

На правах рукописи



Кузнецов Роман Вадимович

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ, ДЕФЕКТНАЯ
СУБСТРУКТУРА И СВОЙСТВА ДЛИННОМЕРНЫХ РЕЛЬСОВ ПОСЛЕ
ЭКСТРЕМАЛЬНО ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новокузнецк – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный руководитель Громов Виктор Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Астафурова Елена Геннадьевна, доктор физико-математических наук, доцент, заведующая лабораторией физики иерархических структур в металлах и сплавах, ФГБНУ «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук»

Никоненко Елена Леонидовна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики, химии и теоретической механики, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Ведущая организация Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина»

Защита состоится 7 июня 2022 г. в 10⁰⁰ ч. на заседании диссертационного совета Д 212.252.04 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, г. Новокузнецк, Кемеровской области, ул. Кирова, 42.

Факс: (3843) 46-57-92.

E-mail: d212_252_04@sibsiu.ru.

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

Автореферат разослан апреля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.х.н., профессор

Горюшкин В.Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В связи с наметившейся в последние годы тенденцией возрастания скоростей и интенсивности железнодорожного транспорта в разряд актуальных задач выходит создание рельсов с высокими эксплуатационными характеристиками. Решение этой проблемы в России осуществляется с 2013 года путем производства длинномерных дифференцированно закаленных рельсов. Совершенствование технологии их производства возможно лишь при глубоком анализе механизмов формирования структуры, фазового состава и свойств и их эволюции при длительной эксплуатации.

Длительные деформационные воздействия инициируют сложные процессы, протекающие в рельсах и способствующие ухудшению механических свойств. Получение информации в этой области определяется как фундаментальностью проблем физики конденсированного состояния, так и практической их значимостью. Установление закономерностей эволюции параметров структурно-фазового состояния и дислокационной субструктуры при длительной эксплуатации рельсов возможно лишь при применении высокоинформативных методов современного физического материаловедения и в первую очередь просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Полученный с помощью методов ПЭМ банк данных позволяет количественно оценить вклады структурных составляющих и дефектной субструктуры в упрочнение рельсов при эксплуатации.

В этой связи совместный анализ структурно-фазовых состояний, дислокационной субструктуры и механических свойств в сечении головки рельсов после длительной эксплуатации представляется актуальным.

Целью является выявление физических механизмов упрочнения и установление закономерностей формирования структуры, фазового состава, дислокационной субструктуры, механических свойств по центральной оси и радиусу скругления выкружки головки длинномерных рельсов после экстремально длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж 1770 млн. тонн).

Для реализации цели работы решены следующие задачи:

1. Проанализировать структурные состояния перлита на глубине 10 и более мм в головке рельсов по различным направлениям и оценить скалярную и избыточную плотность дислокаций.

2. Изучить распределение прочностных и пластических свойств рельсовой стали, твердости и микротвердости по сечению головки рельсов.

3. Выявить градиентный характер изменения относительного содержания различных типов структуры вдоль центральной оси симметрии и радиуса скругления выкружки головки рельсового профиля.

4. Количественно оценить изменение скалярной и избыточной плотности дислокаций на расстояниях 0, 2, 10 мм вдоль центральной оси симметрии головки рельсов и радиуса скругления выкружки.

5. Провести сравнение перераспределения карбидной фазы и атомов углерода по центральной оси и радиусу скругления выкружки головки.

6. Количественно оценить вклады структурных составляющих и дефектной субструктуры и механизмы упрочнения головки рельсов по разным направлениям.

7. Выявить и обосновать направления апробации и использования полученного банка данных в промышленности, в научной деятельности и учебном процессе.

Степень разработанности темы. Анализ причин износа и деградации свойств рельсов при эксплуатации является традиционным направлением в физике сталей. Анализ работ отечественных и зарубежных исследователей последних двух десятилетий показывает, что как в объемно-закаленных (пропущенный тоннаж 500-1000 млн. тонн) так и в дифференцированно закаленных (пропущенный тоннаж до 1411 млн. тонн) изменение в поверхностных слоях головки рельсов структуры, накопление плотности дислокаций, аномально высокая микротвердость, наличие белого слоя способны привести к выходу рельсов из строя. Выявлен многофакторный характер природы упрочнения поверхности катания рельсов и оценены основные механизмы.

Научная новизна.

1. С использованием высокоинформативных методов современного физического материаловедения впервые получены новые знания о структурно-фазовых состояниях, дислокационной субструктуре и механических свойствах длиномерных термоупрочненных рельсов в сечении головки после экстремально длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж 1770 млн. тонн брутто).

2. Выявлен градиентный характер изменения относительного содержания различных типов структуры, скалярной и избыточной плотности дислокаций в сечении головки рельсов.

3. Произведена количественная оценка механизмов упрочнения на разных расстояниях от поверхности катания.

4. Произведена количественная оценка перераспределения карбидной фазы и атомов углерода в головке рельсов при эксплуатации.

5. Выполнено сравнение суммарного предела текучести по разным направлениям в головке рельсов после различного объема пропущенного тоннажа.

Достоверность результатов работы определяется корректностью поставленных цели и задач, использованием апробированных методов и методик исследования, современного физического материаловедения, большим объемом экспериментальных данных, опубликованных в профильных журналах, их сопоставлением между собой, детальным исследованием и анализом процессов, имеющих место в рельсах при длительной эксплуатации, четким определением взаимосвязей между различными структурными параметрами, достаточным объемом экспериментального материала для

корректной статистической обработки, сопоставлением полученных результатов с данными других авторов, справками об использовании результатов работы.

Научная и практическая значимость работы состоит в углублении знаний о физических процессах формирования структуры, фазового состава, дислокационной субструктуры, перераспределения карбидной фазы и углерода в дифференцированно термоупрочненных рельсах в реальных условиях эксплуатации. Выявлен градиентный характер изменения структуры, фазового состава, дислокационной субструктуры рельсовой стали, характеризующийся определенными закономерными изменениями скалярной и избыточной плотности дислокаций, относительного содержания типов структуры, карбидной фазы и атомов углерода в сечении головки рельсов. Это позволило выявить физическую природу и количественно оценить механизмы упрочнения на разных расстояниях от поверхности катания.

Результаты диссертации могут быть использованы для сравнительного анализа и корректировки режимов термомеханического упрочнения, мониторинга дефектоскопии рельсов, обоснования сроков регламентных работ по проверке состояния рельсов, разработке методик неразрушающего контроля. Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для развития теории деформационных структурно-фазовых превращений в сталях с перлитной структурой. Результаты диссертации апробированы при проведении научных исследований в Сибирском государственном индустриальном университете и учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Материаловедение и технологии материалов», что подтверждено соответствующими актами.

Личный вклад автора заключается в анализе литературных данных, планировании и проведении исследований структурно-фазовых состояний и механических свойств рельсов, сопоставлении полученных результатов с данными других исследователей, написании статей и тезисов докладов, формулировании положений, выносимых на защиту и основных выводов.

Методология и методы исследования. Задачи диссертации направлены на установление закономерностей формирования структуры, фазового состава, дислокационной субструктуры и механических свойств рельсовой стали по центральной оси симметрии и радиусу скругления выкружки в головке длинномерных дифференцированно термоупрочненных рельсов после экстремально длительной эксплуатации.

Диссертация является продолжением исследований рельсового металла, проводимых в научной школе Сибирского государственного индустриального университета «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий». Для достижения цели и задач диссертации был использован комплекс методов современного физического материаловедения: оптическая, сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия, рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ, испытания на твердость, микротвердость. Использовались оптический микроскоп Olympus GX-51,

рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000, растровый электронный микроскоп Philips SEM 515, просвечивающий электронный дифракционный микроскоп JEOL JEM 2100F, микротвердомеры ПМТ-3 и HVS-1000A.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Совокупность результатов изучения структурного состояния перлита в головке рельсов на глубине 10 мм и более на макро- и микромасштабных уровнях. Классификация структурных состояний перлита по морфологическому признаку. Оценка скалярной и избыточной плотности дислокаций вдоль центральной оси и вдоль радиуса скругления выкружки головки рельсов.

