

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи



Порфирьев Михаил Анатольевич

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ,
ДИСЛОКАЦИОННАЯ СУБСТРУКТУРА И МЕХАНИЗМЫ
УПРОЧНЕНИЯ РЕЛЬСОВ ИЗ ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ
ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» и в АО «Новокузнецкий завод резервуарных металлоконструкций имени Н.Е. Крюкова»

**Научный
руководитель**

Громов Виктор Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор

**Научный
консультант**

Крюков Роман Евгеньевич, доктор технических наук, доцент

**Официальные
оппоненты:**

Клопотов Анатолий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры прикладной механики и материаловедения, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск

Астафурова Елена Геннадьевна, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории физики иерархических структур в металлах и сплавах.

Защита состоится «20» мая 2026 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.03 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 4, аудитория 245



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук

С.А. Гынгазов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Просвечивающая электронная дифракционная микроскопия является самым высокоинформативным методом современного физического материаловедения, поскольку позволяет выявить все изменения в структуре, фазовом составе дислокационной субструктуре при длительной эксплуатации рельсов.

Поэтому информация о механизмах формирования и эволюции структуры, фазового состава и свойств в реальных условиях длительной эксплуатации является актуальной.

Целью является установление физической природы упрочнения и закономерностей формирования структуры, фазового состава, дислокационной субструктуры, свойств по разным направлениям в головке длинномерных рельсов после экстремально длительной эксплуатации на экспериментальном кольце РЖД (г. Щербинка).

Для реализации этой цели работы решены следующие задачи:

1. Определить структурно-фазовые состояния, дефектную субструктуру и свойства в головке рельсов на глубине 0,2,10 мм от поверхности катания по центральной оси
2. Выявить немонотонный характер изменения структуры и дислокационной субструктуры вдоль радиуса скругления выкружки головки рельсов.
3. Изучить эволюцию субструктуры цементита рельсов из заэвтектоидной стали при эксплуатации.
4. Изучить эволюцию морфологических составляющих структуры и фазового состава по различным направлениям в головке рельсов.
5. Выявить изменения дислокационной субструктуры и внутренних полей напряжений в головке рельсов по центральной оси симметрии и радиусу скругления выкружки после длительной эксплуатации.
6. Провести количественную оценку основных механизмов упрочнения заэвтектоидной рельсовой стали по центральной оси и радиусу скругления головки рельсов после пропущенного тоннажа 187 млн. тонн брутто.

Степень разработанности темы. С начала производства стальных рельсов внимание исследователей в области физического материаловедения привлечено к анализу причин деградации свойств рельсов различных структурных классов при эксплуатации.

В многочисленных работах отечественных и зарубежных исследователей сформирован большой объем данных по эволюции структуры, фазового состава, дефектной субструктуры рельсов из доэвтектоидной и бейнитной

стали при эксплуатации в реальных условиях железных дорог и городских условиях метрополитенов. Для доэвтектоидных сталей пропущенный тоннаж составлял до 1000 млн. тонн на Свердловской железной дороге, до 1770 млн. тонн на экспериментальном кольце РЖД, до 350 млн. тонн на криволинейных и прямолинейных участках парижского метро. Имеется большое число публикаций по стендовым испытаниям, имитирующим контакт колесо-рельс и скольжение в этой системе. Анализу подвергались поверхностные слои головки рельсов, их дефектная субструктура, микротвердость, образование «белого слоя», механические и трибологические свойства и другие параметры. Число работ по количественной оценке физических механизмов упрочнения поверхности катания для доэвтектоидных рельсов крайне незначительно, а для заэвтектоидных - они отсутствуют вообще.

Научная новизна.

1. В работе впервые получен обширный банк новых данных о структуре, фазовом составе, дефектной субструктуре и свойствах в головке 100-метровых дифференцированно упрочненных рельсов категории ДТ 440ИК из заэвтектоидной стали по разным направлениям после полигонных испытаний (пропущенный тоннаж 187 млн. тонн брутто).
2. Выявлен градиентный характер изменения структуры и дислокационной субструктуры по центральной оси симметрии и радиусу скругления в головке рельсов после длительной эксплуатации.
3. Выявлена физическая природа и характер трансформации цементита в головке рельсов из заэвтектоидной стали на разном расстоянии от поверхности по разным направлениям после эксплуатации.
4. Проанализировано изменение морфологических составляющих рельсов из заэвтектоидной стали по разным направлениям после полигонных испытаний на экспериментальном кольце РЖД.
5. Впервые проведена количественная оценка основных механизмов упрочнения поверхности катания в головке рельсов по разным направлениям и различном расстоянии.

