торца, мм	Скорость охлаждения, град/с	T <sub>нпп</sub> , °C	τ, с	Микроструктура			Твердость, НВ
					мартенсит и бейнит	перлит	свободный феррит	
22376	20	5,6	-	-	~50 %	+	+	444-444-429
	30	4,0	610	54	~1%	+	+	395-401-395
	40	2,5	601	79	-	+	+	375-373-366
	45	2,5	604	87	-	+	+	371-375-363
	50	2,1	613	92	-	+	+	352-347-363
	60	2,0	608	94	-	+	+	335-341-331
22674	25	5,0	-	-	~30-40%	+	+	444-461-415
	30	3,7	564	69	~1 %	+	+	409-411-411
	35	3,0	579	82	редко встречающиеся вкрапления мартенсита	+	+	401-401-409
	45	2,4	599	86	-	+	+	375-375-368
	50	2,3	601	94	-	+	+	363-350-347
	55	-	-	-	-	+	+	344-341-341
28551	35	2,8	-	-	~80%, мартенсит преобладает	по границам участков мартенсита	+	495-477-469
	40	2,5	-	-	~40-50%	+	+	441-438-438
	45	2,4	-	-	~3-5%	+	+	429-429-415
	50	2,2	574	109	-	+	+	395-395-388
	60	2,0	591	114	-	+	+	375-375-363
	65	-	-	-	-	+	+	363-357-359
28554	20	4,8	-	-	100 % , мартенсит преобладает	-	-	601-601-601
	25	4,5	-	-	100 %, мартенсита и бейнита поровну	-	-	444-438-429
	30	3,1	-	-	~5%	+	+	398-415-409
	35	3.0	583	80	редко встречающиеся вкрапления мартенсита	+	+	401-398-388
	40	2,5	590	87	-	+	+	375-375-370
	45	2,5	596	88	-	+	+	363-352-359

Изменение температуры в процессе закалки от 820 °С приведено на рисунках 2.21 – 2.24. Обработка данных, полученных с помощью системы измерений температуры, позволяет оценить скорость охлаждения металла в участках закрепления термопар. По результатам экспериментов определяли среднюю скорость в начальный период охлаждения – от температуры начала охлаждения до температуры начала превращения (таблица 2.3).

После закалки образцы были разрезаны поперек таким образом, чтобы место пайки термопары совпало с разрезаемой поверхностью. После чего, по полученным поперечным плоскостям готовили микрошлифы, оценивали структуру и проводили измерение твердости методом Бринелля.



а

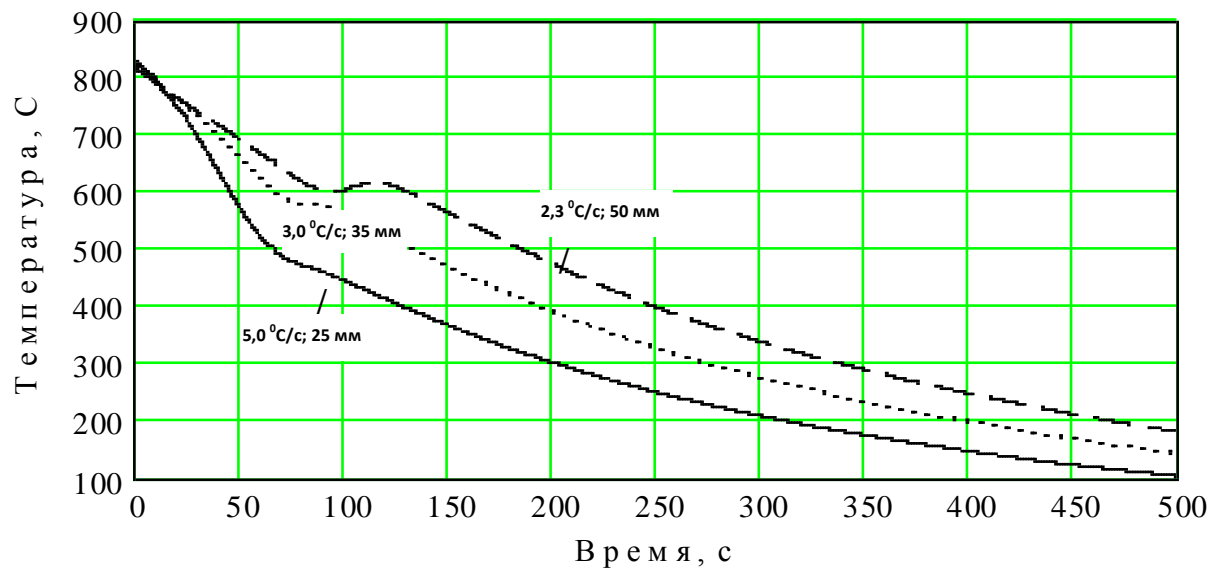


б

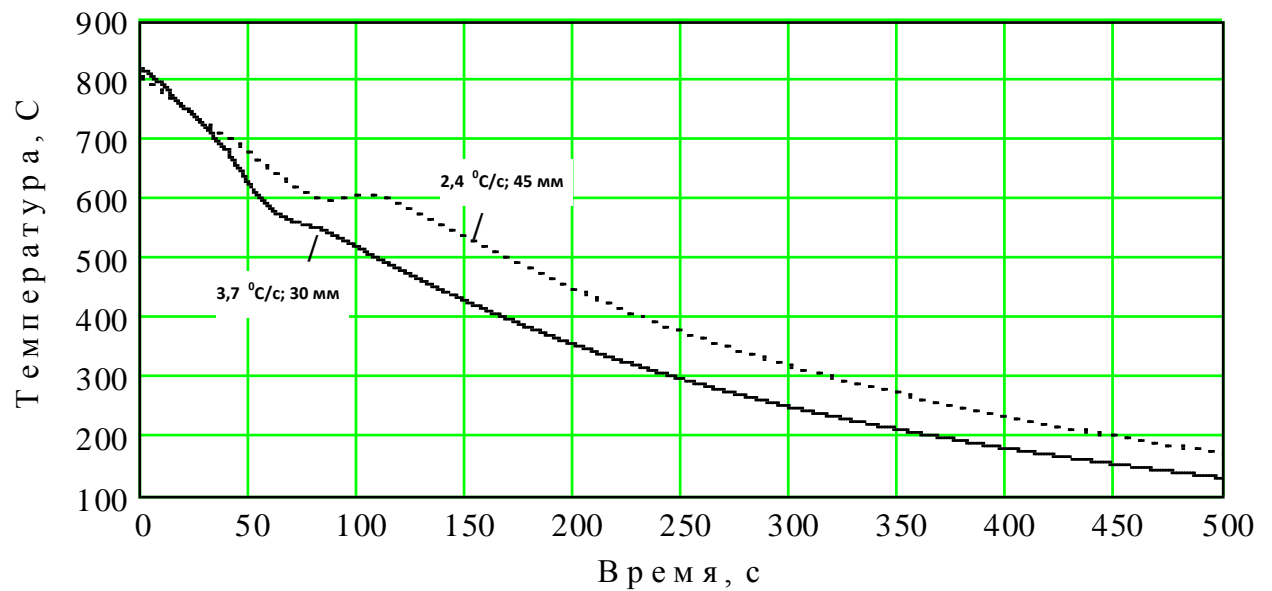
а – сторона 1;

б – сторона 2

Рисунок 2.21 – Изменение температуры образцов из стали плавки № 22376 при охлаждении (цифры у кривых – скорость охлаждения, град/с; расстояние от торца образца)



а



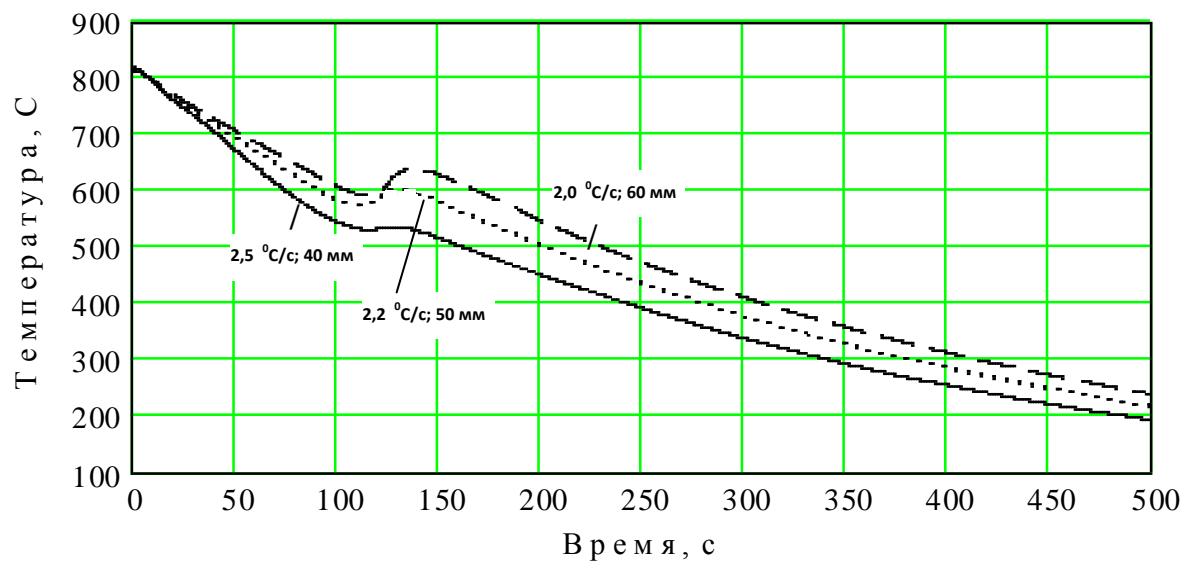
б

а – сторона 1;

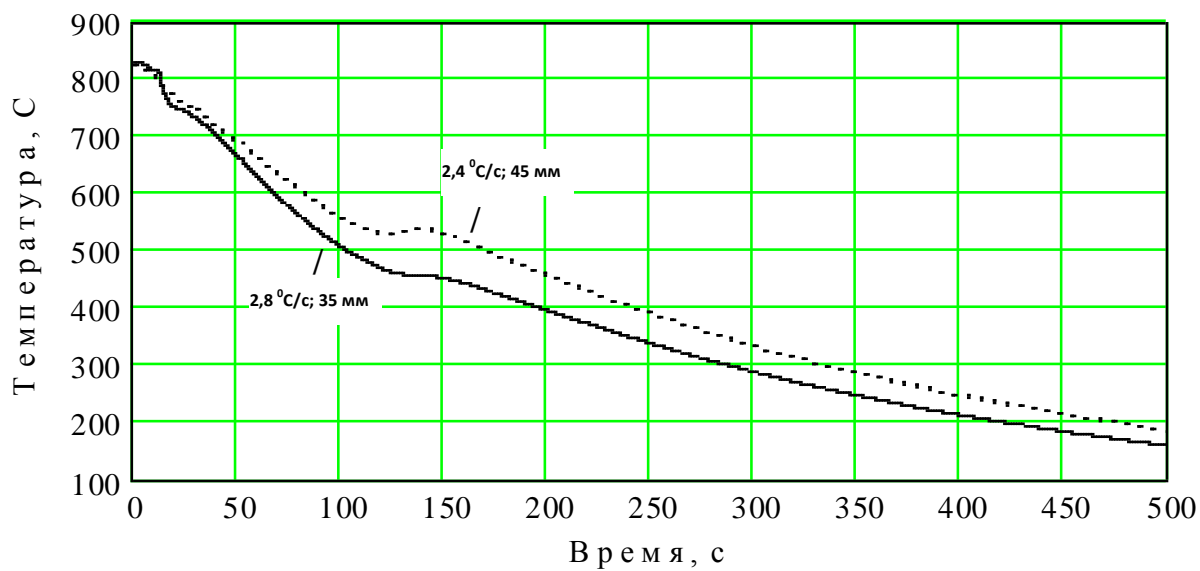
б – сторона 2

Рисунок 2.22 – Изменение температуры образцов из стали плавки № 22674 при охлаждении (цифры у кривых – скорость охлаждения, град/с; расстояние от торца образца)





а

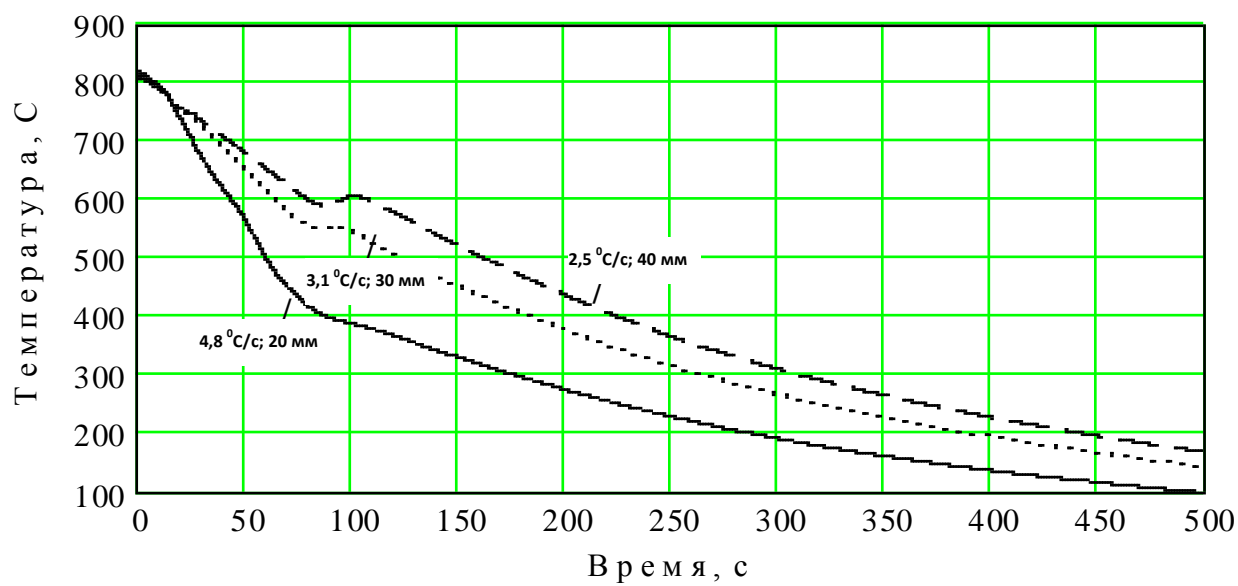


б

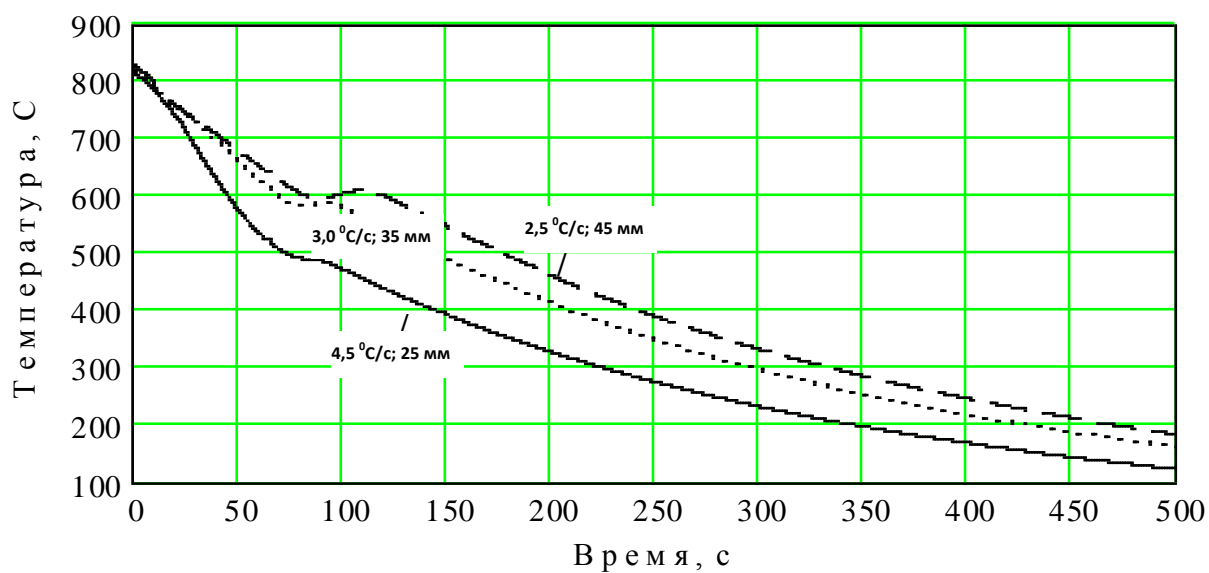
а – сторона 1;

б – сторона 2

Рисунок 2.23 – Изменение температуры образцов из стали плавки № 28551 при охлаждении (цифры у кривых – скорость охлаждения, град/с; расстояние от торца образца)



а



б

а – сторона 1;

б – сторона 2

Рисунок 2.24 – Изменение температуры образцов из стали плавки № 28554 при охлаждении (цифры у кривых – скорость охлаждения, град/с; расстояние от торца образца)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в образцах из стали плавки № 22376 полностью перлитная структура без мартенсита и бейнита получена в тех сечениях, средняя скорость охлаждения которых до начала перлитного превращения не превышала 2,5 град/с (таблица 2.3). С учетом того, что при охлаждении со скоростью 4,0 град/с в структуре присутствует только ~ 1 % мартенсита и бейнита, можно считать, что предельно возможная скорость охлаждения для получения перлита составляет 3,0 – 3,5 град/с.

В образцах из стали плавки № 22674 и № 28554 полностью перлитная структура получена в сечениях, скорость охлаждения которых составляет 2,4 – 2,5 град/с. Вследствие того, что при охлаждении образцов этих плавки со скоростью 3 град/с получена перлитная структура с редкими включениями мартенсита, вероятно наибольшая скорость образования перлита без участков игольчатой структуры составляет 2,7 – 2,8 град/с.

Для образцов из стали плавки № 28551, отличающейся наибольшей прокаливаемостью, однородная перлитная структура без мартенсита и бейнита сформировалась при охлаждении со скоростями не более 2,2 град/с. При охлаждении со скоростью 2,4 град/с в структуре уже присутствуют участки мартенсита.

В таблице 2.3 для сечений образцов, в которых полностью перлитная структура или преобладает перлит, приведены температура  $T_{\text{нпп}}$  начала перлитного превращения и продолжительность  $\tau$  охлаждения от 820 °С до начала перлитного превращения. Начало перлитного превращения определяли на графиках изменения температуры при охлаждении образцов: началу перлитного превращения соответствует замедление или приостановка падения температуры, что вызвано выделением тепла во время превращения.

Результаты измерения твердости в плоскости крепления термопары показали, что наибольшая твердость полностью перлитной структуры для плавки № 22376, 22674 и 28554 составила 375НВ, а для плавки № 28551 – 395НВ. Эти значения твердости соответствуют наибольшим скоростям, при которых получена однородная перлитная структура в данном исследовании. Как следует из таблицы 2.3, для плавки № 22376, 22674 и 28554 существует возможность некоторого

повышения скорости охлаждения без опасности образования игольчатой структуры и, следовательно, получения более высокой твердости.

## 2.5 Выводы по главе

1. Сравнение ТКД распада переохлажденного аустенита четырех плавок после различных схем ТМО показало, что область перлитного превращения зависит от содержания легирующих и микролегирующих элементов, режимов горячей деформации и последеформационной термообработки.

2. Мартенситное превращение для исследуемой стали марки Э76ХФ находится в интервале температур 195 – 225 °С, однако было установлено, что комплексное микролегирование Nb и V, снижает температуру начала мартенситного превращения на 10 – 15 °С.

3. Удовлетворительная микроструктура, состоящая из перлита и локальных участков бейнита в количестве 1 – 3 % (не разрешимых при исследовании на световом микроскопе), наблюдается в стали:

- микролегированной ванадием в количестве 0,07 % и охлажденной со скоростью 1 – 3 град/с;

- комплексно легированной ванадием в количестве 0,04 % и ниобием в количестве 0,035 – 0,060 %, охлажденной со скоростью 1 град /с.

4. Полностью перлитная микроструктура, без бейнита и мартенсита сформировалась при охлаждении металла плавки № 22376 со скоростью до 3 град/с и плавки № 22851 при охлаждении со скоростью 1 град/с.

5. Средняя величина межпластиночного расстояния в исследуемом металле всех плавок изменяется в пределах 0,09 – 0,13 мкм, что сопоставимо с параметрами структуры металла рядовых рельсов отечественного и зарубежного производства – 0,08 – 0,12 мкм.

6. С увеличением скорости охлаждения от 1 до 3 град/с и при формировании однородной перлитной структуры или до 50 % перлитной структуры отмечено уменьшение на 0,01 – 0,02 мкм среднего значения межпластиночного расстояния.

7. Наиболее благоприятной схемой ТМО для всех четырех плавов по результатам работ является использование схемы двух- и более ступенчатой деформации со степенью свыше 50 %, скоростью охлаждения 5 – 6 град/с до температуры, лежащей в интервале 630 – 510 °С и последующим охлаждением на воздухе в условиях естественной конвекции.

9. Максимальная предельно допустимая скорость охлаждения металла при которой формируется полностью перлитная структура отмечена в металле плавки № 22376 и составляет 3,5 град/с.

10. Наибольшая прокаливаемость отмечена у металла плавки № 28551 наиболее сильно легированного марганцем и хромом, при умеренном содержании кремния. Максимально допустимая скорость охлаждения металла данной плавки без образования нежелательных игольчатых включений составляет 2,2 град/с.

11. Максимально допустимая скорость охлаждения металл плавов №№ 28554 и 22674 с обеспечением перлитной структуры составляет 2,8 град/с.

Таким образом, формирование однородной перлитной структуры в более широком диапазоне скоростей охлаждения происходит в металле плавки № 22376.

### 3 Моделирование процессов воздушоструйной термической обработки рельсов с использованием тепла печного нагрева и остаточного тепла предпрокатного нагрева

#### 3.1 Методика экспериментальных исследований и применяемое оборудование

Нагрев рельсовых проб при проведении экспериментов по термической обработке с печного нагрева проводили в газовой печи до температуры 900 – 950 °С.

При проведении экспериментов по термической обработке рельсовых проб с использованием тепла прокатного нагрева выбран температурный режим максимально соответствующий реально действующим производственным условиям, схематично представленным на рисунке 3.1, для этого рельсовые пробы отбирали на пилах горячей резки при температурах ~ 950 – 1000 °С, подстуживали до температуры начала закали 750 – 900 °С, и подвергали ускоренному охлаждению в среде сжатого воздуха.

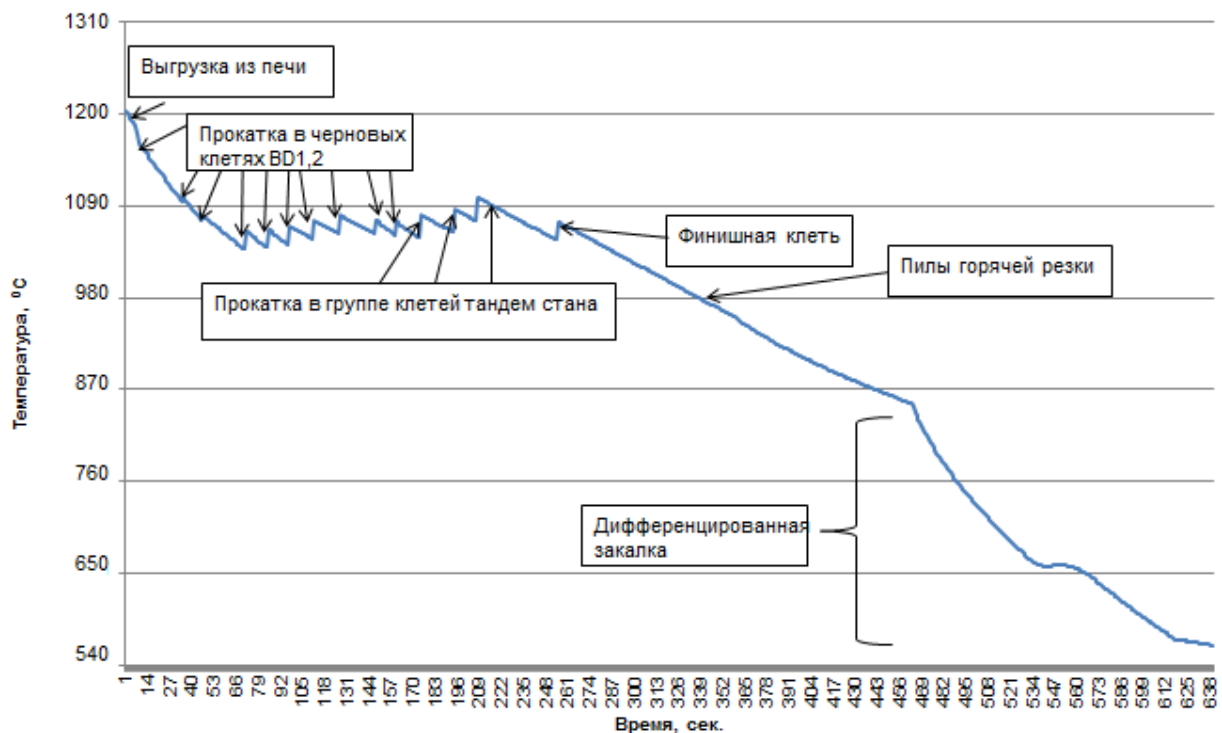


Рисунок 3.1 – Температура рельсового раската в процессе прокатки и термообработки

Экспериментальные исследования по термообработке рельсовых проб с отдельного (печного) и остаточного тепла предпрокатного нагрева проводили на опытной установке, предназначенной для воздушоструйной дифференцированной термической обработки проб рельсов типа Р65 длиной до 400 мм. Внешний вид установки представлен на рисунке 3.2. Установка состоит из трех перфорированных коробов расположенных над поверхностью головки рельса. Короба закреплены на станине с возможностью регулировки расстояния между коробом и охлаждаемой поверхностью. В конструкции коробов предусмотрено крепление для манометров. К каждому коробу подведен шланг от распределительного устройства, с отдельным регулирующим краном. К распределительному устройству подведен сжатый магистральный воздух с каналом большего сечения.