2. Результаты исследования прочностных и пластических свойств, твердости и микротвердости по сечению головки рельсов. Связь установленных зависимостей с деформационным преобразованием дефектной субструктуры и фазового состава рельсовой стали при эксплуатации.

3. Градиентный характер изменения различных типов структуры в головке рельсов по центральной оси и радиусу скругления выкружки. Результаты анализа относительного содержания пластинчатого перлита, разрушенного перлита, вырожденного перлита, зерен перлита с нанопластинами цементита, зерен феррита с субмикроструктурной структурой на расстояниях 0, 2, 10 мм от поверхности катания.

4. Результаты количественной оценки изменения скалярной и избыточной плотности дислокаций вдоль центральной оси и радиуса скругления выкружки головки. Идентификация источников кривизны кручения кристаллической решетки.

5. Результаты сравнительного анализа перераспределения карбидной фазы и атомов углерода по центральной оси и радиусу скругления выкружки. Факты снижения объемной доли цементита от 10,4% на расстоянии 10 мм (углерода 0,74%) до 4,5% (углерода 0,32%) на поверхности по центральной оси и от 9,6% до 3,1% (углерода от 0,69% до 0,22%), соответственно, по радиусу скругления выкружки.

6. Результаты количественной оценки физических механизмов упрочнения поверхностных слоев рельсов на расстояниях 0, 2, 10 мм от поверхности катания по центральной оси и радиусу скругления выкружки после экстремально длительной эксплуатации. Определение аддитивного предела текучести рельсовой стали и его сравнение с результатами оценки после пропущенного тоннажа 691,8 и 1411 млн. тонн брутто.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования, научной новизне и практической значимости соответствует пункту 1 «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления», и пункту 7 «Технические и технологические приложения физики

конденсированного состояния» паспорта специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния» (технические науки).

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях, чтениях, семинарах и школах: Международной конференции «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии», Томск, 2021; Международной конференции «Перспективные направления развития рельсовой индустрии. Технологии производства и эксплуатации», Новокузнецк, 2021; 9-ой Международной конференции «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов» Москва, 2021; Международной научно-практической конференции. Технические науки: достижения, инновации, проблемы и перспективы развития, Юрга, 2021; XXII Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество», Новокузнецк, 2021; LXIII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (АПП-2021), Тольятти, 2021; LXIV Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», Екатеринбург, 2022, 11th International online symposium on materials in external fields (ISMEF 2022), Novokuznetsk, 2022.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 19 работах, в том числе в 10 статьях в журналах, входящих в Перечень, рекомендованный ВАК для публикации результатов диссертационных исследований, 2 статьях, проиндексированных в международной базе данных Scopus, 1 монографии, остальные – в трудах всероссийских и международных конференций и других научных мероприятий.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, основных выводов и 5 приложений, списка литературы из 220 наименований. Диссертация изложена на 146 страницах машинописного текста, содержит 55 рисунков, 16 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, перечислены положения, выносимые на защиту.

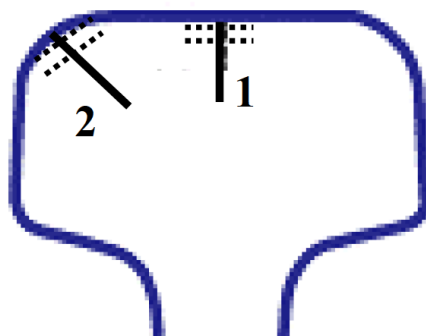
В первой главе «Структурные преобразования в рельсах и изменение свойств при длительной эксплуатации», являющейся обзором литературы, проведен тщательный анализ работ отечественных и зарубежных исследователей по изменению структурно-фазовых состояний, дефектной субструктуры и свойств объемно- и дифференцированных рельсов под действием внешних факторов. Основное внимание уделено сопоставлению результатов по формированию структуры, дефектной субструктуры в головке рельсов после термической обработки и их эволюции при длительной эксплуатации. Проанализированы работы по разрушению пластин цементита поверхностных слоев при эксплуатации рельсов. На основе анализа сформулированы цель и задачи настоящего исследования.

Во второй главе «Материал и методы исследования» отмечено, что материалом исследования являлись образцы дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ350 из стали марки Э76ХФ производства АО «Евраз-ЗСМК» после пропущенного тоннажа 1770 млн. т брутто в процессе полигонных испытаний на Экспериментальном кольце АО «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (г. Щербинка).

Количественный анализ структуры стали осуществляли, используя методы стереологии и количественной электронной микроскопии; фазовый анализ стали осуществляли путем индицирования микроэлектроннограмм с применением темнопольной методики.

Металлографические исследования выполнялись на оптическом микроскопе Olympus GX51, оснащенном цифровой камерой с программным обеспечением Siam Photolab 700. Макроструктуру металла рельсов выявляли в соответствии с требованиями Российского стандарта 51685-2013 на полнопрофильном темплете, вырезанном из рельса в поперечном направлении.

Концентрацию атомов углерода в кристаллической решетке α -железа определяли методами рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD-6000, Shimadzu).



1 – вдоль центральной оси; 2 – вдоль радиуса скругления выкружки

Рисунок 1 – Условная схема препарирования образца рельсов при исследовании его структуры методами электронной дифракционной микроскопии тонких фольг

Исследование дефектной субструктуры, морфологии фаз и состояния карбидной фазы рельсов осуществляли методами просвечивающей дифракционной электронной микроскопии. Фольги для исследования изготавливали методами электролитического утонения пластинок, вырезанных электроискровым методом на расстоянии 2 мм, 10 мм и вблизи поверхности катания вдоль центральной оси (рисунок 1) и по рабочей выкружке. Схема препарирования образцов приведена на рисунке 1.

Твёрдость металла рельсов определяли на поперечных темплетах, приготовленных в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685-2013. Твёрдость определяли методом Бринелля на твердомере типа ТШ-2М шариком диаметром 10 мм при нагрузке 3000 кгс в соответствии с требованиями ГОСТ 9012-59, а

также методом Роквелла, ГОСТ 9013-59 (ИСО 6508-86). Твердость в этом случае определяли по шкале С внедрением алмазного конусного наконечника типа НК по ГОСТ 9377 при нагрузке 150 кгс (1500Н).

Микротвердость измеряли методом внедрения алмазной пирамидки Виккерса на приборе HVS-1000А с цифровым дисплеем, отображающим микротвердость числами твердости HV. Нагрузка на индентор составляла 0,02 Н. Значения микротвердости рассчитывали по результатам измерения диагоналей не менее десяти отпечатков. Усреднение проводили по результатам измерений на трех – пяти образцах. Точность измерений в этом случае составляла 7–10 %.

Микротвердость, ГОСТ 9450-76, также определяли прибором ПМТ-3, ТУ 3-3.1377-83, при нагрузке 30 г на расстоянии 2, 5 и 10 мм от поверхности по месту обеих выкружек и центральной зоны поверхности катания головки пробы путем 4-х измерений в каждой зоне с усреднением значений, полученных при измерении в каждой зоне.

Для определения механических свойств из рельсов вырезались образцы согласно по ТУ 0921-276-01124323-2012.

В третьей главе «Структурно-фазовое состояние и свойства рельсов на различных масштабных уровнях после экстремально длительной эксплуатации» представлены результаты исследования на макро и микро уровнях структуры, фазового состава, дислокационной субструктуры и свойств в исходном состоянии (после дифференцированной закалки) и их эволюция на глубине 10 мм от поверхности катания по разным направлениям в головке после экстремально длительной эксплуатации.

Независимо от направления исследований структура рельсов на глубине 10 мм и более после пропущенного тоннажа 1770 млн. тонн представлена зернами перлита преимущественно пластинчатой морфологии.

Проведена количественная оценка параметров микроструктуры зерен перлита, проанализированы частотные распределения величины перлитных колоний и межпластинчатого расстояния в них вдоль центральной оси симметрии головки и радиуса скругления рабочей выкружки. Методами ПЭМ проведена классификация структурных состояний зерен перлита: зерна перлита пластинчатого с искривленными пластинами цементита (рис. 2, а); вырожденный перлит (рис. 2, б); зерно структурно свободного феррита.