Достоверность полученных результатов. Задачи исследования четко сформулированы и полноценно решены, что обеспечивает надежность выводов. В работе применялись апробированные и признанные методы экспериментального анализа структуры и механических свойств материала, подвергшемуся длительному механическому воздействию. Полученные данные обладают высоким качеством и информативностью и согласуются с имеющимися литературными источниками. Полученные результаты и выводы были проверены и обсуждены на международных научных

конференциях и опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, а также в изданиях, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus.

Научная и практическая значимость работы. Результаты работы позволяют глубже понять физическую природу и механизмы формирования и изменения структурно-фазовых состояний, дислокационной субструктуры и свойств рельсов специального назначения (повышенная износостойкость и контактно-усталостная выносливость) при длительной эксплуатации. На основе выявленных закономерностей количественно оценены механизмы упрочнения поверхности катания на разных расстояниях по центральной оси и радиусу скругления головки рельсов. На основе сформированного в работе банка данных могут быть развиты положения теории структурно-фазовых превращений в перлитных сталях. Для разработки методов неразрушающего контроля, мониторинга дефектоскопии рельсов нового поколения из заэвтектоидной стали могут быть использованы результаты диссертации. Проведена апробация результатов при проведении научных исследований в Сибирском государственном индустриальном университете и учебном процессе при выполнении выпускных квалификационных работ, подготовке бакалавров и магистров по направлению «Материаловедение и технология материалов». Представлены соответствующие акты и справки учебных заведений и промышленных предприятий.

Личный вклад автора включает все этапы от планирования и проведения экспериментов до анализа, интерпретации результатов, их подготовку к печати.

Методология и методы исследования. В Сибирском государственном индустриальном университете (ранее Сибирский металлургический институт) более полувека проводятся исследования объемных дифференцированных закаленных рельсов из доэвтектоидной стали. В работе использован широкий набор современных и апробированных методов, позволяющих проводить адекватное сравнение с данными, полученными другими авторами. Использовались методы современного физического материаловедения: оптический микроскоп Olympus GX-51, рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000, растровый электронный микроскоп Philips SEM 515, просвечивающий электронный дифракционный микроскоп JEOL JEM 2100F, микротвердомеры PMT-3 и HVS-1000A, трибометр (TRIBO technic).

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Исследования структурно-фазовых состояний, дефектной субструктуры, микротвердости и трибологических свойств в головке рельсов из заэвтектоидной стали на глубине 0, 2, 10 мм от поверхности катания по

центральной оси показали немонотонные зависимости параметров тонкой структуры от расстояния до поверхности катания. Поверхностный слой на 90% состоит из субзеренной структуры.

2. Обнаружен немонотонный характер изменения структуры, дислокационной субструктуры, микротвердости и трибологических свойств вдоль радиуса скругления выкружки головки рельсов после длительной эксплуатации.

3. Исследование эволюции субструктуры цементита рельсов из заэвтектоидной стали позволило выявить два механизма разрушения пластин цементита в перлитных колониях: растворение пластин с уходом атомов углерода на движущиеся дислокации и разрезание цементита движущимися дислокациями.

4. Изучена эволюция морфологических составляющих структуры и фазового состава по разным направлениям в головке рельсов из заэвтектоидной стали при длительной эксплуатации. Во всех морфологических компонентах происходит формирование и совершенствование фрагментированной структуры, внутри и на границах которой образуются частицы цементита.

5. Проведено сравнение упругой и пластической составляющих полей напряжений и изучены условия возникновения упрочнения и разупрочнения (образование микротрещин). Показано, что превышение амплитуды упругих полей напряжений над пластическими в несколько раз приводит к трещинообразованию и разупрочнению материала

6. Проведены теоретические оценки параметров, определяющих механизмы упрочнения длинномерных рельсов, позволившие установить причины упрочнения в головке рельсов и вычислить аддитивный предел текучести на разных расстояниях от поверхности катания по центральной оси и радиусу скругления выкружки.