К перфорированной области коробов прикреплена пластина с соосными перфорации отверстиями. Система перфорации короба и отверстий в прикрепленной пластине образуют совокупность сопел. Диаметр сопел составляет 5 мм. Сопла расположены в шахматном порядке, в 4 ряда над поверхностью катания головки рельса, и 3 ряда напротив боковых поверхностей головки рельса.

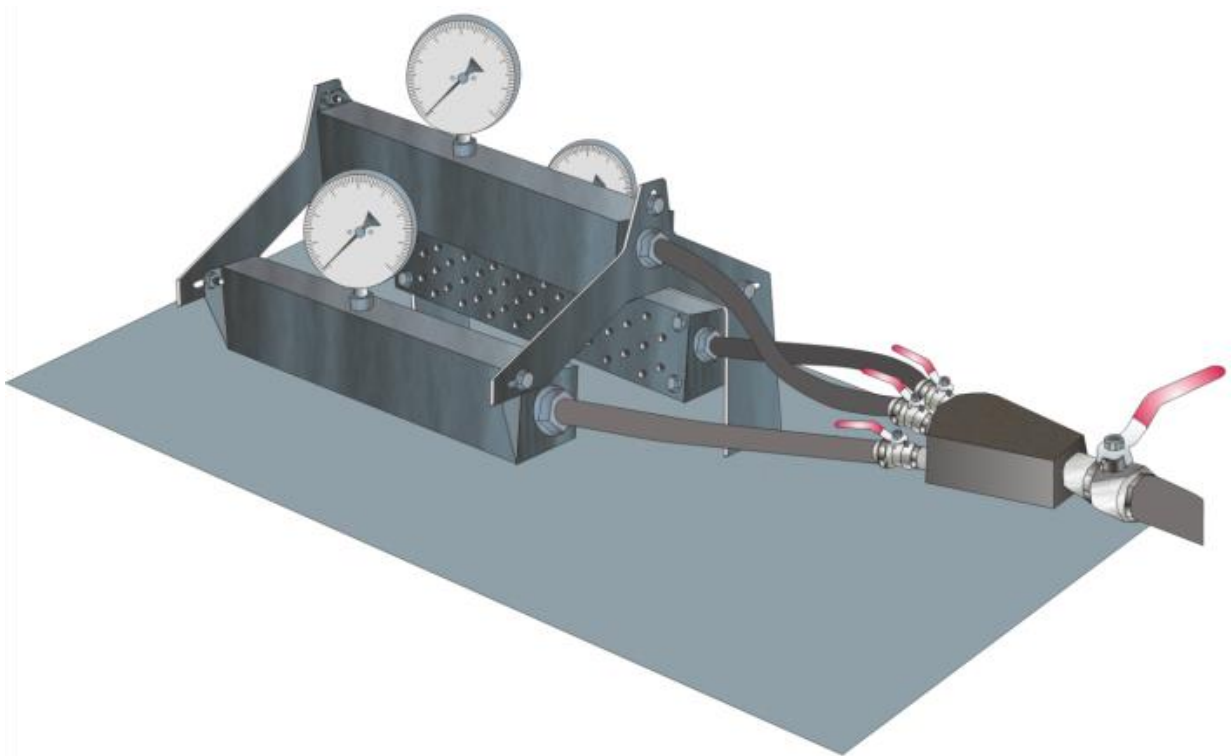


Рисунок 3.2 –Внешний вид опытной установки для воздушоструйной дифференцированной термической обработки рельсовых проб

В процессе проведения эксперимента зазор между поверхностью сопел и охлаждаемой поверхностью устанавливали равным 50 мм. Конфигурация и размер сопел, расстояние между поверхностью сопел и охлаждаемой поверхностью соответствуют реально действующим промышленным установкам дифференцированной закалки, что подтверждает адекватность моделирования и гарантирует сопоставимость результатов эксперимента промышленным условиям.

Температура сжатого воздуха в процессе проведения экспериментов составила  $20 \pm 5$  °C, относительная влажность – 45 %.

Максимальное давление воздуха в установке при проведении опытов по термической обработке составляло:

- с отдельного печного нагрева – 30 кПа;
- с остаточного тепла предпрокатного нагрева (за счет большего давления в магистрали) – 60 кПа.

Температуру на поверхности проб в процессе проведения экспериментов фиксировали ручным инфракрасным пирометром типа Raynger MX.

Измерение скорости охлаждения по сечению рельсовой пробы проводили при помощи специально подготовленного полнопрофильного темплета, отобранного от рельса типа Р65, с высверленными на глубине 5 мм, 10 мм и 20 мм отверстиями. После нагрева темплета и выдержки до заданной температуры ( $\sim 900$  °C), предварительно подогретый конец термопары совмещали с отверстием в пробе и проводили ускоренное охлаждение по различным режимам.

Термическую обработку с отдельного печного нагрева производили на пробах длиной 400 мм, отобранных от горячекатаных железнодорожных рельсов типа Р65 опытных плавов №№ 25851, 25852, 25853, 25854 стали марки Э76ХФ дополнительно микролегированных ниобием в количестве до 0,06 %. После нагрева проб в газовой печи до температуры 800 – 930 °C, выдержки при этой температуре в течение 20 – 30 мин их подстуживали до температуры начала закалки, которую варьировали от 770 до 870 °C, и охлаждали сжатым воздухом при постоянном давлении от 10 до 25 кПа в течение 90 – 280 с. По окончании термообработки рельсы остывали до комнатной температуры в условиях естественной конвекции.



После проведения экспериментов от каждой пробы были отобраны в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685-2000: один темплет для измерения твердости на поверхности катания и по сечению головки и шейки рельса, образец для определения механических свойств при растяжении; образец для проведения испытания на ударный изгиб при комнатной температуре и при температуре – 60 °С, а также образец для контроля микроструктуры вырезанный в верхней части головки.

Испытание на твердость на поверхности катания и по сечению головки проводили методом Бринелля на твердомере типа ТШ-2М шариком диаметром 10 мм при нагрузке 3000 кгс в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685 по методике ГОСТ 9012 «Измерение твёрдости методом Бринелля».

Механические свойства при растяжении определяли на разрывной испытательной машине EU-40 с усилием в 10 т на разрывных цилиндрических образцах диаметром 6 мм и начальной расчётной длиной рабочей части 30 мм, приготовленных в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685 и ГОСТ 1497.

Испытание на ударный изгиб проводили на маятниковом копре МК-15 в соответствии с требованиями ГОСТ 9454 на стандартных образцах размером 10×10×55 мм с U-образным надрезом радиусом 1 мм и глубиной 2 мм при температурах +20 °С и минус 60 °С.

Микроструктуру металла выявляли методом электролитического полирования поверхности микрошлифа в 5 % уксусном растворе хлорной кислоты, и травлением в 4 % спиртовом растворе азотной кислоты.

Оценку величины действительного зерна производили по сетке феррита с поверхности, а также путем анализа изображений границ зёрен в темном поле, методом сравнения с эталонными шкалами ГОСТ 5639-82, с использованием программного обеспечения системы анализа изображений Siams 700.

Металлографические исследования проводили на световом инвертированном микроскопе «OlympusGX-71» анализом светлых и темных полей.

Электронномикроскопические исследования проводили на электронных микроскопах QUANTA-200 Philips и Tescan Mira 3LMH.

### **3.2 Исследование влияния давления воздуха на скорость охлаждения стали в различных участках по сечению головки рельсового профиля**

Так как при проведении приёмосдаточных испытаний на соответствие требованиям Российских и зарубежных стандартов, большинство свойств (механические свойства при растяжении, ударная вязкость, твердость) характеризующих качество рельсового металла, определяют, как правило, на глубине до 10 мм от поверхности катания, а качество закалки контролируют измерением твёрдости на глубине 22 мм, то для определения скорости охлаждения были выбраны точки расположенные на центральной оси симметрии рельса на расстоянии 10 и 22 мм от поверхности катания.

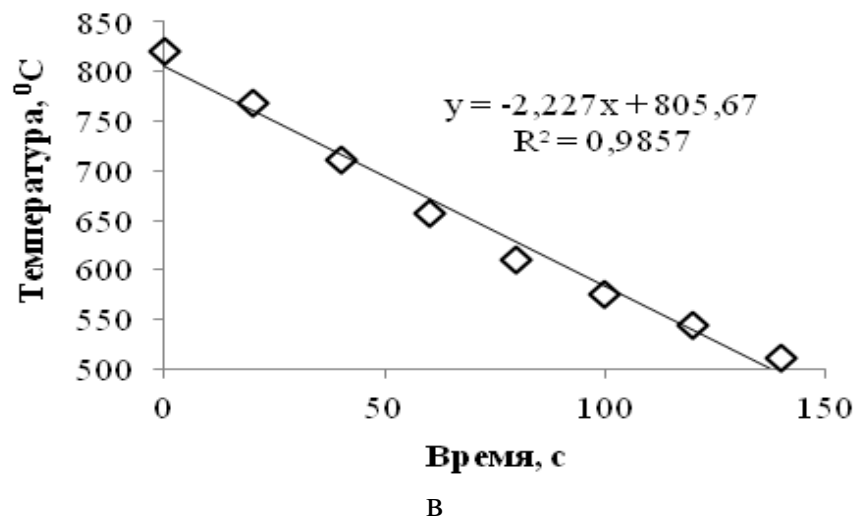
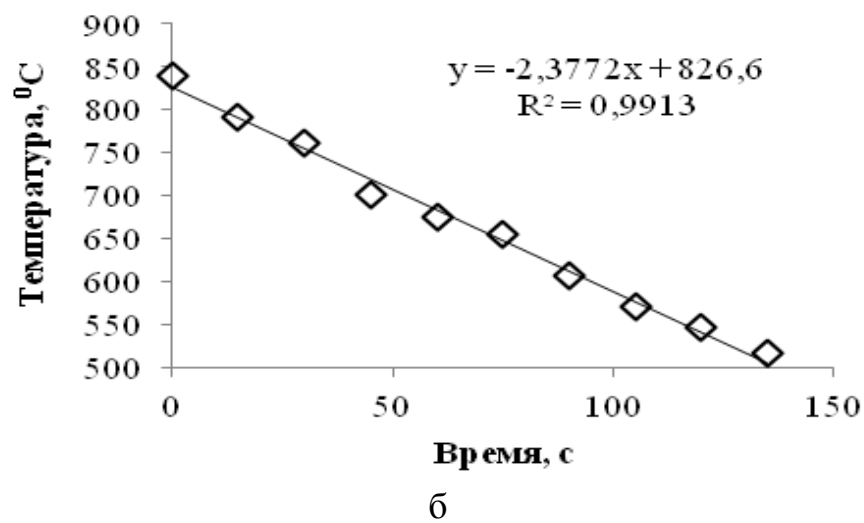
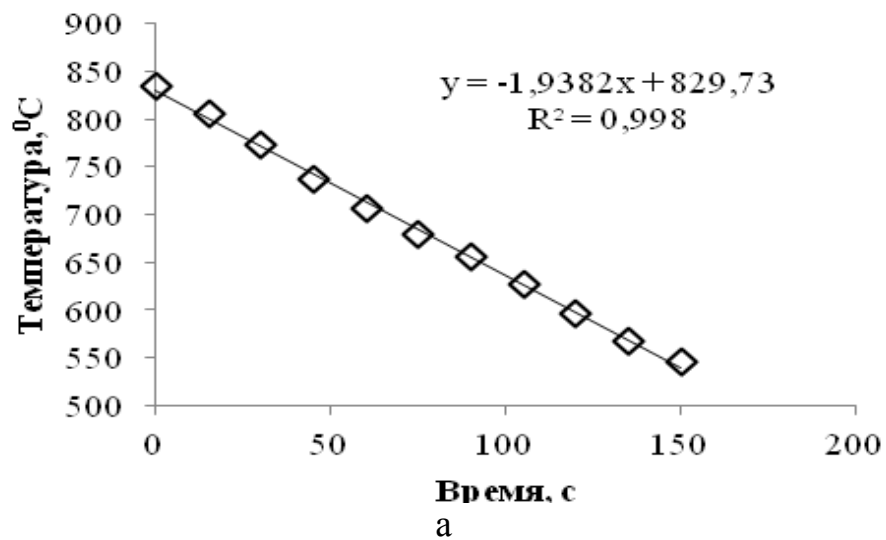
На рисунках 3.3 и 3.4 представлены результаты экспериментальных данных по определению зависимости изменения температуры металла рельсов на глубине 10 мм и 22 мм соответственно от поверхности катания головки (ПКГ) в процессе охлаждения в зависимости от давления воздуха.

Из представленных данных видно, что при давлении воздуха 10 кПа наблюдается минимальная скорость охлаждения в интервале температур перлитного превращения 700 – 600 °С составляющая ~ 1,83 град/с.

С увеличением давления до 15 и 22 кПа средняя скорость охлаждения увеличивается до 2,09 и 2,52 град/с соответственно.

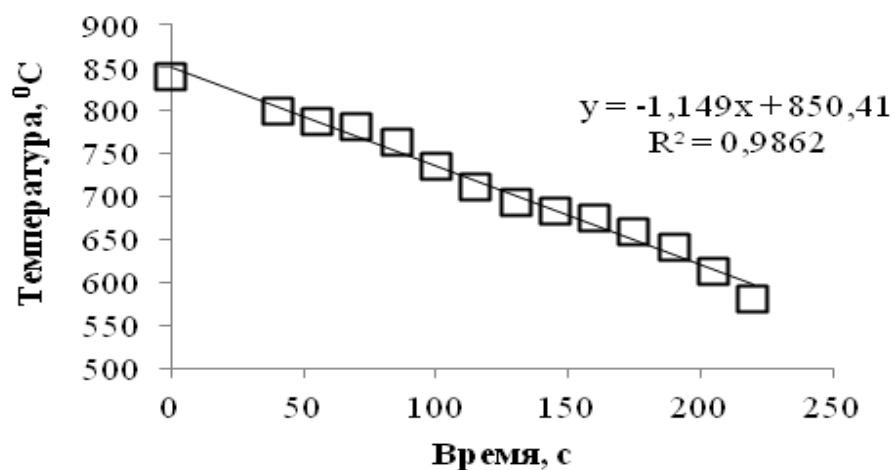
С увеличением расстояния до 22 мм от поверхности катания скорость охлаждения в интервале температур перлитного превращения уменьшается (рисунок 3.4) и составляет 1,1 град/с при 10 кПа, 1,31 град /с при 15 кПа и 1,63 град /с при 22 кПа.

Зависимость температуры от времени практически подчиняется линейному закону, с высокой величиной достоверности аппроксимации.

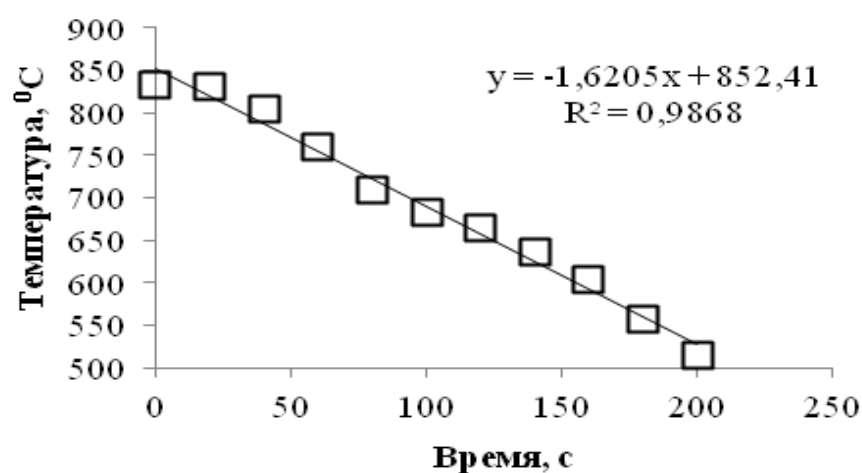


а – 10 кПа; б – 15 кПа; в – 22 кПа

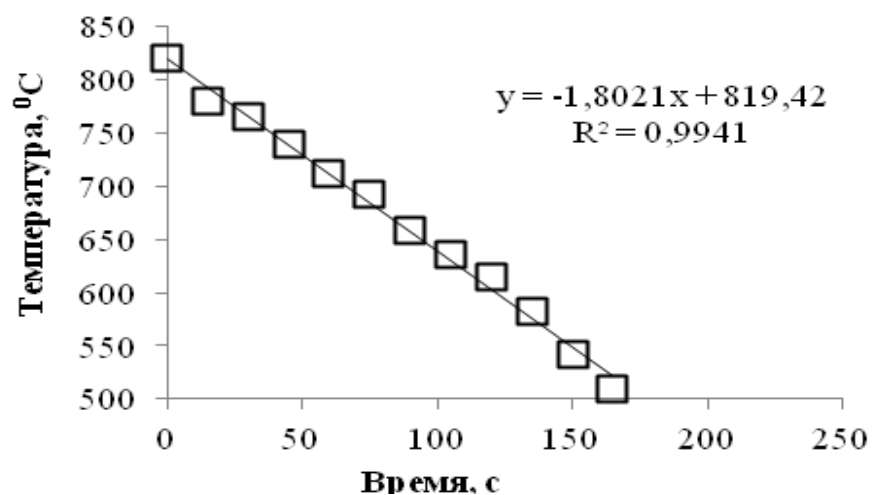
Рисунок 3.3 – Изменение температуры металла на глубине 10 мм от ПКГ в процессе охлаждения при различном давлении воздуха



а



б



в

а – 10 кПа; б – 15 кПа; в – 22 кПа

Рисунок 3.4 – Изменение температуры металла на глубине 22 мм от ПКГ в процессе охлаждения при различном давлении воздуха

На рисунке 3.5 представлено изменение скорости охлаждения металла головки рельсов на глубине 10 и 22 мм от поверхности катания в интервале перлитного превращения 700 – 600 °С в зависимости от давления воздуха.

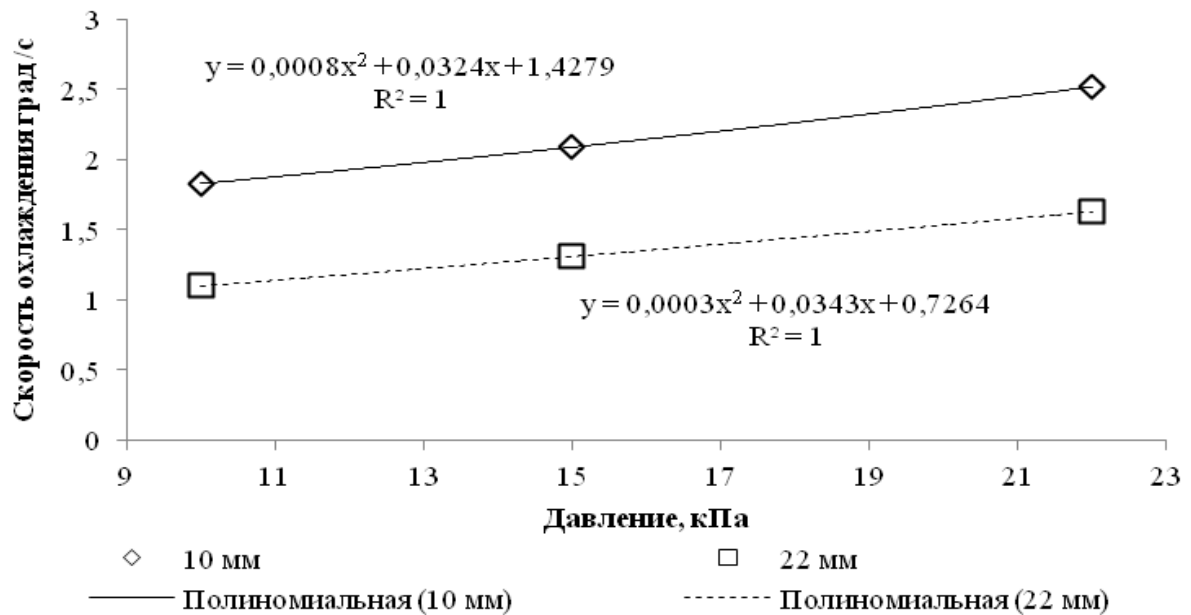


Рисунок 3.5 – Зависимость скорости охлаждения стали на глубине 10 мм и 22 мм от ПКГ от давления воздуха

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:

$$V_{\text{охл}10} = 1,4279 + 0,0324 P_{\text{ос}} + 8 \cdot 10^{-4} P_{\text{ос}}^2 \quad (3.1)$$

- на глубине 22 мм:

$$V_{\text{охл}22} = 0,7264 + 0,0343 P_{\text{ос}} + 3 \cdot 10^{-4} P_{\text{ос}}^2 \quad (3.2)$$

Для представленных выше выражений (3.1) и (3.2) отмечена высокая величина достоверности аппроксимации.

С целью определения рациональных режимов термической обработки, обеспечивающих получение оптимального комплекса свойств рельсового металла провели моделирование процессов закалки с отдельного (печного) и прокатного нагревов полнопрофильных рельсовых проб.

### 3.3 Исследование влияния режимов воздушоструйной термической обработки с использованием тепла повторного (печного) нагрева на структуру и свойства рельсов

Режимы термической обработки и результаты механических испытаний рельсового металла четырех плавов представлены в таблице 3.1 и на рисунках 3.6 – 3.14.