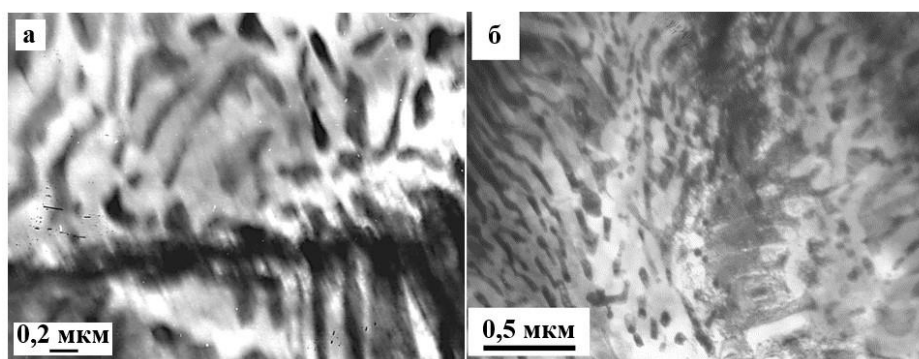


Рисунок 2 – Электронно-микроскопическое изображение зерен вырожденного перлита металла головки

Скалярная плотность хаотически распределенных дислокаций вдоль центральной оси составляет $\langle \rho \rangle = 2,9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, а вдоль радиуса скругления выкружки оси $\langle \rho \rangle = 3,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Выявлено присутствие изгибных контуров экстинкции, свидетельствующих о кривизне кручения фольги, указывающее на существование внутренних полей напряжений. Источниками полей напряжения являются границы раздела пластин цементита и феррита (рис. 3, а), частицы цементита в колониях вырожденного перлита и границы раздела колоний перлита и перлитных зерен (рис. 3, б).

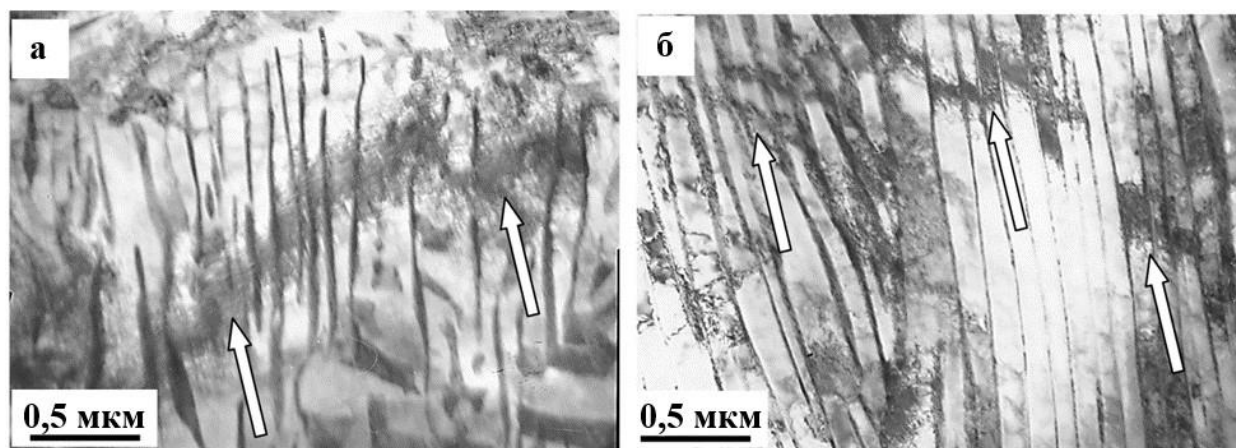


Рисунок 3 – Дефектная субструктура колоний перлита металла. Стрелками указаны изгибные экстинкционные контуры

Значения твердости НВ на поверхности катания головки и по сечению удовлетворяют требованиям ТУ 0921-276-01124323-2012 для рельсов категории ДТ 350. Методом Роквелла значения твердости на глубине 2 мм по центральной оси и радиусу скругления выкружки имеют высокие значения ($36,8 \div 37,0 \text{ HRC}$), уменьшающиеся с удалением от поверхности на расстояние 5, 10 мм и составляющие $34,5 \div 35,0 \text{ HRC}$ на глубине 22 мм. Механические свойства при растяжении и ударная вязкость образцов, вырезанных по ТУ 0921-276-01124323-2012, удовлетворяют требованиям стандарта. Анализ распределения прочностных и пластических свойств по сечению рельса показывает, что наиболее высокие прочностные характеристики отмечены на образцах, изготовленных из верхней части головки ближе к поверхности катания (σ_T -

870-880 МПа и $\sigma_{\text{в}}$ -1270 МПа). Микротвердость на глубине 10 мм имеет наименьшие значения 1274-1285 МПа для центральной оси симметрии и радиуса выкружки, соответственно. Они увеличиваются по мере приближения к поверхности до значений 1666-1668 МПа на глубине 2 мм, что хорошо согласуется с результатами измерения твердости.

В четвертой главе «Градиенты структурно-фазового состояния в головке рельсов после ультрадлительной эксплуатации» приведены результаты формирования градиентов по радиусу скругления рабочей выкружки и центральной оси симметрии головки рельсов. Независимо от направления исследования в слое толщиной не менее 2,0 мм преобразование зерен и колоний пластинчатого перлита протекает следующим образом.

Во-первых, выявляются зерна, сохранившие структуру пластинчатого перлита с фрагментированными пластинами феррита. Во-вторых, наблюдаются колонии перлита, пластины цементита в которых разбиваются на отдельные фрагменты сдвинутые относительно друг друга (рис. 4).

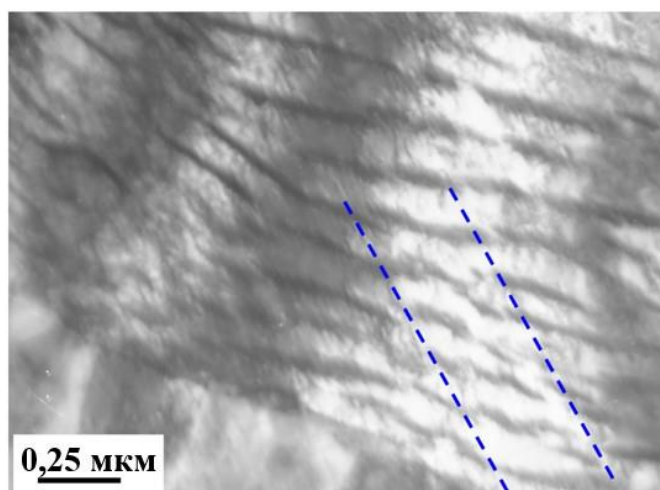


Рисунок 4 – Структура пластинчатого перлита металла рельс, формирующаяся в слое толщиной 2 мм, примыкающего к поверхности рабочей выкружки.

Пунктирными линиями указана область с разрушенными, путем реализации механизма перерезания, пластинами цементита

В-третьих, наблюдаются колонии перлита, пластины цементита в которых разделены на отдельные частицы карбида Fe округлой формы, декорирующие пластины феррита. Их размеры изменяются в пределах от 10 до 45 нм на поверхности и увеличиваются по мере удаления от поверхности катания на 2 мм до (80÷95) нм и (60÷75) нм соответственно, при измерении по центральной оси и радиусу выкружки (рис. 5).