Соответствие диссертации паспорту специальности.
Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования, научной новизне и практической значимости соответствует пункту 1 «Экспериментальное изучение физической природы и свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и, в том числе, материалов световодов как в твердом (кристаллы, поликристаллы), 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 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

Апробация результатов. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, чтениях, школах и семинарах: XII и XIII международных on-line симпозиумах «Материалы во внешних полях», Новокузнецк, 2023-2024 гг., Международных конференциях Физика и технология перспективных материалов – 2023, 2025 (Уфа, 2023, 2025), XI Российско-Казахстанской молодежной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии» Барнаул, 2023г., LXVIII международной научной конференции «Актуальные проблемы прочности» Витебск, 2024, XIII Международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов» Черноголовка, 2024, XXIII и XXIV Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации и качество» (Новокузнецк, 2023, 2024), Международном симпозиуме «Перспективные материалы и технологии» (Минск, 2025), Международной научно-практической конференции «Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов» (Курск, 2025), XII международной школе-конференции «Физическое материаловедение (ШФМ-2025)» (Тольятти, 2025), IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ–2025)» (г. Пермь, 2025 г.)

Публикации. Основное содержание работы представлено в виде 52 публикациях, в том числе в 16 статьях в журналах, входящих в Перечень, рекомендованный ВАК для публикации результатов диссертационных исследований, 8 статьях, проиндексированных в международной базе данных Scopus, 5 монографиях, остальные 13 в трудах всероссийских и международных конференций и других научных мероприятий.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных выводов и 4 приложений, списка литературы из 152 наименований. Диссертация изложена на 169 страницах машинописного текста, содержит 78 рисунков, 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, методы и методология исследования, достоверность результатов, личный вклад автора.

В первой главе «Структурно-фазовые состояния и свойства рельсов при 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. На основе анализа сформированы цель и задачи настоящего исследования под действием ряда факторов. Рассмотрены контактно-усталостные повреждения и их эволюция при эксплуатации в сложных условиях.

Во второй главе «Материалы и методы исследования» отмечено, что материалом исследования являлись образцы дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ400ИК из заэвтектоидной стали марки Э90ХФ производства АО «Евраз-ЗСМК» после пропущенного тоннажа 187 млн. т брутто в процессе полигонных испытаний на Экспериментальном кольце АО «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (г. Щербинка).

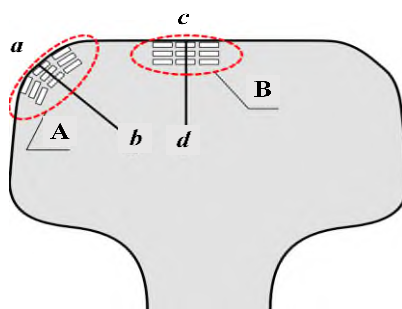


Рисунок 1 – Схематическое изображение образцов рельса с указанием мест, использованных для сравнения структуры. Линия ab направлена по радиусу скругления головки рельса («выкружка»), линия cd – вдоль центральной оси рельса («поверхность катания»). Пунктирными линиями показаны две группы образцов А и В, подвергнутые сравнению

Исследование структуры, дефектной субструктуры, морфологии фаз и состояния карбидной фазы рельсов осуществляли методами просвечивающей дифракционной электронной микроскопии. Схема препарирования образцов приведена на рисунке 1.

Микротвердость измеряли методом внедрения алмазной пирамидки Виккерса на приборе HVS-1000А с цифровым дисплеем, отображающим микротвердость числами твердости HV. Микротвердость, ГОСТ 9450-76, также определяли прибором ПМТ-3, ТУ 3-3.1377-83, при нагрузке 30 г на расстоянии 0, 2 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. Трибологические свойства определяли на приборе TRIBO technic.

В третьей главе «Структура и свойства рельсов из стали заэвтектоидного состава после эксплуатации на экспериментальном ж/д

кольце» представлены результаты исследования градиентов структуры металла головки рельсов по центральной оси и радиусу скругления выкружки.