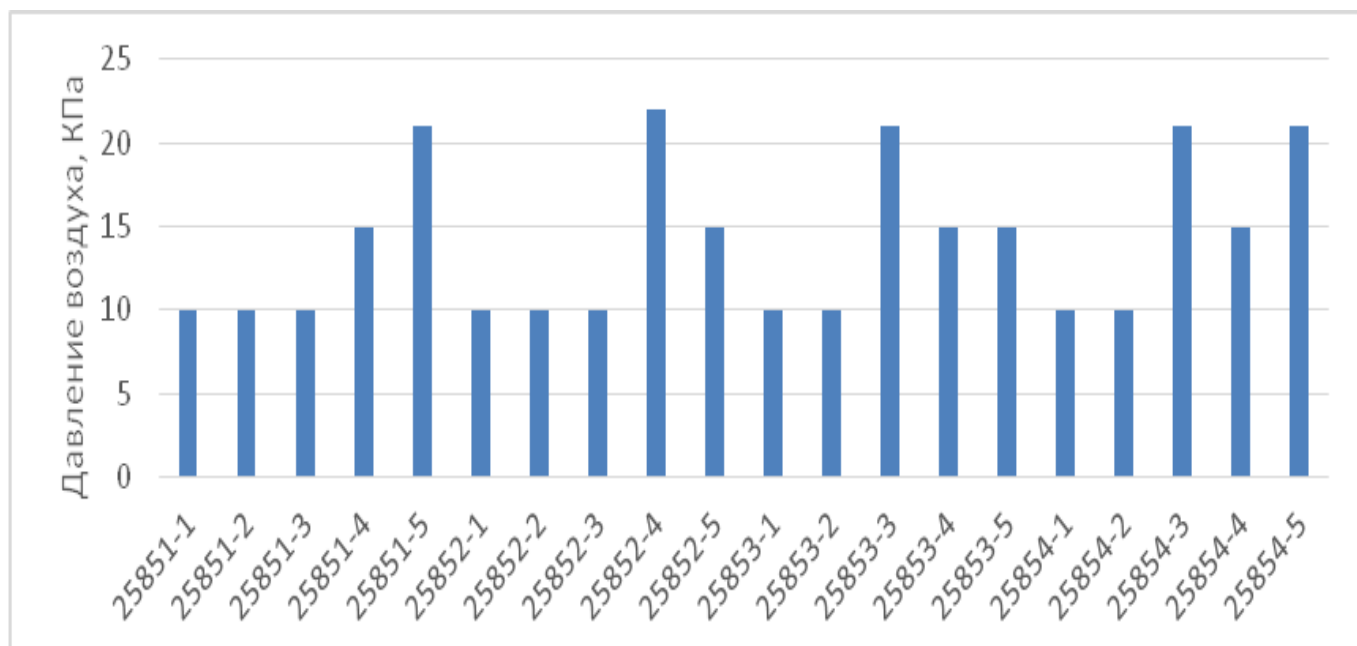


Рисунок 3.6 – Давление воздуха при проведении экспериментов

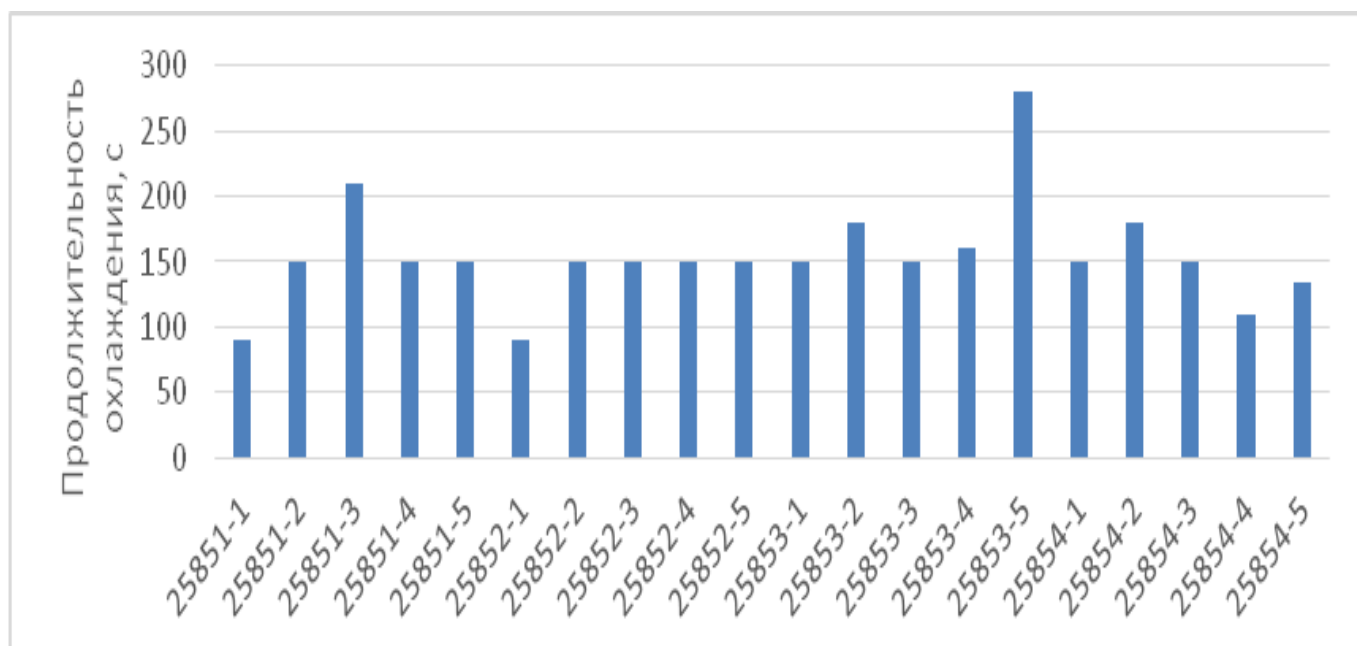


Рисунок 3.7 – Продолжительность охлаждения при проведении экспериментов

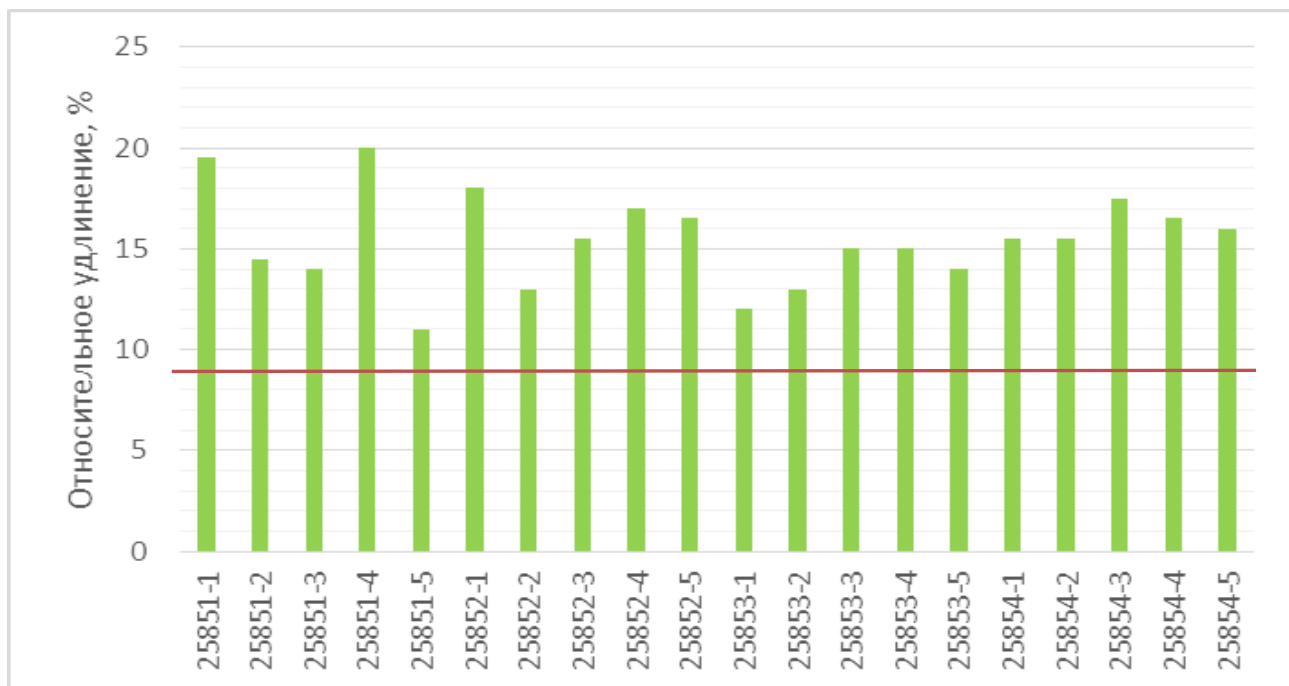


Рисунок 3.8 – Относительное удлинение стали исследуемых плавок после термообработки по различным режима

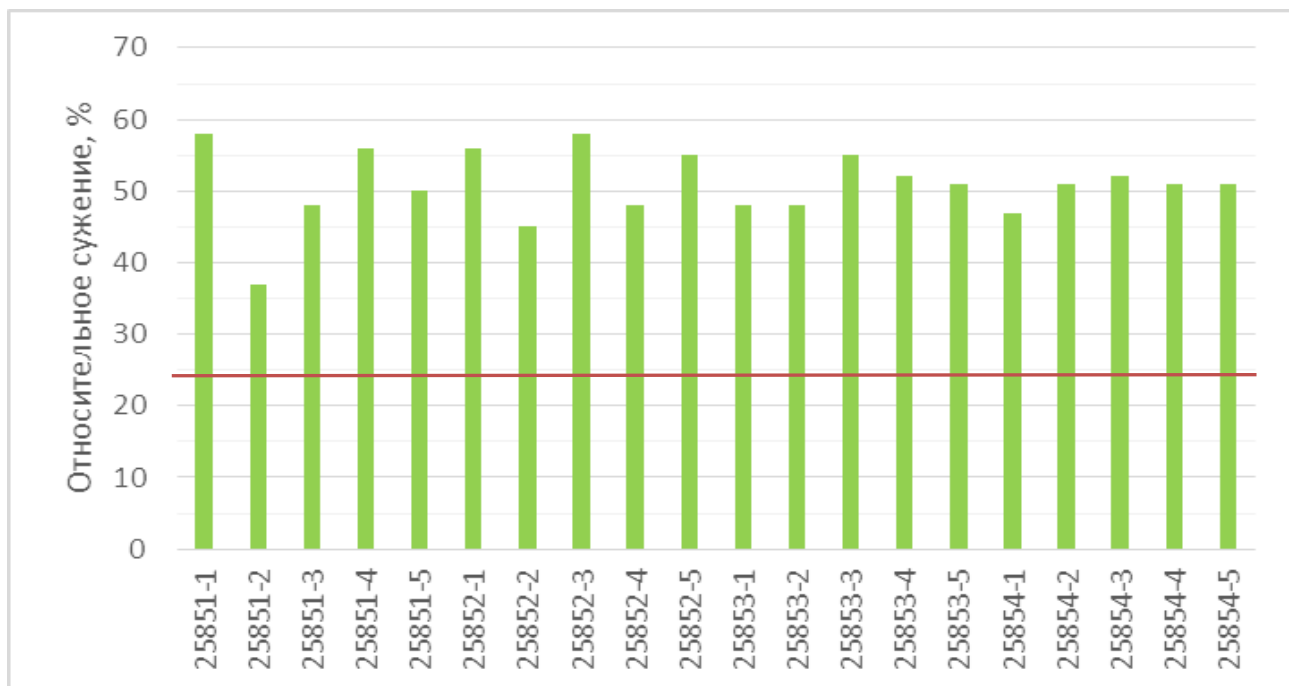


Рисунок 3.9 – Относительное сужение стали исследуемых плавок после термообработки по различным режима

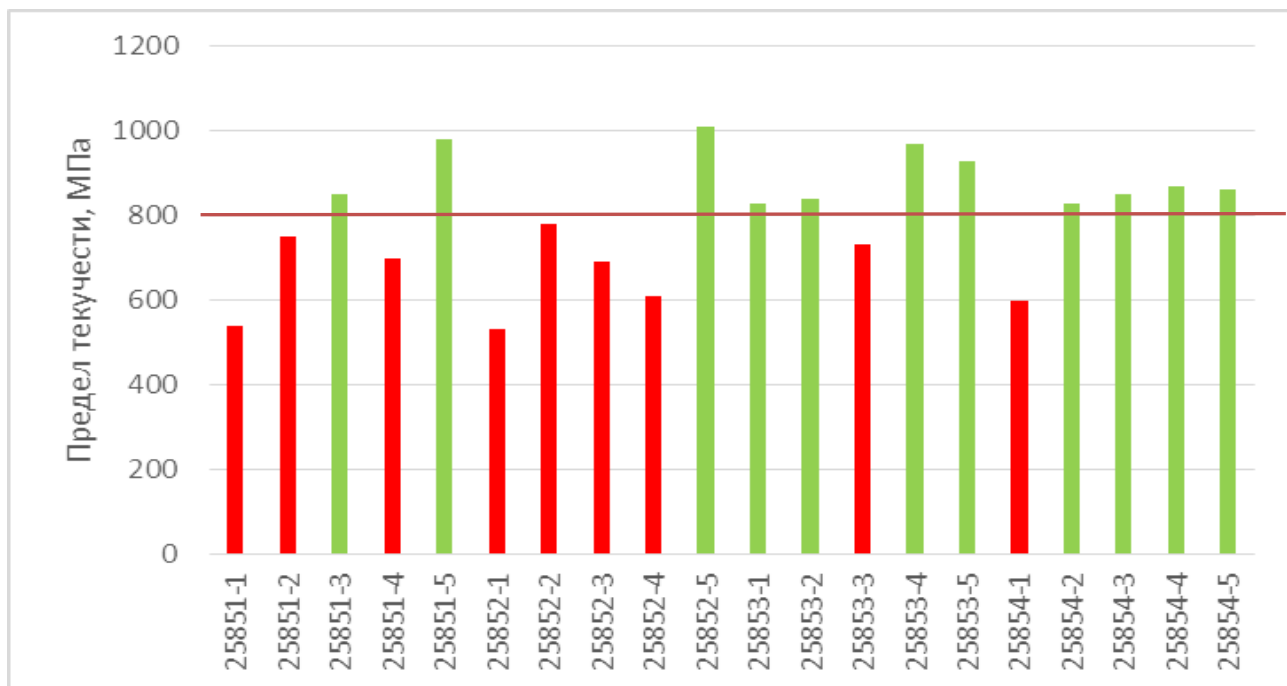


Рисунок 3.10 – Предел текучести стали исследуемых плавов после термообработки по различным режимам

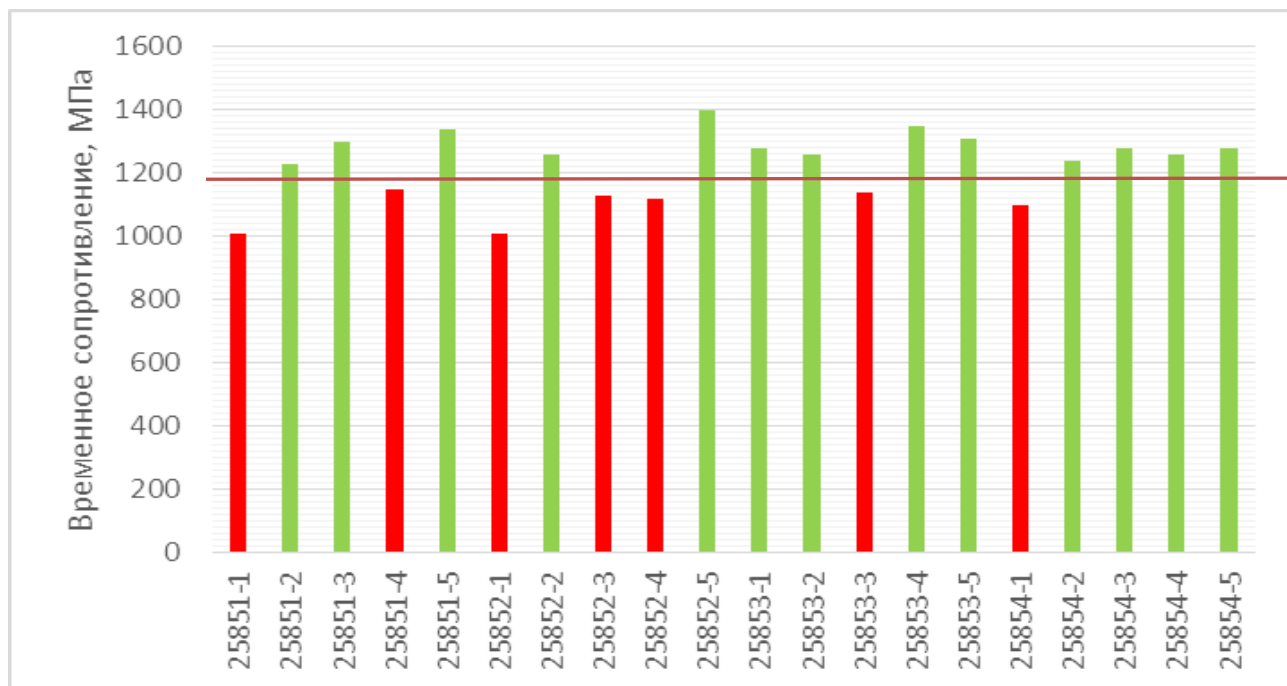


Рисунок 3.11 – Временное сопротивление стали исследуемых плавов после термообработки по различным режимам



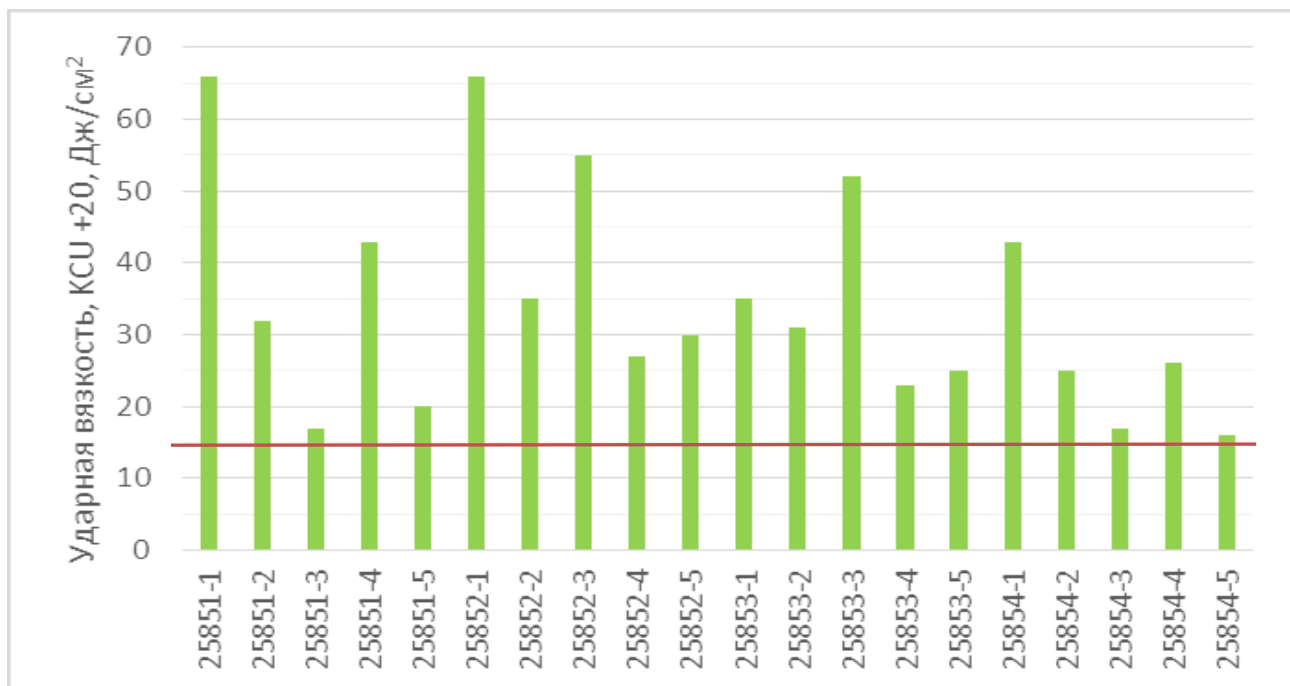


Рисунок 3.12 – Ударная вязкость КСУ +20 стали исследуемых плавков после термообработки по различным режимам

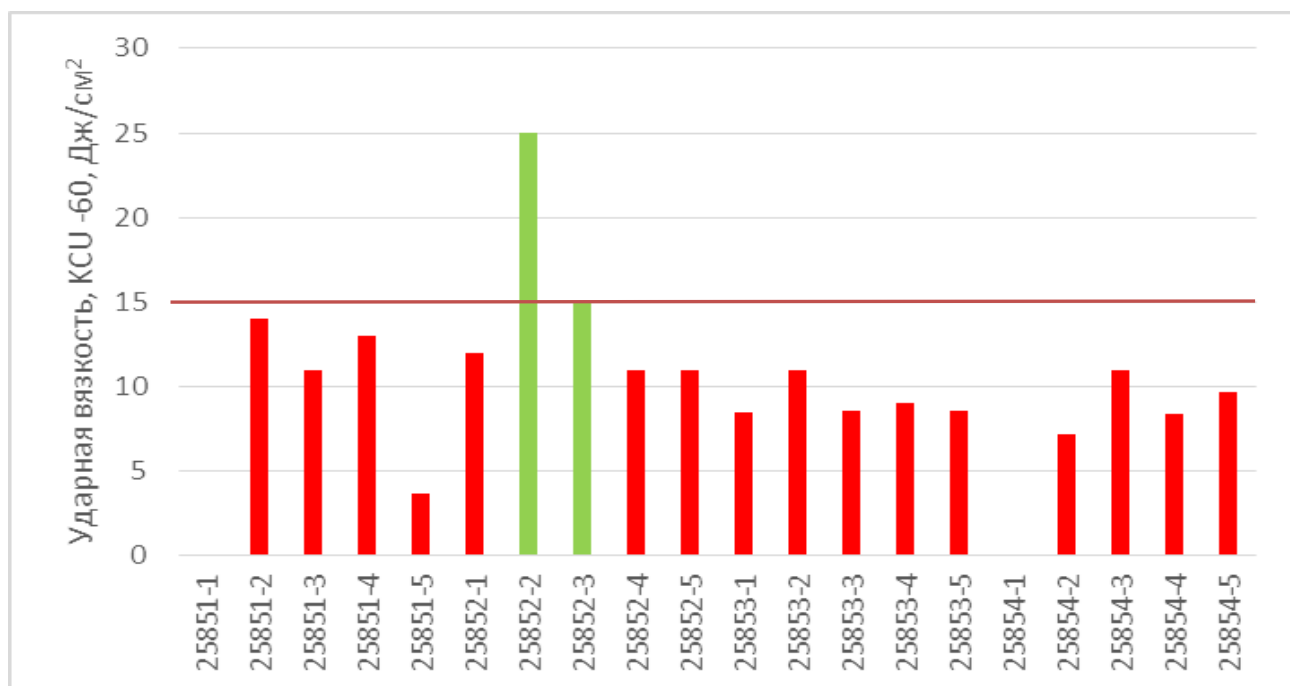
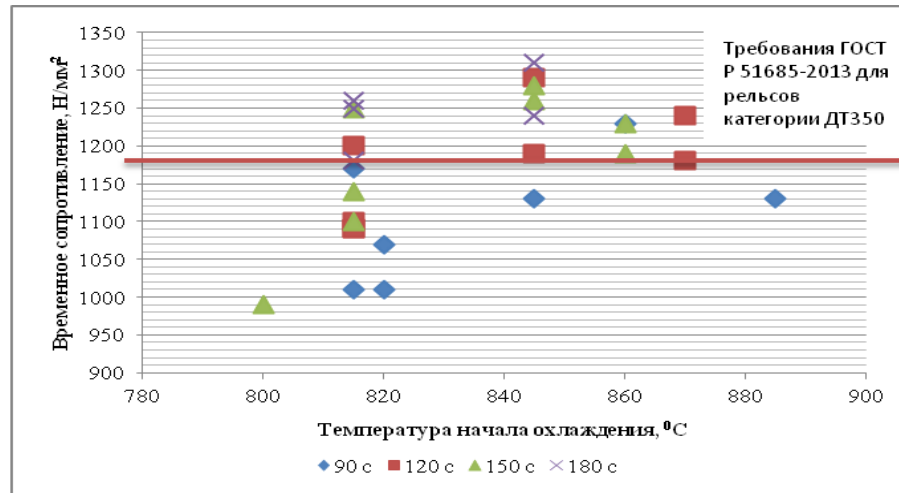
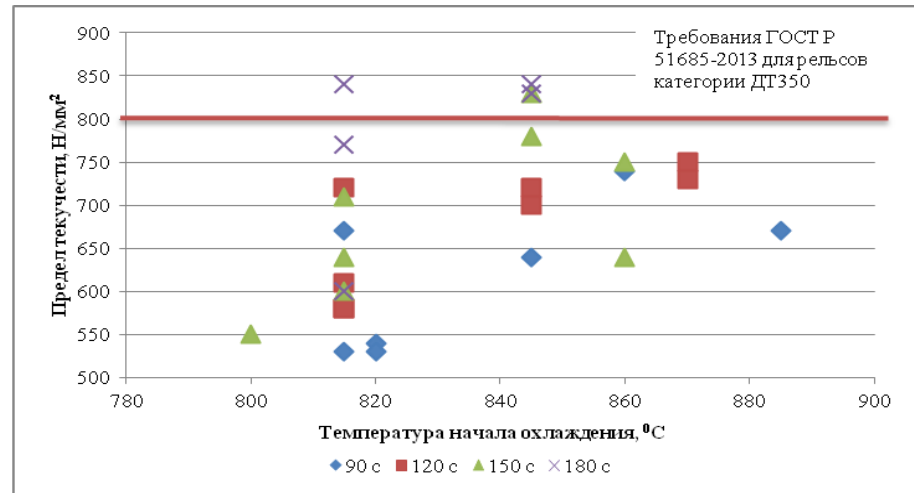