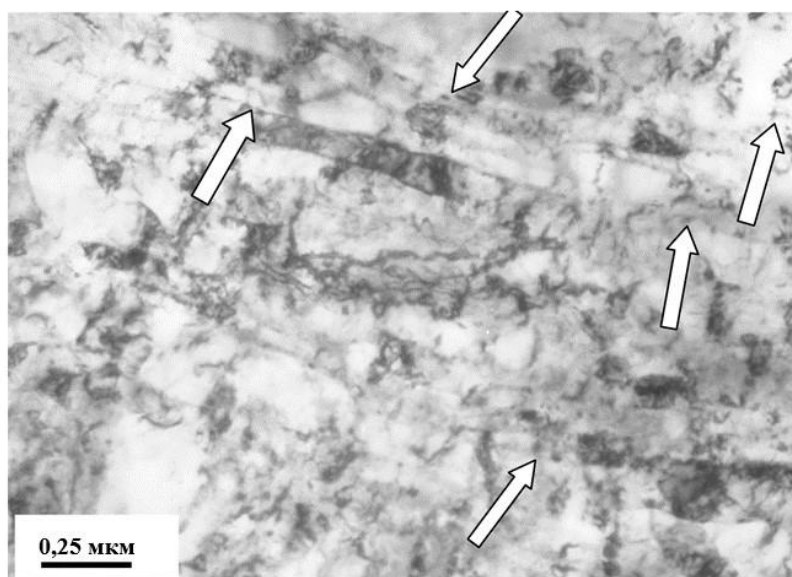
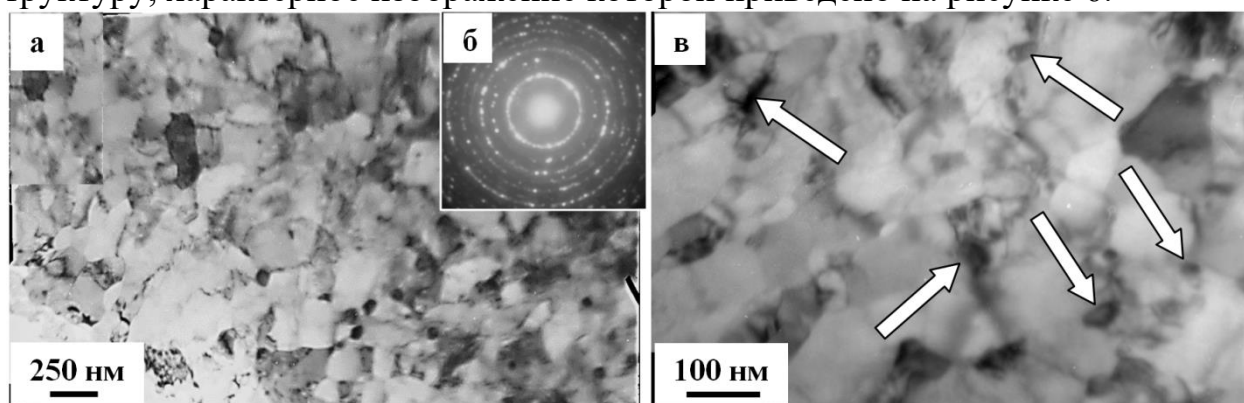


Рисунок 5 – Структура пластинчатого перлита металла рельс в слое, примыкающем к поверхности рабочей выкружки. Стрелками указаны частицы цементита, декорирующие пластины феррита

В-четвертых, области материала, имеющие поликристаллическую структуру, характерное изображение которой приведено на рисунке 6.



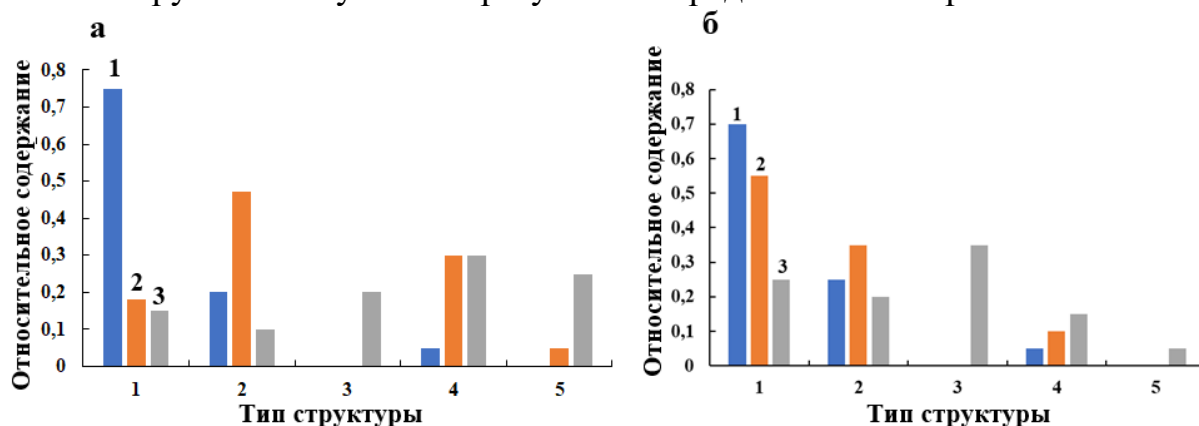
а, в – светлопольные изображения; б – микроэлектроннограмма; стрелками на (в) указаны частицы карбидной фазы

Рисунок 6 – Субмикрокристаллическая структура поверхности «рабочей выкружки»

Микроэлектроннограмма, полученная с данной структуры, имеет кольцевое строение (рис. 6, б). Последнее указывает на субмикронаномасштабный размер кристаллитов. Количественный анализ такой структуры показывает, что размеры кристаллитов изменяются в пределах от 150 нм до 250 нм. Дифракционные кольца сформированы отдельно расположенными точечными рефlekсами (рис. 6, б). Такое строение колец свидетельствует о большеугловой разориентации кристаллитов, т.е. о формировании именно зеренной структуры. На границах зерен феррита располагаются частицы карбидной фазы (рис. 6, в, частицы указаны стрелками). Размеры частиц изменяются в пределах от 25 нм до 75 нм. Можно

предположить, что данный тип структуры сформировался в результате динамической рекристаллизации стали, имеющей место при циклическом нагружении металла рельс в процессе сверхдлительной эксплуатации.

Количественный анализ, выполненный с использованием методов стереологии, позволил выявить относительное содержание указанных выше морфологических разновидностей структуры металла вдоль оси скругления рабочей выкружки. Полученные результаты представлены на рис. 7.

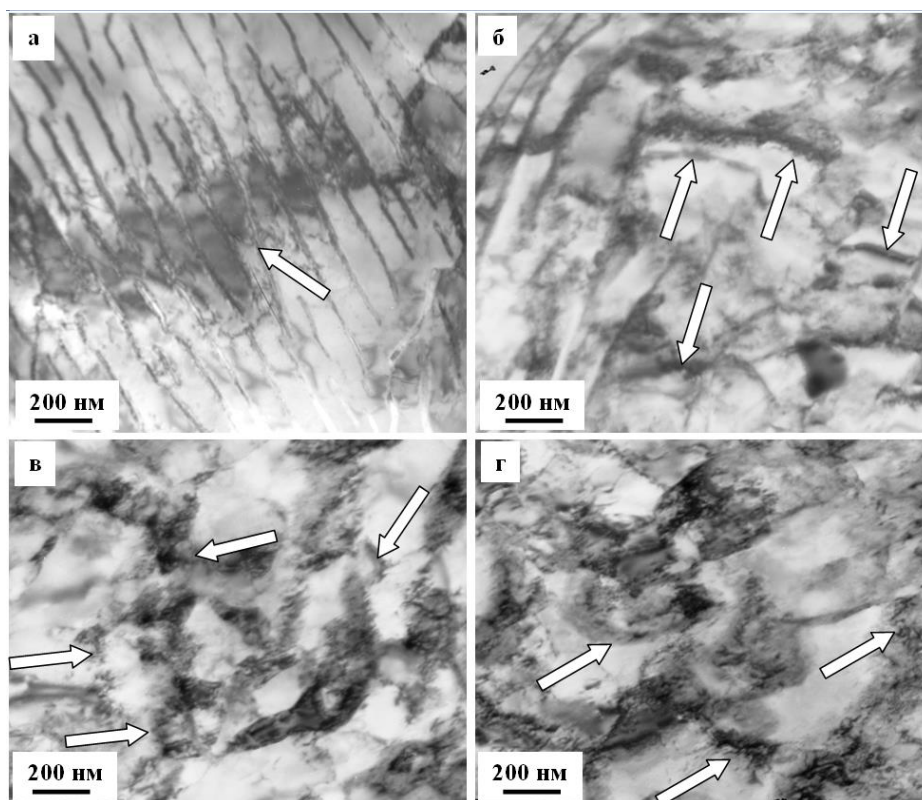


1 – относительное содержание типов структуры в слое, расположенном на глубине 10 мм; 2 – в слое, расположенном на глубине 2 мм; 3 – в поверхностном слое. Обозначены следующие типы структуры: 1 – перлит пластинчатой морфологии; 2 – перлит разрушенный; 3 – вырожденный перлит (феррито-карбидная смесь); 4 – зерна перлита, пластины феррита в которых декорированы наноразмерными частицами цементита; 5 – зерна феррита с субмикроструктурной зеренно-субзеренной структурой

Рисунок 7 – Относительное содержание различных типов структуры головки рельсов вдоль радиуса скругления рабочей выкружки (а) и вдоль центральной оси (б).