Установлено, что исследуемая заэвтектоидная сталь в исходном состоянии имеет преимущественно структуру перлита пластинчатой морфологии. Размеры зерен перлита изменяются в пределах от 1,5 мкм до 25 мкм. Пластины цементита перлитных колоний фрагментированы, т.е. разделены на отдельные области, размеры которых изменяются в пределах (10-12) нм. Показано, что в пластинах феррита перлитных колоний присутствует дислокационная субструктура с хаотически распределенными дислокациями и дислокациями, формирующими сетки. В первом случае скалярная плотность дислокаций составляет $\langle \rho \rangle = 3,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$; во втором случае – $\langle \rho \rangle = 5,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Установлено, что исследуемая сталь находится в упруго-напряженном состоянии, о чем свидетельствуют изгибные экстинкционные контуры. Источниками полей напряжений являются границы раздела зерен перлита (внутрифазные границы) и границы раздела пластин феррита и цементита перлитных колоний (межфазные границы). Установлено, что наиболее напряженными участками перлитной структуры исследуемой стали являются торцы пластин цементита, обрывающиеся в объеме перлитной колонии.

Эксплуатация рельсов на железной дороге привела к множественным преобразованиям структуры стали, связанным с разрушением колоний перлита. Обнаружено, что разрушение пластин цементита сопровождается образованием наноразмерных (4-7 нм) частиц округлой формы, расположенных либо вдоль бывших границ пластин цементита, либо в объеме пластин феррита.

Основным типом дислокационной субструктуры поверхностного слоя металла поверхности катания рельсов является сетчатая. Скалярная плотность дислокаций формирующейся дислокационной субструктуры изменяется в пределах $\langle \rho \rangle = (6-8) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ и в ≈ 2 раза превышает величину скалярной плотности дислокаций слоя, расположенного на глубине 10 мм. Скалярная плотность дислокаций достигает максимального значения на расстоянии 2 мм от поверхностного слоя. Ферритные пластины перлитной структуры фрагментированы. Продольные средние размеры фрагментов увеличиваются по мере удаления от поверхности. В пластинах цементита также наблюдается фрагментированная структура.

Присутствие на электронно-микроскопических изображениях изгибных контуров экстинкции свидетельствует о кривизне-кручении анализируемого материала. Изгибные контуры экстинкции наблюдаются как в ферритных

пластинах, так и в пластинах цементита. Контуры 1 типа, наблюдаемые в ферритных пластинах, могут распространяться на все зерно перлита, начинаясь и заканчиваясь на его границах. Источником кривизны-кручения материала в этом случае являются границы раздела зерен или колоний перлита. Контуры 2 типа располагаются в пределах отдельно взятой пластины феррита. В этом случае источником кривизны-кручения материала являются границы раздела пластин феррита и цементита.

Средние поперечные размеры экстинкционных контуров обоих типов изменяются немонотонным образом по мере удаления от поверхностного слоя выкружки и достигают минимальных значений на глубине 2 мм. При этом амплитуда напряжений, формирующихся у межфазной границы (границы раздела пластин цементита и феррита) на порядок выше амплитуды напряжений, формирующихся у внутрифазных границ (границ зерен перлита).

Поперечные размеры контуров в цементите практически не зависят от расстояния от поверхности выкружки и изменяются в пределах (8-13) нм.

Выполненные исследования структуры рельсовой стали заэвтектоидного состава, подвергнутой эксплуатации на железной дороге, позволили выявить два механизма разрушения пластин цементита перлитных колоний: (1) растворение пластин с уходом атомов углерода на движущиеся дислокации, и (2) разрезание пластин цементита движущимися дислокациями. Показано, что независимо от места расположения – выкружка или поверхность катания в слое металла рельс, расположенном на глубине 2 мм, основным механизмом разрушения пластин цементита является механизм растворения с последующим выделением в объеме пластин феррита наноразмерных частиц карбида железа. В поверхностном слое металла рельс реализуются оба механизма преобразования пластин цементита – растворение и разрушение путем перерезания движущимися дислокациями.

Изменения микротвердости показали, что после эксплуатации она почти в 2 раза увеличивается в слое, формирующем поверхность катания, особенно вдоль оси симметрии головки, наблюдается существенное снижение параметра износа, т.е. увеличение износостойкости (в ≈ 3 раза) и снижение коэффициента трения (в $\approx 1,2$ раза) поверхностного слоя стали относительно исходного состояния.