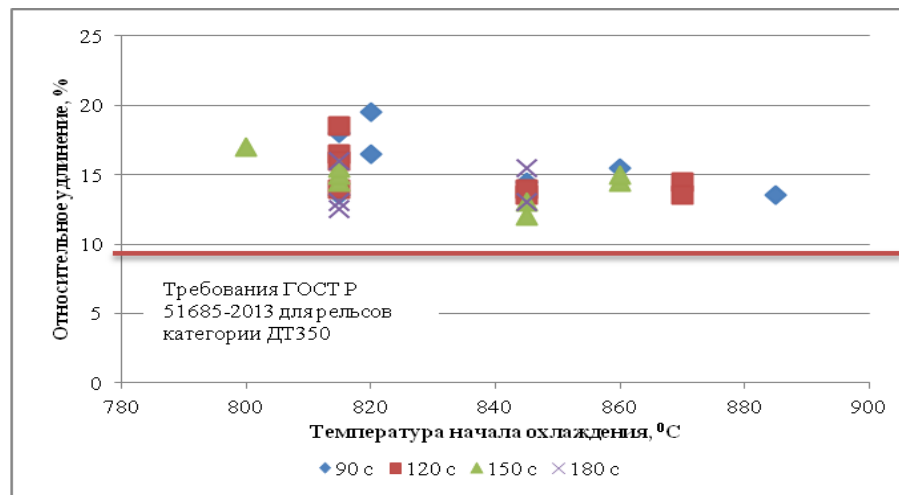
Рисунок 3.13 – Ударная вязкость КСУ –60 стали исследуемых плавков после термообработки по различным режимам



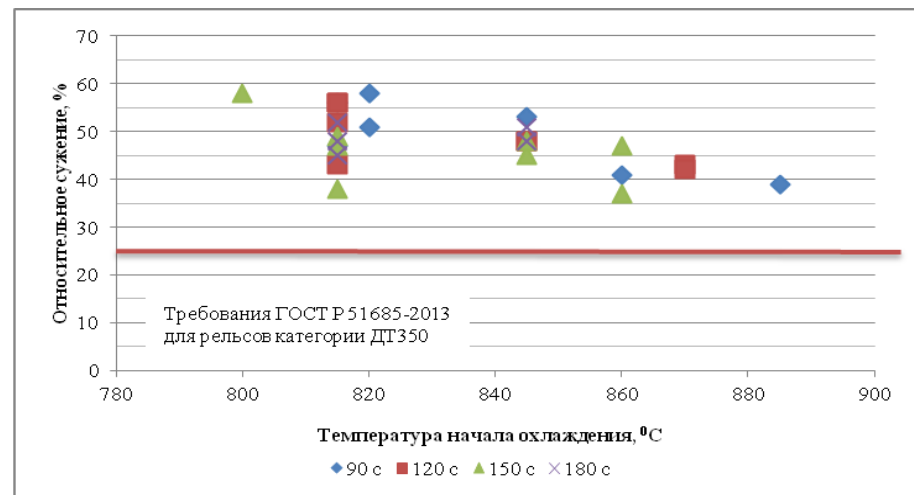
а



б



в



г

а – временное сопротивление; б – предел текучести; в – относительное удлинение; г – относительное сужение стали

Рисунок 3.14 – Влияние температуры начала охлаждения при давлении 10 кПа и продолжительности охлаждения 90, 120, 150 и 180 с на механические свойства рельсовых проб

Таблица 3.1 – Режимы термообработки и свойства образцов рельсов типа Р65 опытного металла

Номер плавки	Про-ба №	Температура, °С			Давление воздуха, кПа	Продолжи-тельность охлаждения, с	Механические свойства				КСУ		Твердость, НВ							
		Начала охлажд.	Конца охлажд.	После выравн.			σ <sub>т</sub>	σ <sub>в</sub>	δ	ψ	+20	-60	на поверх-ности ката-ния	головки на глубине			шей ки	подошвы		
							МПа	%	Дж/см <sup>2</sup>	10 мм по оси	22 мм по оси	10 мм от выкружек								
25851	1	820	680	690	10	90	540	1010	19,5	58	66	—	297	295	286	288	300	278	280	277
	2	860	600	615	10	150	750	1230	14,5	37	32	14	398	385	356	368	388	335	347	339
	3	845	430	505	10	210	850	1300	14	48	17	11	401	388	359	385	383	339	333	326
	4	780	365	460	15	150	700	1150	20	56	43	13	356	345	321	337	333	302	290	292
	5	825	400	485	21	150	980	1340	11	50	20	3,7	398	380	345	368	368	333	323	321
25852	1	815	560	660	10	90	530	1010	18	56	66	12	315	306	292	300	311	278	272	275
	2	845	н/д	580	10	150	780	1260	13	45	35	25	375	370	354	363	370	321	315	319
	3	800	385	466	10	150	690	1130	15,5	58	55	15	350	345	326	335	333	306	298	293
	4	830	410	495	22	150	610	1120	17	48	27	11	401	388	354	375	375	337	335	329
	5	845	430	540	15	150	1010	1400	16,5	55	30	11	444	385	370	415	415	359	368	368
52853	1	845	430	545	10	150	830	1280	12	48	35	8,5	393	380	356	378	378	333	329	331
	2	825	440	510	10	180	840	1260	13	48	31	11	398	383	352	380	380	325	326	323
	3	780	375	460	21	150	730	1140	15	55	52	8,6	345	341	323	339	337	298	288	300
	4	845	420	525	15	160	970	1350	15	52	23	9	432	395	378	398	395	345	352	354
	5	845	300	386	15	280	930	1310	14	51	25	8,6	451	390	383	429	415	343	356	356
25854	1	815	—	600	10	150	600	1100	15,5	47	43	—	341	341	325	335	331	300	302	302
	2	845	490	530	10	180	830	1240	15,5	51	25	7,2	366	366	354	368	368	315	323	321
	3	840	400	520	21	150	850	1280	17,5	52	17	11	378	380	352	383	380	329	337	335
	4	830	446	600	15	110	870	1260	16,5	51	26	8,4	378	383	361	385	388	341	343	343
	5	830	425	535	21	135	860	1280	16	51	16	9,7	380	380	356	388	385	341	350	345
Требования ГОСТ Р 51685-2013 для рельсов категории ДТ350							Не менее					—	352-	Не менее			Не более			
							800	1240	9,0	25,0	15		401	341	321	341	341	363		

Как видно из представленных данных, охлаждение рельсового металла при давлении 10 кПа в течение 90 с от температур 815 – 820 °С (пробы № 1 плавки №№ 25851, 25852) 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 №№ 25851, 25852, проба № 1 плавка № 25854). Удовлетворительные результаты при закалке по этому режиму получены только на пробе № 1 плавки № 25853.

Повышение давления до 15 и 21 кПа и увеличение продолжительности термообработки свыше 150 с на пробах плавки №№ 25851, 25852, 25853 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 рисунках 3.15, 3.16. В микроструктуре металла всех проб плавки № 25854 бейнит не выявлен.

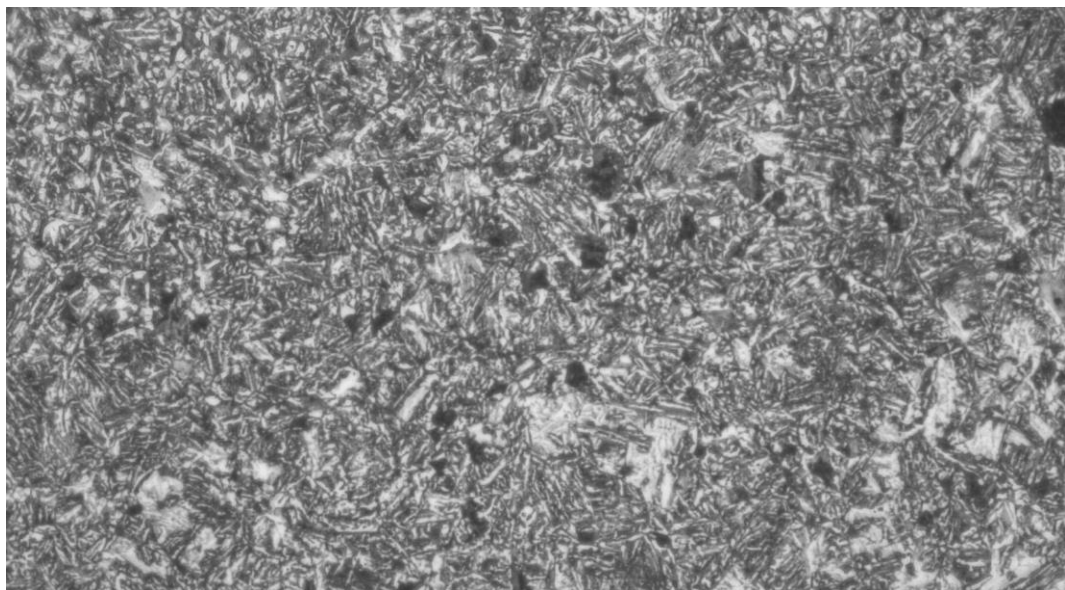


Рисунок 3.15 – Участки бейнита в микроструктуре опытного металла плавки № 25851,  $\times 500$

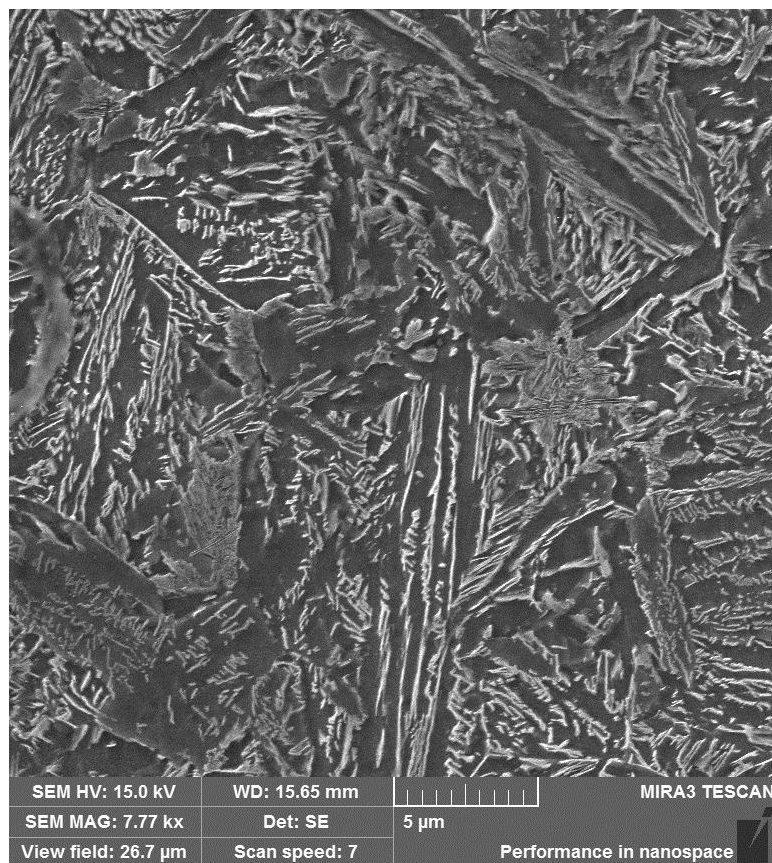


Рисунок 3.16 – Участки бейнита в микроструктуре опытного металла плавки № 25852,  $\times 7700$

Далее по глубине микроструктура опытного металла всех проб состоит из сорбита закалки с незначительными выделениями зернограницного феррита (рисунки 3.17, 3.18).

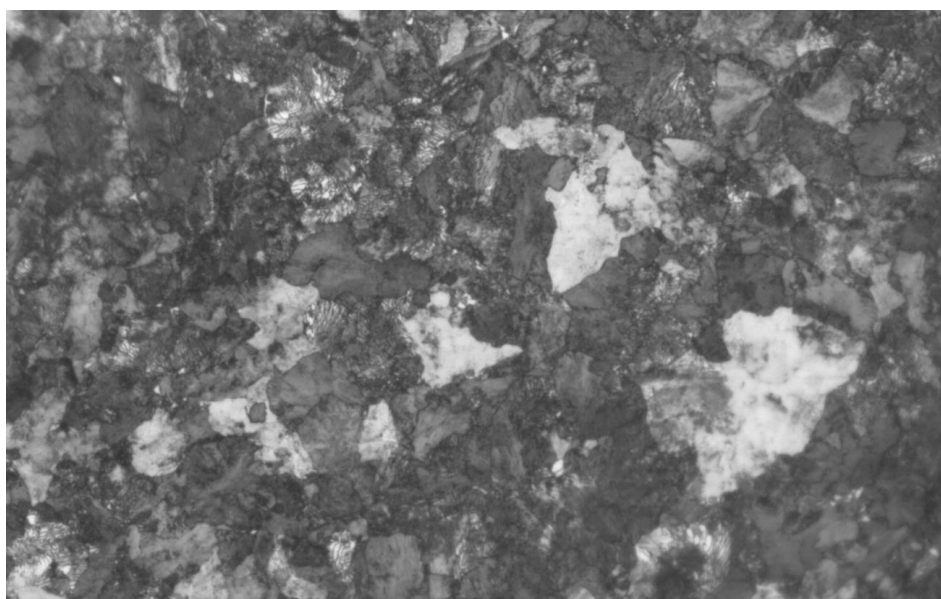
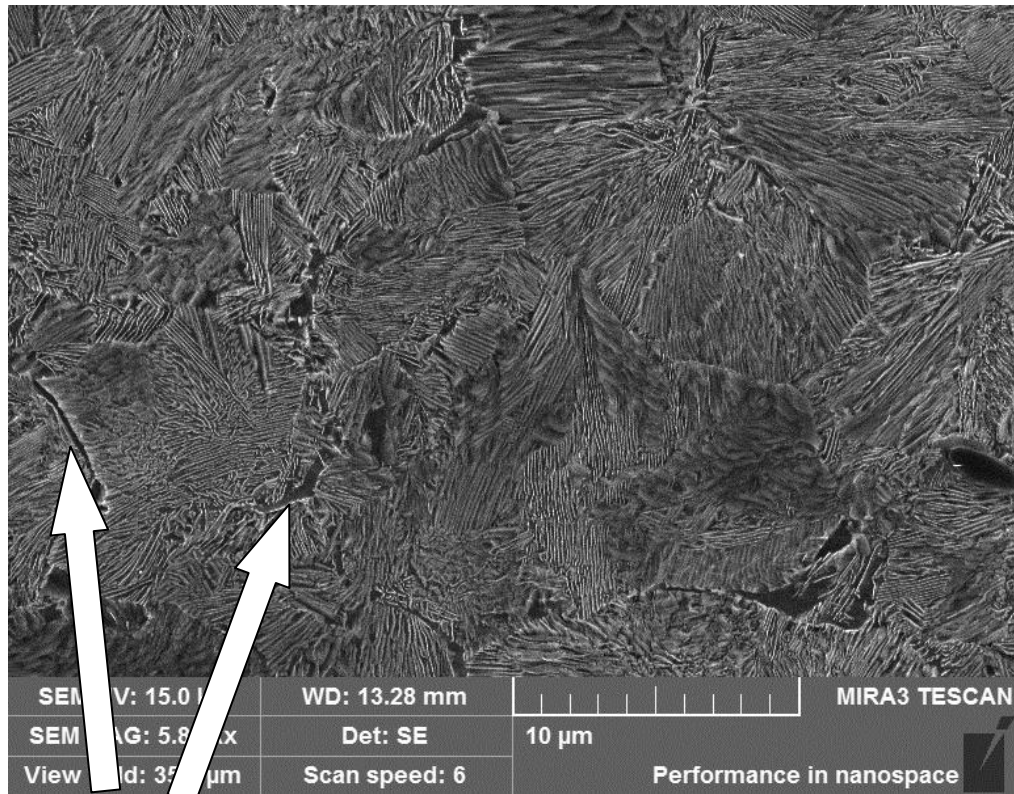


Рисунок 3.17 – Основная микроструктура опытного металла плавки №№ 25851 – 25854,  $\times 500$



Ферритная сетка

Рисунок 3.18 –Микроструктура тонкопластинчатого перлита металла плавки № 25854,  $\times 5800$

Величина зерна исследуемых рельсовых проб, термообработанных с печного нагрева оценивается преимущественно 9 – 11 номерами шкалы 2 ГОСТ 5639.

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

Одним из наиболее важных параметров при выборе технологии термической обработки является её продолжительность, которая с одной стороны должна быть как можно более короткой для обеспечения максимально возможной производительности, а с другой - обеспечивать возможно большую технологичность, которая реализуется обеспечением необходимого комплекса свойств при увеличении продолжительности операции, вследствие неизбежных при массовом производстве отклонений от установленной технологии.

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 № 25854, что позволяет рассматривать данный состав в качестве базового при его дальнейшей оптимизации в процессе отработки режимов при закалке с использованием тепла прокатного нагрева.

### **3.4 Исследование влияния режимов воздушоструйной термической обработки с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева на структуру и свойства рельсов**

#### **3.4.1 Исследование влияния режимов термообработки на свойства рельсов из стали марки Э76Ф**

С целью оценки возможности производства рельсов из углеродистой стали дифференцированно термоупрочненных воздухом с прокатного нагрева без дополнительного легирования хромом, была проведена закалка шести проб, отобранных от рельсов типа Р65 из стали марки Э76Ф (категорий Т1 и В по ГОСТ Р 51685-2000). Химический состав опытного металла представлен в таблице 2.1, из которого следует, что металл проб № 1 – 3, предназначенный для производства рельсов категории «Т1», отличается от металла проб № 4 – 6, предназначенных для производства рельсов категории «В» несколькими пониженными значениями углерода, марганца и ванадия. Эксперименты по термической обработке рельсовых проб проводили в два этапа.

В первой серии экспериментов провели закалку трёх проб стали марки Э76Ф (Т1) при одинаковых параметрах давления и продолжительности охлаждения, но с различной температуры начала закалки (таблица 3.2). По результатам механических испытаний установлено, что при закалке от температуры 860 °С, опытный металл по прочностным свойствам несколько превосходит средний уровень значений пределов текучести и прочности рельсового металла текущего производства, но обладает несколько пониженным уровнем значений твёрдости, пластичности и ударной вязкости. За исключением значений относительного сужения, механические свойства при растяжении, твёрдость и ударная вязкость рель-

совой пробы закаленной от температуры 860 °С удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 51685-2000 и требованиям ТУ 0921-276-01124323-2012.

Понижение температуры начала закалки до 805 °С привело к резкому снижению уровня прочностных и повышению пластических свойств, при этом значения твердости на поверхности катания и по сечению головки рельса остались практически на прежнем уровне. Рельсовый металл, закаленный по данному режиму не удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 51685 – 2000 по уровню ударной вязкости, и требованиям ТУ 0921-276-01124323-2012 по уровню временного сопротивления разрыву.

При понижении температуры начала закалки ниже 800 °С отмечено снижение значений предела текучести до недопустимых стандартами значений, и в целом к уменьшению значений твёрдости, при этом твёрдость на поверхности катания ниже допустимого стандартом значения. Микроструктура металла представляет собой сорбит закалки с выделениями феррита по границам зёрен, с понижением температуры начала закалки в микроструктуре отмечена более грубозернистая структура (рисунки 3.19, 3.20).

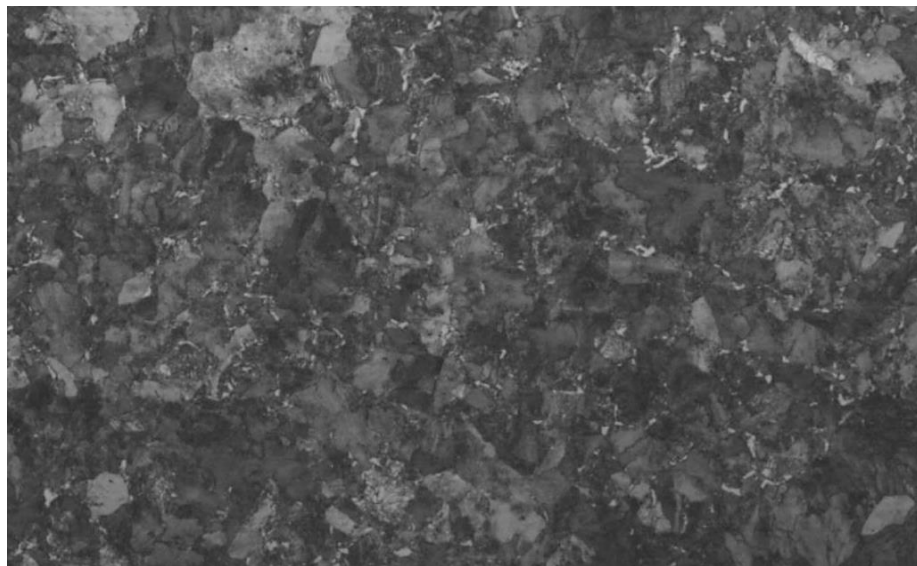


Рисунок 3.19 – Микроструктура образца № 1 рельсовой стали Э76Ф

(20 кПа, 860 °С, 125 с), ×500



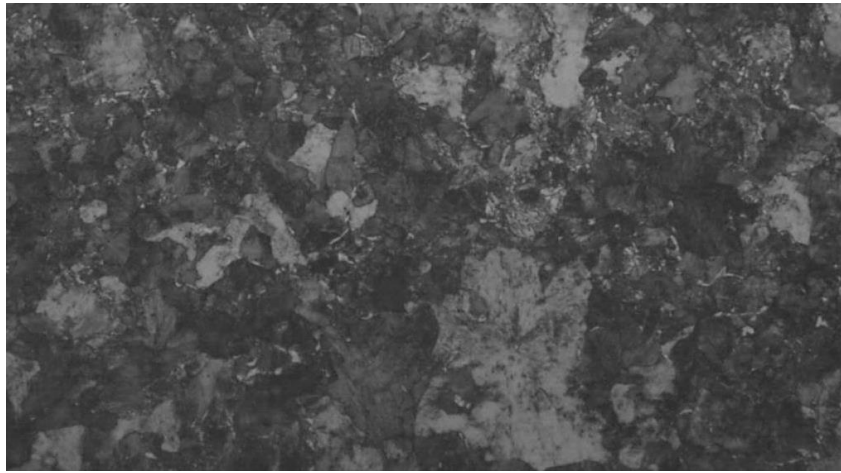


Рисунок 3.20 – Микроструктура образца № 3 рельсовой стали Э76Ф  
(20 кПа, 750 °С, 125 с),  $\times 500$

На рисунке 3.21 представлена динамика изменения свойств с увеличением температуры начала термической обработки.

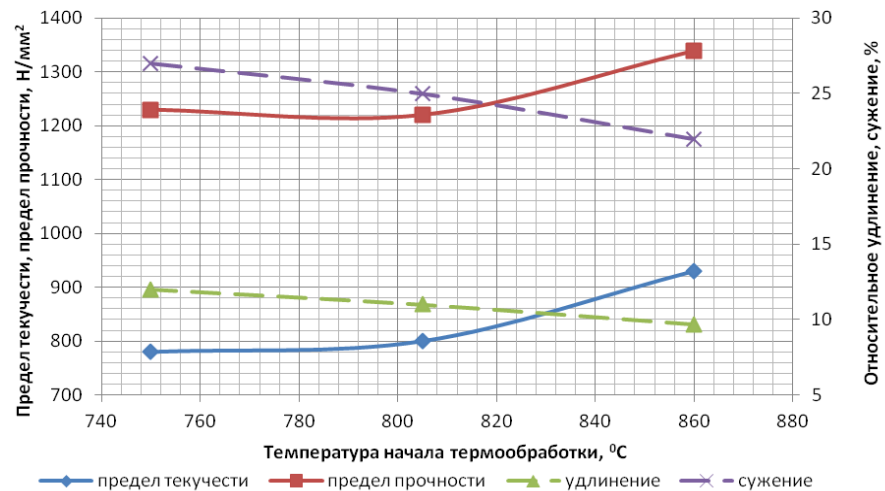


Рисунок 3.21 – Динамика изменения свойств стали с увеличением температуры начала термической обработки

Из представленных на рисунке 3.21 данных видно, что для рельсового металла данного химического состава оптимальная температура начала термической обработки находится в области температур 820 – 830 °С. При этом, в целом для данных рельсов характерен достаточно низкий уровень механических свойств.