Сопоставляя результаты, представленные на рис.7а и 7 б можно отметить следующее. Во-первых, преобразование в процессе эксплуатации рельс структуры перлита пластинчатой морфологии относительно центральной оси протекает существенно меньшими темпами по сравнению с изменением структуры относительно радиуса скругления рабочей выкружки. Во-вторых, зеренно-субзеренная структура формируется исключительно в поверхностном слое металла рельс. В-третьих, относительное содержание зеренно-субзеренной структуры в поверхностном слое рабочей выкружки в 5 раз выше, чем в поверхностном слое поверхности катания. В совокупности указанные факты свидетельствуют о существенно более высоком уровне термо-деформационного преобразования металла рельс вдоль радиуса рабочей выкружки, по сравнению с металлом рельс вдоль центральной оси.

Дефектная субструктура перлита характеризуется дислокационной субструктурой, количественной характеристикой которой является скалярная плотность дислокаций. ПЭМ анализ структуры выявил наличие изгибных контуров экстинкции (рис. 8).

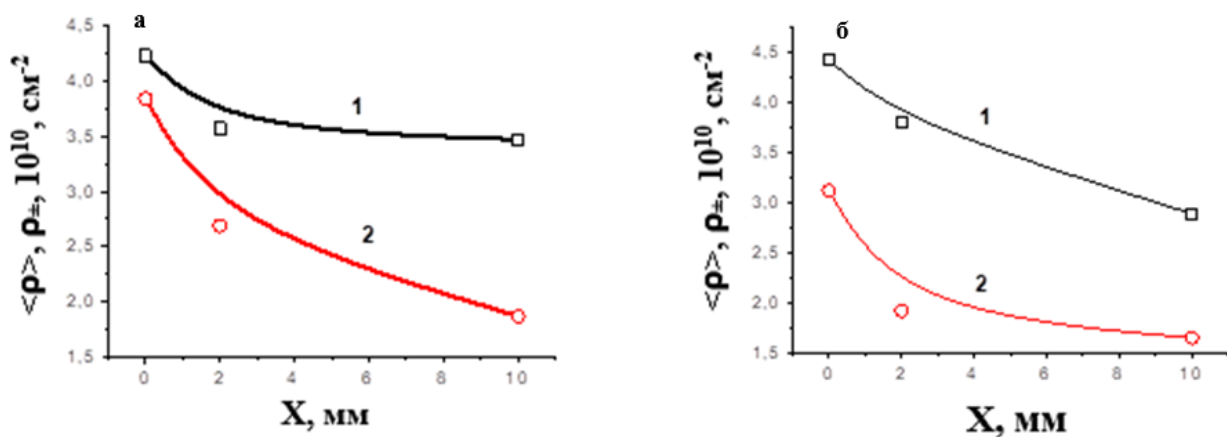


Стрелками указаны изгибные экстинкционные контуры, источниками которых являются: а – границы раздела феррита и цемента; б – границы раздела субзерен; в – границы раздела частиц глобулярной формы на границах субзерен; г – границы раздела частиц глобулярной формы в объеме субзерен

Рисунок 8 – Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя по центральной оси

Источниками кривизны-кручения металла фольги являются границы раздела пластин феррита и цемента (рис. 8, а), границы раздела субзерен (рис. 8, б), границы раздела частиц глобулярной формы, расположенных на границах (рис. 8, в) и в объеме (рис. 8, г) субзерен. Наличие на электронно-микроскопических изображениях изгибных контуров экстинкции указывает на изгиб-кручение фольги (формирование внутренних полей напряжений). Одной из количественных характеристик внутренних полей напряжений является избыточная плотность дислокаций.

Представленные на рис. 9 результаты свидетельствуют о том, что независимо от направления исследования, значения скалярной и избыточной плотности дислокаций увеличиваются по мере приближения к поверхности головки рельсов.



а – по радиусу скругления выкружки; б – вдоль оси симметрии

Рисунок 9 – Зависимости скалярной ($\langle \rho \rangle$, кривая 1) и избыточной (ρ_{\pm} , кривая 2) плотности дислокаций от расстояния от поверхности головки

Сопоставляя результаты, представленные на рис. 9а и 9б (кривые 1,2) можно отметить, что увеличение скалярной плотности дислокаций в поверхностном слое относительно слоя, расположенного на глубине 10 мм, измеренной вдоль центральной оси головки рельс составляет 21 %; при измерении вдоль оси симметрии рабочей выкружки увеличение более значительно и составляет 52 %. Следовательно, деформационное преобразование структуры рельсов более существенно в области рабочей выкружки.

Анализируя результаты, приведенные на рис. 9, а, (кривая 2) и рис. 9, б (кривая 2), отметим, что величина избыточной плотности дислокаций ниже величины скалярной плотности дислокаций, не зависимо от места анализа структуры стали. Последнее указывает на упругий характер изгиба-кручения фольги. Величина избыточной плотности дислокаций, измеренная и вдоль центральной оси головки рельс, и вдоль оси симметрии рабочей выкружки в поверхностном слое более чем в 2 раза превышает эту же характеристику дефектной субструктуры материала, выявленную в слое, расположенном на глубине 10 мм. Следовательно, длительная эксплуатация рельсов способствует кратному увеличению внутренних упругих полей напряжений металла поверхностного слоя головки рельс, не зависимо от области анализа структуры материала.

Эксплуатация рельсов сопровождается деформационным преобразованием структуры перлита, одним из проявлений которого является разрушение и растворение пластин цементита. Выполненные оценки показали, что вне зависимости от направления исследования объемная доля цементита увеличивается от 4,5% на поверхности до 10,4% на глубине 10 мм при анализе вдоль центральной оси и от 3,1% до 9,6% вдоль радиуса скругления рабочей выкружки, соответственно (табл. 1).

Таблица 1 – Количественные характеристики структуры рельсов после пропуска 1770 млн. тонн брутто

Параметры, средние по анализируемому слою	Поверхность катания			Рабочая выкружка		
	10 мм	2 мм	Поверх-ность	10 мм	2 мм	Поверх-ность
$\rho \cdot 10^{-10}, \text{см}^{-2}$	2.89	3.81	4.43	3.47	3.46	4.23
$\rho_{\pm} \cdot 10^{-10}, \text{см}^{-2}$	1.65	1.92	3.12	1.87	2.70	3.84
Объемная доля Fe_3C	10.4%	8.2%	4.5%	9.6%	3.6%	3.1%
Доля углерода	0.74%	0.59%	0.32%	0.69%	0.26%	0.22%

Согласно литературным данным оценку количества атомов углерода, формирующих карбид железа Fe_3C проводили, используя выражение $\Delta C = \text{Fe}_3\text{C} = 0,07 \Delta V$, где ΔV – объемная доля частиц карбидной фазы.

Выполненные таким образом оценки показывают, что концентрация углерода в слое на глубине 2 мм равна 0,26% масс., а в поверхностном слое выкружки составляет 0,22% масс. Для центральной оси симметрии эти значения составляют 0,59 % масс. и 0,32% масс., соответственно (табл.2).