В четвертой главе «Структурно-фазовое состояние и упрочнение поверхностных слоев длинномерных рельсов по радиусу скругления выкружки головки рельсов из заэвтектоидной стали при длительной эксплуатации» прослежена эволюция морфологических составляющих

структуры и фазового состава, дислокационной субструктуры и внутренних полей напряжений вдоль радиуса скругления выкружки в рельсах при длительной эксплуатации, что позволило провести оценку механизмов упрочнения, формирующих предел текучести.

В исходном состоянии по радиусу скругления головки рельса («выкружка») структура стали после длительной эксплуатации представлена пятью морфологическими составляющими: пластинчатым, фрагментированным, разрушенным, глобулярным перлитом и полностью разрушенной структурой. Длительная эксплуатация рельсов из заэвтектоидной стали привела к разрушению пластинчатого и разрушенного перлита, формированию, а затем разрушению фрагментированного перлита и интенсивному формированию полностью разрушенной структуры, вблизи поверхности образца начинает образовываться субзеренная структура.

Количественные изменения параметров фазового состава и объемных долей морфологических составляющих по радиусу скругления выкружки представлены на рис. 2 и табл. 1.

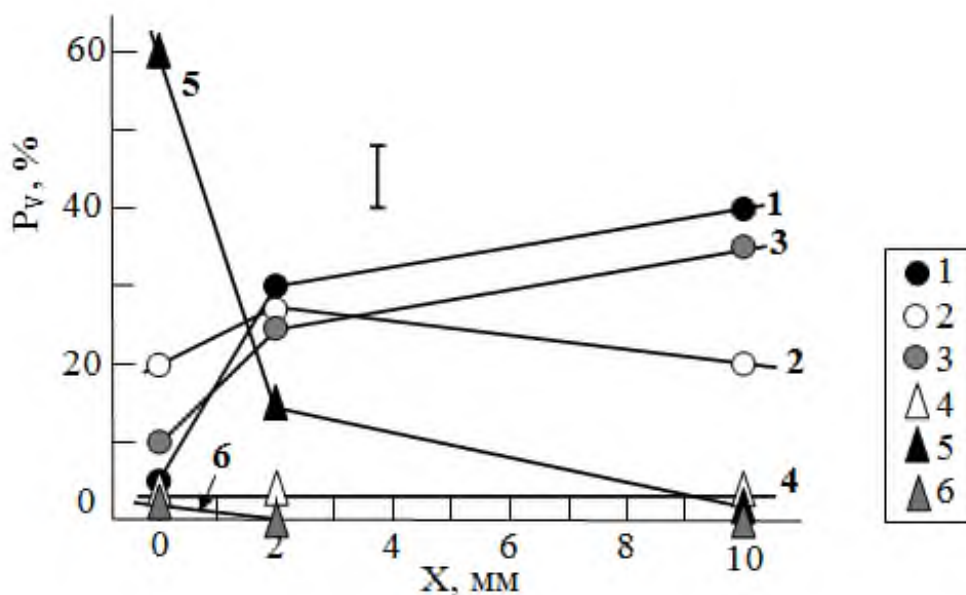


Рисунок 2 – Изменение объемных долей морфологических составляющих по радиусу скругления головки рельса («выкружка») при удалении от поверхности контакта «колесо – рельс»: 1 – пластинчатый не разрушенный перлит, 2 – фрагментированный пластинчатый перлит, 3 – разрушенный пластинчатый перлит, 4 – глобулярный перлит, 5 – феррито-карбидная смесь, 6 – субзеренная структура

Таблица 1 –. Количественные параметры фазового состава стали на различных расстояниях от поверхности контакта по радиусу скругления головки рельса («выкружка»)

Параметры		Перлит				Феррито-карбидная смесь	Субзеренная структура
		пластинчатый	фрагментированный	разрушенный	глобулярный		
10 мм от поверхности головки рельса							
Об. доля		40%	20%	35%	3%	2%	0
Размер фрагментов (субзерен), нм		—	95×465	—	—	—	—
Fe ₃ C (на границах)	размер, нм	—	20×240	—	—	—	—
	об. доля	—	5.2%	—	—	—	—
Fe ₃ C (внутри)	размер, нм	20	5×15	20×300	100	10×25	—
	об. доля	12.0%	0.2%	6.4%	6.5%	1.6%	—
2 мм от поверхности головки рельса							
Об. доля		30%	27%	25%	3%	15%	0
Размер фрагментов (субзерен), нм		—	95×255	—	—	—	—
Fe ₃ C (на границах)	размер, нм	—	20×165	—	—	—	—
	об. доля	—	1.8%	—	—	—	—
Fe ₃ C (внутри)	размер, нм	20	5×20	20×200	90	8×35	—
	об. доля	12.0%	0.2	2.1%	4.1%	1.0%	—
Поверхность головки рельса							
Об. доля		5%	20%	10%	3%	60%	2%
Размер фрагментов (субзерен), нм		—	80×125	—	—	—	90
Fe ₃ C (на границах)	размер, нм	—	15×95	—	—	—	5×35
	об. доля	—	0.7%	—	—	—	0.05%
Fe ₃ C (внутри)	размер, нм	15	5×15	20×110	45	8×30	—
	об. доля	12.0%	0.1	1.2%	2.3%	0.4%	0