На втором этапе термическую обработку проводили от постоянной температуры 845 °С. Всего было термообработано три пробы рельсов, стали марки Э76Ф

(В) при давлениях 30, 40 и 50 кПа соответственно. Продолжительность термообработки рельсов по первым двум режимам составила 105 с, по последнему режиму 90 с. Приведенные в таблице 3.3 данные показывают, что твердость исследуемых рельсов находится на сопоставимом, достаточно высоком уровне и удовлетворяет требованиям стандартов как для рельсов категории В, так и для рельсов категории ДТ350. С увеличением давления воздуха свыше 30 кПа, резко возрастают прочностные свойства, уровень которых удовлетворяет требованиям стандартов к рельсам категорий ДТ350 и В. Следует отметить, что полученный уровень свойств ( $\sigma_t = 900 - 920$  МПа;  $\sigma_b = 1310$  МПа), по мнению японских разработчиков рельсовой стали [77], близок к теоретическому пределу прочности перлитной рельсовой стали. В целом, с увеличением давления, также отмечена тенденция по повышению пластических свойств и ударной вязкости, однако уровень относительного сужения находится на достаточно низком уровне, и не удовлетворяет требованиям стандарта. Микроструктура металла образцов № 4 – 6 представляет собой сорбит закали с разрозненными выделениями феррита по границам зерен, однако, в отличие от металла образцов № 1 – 3, структура несколько более дисперсна, а феррит присутствует в меньшем количестве (рисунок 3.22), что соответствует текущим представлениям, так как металл категории В по содержанию углерода ближе к эвтектоидному составу.



Рисунок 3.22 – Микроструктура образца № 5 рельсовой стали Э76Ф (40 кПа, 845 °С, 105 с),  $\times 500$

Таблица 3.2 – Механические свойства рельсовых проб № 1 – 3 стали марки Э76Ф категории Т1

№ пробы	Параметры термообработки			Механические свойства при растяжении				Ударная вязкость КСУ при температуре		Твердость, НВ							
	Давление, кПа	Температура, °С	Время, с	σ <sub>т</sub>	σ <sub>в</sub>	δ	ψ	+20 °С	- 60°С	на поверхности катания	головки на глубине				шейки	подошвы	
				МПа	%	Дж/см <sup>2</sup>	10 мм по оси	22 мм по оси	10 мм от выкружек								
									1		2	1	2				
1	20	860	125	930	1340	9,7	22	25	16	373	370	359	373	373	331	339	335
2	20	805	125	800	1220	11	25	21	13	373	370	361	370	368	335	325	323
3	20	750	125	780	1230	12	27	24	13	356	354	352	361	366	321	307	306
Средние значения для рельсов категории Т1 текущего производства				900	1250	12	36	40	—	380	375	354	—	—	363	372	
Требования ГОСТ Р 51685-2000 для рельсов категории Т1				Не менее					—	341-401	Не менее		—	—	Не более		
				800	1180	8,0	25	25			341	321			388		
Требования ТУ 0921-276-01124323-2012 для рельсов категории ДТ350				Не менее					—	363-401	Не менее			Не более			
				800	1240	9,0	25	15			341	341	341		341	363	

Таблица 3.3 – Механические свойства рельсовых проб № 4 – 6 стали марки Э76Ф категории В

№ пробы	Параметры термообработки			Механические свойства при растяжении				Ударная вязкость КСУ при температуре		Твердость, НВ							
	Давление, кПа	Температура, °С	Время, с	σ <sub>т</sub>	σ <sub>в</sub>	δ	ψ	+20 °С	- 60°С	на поверхности катания	головки на глубине				Шейки	Подошвы	
											10 мм по оси	22 мм по оси	10 мм от выкружек				
				МПа	%	Дж/см <sup>2</sup>	1	2	1				2				
4	30	845	105	820	1230	9,9	23	18	8,6	390	380	359	380	380	333	359	354
5	40	845	105	900	1310	11,5	25	27	13	385	385	383	388	388	352	347	363
6	50	845	90	920	1310	10	22	23	8,4	388	380	370	383	385	375	366	359
Средние значения для рельсов категории В текущего производства				930	1300	12,8	39	40	32	388	383	362	—	—	373	380	
Требования ГОСТ Р 51685-2000 для рельсов категории В				Не менее					—	363-401	Не менее		—	—	Не более		
				850	1320	12	35	15			341	341			388		
Требования ТУ 0921-276-01124323-2012 для рельсов категории ДТ350				Не менее					—	Не менее				Не более			
				800	1240	9	25	15		363-401	341	341	341	341	363		

### **3.4.2 Исследование влияния режимов термообработки на свойства рельсов из низколегированной стали с хромом, кремнием и ванадием**

На основании проведенных ранее экспериментов (раздел 3.3) по закалке воздухом с отдельного, печного нагрева, было установлено, что оптимальное соотношение прочностных и пластических свойств достигается на рельсах из стали с повышенным содержанием кремния, при умеренном содержании марганца и хрома. В связи с этим исследование влияния режимов термической обработки на свойства рельсов проводили на металле плавки № 22376 (таблица 2.1) содержащей порядка 0,78 % марганца, 0,55 % кремния и 0,46 % хрома, а также для сравнения металла плавок №№ 22677 и 22674 с более низким содержанием кремния и отличным содержанием хрома – 0,42 и 0,55 % соответственно.

Выплавка, внепечная обработка, разливка на МНЛЗ, нагрев НЛЗ и прокатку проводили по принятой схеме производства рельсов типа Р65.

#### *Термообработка рельсового металла плавки № 22674*

Термообработку рельсов плавки № 22674 с содержанием хрома 0,55 % проводили от температуры 700 – 850 °С, с давлением 15 – 22 кПа в течение 105 – 125 с. Режимы термообработки и результаты механических испытаний представлены в таблице 3.4 и на рисунке 3.23.

Из представленных данных видно, что все опытные пробы, за исключением пробы № 1.5, показали высокие значения временного сопротивления и предела текучести, а также удовлетворительные значения пластических свойств, однако с увеличением температуры начала термообработки отмечено снижение значений относительного сужения.

Проба № 1.5 была термообработана от 700 °С, при испытании на растяжение металл данной пробы показал значения механических свойств не отвечающие требованиям стандарта для термоупрочненных рельсов.

Таблица 3.4 – Параметры термообработки с использованием тепла прокатного нагрева и механические свойства рельсов типа Р65 стали марки Э76ХФ плавки № 22674

№ п/п	Параметры термообработки			Механические свойства				КСУ, при темпе- ратуре, °С		Твердость головки рельса, НВ				
	Т, °С	Р, кПа	Время, с	σ <sub>т</sub>	σ <sub>в</sub>	δ <sub>5</sub>	ψ	+20	-60	на по- верх- ности ката- ния	на глубине			
				МПа		%		Дж/см <sup>2</sup>			10 мм по оси	22 мм по оси	10 мм от выкружек	
													1	2
1.1	750	22	125	960	1370	10,5	36	23	8,5	406	406	398	415	415
1.2	780	22	125	1040	1400	9,4	35	20	9,7	415	415	395	415	415
1.3	815	22	125	1000	1410	14	30	16	4,9	420	415	406	415	415
1.4	845	22	125	1020	1410	11	27	14	6	429	406	393	415	415
1.5	700	15	105	760	1230	10	18,5	12	3,6	380	380	388	359	361
1.6	780	15	120	970	1380	11,5	27	8,4	6	411	390	385	395	393
1.7	850	15	120	950	1380	15	31	22	6	415	415	404	409	409
Требования ГОСТ Р 51685-2013 для рельсов категории ДТ350				Не менее					—	363- 401	Не менее			
				800	1240	9,0	25,0	15,0			341	341	341	

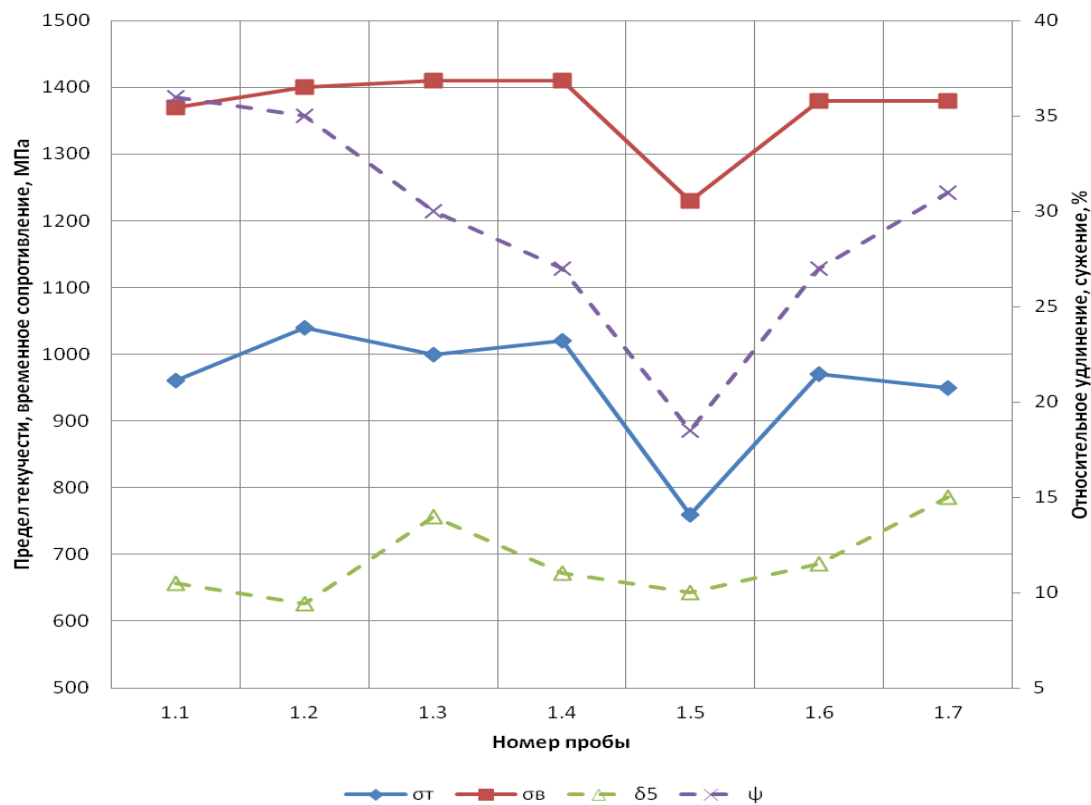


Рисунок 3.23 – Механические свойства исследованных проб рельсовой стали плавки № 22674

С увеличением давления охлаждающей среды наблюдается рост прочностных характеристик и твердости по сечению головки. Среди проб № 1.1 – 1.4, закаленных при 22 кПа, отмечена тенденция по увеличению прочностных свойств и уменьшению относительного удлинения, относительного сужения и ударной вязкости с повышением температуры начала термической обработки.

Ударная вязкость рельсов закаленных с более низким давлением (15 кПа) показала более низкие значения, не удовлетворяющих по этому параметру требованиям стандарта. Опытные рельсы характеризуются высокими значениями твердости по сечению головки, и, за исключением рельса, термоупрочненного от температуры 700 °С, превышают установленные стандартом максимально допустимые значения твёрдости на поверхности катания головки.

Испытания на ударный изгиб при отрицательной температуре показали низкий уровень ударной вязкости всего опытного металла не превышающий 10 Дж/см<sup>2</sup>.

Микроструктура металла опытных рельсов представляет собой тонкопластинчатый и сорбитообразный перлит. С поверхности катания головки по центру головки и со стороны выкружек на глубину до 11 мм проб 1.1 – 1.4, термоупрочненных при 22 кПа, наблюдаются участки продуктов промежуточного превращения, недопустимые по требованиям нормативно-технической документации на рельсовую продукцию. При этом с понижением температуры начала термообработки отмечена тенденция по увеличению величины слоя с наличием бейнитной структуры. На рисунке 3.24 представлена структура бейнита, характерная для описываемого в этом разделе опытного металла.

С понижением давления до 15 кПа глубина слоя с участками бейнитных структур уменьшается до 0,3 – 0,5 мм. В металле пробы № 1.5 бейнит не обнаружен, перлит имеет более грубое, пластинчатое строение.

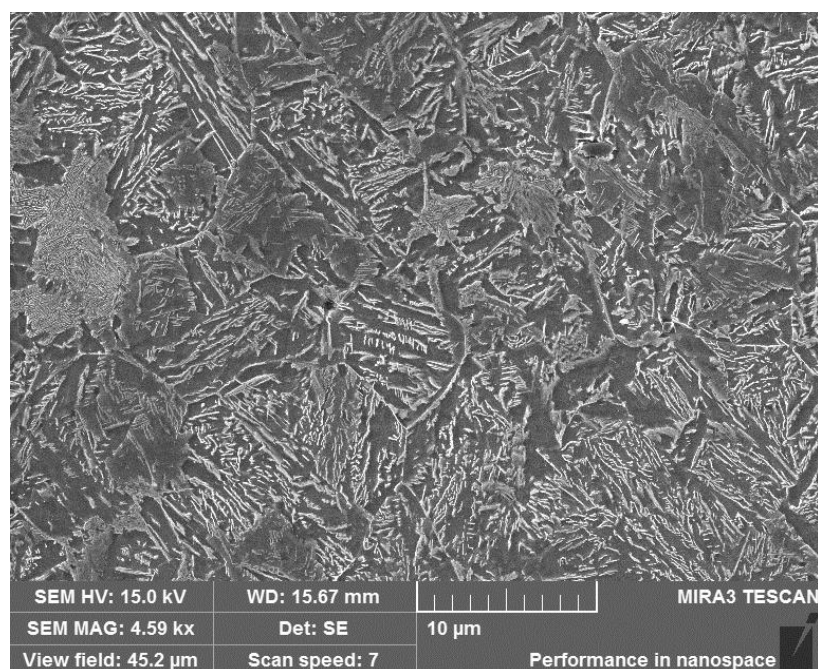


Рисунок 3.24 – Бейнит в микроструктуре пробы 1.4,  $\times 4600$

### *Термообработка рельсового металла плавки № 22677*

Термообработку рельсов типа Р65 плавки № 22677 с содержанием хрома 0,42 % проводили с давлениями 10, 15, 22 кПа, от температур 750 – 860 °С, в течение 120 – 125 с. Параметры термообработки и результаты механических испытаний представлены в таблице 3.5 и на рисунке 3.25.

Таблица 3.5 – Параметры термической обработки и механические свойства рельсов типа Р65 стали марки Э76ХФ плавки № 22677

№ п/п	Параметры термообработки			Механические свойства				КСУ,при температу- ре, °С		Твердость головки рельса, НВ				
	Т, °С	Р, кПа	Время, с	σ <sub>Т</sub>	σ <sub>В</sub>	δ <sub>5</sub>	ψ	+20	-60	на по- верх- ности ката- ния	на глубине			
				МПа		%		Дж/см <sup>2</sup>			10 мм по оси	22 мм по оси	10 мм от выкружек	
													1	2
2.1	780	22	125	980	1380	13	30	21	10	420	404	390	404	401
2.2	780	22	125	940	1360	13	25	8,4	8,4	423	409	395	401	401
2.3	802	22	125	980	1380	9,3	26	19	9,7	415	415	401	415	415
<b>2.4</b>	<b>810</b>	<b>22</b>	<b>125</b>	<b>940</b>	<b>1370</b>	<b>9</b>	<b>26</b>	<b>15</b>	<b>6</b>	<b>398</b>	<b>409</b>	<b>393</b>	<b>415</b>	<b>415</b>
2.5	830	22	125	1010	1400	11,5	22,5	16	8,4	415	409	395	415	415
2.6	860	22	125	990	1400	11,5	21,5	22	9,7	404	404	398	415	415
2.7	760	15	120	880	1350	9,9	21,5	17	6	423	404	398	404	401
2.8	800	15	120	930	1230	8,9	23,5	19	12	409	409	401	401	401

№ п/п	Параметры термообработки			Механические свойства				КСУ,при температу- ре, °С		Твердость головки рельса, НВ				
	Т, °С	Р, кПа	Время, с	σ <sub>Т</sub>	σ <sub>В</sub>	δ <sub>5</sub>	ψ	+20	-60	на по- верх- ности ката- ния	на глубине			
				МПа		%		Дж/см <sup>2</sup>			10 мм по оси	22 мм по оси	10 мм от выкружек	
													1	2
2.9	870	15	120	950	1360	9,2	24	19	6	409	409	409	409	404
2.10	750	10	120	900	1350	12,5	23	11	12	401	390	390	383	383
2.11	790	10	120	900	1350	12,5	23,5	17	8,4	409	395	383	395	395
2.12	845	10	120	920	1340	11,5	24	18	6,1	404	404	393	409	409
Требования ГОСТ Р 51685-2013 для рельсов категории ДТ350				Не менее					—	363- 401	Не менее			
				800	1240	9,0	25,0	15,0			341			

Из представленных данных, видно, что для металла данной группы характерны высокие значения твёрдости на поверхности катания и по сечению головки, очень высокий уровень прочностных свойств и достаточно низкий уровень пластических, главным образом относительного сужения. В микроструктуре проб 2.1, 2.2 и 2.7 температура начала термообработки которых составила 780 – 760 °С, с поверхности катания, по центру и со стороны выкружек, на глубину до 3 мм и 1,5 мм соответственно наблюдаются участки бейнита. Полностью отвечает требованиям стандарта для рельсов категории ДТ350 только металл пробы № 2.4, термообработанный в течение 125 с при давлении 22 кПа от 810 °С.

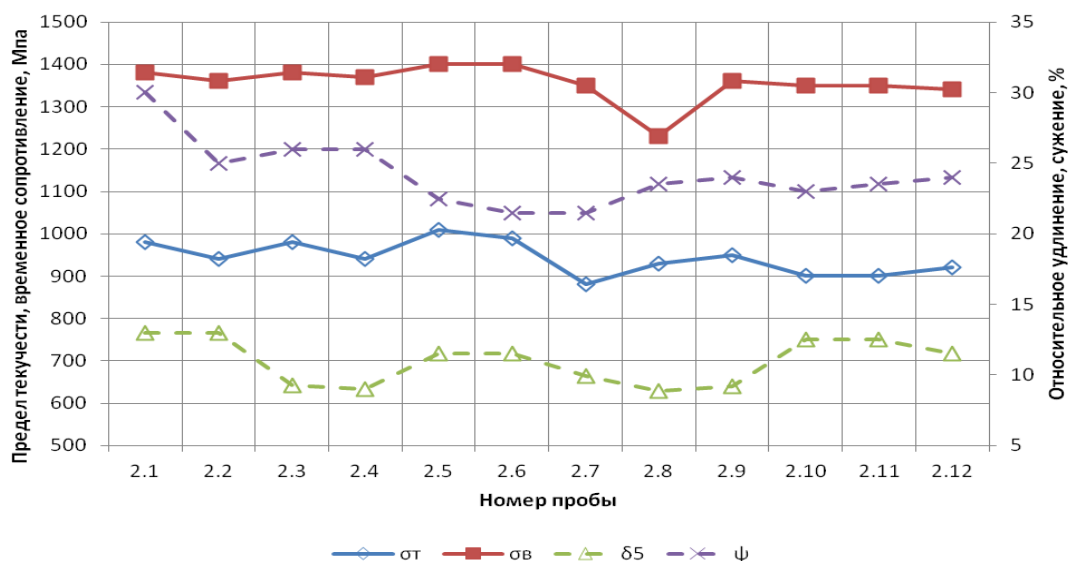


Рисунок 3.25 – Механические свойства исследованных проб рельсовой стали плавки № 22677



Повышение температуры начала заковки при данной скорости охлаждения или уменьшение скорости охлаждения при прочих равных условиях приводят к снижению значений относительного сужения.

### *Термообработка рельсового металла плавки № 22376*

В виду того, что плавка № 22376 была изготовлена в соответствии с ранее полученными в разделе 3.3 рекомендациями, на основании положительных результатов при проведении опытов по дифференцированной заковке рельсовых проб с печного нагрева, то на металле данной плавки проведено наибольшее количество экспериментов, всего по различным режимам было заковано порядка 50 проб рельсов типа Р65. Термообработку рельсов проводили при давлении от 10 до 30 кПа, в течение 60 – 160 с. В таблицах 3.6 – 3.9 и на рисунке 3.26 представлены обобщенные результаты испытаний.

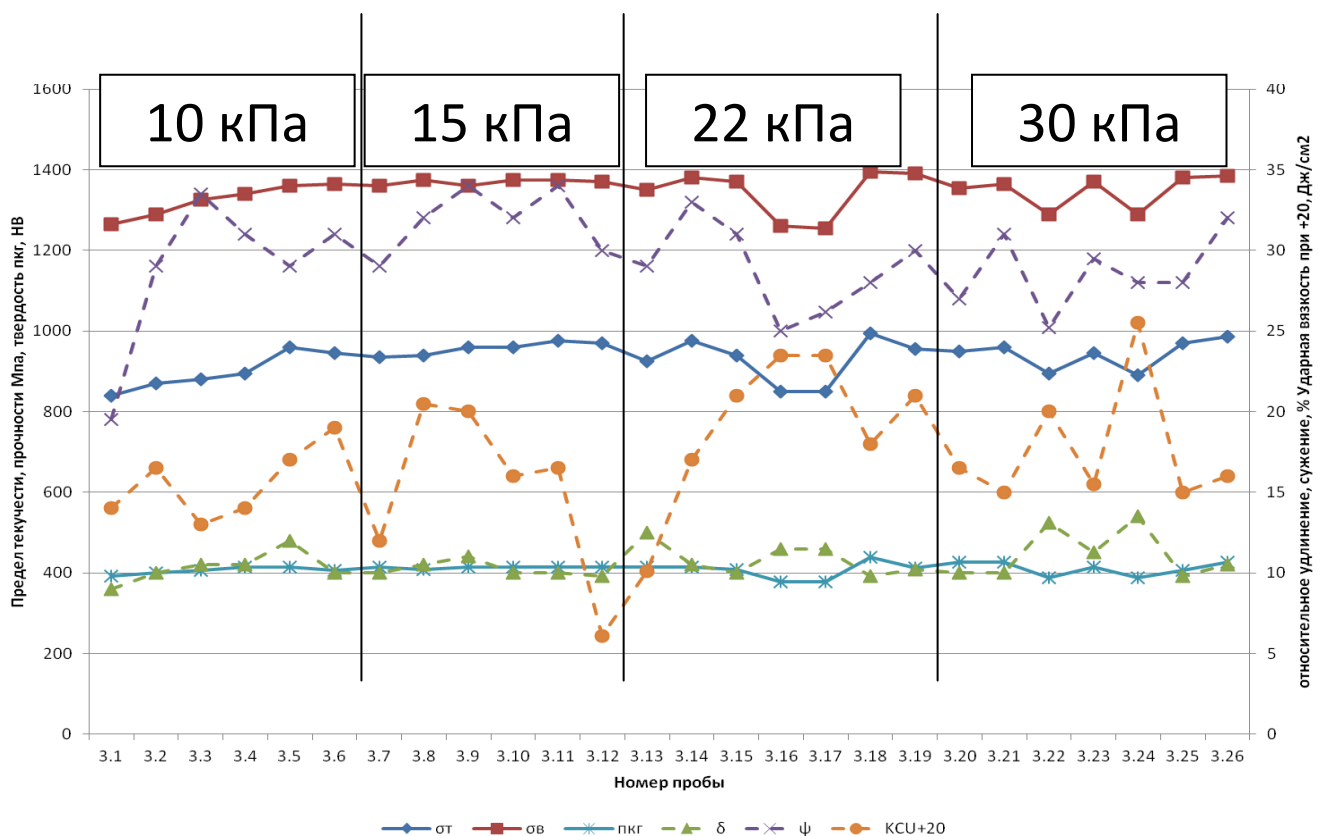


Рисунок 3.26 – Механические свойства исследованных проб рельсовой стали плавки № 22376

В таблице 3.6 представлены данные по термообработке рельсов плавки № 22376 при давлении воздуха 10 кПа.

Таблица 3.6 – Механические свойства и твердость рельсовой стали плавки № 22376 после термообработки при давлении воздуха 10 кПа

№ п/п	Т, °С	Время, с	Механические свойства				КСU при темпера- туре, °С		Твердость головки рельса, НВ				
			σ <sub>т</sub>	σ <sub>в</sub>	δ	ψ	+20	-60	на поверх- ности ката- ния	на глубине			
			МПа		%		Дж/см <sup>2</sup>			10 мм по оси	22 мм по оси	10 мм от выкружек	
												1	2
3.1	690	90	840	1265	9	19,5	14	7,4	393	388	383	375	385
3.2	710	105	870	1290	10	29	16,5	10,8	401	388	378	388	380
3.3	735	120	880	1325	10,5	33,5	13	7,5	406	393	375	393	395
3.4	750	120	895	1340	10,5	31	14	5	415	395	383	398	393
3.5	800	125	960	1360	12	29	17	4,9	415	401	388	404	401
3.6	860	150	945	1365	10	31	19	8,5	406	406	395	406	409
Требования ГОСТ Р 51685-2013 для рельсов категории ДТ350			Не менее						363- 401	Не менее			
			800	1240	9,0	25,0	15,0	—		341			

Из представленных в таблице 3.6 данных видно, что с увеличением температуры начала заковки и продолжительности охлаждения повышается комплекс механических свойств. При более низких температурах начала заковки отмечен достаточно низкий уровень пластических свойств.