Выявленная потеря углерода может быть обусловлена как обезуглероживанием поверхностного слоя металла рельсов в процессе сверхдлительной эксплуатации, так и выходом атомов углерода на дефекты структуры стали – линии дислокаций, границы зерен и субзерен, т.е. реализацией процесса динамического старения стали. Взаимодействие дислокаций с атомами внедрения приводит к закреплению дислокаций, препятствующему их дальнейшему движению, способствуя существенному упрочнению материала, приводя, в конечном итоге, к его охрупчиванию. Факт охрупчивания поверхностного слоя металла проявляется в формировании множества микротрещин в головке рельсов.

В пятой главе «Физическая природа прочности и механизмы упрочнения рельсов при сверхдлительной эксплуатации» проведена количественная оценка механизмов упрочнения поверхностных слоев рельсов по разным направлениям в головке и перераспределение атомов углерода.

Очевидно, что исследованные преобразования структуры стали, подробно рассмотренные в главах 3, 4 существенным образом сказываются на прочностных и пластических характеристиках металла, определяя, в конечном итоге, срок службы изделия. Выявить закономерности, связывающие параметры структуры и прочностные свойства материала, вскрыть физическую природу процесса эволюции свойств, позволяют оценки механизмов упрочнения.

Они были сделаны на основе широко апробированных выражений, приведенных в классических работах ведущих отечественных и зарубежных металлофизиков и металлургов. Учитывались вклады, обусловленные трением решетки $\Delta\sigma_0 = 30$ МПа, внутрифазными границами $\Delta\sigma(L)$, дислокационной субструктурой $\Delta\sigma(\rho)$, частицами карбидной фазы $\Delta\sigma(\text{ч})$, внутренними полями напряжений $\Delta\sigma(h)$, твердорастворным упрочнением $\Delta\sigma(\text{тв})$, перлитной

составляющей структуры стали $\Delta\sigma(\Pi)$. Общий предел текучести стали в первом приближении, основанном на принципе аддитивности, который предполагает независимое действие каждого из механизмов упрочнения материала, можно представить в виде линейной суммы вкладов отдельных механизмов упрочнения:

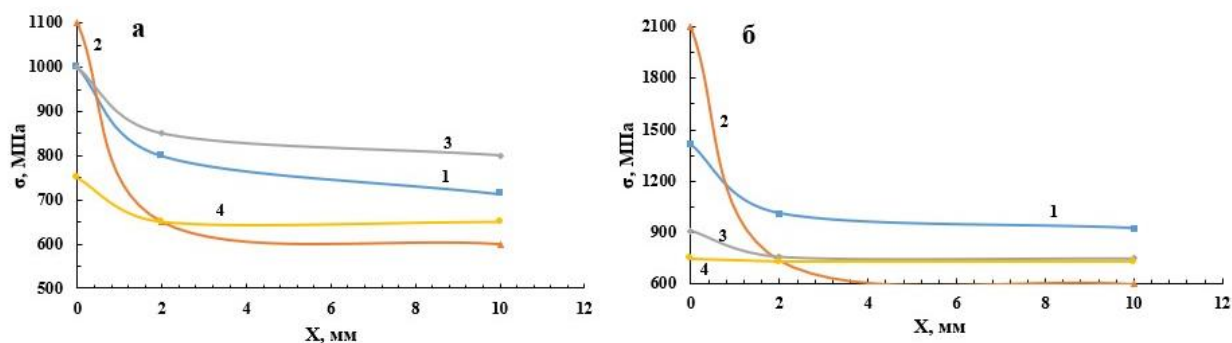
$$\sigma = \Delta\sigma_0 + \Delta\sigma(L) + \Delta\sigma(\rho) + \Delta\sigma(h) + \Delta\sigma(\text{ч}) + \Delta\sigma(\text{тв}) + \Delta\sigma(\Pi),$$

Анализируя результаты, приведенные в таблице 2, можно отметить, что, во-первых, прочность стали является величиной многофакторной и определяется совокупным действием ряда физических механизмов. Во-вторых, прочность металла рельсов зависит от расстояния до поверхности головки, независимо от места анализа (вдоль центральной оси или вдоль оси симметрии выкружки). В-третьих, прочность металла увеличивается по мере приближения к поверхности головки; при этом прочность металла рельсов вдоль оси симметрии выкружки выше, чем вдоль центральной оси. В-четвертых, основным механизмом упрочнения металла в поверхностном слое (в слое, формирующем поверхность головки), после пропущенного тоннажа 1770 млн. тонн является – субструктурный для рабочей выкружки и механизм, обусловленный внутренними полями напряжений, для поверхности катания.

Таблица 2 – Оценки механизмов упрочнения металла рельсов после пропущенного тоннажа 1770 млн. тонн брутто

Вклады в предел текучести, средние по материалу	Поверхность катания			Рабочая выкружка		
	10 мм	2 мм	Поверхность	10 мм	2 мм	Поверхность
$\Delta\sigma(\Pi)$, МПа	142,0	112	50,7	142	36,5	30,4
$\Delta\sigma(L)$, МПа	38,3	68,8	153	39,0	260,1	420,8
$\Delta\sigma(\rho)$, МПа	170	192,5	210	185	185	327,5
$\Delta\sigma(h)$, МПа	255	275	355	465	330	405
$\Delta\sigma(\text{ч})$, МПа	98,5	142	216,7	82,7	189,1	219
$\Delta\sigma(\text{тв})$, МПа	11	11	11,7	11	11	11,7
$\sigma = \sum_{i=1}^n \sigma_i$, МПа	714,8	801,3	997,1	924,7	1011,7	1414,4

На рис. 10 приведены зависимости суммарного предела текучести стали рельсов от расстояния до поверхности головки (кривые 1 на (а) и (б)). Для сравнения представлены зависимости после пропущенного тоннажа 691,8 и 1411 млн. тонн и в исходном состоянии, опубликованные ранее в работах А.А. Юрьева и В.Е. Кормышева.



а – вдоль центральной оси; б – вдоль оси симметрии рабочей выкружки; 1 – 1770 млн. т; 2 – 1411 млн. т; 3 – 691,8 млн. т; 4 – исходное состояние
Рисунок 10 – Зависимости суммарного предела текучести стали от расстояния до поверхности головки рельсов

Отчетливо видно, что увеличение пропущенного тоннажа в процессе эксплуатации в интервале 691,8 и 1411 млн. т приводит к существенному (в 1,5-2 раза) повышению прочности стали на пределе текучести. При этом упрочнению подвергается исключительно поверхностный слой металла толщиной не более 2 мм. При большем удалении от поверхности головки прочностные свойства стали остаются на уровне прочностных свойств стали в исходном состоянии.

Увеличение пропущенного тоннажа до 1770 млн. тонн не привело к ожидаемому повышению предела прочности по сравнению с данными 1411 млн. тонн. Как уже отмечалось, это может быть обусловлено формированием зеренно-субзеренной структуры при динамической рекристаллизации вследствие интенсивной деформации при экстремально длительной эксплуатации.

Известно, что углерод в структуре стали может находиться в твердом растворе на основе α - и γ -железа (на позиции элементов внедрения), на дислокациях (в виде атмосфер Коттрелла и Максвелла), на межфазных (карбид-матрица) и внутрифазных (границы зерен, пакетов и кристаллы пакетного и пластинчатого мартенсита) границах, в частицах карбидной фазы.

Оценку относительного содержания углерода на структурных элементах стали осуществляли по выражениям, приведенным в табл. 3. Результаты выполненных оценок представлены в табл. 4. Если в исходном состоянии основное содержание углерода соответствует частицам цементита, то после эксплуатации рельсов местом расположения углерода, наряду с частицами цементита, являются дефекты кристаллической структуры стали (дислокации, границы зерен и субзерен), а в поверхностном слое стали углерод обнаруживается и в кристаллической решетке α -железа.

Из табл. 4 также следует, что процессы эволюции/деградации карбидной фазы и перераспределения атомов углерода наиболее интенсивно реализуются в поверхностных слоях до 2 мм. Увеличение пропущенного тоннажа также сопровождается заметным перемещением атомов углерода на дефекты структуры стали в рабочей выкружке по сравнению с поверхностью катания.