Наиболее высокий комплекс свойств получен при заковке от температуры 800 °С.

Результаты испытаний металла закаленного при давлении 15 кПа представлены в таблице 3.7, из которой следует, что для всех проб получен достаточно высокий комплекс свойств. С увеличением температуры начала заковки увеличивается предел текучести, при сопоставимом уровне временного сопротивления разрыву и пластических свойств. Наиболее высокий уровень ударной вязкости получен на образцах закаленных от температуры ~ 750 °С, что может быть обусловлено большим количеством зернограницного феррита, выделившегося в процессе замедленного охлаждения после прокатки, вязкость которого выше при распространении трещины по границам зерен в процессе разрушения.

Таблица 3.7 – Механические свойства и твердость рельсовой стали плавки № 22376 после термообработки при давлении воздуха 15 кПа

№ п/п	Т, °С	Время,	Механические свойства				КСУ при температуре, °С		Твердость головки рельса, НВ				
			σ <sub>т</sub>	σ <sub>в</sub>	δ	ψ	+20	-60	на поверх- ности ката- ния	на глубине			
			Н/мм <sup>2</sup>		%		Дж/см <sup>2</sup>			10 мм по оси	22 мм по оси	10 мм от выкружек	
												1	2
3.7	735	105	935	1360	10	29	12	8,4	415	401	383	395	393
3.8	745	135	940	1375	10,5	32	20,5	7,3	409	401	383	395	401
3.9	750	125	960	1360	11	34	20	6,1	415	401	378	406	398
3.10	810	125	960	1375	10	32	16	6,2	415	409	390	406	415
3.11	830	135	975	1375	10	34	16,5	7,4	415	415	388	415	388
3.12	850	125	970	1370	9,8	30	6,1	7,2	415	401	375	401	398
Требования ГОСТ Р 51685-2013 для рельсов категории ДТ350			Не менее						363- 401	Не менее			
			800	1240	9,0	25,0	15,0	—		341			

Результаты испытаний металла закаленного при давлении воздуха 22 кПа представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Механические свойства и твердость рельсовой стали плавки № 22376 после термообработки при давлении воздуха 22 кПа

№ п/п	Т, °С	Время, с	Механические свойства				КСУ при темпе- ратуре, °С		Твердость головки рельса, НВ				
			σ <sub>т</sub>	σ <sub>в</sub>	δ	ψ	+20	-60	на поверх верх- ности ката- ния	на глубине			
			Н/мм <sup>2</sup>		%		Дж/см <sup>2</sup>			10 мм по оси	22 мм по оси	10 мм от выкружек	
												1	2
3.13	700	125	925	1350	12,5	29	10,1	7,7	415	412	393	401	401
3.14	760	110	975	1380	10,5	33	17	6,6	415	404	388	415	406
3.15	775	105	940	1370	10	31	21	6,1	409	406	388	409	409
3.16	810	60	850	1260	11,5	25	23,5	8	378	363	333	375	370
3.17	840	70	850	1255	11,5	26,2	23,5	7,9	378	356	337	368	370
3.18	840	125	995	1395	9,8	28	18	7,3	438	420	401	423	417
3.19	865	115	955	1390	10,2	30	21	8,6	412	401	383	409	401
Требования ГОСТ Р 51685-2013 для рельсов категории ДТ350			Не менее					—	363- 401	Не менее			
			800	1240	9,0	25	15			341			

Из представленных данных видно, что при закалке с давлением воздуха 22 кПа уже в течение 60 с обеспечивается выполнение требований ГОСТ Р51685-

2013 по уровню механических свойств, но при этом на глубине 22 мм отмечена довольно низкая твёрдость. С увеличением продолжительности охлаждения увеличивается уровень прочностных свойств и твёрдости. Для всех образцов за исключением пробы 1.13, закаленной от температуры 700 °С, наблюдается удовлетворительный уровень ударной вязкости при температуре испытания + 20 °С.

Данные по результатам испытания проб закаленных при давлении воздуха 30 кПа представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Механические свойства и твердость рельсовой стали плавки № 22376 после термообработки при давлении воздуха 30 кПа

№ п/п	Т, °С	Время, с	Механические свойства				КСУ при температуре, °С		Твердость головки рельса, НВ				
			σ <sub>т</sub>	σ <sub>в</sub>	δ	ψ	+20	-60	на поверх верх- ности	на глубине			
			Н/мм <sup>2</sup>		%		Дж/см <sup>2</sup>			10 мм по оси	22 мм по оси	10 мм от выкружек	
												1	2
3.20	700	125	950	1355	10	27	16,5	7,5	426	404	395	406	406
3.21	770	125	960	1365	10	31	15	9,2	426	409	393	409	406
3.22	787	90	895	1290	13,1	25,2	20	8	388	383	370	385	383
3.23	800	110	945	1370	11,3	29,5	15,5	7,2	415	409	388	409	409
3.24	840	105	890	1290	13,5	28	25,5	10	388	383	368	388	385
3.25	850	100	970	1380	9,8	28	15	8	406	404	375	393	398
3.26	880	125	985	1385	10,5	32	16	8	426	409	390	409	409
Требования ГОСТ Р 51685-2013 для рельсов категории ДТ350			Не менее					—	363-401	Не менее			
			800	1240	9,0	25	15			341			

Из представленных данных видно, что при закалке с давлением воздуха 30 кПа обеспечивается достаточно высокий комплекс свойств во всем интервале температур начала закалки от 700 до 880 °С. Увеличение продолжительности термообработки приводит к существенному повышению прочностных свойств и твёрдости, с уменьшением продолжительности охлаждения увеличивается ударная вязкость.

Микроструктура металла всех рельсов плавки № 22376 представляет собой тонкопластинчатый перлит с разрозненными выделениями феррита по границам зёрен (рисунок 3.27). Бейнит в микроструктуре рельсов не выявлен. Отмечено некоторое увеличение объемной доли структурно свободного феррита с пониже-

ем температуры начала закалки. Величина зерна оценивается преимущественно 5 – 7 номером шкалы 2 ГОСТ 5639-82.

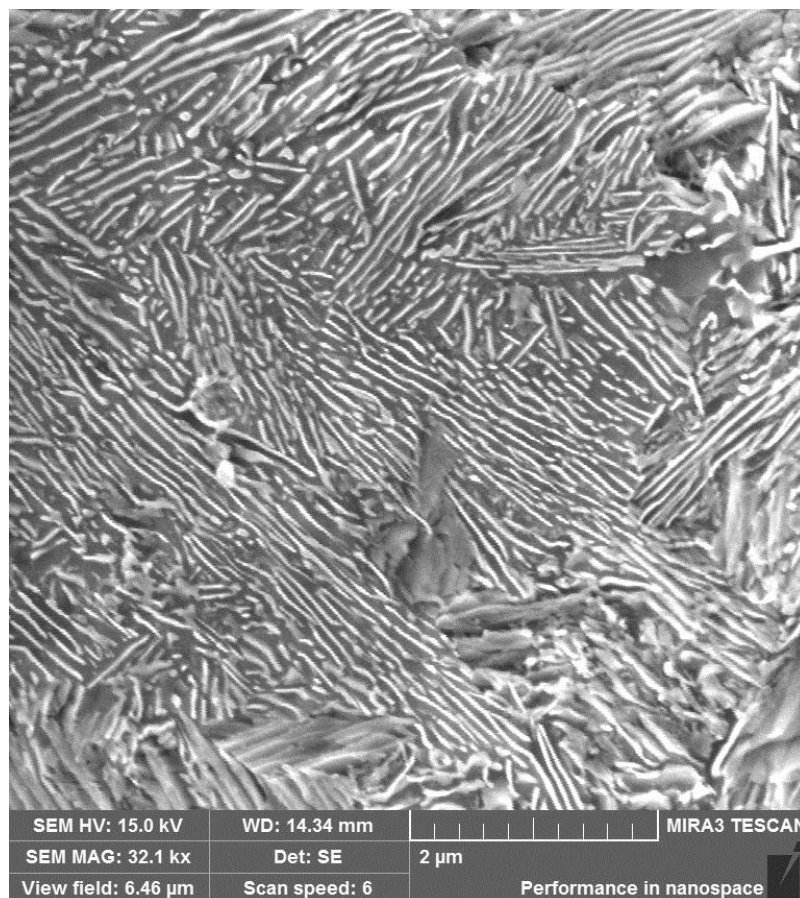


Рисунок 3.27 – Микроструктура тонкопластинчатого перлита в пробе 3.26 плавки № 22376, увеличение  $\times 32100$

### 3.5 Выводы по главе

1. На основе экспериментальных исследований 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 сжатого воздуха.

2. Установлено, что при охлаждении головки рельсов сжатым 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.

3. При термической обработке с использованием отдельного (печного) нагрева:

- наиболее высокий (оптимальный) комплекс свойств для рельсов типа Р65 категории ДТ350 соответствующий требованиям ГОСТ Р 51685-2013 из стали марки Э76ХФ достигается ускоренным охлаждением с отдельного нагрева от температур выше 825 °С при давлении 15 – 22 кПа в течение не менее 110 с;

- увеличение содержания элементов повышающих устойчивость аустенита (хрома, марганца выше 0,45 и 0,83 % соответственно) нецелесообразно, так как приводит к появлению в микроструктуре нежелательной бейнитной структуры и достижению уровня твердости на поверхности катания и по сечению выше допустимых стандартом значений;

4. При термической обработке с использованием остаточного тепла передпрокатного нагрева:

- при термообработке рельсов типа Р65 из стали марки Э76Ф от температуры 845 °С, давлении 40 кПа и выше, в течение 90 – 105 с металл опытных рельсов 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. Оптимальная температура начала термической обработки составляет 800 – 860 °С. С увеличением давления выше 30 кПа происходит резкое увеличение прочностных свойств и твердости при сохранении пластичности.

- наиболее стабильные результаты по микроструктуре, без возникновения игольчатых структур, в наибольшем интервале температур (от 700 до 880 °С) и скоростей охлаждения (от 2 до 3,3 град/с) обеспечиваются при термообработке металла плавки № 22376.

- при понижении температуры менее 730 – 750 °С при закалке рельсов стали марки Э76ХФ отмечен риск получения неудовлетворительных пластических свойств.

5. Установлено, что наиболее перспективной для промышленного внедрения является рельсовая сталь близкая по химическому составу металлу плавки № 22376 с содержанием хрома в пределах 0,38 – 0,43 %; кремния 0,54 – 0,60 %; марганца 0,80 – 0,90 %; ванадия 0,03 – 0,04 %. Данный химический состав обладает высокой технологичностью, так как позволяет работать в широком температурном интервале начала закалки от 700 до 880 °С, и с различными скоростями охлаждения от 10 до 22 кПа. При промышленном освоении для обеспечения высокой производительности рекомендуется термообработку производить при температурах выше 800 °С, для повышения энергоэффективности рекомендуется термообработку производить со скоростью охлаждения 10-15 кПа, продолжительность охлаждения выдерживать на уровне 90 – 110 с.

## **4 Промышленное освоение воздушоструйной дифференцированной термической обработки рельсов длиной до 100 м с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева**

### **4.1 Освоение промышленной технологии воздушоструйной дифференцированной термической обработки длинномерных рельсов.**

В процессе освоения промышленной технологии дифференцированной термической обработки длинномерных рельсов было выявлено значительное их искривление (рисунок 4.1), обусловленное различиями в скоростях охлаждения тепловых центров, расположенных в головке и подошве рельсов [8].



Рисунок 4.1 – Искривление рельсов на холодильнике на начальном этапе промышленного освоения новой технологии термообработки

С целью повышения прямолинейности рельсов, за счет синхронизации процессов распада аустенита в головке и подошве рельсов, сопровождающихся дилатометрическими изменениями, проведена серия промышленных экспериментов по отработке режимов охлаждения подошвы, в рамках которой установлено, что для обеспечения необходимой прямолинейности рельсов длиной до 100 м и



достижения требуемого стандартом комплекса свойств необходимо обеспечение давления воздушной среды, подаваемой на подошву в пределах  $50 \pm 10$  % от давления воздушной среды, подаваемой на головку. Термообработанные таким образом рельсы, показали удовлетворительную прямолинейность (рисунок 4.2).

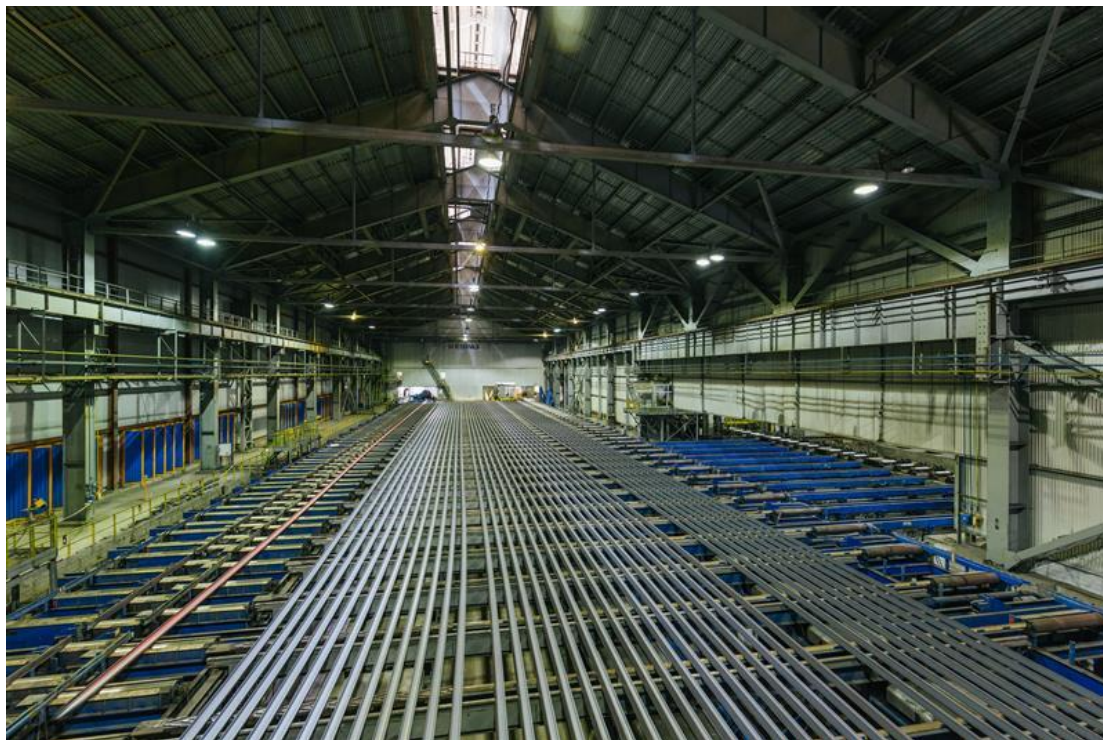


Рисунок 4.2 – Прямолинейность рельсов, термически обработанных по скорректированному режиму

Технологическая схема термической обработки рельсов на промышленной установке предусматривает охлаждение в воздушной среде, нагнетаемой вентиляторами, при этом забор воздуха осуществляется из атмосферы рельсобалочного цеха.

С целью установления влияния изменения температуры охлаждающей среды на изменение твердости на поверхности катания головки рельсов, проведен анализ и статистическая обработка данных температуры воздуха и твердости рельсов за период в течение 1 года.

На рисунке 4.3. представлены данные о влиянии исходной температуры воздуха окружающей среды (перед вентилятором) на температуру охлаждающей среды, непосредственно в промышленной установке. Эта зависимость имеет линейный вид, с высокой степенью достоверности ( $R^2=0,8$ ):

$$T_{\text{вых}} = 13,375 + 0,9951 \times T_{\text{вх}} \quad (4.1)$$

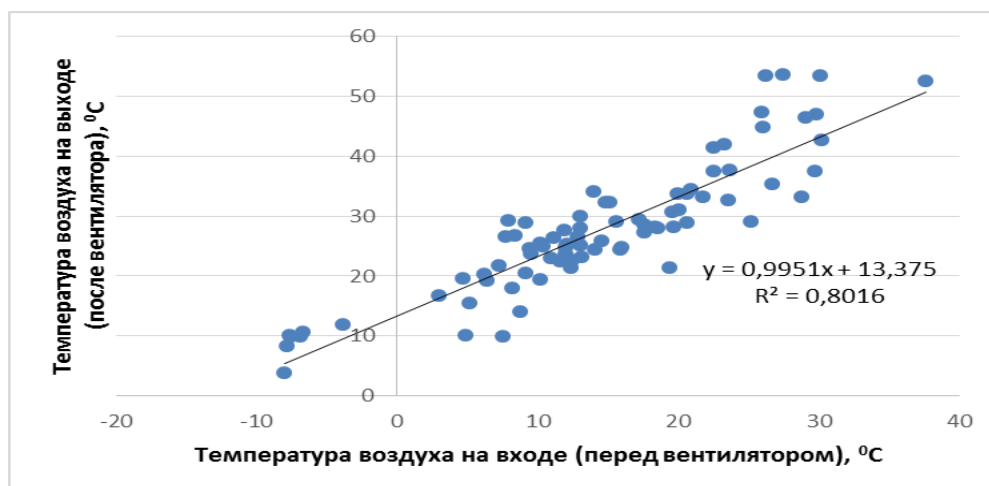


Рисунок 4.3 – Зависимость температуры воздушной среды после вентилятора от температуры окружающего воздуха на входе (перед вентилятором)

Фактические значения температуры воздушной среды на выходе из закалочного устройства составили от 3,7 до 53,7 °C.

Приведенные на рисунке 4.4 среднемесячные фактические значения твердости поверхности катания головки рельсов, термообработанных по одной и той же технологии, имеют незначительные отклонения от среднегодового значения, без выраженных отклонений в зимний и летний период, что свидетельствует об отсутствии существенного влияния колебаний воздушной среды по температуре и влажности.



Рисунок 4.4 – Динамика изменения среднемесячных значений твердости на поверхности катания головки рельсов

## 4.2 Освоение производства рельсов категории ДТ350

Согласно разработанным в данной диссертации рекомендациям в мае – июне 2013 г. 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 плавов по результатам ковшевого и проверочного анализа представлен в таблице 4.1, 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 на головку рельса 10 – 11 кПа, на подшву 4-6 кПа; продолжительность охлаждения 110 с.

Значения механических свойств и твёрдости рельсов сертификационной партии определенных по длине раската представлены в таблице 4.2, из которой видно, что рельсы отвечают всем требованиям ГОСТ Р 51685-2013 для категории качества ДТ350.

Микроструктура рельсов удовлетворительная и представляет собой пластинчатый перлит, оцениваемый 2 – 3 номером шкалы 1 ГОСТ 8233 с разрозненными участками феррита по границам зёрен, количество которого составляет менее 5 % и оценивается номером 1,5 шкалы 7 ГОСТ 8233.

По мере удаления от поверхности перлит приобретает более грубое строение (рисунки 4.5 – 4.7). Величина зерна исследуемого металла оценивается 7 номером шкалы 2 ГОСТ 5639-82 (рисунок 4.8).

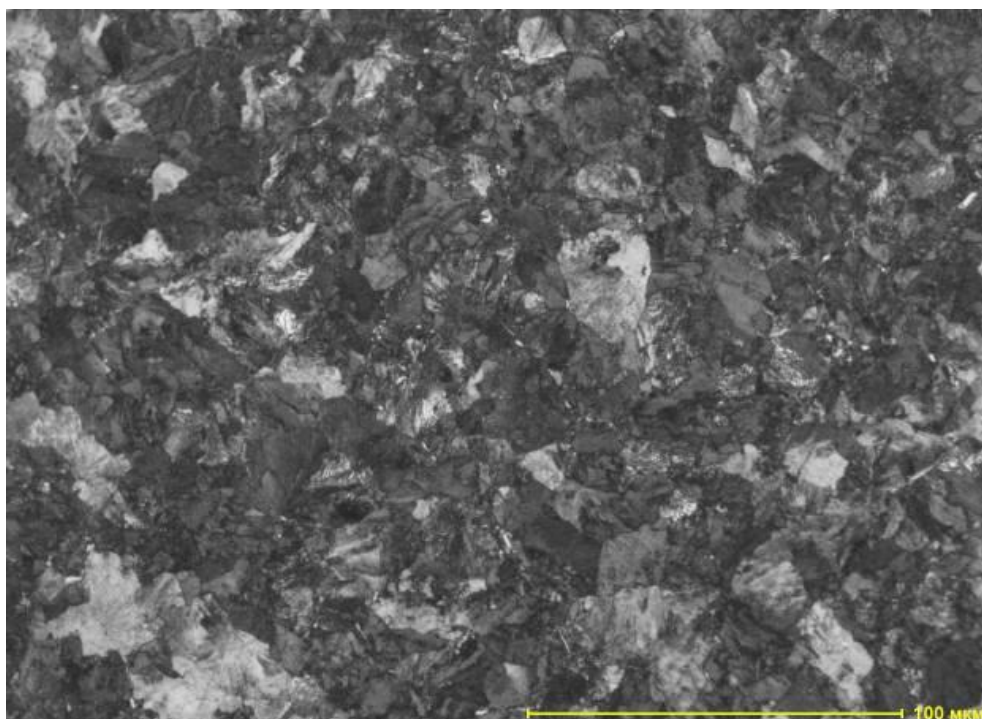


Рисунок 4.5– Микроструктура металла рельса плавки № 26891 на расстоянии 2 мм от поверхности, ×500

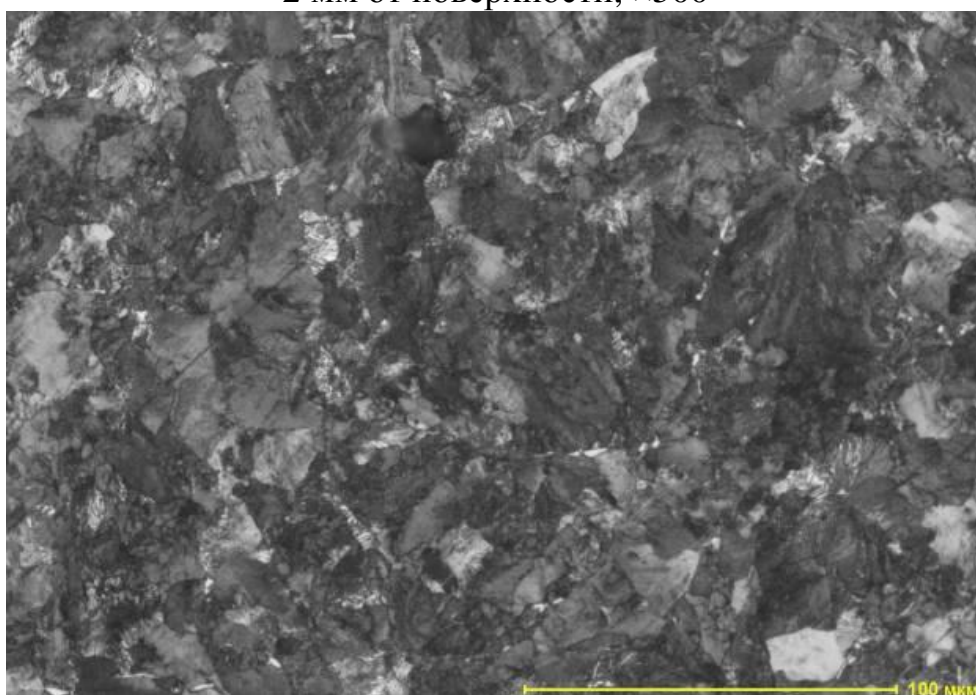


Рисунок 4.6– Микроструктура металла рельса плавки № 26891 на расстоянии 10 мм от поверхности, ×500





x500

Рисунок 4.7 – Микроструктура металла рельса плавки № 26891 на расстоянии 22 мм от поверхности, ×500

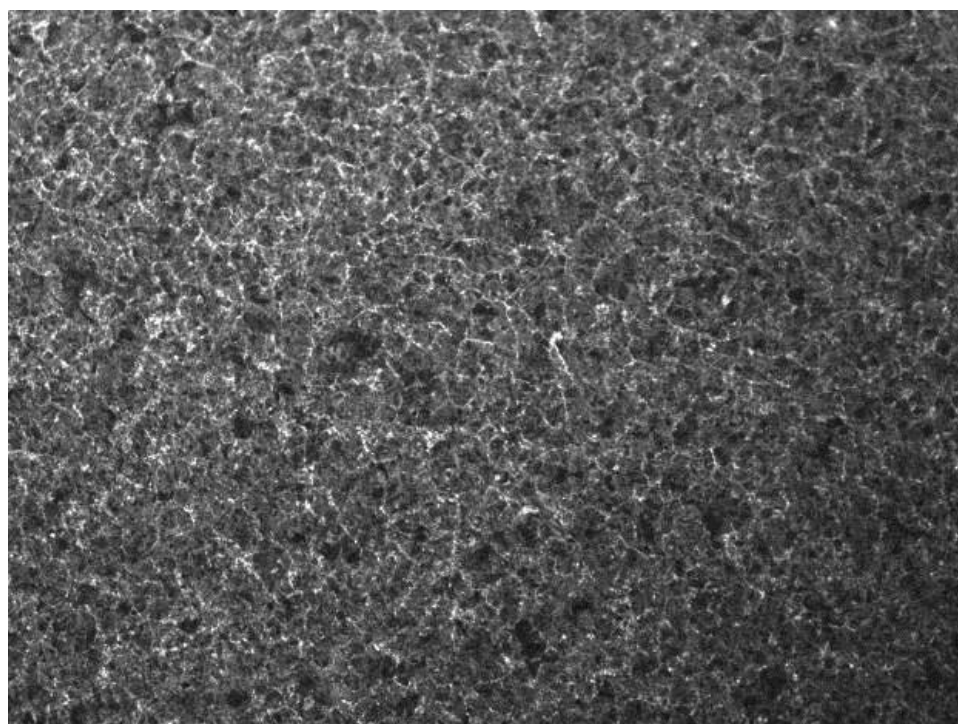
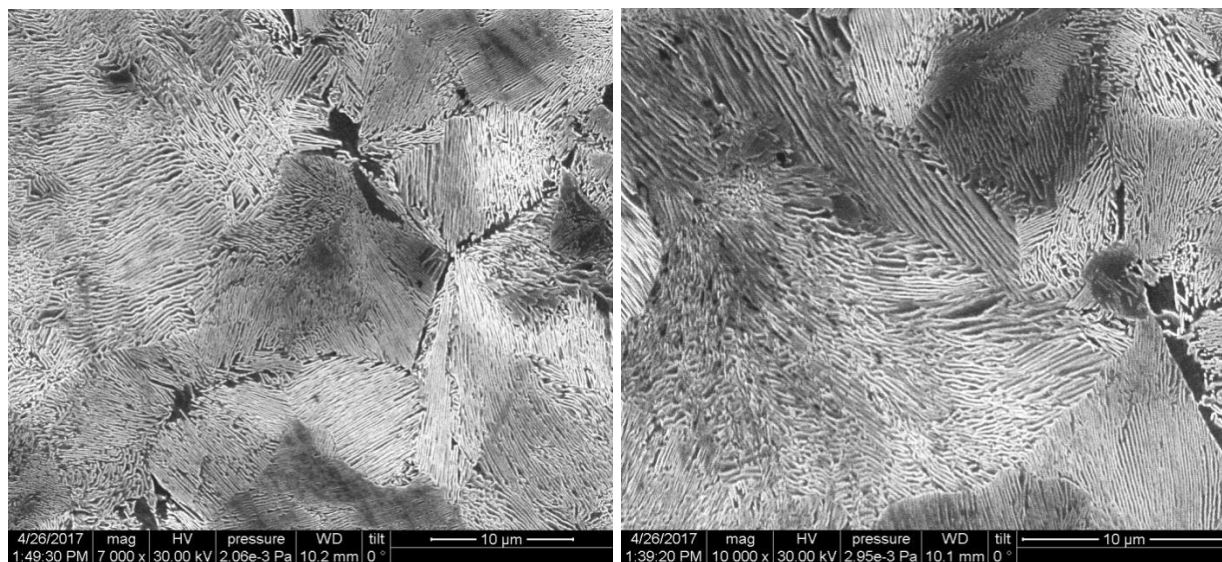


Рисунок 4.8 – Величина зерна металла рельса плавки № 26891, ×100

При исследовании на электронном микроскопе микроструктура металла представляет собой тонкопластинчатый перлит (рисунок 4.9) с участками вырожденного перлита, который представляет собой зерна феррита, содержащие цемен-

тит различной формы (рисунок 4.10). Структурно-свободный феррит преимущественно представлен в виде сетки по границам бывших аустенитных зёрен, а также в виде отдельных зёрен. Толщина ферритной сетки не превышает 0,6 мкм. Величина перлитных колоний составляет 6 мкм, межпластиночное расстояние  $0,17 \pm 0,04$  мкм.



а

б

а –  $\times 7000$ ; б –  $\times 10000$

Рисунок 4.9 – Микроструктура рельсовой стали, тонкопластинчатый перлит

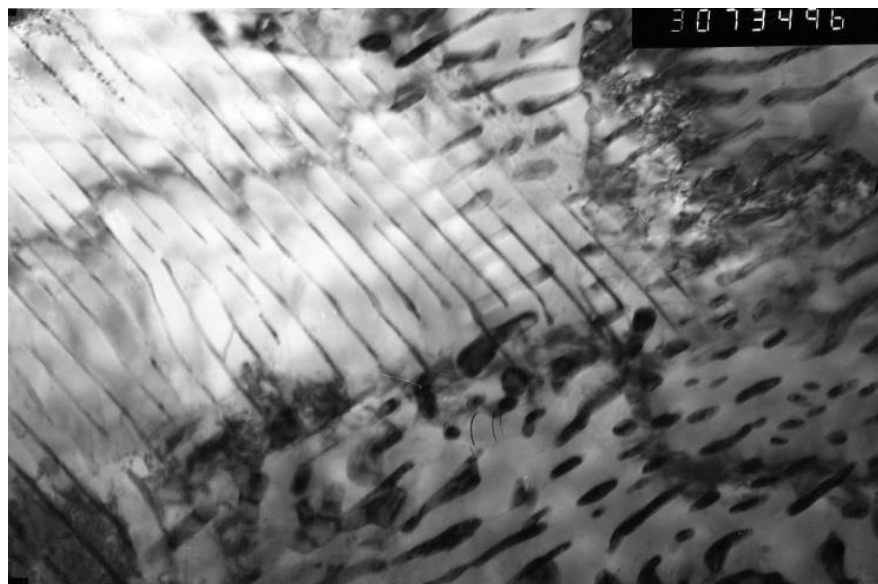


Рисунок 4.10– Микроструктура рельсовой стали, зерна феррита, содержащие цементит различной формы,  $\times 20000$

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 4.3). В настоящее время в АО «ЕВРАЗ ЗСМК» произведена повторная сертификация рельсов категории ДТ350 с присвоением литеры О.

На основе проведенных исследований в течение 2013, 2014 гг., была проведена оптимизация химического состава рельсовой стали, технологии дифференцированной термической обработки и режимов прокатки рельсов, 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  $-60^{\circ}\text{C}$ , 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 экологически чистой 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. Снижение себестоимости дифференцированно термоупрочненных с прокатного нагрева рельсов по сравнению с объемнозакаленными рельсами, обусловленное отказом от применения природного газа для нагрева рельсов и индустриального масла для их охлаждения составило 2 059,64 руб/т рельсов.

Таблица 4.1 – Химический состав металла экспериментальных плавок

Номер плавки	Анализ	Массовая доля химических элементов											
		%											ppm
		C	Mn	Si	Cr	P	S	Ni	Cu	Al	V	Ti	H
26891	Ковшевой	0,73	0,76	0,60	0,42	0,010	0,008	0,07	0,13	0,003	0,04	0,002	1,8
	Проверочный	0,72	0,76	0,58	0,42	0,011	0,009	0,07	0,14	0,003	0,04	0,003	—
26892	Ковшевой	0,72	0,76	0,59	0,43	0,012	0,006	0,07	0,14	0,004	0,04	0,003	1,6
	Проверочный	0,72	0,78	0,57	0,43	0,013	0,007	0,07	0,13	0,003	0,04	0,003	—
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		не более 0,20 % Ni, не более 0,20% Cu; при суммарной массовой доле Ni и Cu не более 0,27%		Не более 0,004	0,03-0,15	Не более 0,010	Не более 2,0
						0,020	0,020						



Таблица 4.2 – Механические свойства и твёрдость рельсов сертификационной партии

Номер плавки	Место отбора проб по длине раската	Механические свойства при растяжении				Ударная вязкость при +20 °С		Твердость, НВ							
								головки					шей-ки	подошвы	
		на поверхности катания	на глубине												
			10 мм по оси	22 мм по оси	10 мм от выкружек		1	2	1	2					
		σ <sub>Т</sub>	σ <sub>В</sub>	δ <sub>5</sub>	ψ	КСУ									
		МПа		%		Дж/см <sup>2</sup>									
26891	Передний конец	840	1250	12,5	37	25	26	378	375	354	368	368	335	339	337
	Середина	840	1270	13	37	31	27	378	385	370	375	378	341	345	345
	Задний конец	870	1280	12,5	40	28	29	375	380	359	373	373	341	341	333
26892	Передний конец	810	1240	12,5	37	32	30	370	370	352	368	373	321	341	339
	Середина	820	1240	12,5	38	27	18	373	373	347	366	363	325	331	329
	Задний конец	820	1240	13	38	35	26	375	383	359	375	375	341	345	350
Требования ГОСТ Р 51685-2013 для рельсов категории ДТ 350		не менее						Не менее					Не более		
		800	1240	9	25	15		363-401	341	341			363		

Таблица 4.3 – Эксплуатационные свойства рельсов сертификационной партии

Материал	Предел вы- носливости Р, МПа	Трещиностойкость		Скорость роста усталостной трещи- ны		Остаточ- ные напряже- ния в по- дошве, Н/мм <sup>2</sup>	Пропущен- ный тоннаж, млн.т.брутто (на 01.06.2017 г.)
		Циклическая	Статическая	ΔK-10, МПа·м <sup>1/2</sup>	ΔK-15, МПа·м <sup>1/2</sup>		
		Kfc, МПа·м <sup>1/2</sup>	K1C, МПа·м <sup>1/2</sup>				
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	

### 4.3 Выводы по главе

1. С использованием результатов теоретических и экспериментальных исследований, разработана новая технология дифференцированная термической обработки рельсов с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева, включающая скорректированный химический состав и режимы воздушоструйной дифференцированной термической обработки железнодорожных длинномерных рельсов общего и специального назначения.

2. Внедрение новой ресурсосберегающей технологии дифференцированной термической обработки с применением экологически чистой среды – воздуха, с использованием тепла прокатного нагрева позволило 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 доле участия автора 30 %.

## 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 % C, 0,78 – 1,09 % Mn, 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 измерения твердости построены термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита.

2. 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 °C, однако комплексное микролегирование Nb и V, снижает температуру начала мартенситного превращения на 10 – 15 °C.

3. 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 ванадием 0,04 – 0,07 %.

4. 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.

5. 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 выше 825 °С при давлении воздуха 15 – 22 кПа; увеличение содержания элементов повышающих устойчивость аустенита (хрома, марганца выше 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 выше 30 кПа происходит резкое увеличение прочностных свойств и твердости при сохранении пластичности.

6. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований, скорректирован химический состав стали, предназначенной для производства дифференцированно термоупрочненных рельсов, определены основные параметры режима воздушно-струйной 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.

7. Разработана и внедрена в производство новая ресурсосберегающая технология дифференцированной воздушно-струйной термической обработки рельсов с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева. Скорректированные содержания химических элементов и разработанные режимы термической обработки позволили освоить производство дифференцированно термоупрочненных

рельсов общего (категория ДТ350) и специального (категории ДТ370ИК, ДТ350НН) назначения.

Наработка первой в России партии дифференцированно термоупрочненных рельсов на Экспериментальном кольце превысила 1,1 млрд. т пропущенного груза, с показателем  $\gamma$ - 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 доле участия автора 30 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Повышение качества отечественных железнодорожных рельсов [Текст] / Л. А. Смирнов [и др.] // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Чёрная металлургия». – 2005. – № 6. – С. 43–49.
2. Захаров, С. Ренессанс железных дорог: новые вызовы для производителей рельсов [Текст] / С. Захаров, Л. Мугинштейн, Е. Шур // Инженерные решения. – 2012. – № 1. – С. 6–7.
3. Лисицын, А. И. Актуальные требования к рельсовой продукции, поставляемой для ОАО «РЖД» [Текст] / А. И. Лисицын // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Челябинск, 24–25 сентября 2015 г. – Екатеринбург, 2016. – С. 193–200.
4. Шур, Е. А. Новый метод термической обработки рельсов [Текст] / Е. А. Шур // Материалы рельсовой комиссии 2005 : сборник докладов. – Нижний Тагил, 2005. – С. 221–231.
5. Снитко, Ю. П. Современное состояние производства рельсов за рубежом [Текст] / Ю. П. Снитко, А. Х. Галямов, С. В. Никитин // Материалы юбилейной рельсовой комиссии 2002 : сборник докладов, Новокузнецк, март 2002 г. – Новокузнецк, 2002. – С. 10–30.
6. Шур, Е. А. Повреждения рельсов [Текст] / Е. А. Шур. – Москва : Интекст, 2012. – 192 с.
7. Черняк, С. С. Проблемы повышения эксплуатационной стойкости стали [Текст] / С. С. Черняк. – Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2007. – 345 с.
8. Перспективные технологии тепловой и термической обработки в производстве рельсов [Текст] : монография / В. В. Павлов [и др.]. – Москва : Тепло-техник, 2007. – 280 с.

9. Sawley, K. Development of bainitic rail steels with potential resistance to rolling contact fatigue [Text] / K. Sawley, D. Kristan // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2003. – Vol. 26, № 10. – P. 1019–1029.
10. Рейхарт, В. А. Можно ли узнать соответствуют рельсы конкретным условиям или нет? [Текст] / В. А. Рейхарт // *Путь и путевое хозяйство*. – 1994. – №8. – С. 10–11.
11. EN 13674-1:2011. Железные дороги. Путь. Рельсы. Часть 1. Рельсы Виньоля 46 кг/м и более [Текст] = *Railway applications – Track – Rail – Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above*. – Введ. 2010–12–10. – Москва : Технический комитет (CEN/TC 256) «Железные дороги», 2010. – 114 с.
12. ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия (с изменением № 1) [Текст] – Взамен [ГОСТ Р 51685–2000](#) ; введ. 2014–07–01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 95 с.
13. AREMA Manual for Railway Engineering. Chapter 4. RAIL [Text] / American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. – USA, 2014.
14. Абдурашитов, А. Ю. О разработке рельса типа Р65 с улучшенным профилем [Текст] / А. Ю. Абдурашитов // *Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Новокузнецк, 26–28 октября 2010 г.* – Екатеринбург, 2011. – С. 144–159.
15. Абдурашитов, А. Ю. Совершенствование профиля рельсов [Текст] / А. Ю. Абдурашитов // *Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам юбилейного 130-го заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Новокузнецк, 7–9 октября 2014 г.* – Санкт-Петербург, 2015. – С. 193–200.
16. Повышение эффективности и надёжности работы рельсов [Текст] : сборник научных трудов / ОАО Научно-исследовательский институт железно-

дорожного транспорта (ВНИИЖТ) ; под ред. А. Ю. Абдурашитова. – Москва : Интекст, 2011. – 128 с.

17. Галицын, Г. А. Совершенствование профиля рельса Р65 для участков дорог скоростного совмещенного движения [Текст] / Г. А. Галицын, А. Б. Добужская, В. А. Рейхарт // Материалы юбилейной рельсовой комиссии 2002 : сборник докладов, Новокузнецк, март 2002 г. – Новокузнецк, 2002. – С. 110–119.

18. Великанов, А. В. Влияние химического состава на свойства термически обработанной рельсовой стали [Текст] / А. В. Великанов, Я. Р. Раузин // Рельсы повышенной эксплуатационной стойкости : труды ВНИИЖТ. – Москва : Транспорт, 1966. – С. 138–152.

19. Поляков, В. В. Основы технологии производства железнодорожных рельсов [Текст] / В. В. Поляков, А. В. Великанов. – Москва : Металлургия, 1990. – 416 с.

20. Ивано, Г. Технические и эксплуатационные характеристики рельсов с высоким содержанием углерода [Текст] / Г. Ивано, И. Кацуя // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Анапа, 28–29 сентября 2011 г. – Екатеринбург, 2012. – С. 72–80.

21. Масару Уэда. Характеристики термоупрочненных рельсов и новейшие разработки NipponSteel [Текст] / Масару Уэда, Кацуя Ивано, Такэси Ямамото // Инженерные решения. – 2012. – №1. – С. 9–11.

22. Производство рельсов повышенной износостойкости [Текст] / В. В. Павлов [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2007. – № 10. – С. 35–37.

23. Лисицын, А. И. Износостойкость рельсов Р65К и Р65НЭ в кривых участках пути на Восточно-Сибирской железной дороге [Текст] / А. И. Лисицын // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Новокузнецк, 26–29 октября 2010 г. – Екатеринбург, 2011. – С. 170–176.



24. Петров, Д. А. Опыт эксплуатации рельсов повышенной износостойкости и контактной выносливости производства ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» в кривых малых радиусов [Текст] / Д. А. Петров // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Московская обл., 23–25 октября 2012 г. – Екатеринбург, 2013. – С. 145–149.
25. Петров, Д. А. Эксплуатация рельсов повышенной износостойкости и контактной выносливости производства ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» в кривых малых радиусов на Южно-Уральской железной дороге [Текст] / Д. А. Петров // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Новокузнецк, 25–27 октября 2013 г. – Екатеринбург, 2014. – С. 149–154.
26. Упрочнение железнодорожных рельсов путем изотермической закалки на нижний бейнит [Текст] / Ю. А. Самойлович // Бюллетень «Черная металлургия». – 2013. – № 8. – С.39–43.
27. Разработка технологии производства рельсов из бейнитной стали [Текст] / В. И. Ворожищев [и др.] // Сталь. – 2005. – № 2. – С. 71–74.
28. Железнодорожные рельсы из бейнитной стали [Текст] / В. В. Павлов [и др.] // Металлург. – 2007. – № 4. – С. 51–53.
29. Рельсы высокой прочности с бейнитной структурой, полученной с прокатного нагрева [Текст] / Х. Де Боер [и др.] // Чёрные металлы. – 1995. – июль. – С. 29–36.
30. Опыт производства рельсов из стали бейнитного класса на НТМК [Текст] / А. В. Кушнарев [и др.] // Сталь. – 2005. – № 6. – С. 131–133.
31. Совершенствование рельсовых сталей [Текст] // Железные дороги мира. – 2016. – №1. – С.74–76. – По материалам компании Voestalpine Schienen ([www.voestalpine.com](http://www.voestalpine.com)). International Railway Journal. 2015. № 10. P. 55–58.
32. Инновационный курс железных дорог (в Японии) [Текст] // Железные дороги мира. – 2015. – № 5. – С. 30–34.

33. Целесообразность линии HS 2 в Великобритании [Текст] // Железные дороги мира. – 2011. – № 9. – С. 14–21.
34. Высокоскоростное движение как драйвер металлургии [Текст] // Металлоснабжение и сбыт. – 2014. – № 4. – С. 84–87.
35. Высокоскоростные сообщения в республике Корея [Текст] // Железные дороги мира. – 2015. – №1. – С. 22–24.
36. Производство рельсов для высокоскоростных дорог и их контроль в потоке [Текст] / К. Ф. Беккер [и др.] // Чёрные металлы. – 2000. – № 5. – С. 32–37.
37. Планирование высокоскоростных линий в Португалии [Текст] // Железные дороги мира. – 2011. – № 9. – С. 22–26.
38. Спрямление скоростного движения Париж-Женева [Текст] // Железные дороги мира. – 2011. – № 8. – С. 59–61.
39. Ермаков, В. М. Инновационные решения в части конструкций железнодорожного пути [Текст] / В. М. Ермаков // Промышленный транспорт XXI век. – 2009. – № 4. – С. 22–24.
40. Андреева, Т. Пора начинать строить ВСМ. [Текст] / Т. Андреева, М. Шевченко // РЖД-Партнер. – 2011. – № 9. – С. 82–84.
41. О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года (вместе с "Планом мероприятий по реализации в 2008-2015 годах Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года") [Текст] : распоряжение Правительства РФ от 17.06.2008 № 877-р // Собрание законодательства РФ. – 2008. – № 29 (ч. II). – Ст. 3537.
42. О мерах по организации движения высокоскоростного железнодорожного транспорта в Российской Федерации [Текст] : указ Президента РФ от 16.03.2010 № 321 // Собрание законодательства РФ. – 2010. – № 12. – Ст. 1312.
43. О комплексе мер по реализации основных положений Послания Президента Российской Федерации Федеральному Собранию Российской Федерации

2007 года [Текст] : распоряжение Правительства РФ от 15.06.2007 № 781-р // Собрание законодательства РФ. – 2007. – № 26. – Ст. 3196.

44. О Плане мероприятий по реализации проектов организации движения высокоскоростного железнодорожного транспорта [Текст] : распоряжение Правительства РФ от 31.08.2011 № 1522-р // Собрание законодательства РФ. – 2011. – № 37. – Ст. 5281.

45. Котельников, А. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы [Текст] : (аналитический обзор) / А. В. Котельников. – Москва : Интекст, 2002. – 104 с.

46. Стали для рельсов высокоскоростных линий [Текст] // Железные дороги мира. – 2000. – № 8. – С. 67–70. – По материалам Eisenbahningenieur. 1998. № 8. S. 12–16.

47. Оптимизация аэродинамики высокоскоростных поездов [Текст] // Железные дороги мира. – 2011. – № 9. – С. 42–46.

48. Железные дороги Германии: 20-летие успешной реформы [Текст] // Железные дороги мира. – 2014. – №4. – С. 14–23.

49. Скоростные стрелочные переводы в кривых [Текст] / Б. Э Глюзберг [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 5. – С. 5–6.

50. Глюзберг, Б. Э. Стрелочные переводы для высокой скорости [Текст] / Б. Э. Глюзберг // Путь и путевое хозяйство. – 2010. – № 6. – С. 9–11.

51. Крысанов, Л. Г. Об установлении геометрических нормативов коротких вертикальных неровностей на рельсах для скорости 250 км/час [Текст] / Л. Г. Крысанов // Промышленный транспорт XXI век. – 2009. – № 5/6. – С. 37–42.

52. Рейхарт, В. А. Прямые рельсы [Текст] / В. А. Рейхарт, Е. А. Шур // Путь и путевое хозяйство. – 2002. – № 12. – С. 7–8.

53. Снитко, Ю. Рельсы: Стремление к скорости [Текст] / Ю. Снитко // Металлы Евразии. – 2008. – № 5. – С. 1–5.

54. Остаточные напряжения и прочность железнодорожных рельсов [Текст] / под общ. ред. В. И. Власова. – Москва : Транспорт, 1973. – 64 с. – (Труды

Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта / ЦНИИ МПС ; Вып. 491).

55. Борц, А. И. Исследования инновационной рельсовой продукции и перспективы её дальнейшего развития [Текст] / А. И. Борц // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам юбилейного 130-го заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Новокузнецк, 7–9 октября 2014 г. – Санкт-Петербург, 2015. – С. 107–120.

56. Ермаков, В. М. О некоторых вопросах ведения рельсового хозяйства [Текст] / В. М. Ермаков // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам юбилейного 130-го заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Новокузнецк, 7–9 октября 2014 г. – Санкт-Петербург, 2015. – С. 137–148.

57. Окладников, Е. В. Рельсы отечественных и иностранных предприятий [Текст] / Е. В. Окладников // Путь и путевое хозяйство. – 2010. – № 6. – С. 11–17.

58. Трушникова, А. С. Сравнение методов контроля неметаллических включений для оценки качества железнодорожных рельсов [Текст] / А. С. Трушникова, К. В. Григорович, С. С. Шибает // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Калуга, 1–2 октября 2009 г. – Екатеринбург, 2010. – С. 116–124.

59. Юнин, Г. Н. Сравнительная характеристика качества железнодорожных рельсов российских и зарубежных производителей [Текст] / Юнин Г. Н. // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Нижний Тагил, 25–26 июня 2008 г. – Екатеринбург, 2009. – С. 87–99.

60. Совершенствование технологии внепечной обработки стали в условиях ОАО «НТМК» с целью повышения качества стали [Текст] / К. В. Григорович [и др.] // Промышленный транспорт XXI век. – 2009. – № 4. – С. 44–52.