Таблица 3 – К методу анализа распределения углерода в стали

Места расположения углерода	Оценочные выражения
Твердый раствор на основе α -железа	$\Delta C_{\alpha} = \Delta V_{\alpha} \frac{a_{\alpha} - a_{\alpha}^0}{39 \pm 4} \cdot 10^3 *$
Частицы карбидных фаз	$\Delta C(\text{Fe}_3\text{C}) = 0,07 \cdot \Delta V_i$
Элементы дефектной структуры	$\Delta C_d = C_0 - \Delta C_{\alpha} - \Delta C(\text{Fe}_3\text{C})$

*Здесь ΔV_{α} , ΔV_i – объемная доля α -Fe и карбидных фаз, соответственно; a_{α} – текущий параметр решетки α -фазы; $a_{\alpha}^0 = 0,28668 \cdot \text{нм}$; $a_{\alpha} = 0,28782 \text{ нм}$; C_0 – среднее содержание углерода в стали.

Таблица 4 – Распределение атомов углерода в структуре рельсов

Структурный элемент	Концентрация углерода, масс. %					
	Расстояние до поверхности катания			Расстояние до поверхности выкружки		
	0 мм	2 мм	10 мм	0 мм	2 мм	10 мм
Пропущенный тоннаж 1770 млн. т брутто						
Частицы цементита	0,32	0,59	0,74	0,22	0,26	0,69
Кристаллическая решетка α -Fe	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Дефекты структуры стали (дислокации, субграницы, границы)	0,44	0,17	0,02	0,54	0,50	0,07

Эксплуатация рельсов по определению должна происходить при нагрузках ниже предела текучести стали. Более того, преимущественной схемой нагружения материала на поверхности катания является сжатие, что должно препятствовать возможному зарождению микротрещин. Наконец, воздействие движущегося железнодорожного транспорта имеет циклический характер, поэтому происходящие изменения следует классифицировать как имеющие преимущественно усталостную природу.

Как уже отмечалось, второй механизм распада цементита заключается в «вытягивании» в процессе пластической деформации дислокациями атомов углерода из решетки карбидной фазы с образованием атмосфер Коттрелла вследствие заметной разницы средней энергии связи атомов углерода с дислокациями (0,6 эВ) и с атомами железа в решетке цементита (0,4 эВ). Согласно классическим представлениям диффузия углерода протекает в поле напряжений, создаваемом дислокационной субструктурой, которая формируется вокруг пластин цементита. При этом степень распада цементита, как правило, определяется величиной плотности дислокаций и типом субструктуры.

При «вытягивании» атомов углерода из кристаллической решетки наблюдается изменение дефектной субструктуры карбида из-за проникновения

дислокаций в решетку цементита. Однако некогерентная межфазная граница α -Fe–Fe₃C будет этому препятствовать, оставляя возможным лишь диффузионный массоперенос. Он может быть реализован различными механизмами, обсуждаемыми в работах В.Е. Гаврилюка: диффузией по междоузлиям и по деформационным вакансиям.

В работах академика В.Е. Панина показано, что ротационные моды пластической деформации связаны с формированием локальной кривизны решетки; в этой связи можно полагать, что развитие подобного эффекта в металле рельсов делает возможным (облегченным) перемещения атомов углерода. В силу циклического характера приложения нагрузки такой механизм может развиваться обратимо, что позволяет элементам внутренней структуры перестраиваться без образования несплошностей. Следует особо отметить, что данный процесс не носит диффузионный характер, поскольку развивается в условиях невысоких температур, а нагрузка прикладывается нерегулярно, но циклически. При пропущенном тоннаже 1770 млн. тонн в поверхностном слое накапливается критическая плотность дефектов, что сдерживает развитие обратимой упругой деформации и вовлечение (развитие) механизма пластической дисторсии. Формирование подобной «критической» структуры будет завершаться зарождением микротрещин по усталостному механизму и выходу рельсов из строя. По этой причине повышение ресурса работы рельсов может быть достигнуто за счет как можно более длительного сохранения структуры, способной к развитию обратимых деформационных процессов, исключающих разрушение цементитных пластин в перлитных колониях с последующим перемещением атомов углерода на дефекты (дислокации) и области решетки α -железа.

В приложении приведены справки и акты использования результатов работы в промышленности, научно-исследовательской работе и учебном процессе.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Методами оптической, сканирующей, просвечивающей электронной микроскопии, измерения механических свойств, выполнены исследования структурно-фазовых состояний, дислокационной субструктуры и свойств, сформированных в сечении головки на расстояниях 0, 2, 10 мм от поверхности по радиусу скругления выкружки и по центральной оси 100-метровых дифференцированно-закаленных рельсов после экстремально длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж с 2013 г. 1770 млн. тонн брутто).

1. Проведена классификация структурных состояний перлита на глубине 10 и более мм от поверхности катания и показано, что независимо от направления исследования (по радиусу скругления выкружки или вдоль центральной оси головки рельса) преимущественно присутствует структура пластинчатой морфологии (относительное содержание 0,70 и 0,74 при измерении вдоль центральной оси и радиусу скругления выкружки, соответственно) зерна вырожденного перлита и структурно свободного феррита. Скалярная плотность дислокаций вдоль центральной оси $\langle \rho \rangle = 2,9 \cdot 10^{10}$

см⁻², вдоль радиуса скругления выкружки $\langle\rho\rangle = 3,5 \cdot 10^{10}$ см⁻², а избыточной плотности дислокаций $\rho_{\pm} = 2,08 \cdot 10^{10}$ см⁻², $\rho_{\pm} = 1,84 \cdot 10^{10}$ см⁻², соответственно.

2. Проведен анализ распределения прочностных и пластических свойств и ударной вязкости по сечению головки, шейки и подошвы рельсов. Наиболее высокие прочностные характеристики отмечены на образцах из верхней части головки (870-880 МПа - σ_T и 1270 МПа - σ_B). Выявлено снижение значений твердости HRC и микротвердости на глубинах 2,5, 10 и 22 мм по сравнению поверхностью катания по центральной оси и радиусу скругления выкружки, что является следствием преобразования структуры, фазового состава и дефектной субструктуры стали при длительной эксплуатации.

3. Выявлен градиентный характер изменения относительного содержания различных типов структуры (пластинчатый перлит: перлит разрушенный, вырожденный перлит (феррито-карбидная смесь); зерна перлита с пластинами феррита, содержащими наноразмерный цементит; зерна феррита с субмикроструктурной зеренно-субзеренной структурой) вдоль центральной оси симметрии и радиуса скругления выкружки головки рельса. Дана физическая интерпретация образования типов структуры при длительной эксплуатации.

4. Значения скалярной $\langle\rho\rangle$ и избыточной ρ_{\pm} плотности дислокаций немонотонно убывают с удалением от поверхности катания по радиусу скругления выкружки и по центральной оси симметрии головки. Независимо от места анализа $\langle\rho\rangle$ ниже величины ρ_{\pm} , что указывает на упругий характер изгиба-кручения решетки. Величина ρ_{\pm} , измеренная в поверхностном слое вдоль центральной оси и вдоль радиуса скругления выкружки более, чем в 2 раза превышает эту характеристика дефектной субструктуры, выявленную в слое на глубине 10 мм. Это свидетельствует о кратном увеличении внутренних упругих полей напряжения поверхностного слоя головки.

5. Сверхдлительная эксплуатация рельсов сопровождается существенным снижением объемной доли карбидной фазы в поверхностном слое головки (от 10,4% на расстоянии 10 мм по центральной оси до 4,5% на поверхности катания и от 9,6% до 3,1% по радиусу скругления выкружки, соответственно), что может быть обусловлено как обезуглероживанием поверхностного слоя, так и выходом атомов углерода на дефекты структуры стали. При этом данный процесс в поверхностном слое выкружки развит в значительно большей степени по сравнению с поверхностью катания.

6. Произведена оценка перераспределения атомов углерода в структуре рельсов и показано, что если в исходном состоянии основное содержание углерода соответствует частицам цементита (0,74% вес), то после эксплуатации уходит на дефекты структуры и его концентрация составляет 0,24% и 0,4% на поверхности катания и поверхности выкружки, соответственно.

7. Проведена оценка суммарного предела текучести по разным направлениям в головке рельсов после различных сроков эксплуатации и дана физическая интерпретация наблюдаемого несоответствия в его изменении с увеличением пропущенного тоннажа.

8. Выявлены и обоснованы направления апробации и использования результатов работы в промышленности, научной деятельности и учебном процессе, что подтверждено справками и актами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Кузнецов, Р. В. Эволюция структурно-фазовых состояний и свойств дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов при экстремально длительной эксплуатации. Сообщение 3. Структура и свойства рельсов после пропущенного тоннажа 1,77 млрд тонн / Р. В. Кузнецов, В. Е. Громов, Е. В. Полевой, Ю. А. Рубанникова, В. Е. Кормышев // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2021. – № 2. – С. 81–87.

2. Кузнецов, Р. В. Эволюция структурно-фазовых состояний и свойств дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов при экстремально длительной эксплуатации. Сообщение 4. Формирование градиентов структурно-фазового состояния металла головки рельсов по центральной оси после пропущенного тоннажа 1770 млн т брутто / Р. В. Кузнецов, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, В. Е. Кормышев, Ю. А. Шлярова, Е. В. Полевой, А. А. Юрьев // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2021. – № 3. – С. 37–46.

3. Кузнецов, Р. В. Структурно-фазовое состояние и упрочнение рельсов после экстремально длительной эксплуатации / Р. В. Кузнецов, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, Ю. А. Рубанникова, В. Е. Кормышев, А. А. Юрьев, Н. А. Попова // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2021. – Т. 18. – № 3. – С. 328–337.

4. Кузнецов, Р. В. Трансформация структурно-фазовых состояний в головке рельсов при экстремально длительной эксплуатации / Р. В. Кузнецов, В. Е. Кормышев, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, Ю. А. Рубанникова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2022. – Т.65. – № 4. – С. 278–283.

5. Кузнецов, Р. В. Перераспределение атомов углерода в рельсах при сверхдлительной эксплуатации / Р. В. Кузнецов, О. А. Перегудов, В. В. Шляров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2022. – Т.65. – № 2. – С. 134–136.

6. Громов, В. Е. Деформационное преобразование структуры и фазового состава поверхности рельсов при сверхдлительной эксплуатации / В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, Р. В. Кузнецов, А. М. Глезер, Ю. А. Шлярова, О. А. Перегудов // Деформация и разрушение материалов. – 2022. – № 1. – С. 35–39.

7. Кузнецов, Р. В. Эволюция структурно-фазовых состояний и свойств дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов при экстремально длительной эксплуатации. Сообщение 5. Градиентные структурно-фазовые состояния по радиусу скругления головки рельсов после сверхдлительной эксплуатации / Р. В. Кузнецов, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, А. А. Юрьев, В. Е. Кормышев, Е. В. Полевой // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2022. – №. 1. – С. 9–18.

8. Иванов, Ю. Ф. Структура рельсов после экстремально длительной эксплуатации / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, Р. В. Кузнецов, Ю. А. Шлярова, А. А. Юрьев, В. Е. Кормышев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2022. – № 3. – С. 160–165.

9. Кузнецов, Р. Е. Градиенты структуры, фазового состава и дислокационной субструктуры рельсов при сверхдлительной эксплуатации / Р.Е. Кузнецов, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, В. Е. Кормышев, Ю. А. Шлярова, А. А. Юрьев // Известия Алтайского государственного университета. – 2022. – № 1. – С. 44–50.

10. Григорович, К. В. Формирование тонкой структуры перлитной стали при сверхдлительной пластической деформации / К. В. Григорович, В. Е. Громов, Р. В. Кузнецов, Ю. Ф. Иванов, Ю. А. Шлярова // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. –2022. – Т. 503. – С. 8–12.

Статьи в зарубежных и переводных рецензируемых изданиях

1. Ivanov, Yu. F. Fine structure formation in rails under ultra long-term operation / Yu. F. Ivanov, A. M. Glezer, R. V. Kuznetsov, V. E. Gromov, Yu. A. Shliarova, A. P. Semin, R. V. Sundeev // Materials Letters. – 2021. – P. 131378.

2. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kormyshev V.E., Rubannikova Yu.A., Kuznetsov R.V., Peregudov O.A. Physical Nature of Rails Strengthening in Extremely Long-Term Operation // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2509.

Монографии

1. Юрьев, А. А. Длинномерные рельсы: структура и свойства после сверхдлительной эксплуатации: Монография / А. А. Юрьев, Р. В. Кузнецов, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, Ю. А. Шлярова. – Издание 2-е, дополненное и переработанное. – Новокузнецк: Полиграфист, 2022. – 311 с.

Тезисы докладов

1. Кузнецов, Р. В. Эволюция структуры стали перлитного класса при многократном длительном деформационном воздействии / Р. В. Кузнецов, В. Е. Громов, А. Е. Корочкин, Ю. А. Рубанникова // Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов : девятая Международная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения академика Б. К. Вайнштейна, 22-26 ноября 2021 г. ; Актуальные проблемы современного материаловедения: четвертая Международная школа молодых ученых, 22-26 ноября 2021 г. : сборник тезисов. – Москва, 2021. – С. 105.

2. Кузнецов, Р. В. Эволюция структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры на разных стадиях экстремально длительной эксплуатации рельсов = Evolution of structure-phase states and defect substructure at different stages of extreme long-term operation of rails / Р. В. Кузнецов, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, Ю. А. Шлярова, В. Е. Кормышев, О. А. Перегудов, А. П. Семин // Металлургия: технологии, инновации, качество. Металлургия – 2021: труды XXII Международной научно-практической конференции, 10–11 ноября 2021 г. – Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2021. – Ч. 1. – С. 189–194.

3. Громов, В. Е. Структурно-фазовое состояние и свойства рельсов по центральной оси и выкружки после экстремально длительной эксплуатации / В. Е. Громов, Р. В. Кузнецов, Ю. Ф. Иванов, Ю. А. Рубанникова, В. Е. Кормышев, О. А. Перегудов // Перспективные материалы и технологии : материалы международного симпозиума, 23–27 августа 2021 г. – Минск, 2021. – С. 307–309.

4. Громов, В. Е. Изменение предела текучести дифференцированно закаленных рельсов при экстремально длительной эксплуатации / В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, Р. В. Кузнецов, Ю. А. Рубанникова, В. Е. Кормышев // Физическое материаловедение : X Международная школа, посвященная 10-летию лаборатории "Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы", 13-17 сентября 2021 г. Актуальные проблемы прочности : LXIII Международная конференция, посвященная 70-летию Тольяттинского государственного университета, 13-17 сентября 2021 г.: сборник материалов. – Тольятти, 2021. – С. 149–150.

5. Kuznetsov, R. V. Evolution of the perlite steel structure at multiple long-term deformation impact / R. V. Kuznetsov, V. E. Gromov, A. E. Korochkin, Y. A. Rubannikova // Synthesis, structure, and properties of high-entropy materials = Получение, структура и свойства высокоэнтروпийных материалов : abstracts of the III International Conference and School of Young Scientists, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, October 11-15, 2021. – Belgorod, 2021. – P. 78-79.

6. Gromov, V. E. Gradient of structure-phase state of rails along central axis of tread surface / V. E. Gromov, R. V. Kuznetsov, Yu.F. Ivanov, V. E. Kormyshev, Yu. A. Shliarova // 11th International online symposium on materials in external fields (ISMEF 2022), Novokuznetsk, Russia, February 14-15, 2022. – Novokuznetsk, 2022. – С. 103-104.

Подписано в печать 04.04.2022 г.

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная

Усл. печ. л. 1,39. Уч. изд. л. 1,56. Тираж 100 экз. Заказ № 89.

Сибирский государственный индустриальный университет.

654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42

Издательский центр СибГИУ