61. Капустина, Е. С. Сравнение методов оценки неметаллических включений в рельсовой стали производства ОАО «НТМК» [Текст] / Е. С. Капустина // Неметаллические включения в рельсовой стали : сборник научных трудов по материалам I Всероссийского научно-технического семинара, Екатеринбург, 2005. – Екатеринбург, 2005. – С. 95–101.
62. Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов [Текст] : сборник научных трудов по материалам II Всероссийского научно-технического семинара, Екатеринбург, 16–17 мая 2006 г. / Уральский институт металлов. – Екатеринбург : УИМ, 2006. – 235 с.
63. Повышение эксплуатационной стойкости рельсов [Текст] // Железные дороги мира. – 1996. – № 5. – С. 54–55. – По материалам Railway Track and Structure. 1994. № 1. Р. 19–23.
64. ГОСТ Р 51685–2000. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия [Текст]. – Введ. 2001–07–01. – Москва : Стандартинформ, 2006. – 23 с.
65. Георгиев, М. Н. Трещиностойкость железнодорожных рельсов [Текст] / М. Н. Георгиев. – Кемерово : ФЛАГ, 2006. – 211 с.
66. Попов, К. В. Низкотемпературная хрупкость стали и деталей машин [Текст] / К. В. Попов, В. Г. Савицкий. – Москва : Машиностроение, 1969. – 192 с.
67. Рейхарт, В. А. Ударная вязкость рельсовой стали [Текст] / В. А. Рейхарт // Путь и путевое хозяйство. – 2005. – № 12. – С. 17–18.
68. Разрушение (Современные представления) [Текст]. Т. 6. Разрушение металлов / ред. Г. Либовиц ; пер. с англ.: В. А. Займовский, Д. В. Лаптев ; ред. пер. М. Л. Бернштейн. – Москва : Металлургия, 1976. – 495 с.
69. Корнева, Л. В. Сравнительный анализ показателей качества рельсов НКМК и зарубежных производителей [Текст] / Л. В. Корнева, Н. А. Козырев, Е. В. Поляков, Г. Н. Юнин, О. П. Атконова, Е. В. Полевой // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 12. – С. 38–42.
70. Юнин, Г. Н. Основопологающие элементы современной технологии производства рельсов, отражение их в рекомендациях межведомственной рельсовой комиссии и реализация на отечественных металлургических предприятиях

[Текст] / Г. Н. Юнин // Повышение качества и эксплуатационной стойкости рельсовой продукции : сборник научных докладов по материалам рельсовой комиссии, Магнитогорск, сентябрь 2004 г. – Москва : Интекст, 2005.

71. Ермаков, В. М. Инновационные решения в области материалов для верхнего строения железнодорожного пути [Текст] / В. М. Ермаков // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Калуга, 1–2 октября 2009 г. – Екатеринбург, 2010. – С. 9–13.

72. Певзнер, В. О. Совершенствование нормативных документов по оценке состояния пути при скоростном движении [Текст] / В. О. Певзнер // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 12. – С. 2–6.

73. Зензинов, Б. Н. Устройство и содержание участков пути на линии С.-Петербург – Хельсинки [Текст] / Б. Н. Зензинов, Ю. Р. Трушина // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 7. – С. 21–23.

74. Аксёнов, В. А. Технологии восстановления служебных свойств рельсов [Текст] / В. А. Аксёнов, И. Я. Пименов, В. А. Шаламов // Мир транспорта. – 2005. – № 3(11). – С. 58–69.

75. Проблемы железнодорожного транспорта [Текст] : сборник трудов ученых и аспирантов / ВНИИЖТ ; под ред. Г. В. Гогричиани. – Москва : Интекст, 2011. – 224 с.

76. Ермаков, В. М. Опытный полигон на линии Санкт-Петербург – Москва [Текст] / В. М. Ермаков, Э. Д. Загитов // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 5. – С. 2–5.

77. Лысюк, В. С. Повреждение рельсов и износ колёс [Текст] / В. С. Лысюк, Г. Г. Желнин, С. Н. Шарапов // Путь и путевое хозяйство. – 1997. – № 6. – С. 4–8.

78. Козлов, В. А. Рельсовая сталь. Ч. 1 [Текст] / В. А. Козлов // Производство проката. – 2005. – № 8. – С. 41–46.

79. Шеёнман, Е. Л. Дефекты рельсов. Обзор зарубежных изданий [Текст] / Е. Л. Шеёнман // Путь и путевое хозяйство. – 2007. – № 3. – С. 29–32.

80. Бели, Я. Контактно-усталостные трещины в головке рельса [Текст] / Я. Бели, И. Немет // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 5. – С. 33–37.
81. Рейхарт, В. А. Испытания железнодорожных рельсов на экспериментальном кольце ВНИИЖТ [Текст] / В. А. Рейхарт // Промышленный транспорт XXI век. – 2009. – № 4. – С. 25–29.
82. Рейхарт, В. А. Анализ дефектов рельсов [Текст] / В. А. Рейхарт // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 4. – С. 22–25.
83. Борц, А. И. Результаты сравнительных испытаний рельсов отечественных и зарубежных производителей на контактно-усталостную выносливость [Текст] / А. И. Борц, К. Л. Заграничек, Л. В. Долгих // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам 128 заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Московская обл., 23–25 октября 2012 г. – Екатеринбург, 2013. – С. 113–127.
84. Борц, А. И. Исследование причин раннего выхода из строя рельсов партии Т1-4 производства ОАО «ЕВРАЗ НТМК» [Текст] / А. И. Борц [и др.] // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Новокузнецк, 25–27 октября 2013 г. – Екатеринбург, 2014. – С. 118–140.
85. О механизме развития контактно-усталостных трещин в железнодорожных рельсах [Текст] / М. Н. Георгиев [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2000. – № 9. – С. 50–52.
86. Рейхарт, В. А. Рельсы нового поколения [Текст] / В. А. Рейхарт, Л. А. Джанполодова, И. В. Хромов // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 8. – С. 9–12.
87. Шлифование рельсов [Текст] // Железные дороги мира. – 2000. – № 9. – С. 55–62.
88. Аксёнов, В. А. Технологии восстановления служебных свойств рельсов [Текст] / В. А. Аксёнов, И. Я. Пименов, В. А. Шаламов // Мир транспорта. – 2005. – № 3(11). – С. 58–69.

89. Развитие технологий шлифования рельсов [Текст] // Железные дороги мира. – 2011. – № 10. – С. 59–62. – По материалам компании Speno international; ZEVRail. 2010. № 5. S. 170–178.
90. Шур, Е. А. Влияние структуры на эксплуатационную стойкость рельсов [Текст] / Е. А. Шур // Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов : сборник научных трудов по материалам II Всероссийского научно-технического семинара, Екатеринбург, 16–17 мая 2006 г. – Екатеринбург, 2006. – С. 37–64.
91. Ворожищев, В. И. Состав и технология производства рельсов повышенной работоспособности [Текст] / В. И. Ворожищев. – Новокузнецк, 2008. – 350 с.
92. Рельсовая сталь для железных дорог Северной Америки [Текст] // Железные дороги мира. – 1999. – № 11. – С. 63–65.
93. Неметаллические включения в рельсовой стали [Текст] : сборник научных трудов по материалам I Всероссийского научно-технического семинара «Неметаллические включения в рельсовой стали», Екатеринбург, 2005 г. / Уральский институт металлов. – Екатеринбург : УИМ, 2005. – 151 с.
94. Павлов, В. В. Разработка методики оценки склонности рельсовой стали к образованию дефектов контактно-усталостного происхождения [Текст] / В. В. Павлов, Л. В. Корнева // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Новокузнецк, 26–29 октября 2010 г. – Екатеринбург, 2011. – С. 117–137.
95. Оценка склонности рельсов к образованию контактно-усталостных дефектов [Текст] / В. В. Павлов, Л. В. Корнева, Е. В. Полевой, К. В. Волков // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Московская обл., 23–25 октября 2012 г. – Екатеринбург, 2013. – С. 106–112.



96. Павлов, В. В. Безалюминиевое раскисление стали [Текст] / В. В. Павлов // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам юбилейного 130-го заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Новокузнецк, 7–9 октября 2014 г. – Санкт-Петербург, 2015. – С. 231–240.
97. Куслицкая, А. Б. О влиянии неметаллических включений на механизм возникновения трещин усталости [Текст] / А. Б. Куслицкая, В. Л. Мизецкий, Г. В. Карпенко // Сборник докладов академии наук СССР. – Москва : Академия наук СССР, 1969. – Т. 187, № 1. – С. 79–80.
98. Абдурашитов, А. Ю. Закономерности образования контактно-усталостных дефектов [Текст] / А. Ю. Абдурашитов // Путь и путевое хозяйство. – 2002. – № 11. – С. 16–20.
99. Рельсы нового поколения [Текст] // Железные дороги мира – 2013. – № 2. – С. 66–67. – K. Smith. International Railway Journal. 2012. № 12. P. 18–20.
100. Шур, Е. А. Структурные основы термической обработки рельсов [Текст] / Е. А. Шур // Термическая обработка металлов : сборник докладов. – Москва : Металлургия, 1974. – Вып. 3. – С. 36–38.
101. Добужская, А. Б. Исследование структуры рельсов с разной стойкостью против образования контактно-усталостных дефектов [Текст] / А. Б. Добужская, Г. А. Голицын, В. И. Сырейщикова // Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов : сборник научных трудов по материалам II Всероссийского научно-технического семинара, Екатеринбург, 16–17 мая 2006 г. / Уральский институт металлов. – Екатеринбург, 2006. – С. 64–80.
102. Павлов, В. В. Выбор технологических параметров термической обработки рельсов [Текст] / В. В. Павлов // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Нижний Тагил, 25–26 июня 2008 г. – Екатеринбург, 2009. – С. 112–134.

103. Технологические аспекты производства железнодорожных «суперперлитных» рельсов [Текст] / А. Б. Юрьев [и др.] // Сталь. – 2009. – № 8. – С. 78–79.
104. Ершов, Г. С. Физико-химические основы рационального легирования сталей и сплавов [Текст] / Г. С. Ершов, Ю. Б. Бычков. – Москва : Metallurgia, 1982. – 360 с.
105. Качество рельсов из легированной хромом и ванадием стали [Текст] / А. А. Дерябин [и др.] // Сталь. – 2004. – № 1. – С. 58–61.
106. Современные подходы к разработке технологии дифференцированной термообработки рельсов [Текст] / С. В. Хлыст [и др.] // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых креплений : сборник научных трудов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Новокузнецк, 26–29 октября 2010 г. – Екатеринбург, 2011. – С. 138–143.
107. Исследование возможности закалки рельсов в водополимерных средах [Текст] / В. И. Ворожищев [и др.] // Сталь. – 2005. – № 11. – С. 126–131.
108. Мозер, А. Изготовление и эксплуатация рельсов с упрочненной головкой [Текст] / A. Moser, R. Oswald. // Eisenbahntechnische Rundschau. – 1991. – № 1/2. – S. 87–92.
109. Могильный, В. В. Результаты производства и качество рельсов ОАО «НКМК» [Текст] / В. В. Могильный, К. В. Волков, Е. П. Кузнецов // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых креплений : сборник научных трудов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Новокузнецк, 26–29 октября 2010 г. – Екатеринбург, 2010. – С. 26–32.
110. Смирнов, Л. А. Состояние и перспективы производства и применения ванадийсодержащих низколегированных сталей [Текст] / Л. А. Смирнов, А. Б. Добужская, В. И. Сырейщикова // Новые технологии и материалы в металлургии : сборник научных трудов / Уральский институт металлов. – Екатеринбург, 2001. – С. 205–218.

111. Внедрение технологии микролегирования рельсовой стали ванадий-содержащими сплавами [Текст] / В. А. Паляничка [и др.] // Технология производства железнодорожных рельсов и колёс : сборник научных статей. – Харьков, 1990. – С. 20–24.
112. Оптимизация химического состава стали и технологии для производства рельсов низкотемпературной надёжности [Текст] / А. А. Дерябин [и др.] // Сталь. – 2005. – № 6. – С. 134–136.
113. Ray, A. Niobium in Microalloyed Rail Steels [Text] / A. Ray, H. K. D. H. Bhadeshia // HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 & Offshore Engineering Steels 2015 : Conference Proceedings. – Switzerland, 2016. – S. 33–40.
114. Исследование неметаллических включений в рельсах и очагах контактно-усталостных дефектов [Текст] / А. Б. Добужская [и др.] // Неметаллические включения в рельсовой стали : сборник научных трудов по материалам I Всероссийского научно-технического семинара / Уральский институт металлов. – Екатеринбург, 2005. – С. 41–58.
115. Шур, Е. А. Влияние неметаллических включений на разрушение рельсов и рельсовой стали [Текст] / Е. А. Шур, С. М. Трушевский // Неметаллические включения в рельсовой стали : сборник научных трудов по материалам I Всероссийского научно-технического семинара / Уральский институт металлов. – Екатеринбург, 2005. – С. 87–94.
116. Термически упрочненные рельсы / под ред. А. Ф. Золотарского. – Москва : Транспорт, 1976. – 264 с.
117. Влияние неметаллических включений на повреждаемость цирконий-содержащих рельсов контактно-усталостными дефектами [Текст] / А. Б. Добужская [и др.] // Сталь. – 1990. – № 11. – С. 81–85.
118. Влияние кальция на загрязненность и морфологию неметаллических включений в рельсовой стали [Текст] / В. В. Могильный [и др.] // Неметаллические включения в рельсовой стали : сборник научных трудов по материалам I Всероссийского научно-технического семинара / Уральский институт металлов. – Екатеринбург, 2005. – С. 59–64.

119. Разработка состава стали и способа термообработки рельсов для работы в тяжёлых условиях эксплуатации [Текст] / Д. К. Нестеров [и др.] // Технология производства железнодорожных рельсов и колёс : сборник научных статей. – Харьков, 1989. – С. 23–27.

120. Влияние модифицирования рельсовой стали барием и кальцием на свойства рельсов [Текст] / А. А. Дерябин [и др.] // Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов : сборник научных трудов по материалам II Всероссийского научно-технического семинара, Екатеринбург, 16–17 мая 2006 г. / Уральский институт металлов. – Екатеринбург, 2006. – С. 18–36.

121. Анализ применения барийсодержащих лигатур для модифицирования и раскисления рельсовой стали с целью повышения эксплуатационной стойкости железнодорожных рельсов [Текст] / К. Л. Заграничек [и др.] // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных трудов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Новокузнецк, 7–9 октября 2014 г. – Санкт-Петербург, 2015. – С. 245–252.

122. Модифицирование стали и сплавов редкоземельными элементами. Сообщение 1 [Текст] / Л. А. Смирнов [и др.] // Metallurg. – 2015. – № 11. – С. 57–63.

123. Модифицирование стали и сплавов редкоземельными элементами. Сообщение 2 [Текст] / Л. А. Смирнов [и др.] // Metallurg. – 2016. – № 1. – С. 41–48.

124. Нано: структуры, материалы и технологии [Текст] : [монография] / Е. А. Будовских [и др.] ; Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2010. – 201 с.

125. Сравнение затрат жизненного цикла обычных и термоупрочненных рельсов [Text] // Железные дороги мира. – 2006. – № 3. – С. 71–74. – По материалам Railway Gazette International. 2005. № 9. P. 549–551.

126. Юнин, Г. Н. О техническом перевооружении и реконструкции отечественного рельсового производства [Текст] / Г. Н. Юнин // Материалы юбилейной

рельсовой комиссии 2002 : сборник докладов, Новокузнецк, март 2002 г. / Кузнецкий металлургический комбинат. – Новокузнецк, 2002. – С. 7–9.

127. Крысанов, Л. Г. Результаты полигонных испытаний рельсов на экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ» в 2001–2008 гг. [Текст] / Л. Г. Крысанов // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Нижний Тагил, 25–26 июня 2008 г. – Екатеринбург, 2009. – С. 31–37.

128. Рейхарт, В. А. Основные результаты полигонных испытаний рельсов на экспериментальном кольце ВНИИЖТ [Текст] / В. А. Рейхарт, Л. А. Джанполодова // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Калуга, 1–2 октября 2009 г. – Екатеринбург, 2010. – С. 16–26.

129. Джанполодова, Л. А. Основные результаты полигонных испытаний рельсов на экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ» в 2008–2010 гг. [Текст] / Л. А. Джанполодова // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Новокузнецк, 26–29 октября 2010 г. – Екатеринбург, 2011. – С. 49–62.

130. Левченко, Н. Ф. Совершенствуем технологию закалки рельсов [Текст] / Н. Ф. Левченко, В. Е. Сапожков, Л. С. Тихонюк // Путь и путевое хозяйство. – 1993. – № 8. – С. 12.

131. Фо, Ф. Новые рельсовые стали Tata Steel [Текст] / Ф. Фо, П. Секордель, Ж. Жисваль // Инженерные решения. – 2012. – № 1. – С. 7–8.

132. Дерябин, А. А. Концепция и основные положения проекта нового национального стандарта на железнодорожные рельсы с учётом современных требований [Текст] / А. А. Дерябин, В. А. Рабовский, А. В. Комоватов // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рель-

совая комиссия», Нижний Тагил, 25–26 июня 2008 г. – Екатеринбург, 2008. – С. 100–111.

133. Железнодорожные рельсы из электростали [Текст] / Н. А. Козырев [и др.] ; ЕвразХолдинг, Новокузнецкий металлургический комбинат. – Новокузнецк, 2006. – 387 с.

134. Нестеров, Д. К. Исследование структурообразования в углеродистой рельсовой стали для выбора режимов термообработки рельсов с нагрева ТВЧ [Текст] / Д. К. Нестеров, В. Е. Сапожков // Технология производства железнодорожных рельсов и колёс : отраслевой сборник научных трудов. – Харьков, 1989. – С. 19–23.

135. Шур, Е. А. Изучение процесса структурообразования при термической обработке рельсов [Текст] / Е. А. Шур // Рельсы повышенной эксплуатационной стойкости : труды ВНИИЖТ. – Москва : Транспорт, 1966. – С. 103–115.

136. Люты, В. Закалочные среды [Текст] : справочник : пер. с польского / В. Люты ; под ред. С. Б. Масленкова. – Челябинск : Металлургия, Челябинское отделение, 1990. – 192 с.

137. Выбор технологии для термического упрочнения железнодорожных рельсов [Текст] / В. В. Павлов [и др.] // Сталь. – 2007. – № 3. – С. 82–84.

138. Исследование возможности использования полимерной среды На-КМЦ для закалки рельсов и деталей рельсовых скреплений [Текст] / А. В. Захаров [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1991. – № 4. – С. 24–27.

139. Исследование возможности использования полимерной среды для закалки рельсов [Текст] / Э. Л. Колосова [и др.] // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 1988. – № 12. – С. 76–80.

140. Капнин, В. В. Освоение технологии производства рельсов на ОАО «ЧМК» [Текст] / В. В. Капнин, Д. В. Шабуров // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам юбилейного 130-го заседания некоммерческого партнерства «Рельсо-

вая комиссия», Новокузнецк, 7–9 октября 2014 г. – Санкт-Петербург, 2015. – С. 77–79.

141. Снитко, Ю. П. Челябинские рельсы будут лучшими [Текст] / Ю. П. Снитко // Металлы Евразии. – 2009. – № 1. – С. 42–46.

142. Разработка и освоение термической обработки с нагрева ТВЧ железнодорожных рельсов [Текст] / Д. К. Нестеров [и др.] // Сталь. – 1989. – № 9. – С. 77–79.

143. Нестеров, Д. К. Повышение качества, эксплуатационной стойкости рельсов, закалённых с нагрева ТВЧ, и технических требований к ним [Текст] / Д. К. Нестеров, В. Е. Сапожков // Бюллетень «Чёрная металлургия». – 1999. – № 9 – С. 46–51.

144. Технологические и физические особенности высокочастотной закалки рельсов [Текст] / Д. В. Сталинский [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – № 1. – С. 92–98.

145. Хрупкая прочность рельсов, поверхностно закаленных с нагрева токами высокой частоты [Текст] / Д. В. Сталинский [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – № 3. – С. 65–70.

146. Термическая обработка рельсовой стали с использованием индукционного нагрева [Текст] / Д. К. Нестеров [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1990. – № 8. – С. 30–33.

147. World's first application of new idRHa+ rail hardening technology in Baogang Rail Mill [Text] / Y. Zou [et al.] // METEC and 2-nd ESTAD Conference, Dusseldorf, 15–19 June 2015.

148. Опыт проведения дифференцированной термообработки рельсов воздушным способом по технологии «ТЭК=ДТО» на промышленной установке ТЭК-ДТО-13,6 [Текст] / С. В. Хлыст [и др.] // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Московская обл., 23–25 октября 2012 г. – Екатеринбург, 2013. – С. 150–159.

149. Дифференцированная термообработка рельсов воздушным способом по технологии «ТЭК» [Текст] / С. В. Хлыст [и др.] // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Анапа, 28–29 сентября 2011 г. – Екатеринбург, 2012. – С. 98–105.

150. Технологии дифференцированной термообработки ТЭК для производства рельсов и остряков [Текст] / С. В. Хлыст [и др.] // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам юбилейного 130-го заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Новокузнецк, 7–9 октября 2014 г. – Санкт-Петербург, 2015. – С. 221–230.

151. Марочник сталей и сплавов [Текст] : справочник / под ред. А. С. Зубченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2003. – 782 с.



# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Акт использования результатов диссертационной работы



УТВЕРЖДАЮ:

Директор по рельсовому производству

А. В. Головатенко  
2018г

## Акт

использования результатов диссертационной работы  
Полевого Егора Владимировича «Разработка ресурсосберегающей технологии дифференцированной термической обработки длинномерных железнодорожных рельсов»

Настоящим актом подтверждается, что по результатам исследований выполненных в рамках диссертационной работы Полевого Е.В. в рельсобалочном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК» разработана новая ресурсосберегающая технология дифференцированной термической обработки рельсов типа Р65 с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева.

Внедрение новой технологии дифференцированной воздушоструйной термообработки рельсов с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева, позволило отказаться от использовавшейся объемной закалки с повторного (печного) нагрева и связанных с этим затрат на канцерогенное и пожароопасное закалочное масло, а также затрат обусловленных повторным нагревом и соответствующими технологическими операциями.

Выполненные в ходе диссертационной работы исследования послужили основанием для последующей разработки режимов термической обработки дифференцированно термоупрочненных рельсов специального назначения, в том числе рельсов повышенной износостойкости и контактно-усталостной выносливости, а также рельсов низкотемпературной надежности.

Новая технология термической обработки рельсов используется на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с декабря 2013 г. Экономический эффект от внедрения технологии дифференцированной воздушоструйной термообработки с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева составляет 118 255 716 руб./год, долевое участие автора составляет 30 %.

Начальник технического отдела  
рельсового производства



Е.П. Кузнецов

## Расчёт экономического эффекта от использования результатов диссертационной работы

**ЕВРАЗ**

УТВЕРЖДАЮ:

Директор по рельсовому производству



А.В. Головатенко

2018 г

Расчёт экономического эффекта  
от использования результатов  
диссертационной работы

Полевого Егора Владимировича

в рельсобалочном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Внедрение новой технологии дифференцированной воздушоструйной термообработки длинномерных рельсов с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева, позволило отказаться от использовавшейся объемной закалки с повторного (печного) нагрева и связанных с этим затрат на природный газ, при этом на новом участке дифференцированной закалки возникли затраты на электроэнергию.

Экономический эффект от внедрения новой технологии дифференцированной воздушоструйной термообработки с использованием остаточного тепла предпрокатного нагрева рассчитан по следующей формуле:

$$Э_{дзр} = (C_{пг} - C_{з/з} - C_{лз}) \times V$$

где,  $C_{пг}$  - затраты на природный газ при производстве рельсов категории Т1 (руб/т);

$C_{з/з}$  – затраты на электроэнергию, потребляемую вентиляторами при термической обработке рельсов категории ДТ350 (руб/т);



$C_{лз}$  – увеличение стоимости НЛЗ рельсовой стали марки Э76ХФ вследствие дополнительного легирования хромом и кремнием, по сравнению со стоимостью НЛЗ рельсовой стали Э76Ф (руб/т);

$V$  – объем производства рельсов общего назначения категории ДТ350 в 2015 г.

На АО «ЕВРАЗ ЗСМК» одновременно рельсы категорий ДТ350 и Т1 производили в 2014 г, поэтому для корректного сравнения в расчете были учтены значения фактических затрат при производстве рельсов указанных категорий на 1 т продукции по данным 2014 г. Фактические затраты на природный газ, используемый для нагрева рельсов категории Т1 под закалку в 2014 г составили 718,27 руб./т. Фактические затраты на электроэнергию, затраченную в процессе термообработки рельсов на участке ДЗР составили 371,78 руб/т. Увеличение себестоимости НЛЗ за счет дополнительного введения хрома и кремния составило 122,15 руб/т. С учетом объема производства рельсов категории ДТ350 в 2015 г на уровне 527 127,2 т годовой экономический эффект, при производстве рельсов категории ДТ350 оценивается на уровне:

$$\mathcal{E}_{дзр} = (718,27 - 371,78 - 122,15) \times 527\,127,2 = 118\,255\,716 \text{ руб./год.}$$

Начальник технического отдела  
рельсового производства

Е.П. Кузнецов