Дислокационная структура во всех морфологических составляющих представлена, в основном, дислокационными сетками.

Величина средней скалярной плотности дислокаций в каждой морфологической составляющей представлена в таблице 2.

Таблица 2. – Количественные параметры структуры заэвтектоидной рельсовой стали по радиусу скругления головки рельса («выкружка»)

Параметры	Перлит				Феррито-карбидная смесь	Субзеренная структура
	пластинчатый	фрагментированный	разрушенный	глобулярный		
10 мм от поверхности головки рельса						
Об. доля	40%	20%	35%	3%	2%	0
$\rho \times 10^{-10}, \text{см}^{-2}$	5.7	2.9	3.6	2.8	6.0	—
$\sigma_{\text{л}}, \text{МПа}$	475	340	380	335	490	—
$\chi = \chi_{\text{пл}} + \chi_{\text{упр}}, \text{см}^{-1}$	340 + 0	690 + 0	575 + 0	630 + 0	1200 + 0	—
$\rho_{\pm} \times 10^{-10}, \text{см}^{-2}$	1.4	2.8	2.3	2.5	4.8	—
$\sigma_{\partial} = \sigma_{\partial}^{\text{пл}} + \sigma_{\partial}^{\text{упр}}, \text{МПа}$	235 + 0	335 + 0	305 + 0	315 + 0	440 + 0	—
2 мм от поверхности головки рельса						
Об. доля	30%	27%	25%	3%	15%	0
$\rho \times 10^{-10}, \text{см}^{-2}$	6.3	4.2	4.4	3.0	6.5	—
$\sigma_{\text{л}}, \text{МПа}$	500	410	420	345	510	—
$\chi = \chi_{\text{пл}} + \chi_{\text{упр}}, \text{см}^{-1}$	545 + 0	895 + 0	745 + 0	700 + 0	1625 + 85	—
$\rho_{\pm} \times 10^{-10}, \text{см}^{-2}$	2.2	3.6	3.0	2.8	6.5	—
$\sigma_{\partial} = \sigma_{\partial}^{\text{пл}} + \sigma_{\partial}^{\text{упр}}, \text{МПа}$	295 + 0	380 + 0	345 + 0	335 + 0	510 + 135	—
Поверхность головки рельса						
Об. доля	5%	20%	10%	3%	60%	2%
$\rho \times 10^{-10}, \text{см}^{-2}$	6.5	4.3	4.5	3.0	6.6	1.4
$\sigma_{\text{л}}, \text{МПа}$	510	415	425	345	515	235
$\chi = \chi_{\text{пл}} + \chi_{\text{упр}}, \text{см}^{-1}$	765 + 0	1075 + 75	805 + 0	740 + 0	1650 + 95	350 + 390
$\rho_{\pm} \times 10^{-10}, \text{см}^{-2}$	3.1	4.3	3.2	3.0	6.6	1.4
$\sigma_{\partial} = \sigma_{\partial}^{\text{пл}} + \sigma_{\partial}^{\text{упр}}, \text{МПа}$	350 + 0	415 + 120	355 + 0	345 + 0	515 + 150	235 + 625

Принятые обозначения и сокращения: ρ , $\rho_{\pm}$ – соответственно скалярная и избыточная плотность дислокаций; χ – амплитуда кривизны-кручения кристаллической решетки и её составляющие: $\chi_{\text{пл}}$ – пластическая и $\chi_{\text{упр}}$ – упругая; $\sigma_{\text{л}}$ – амплитуда внутренних напряжений сдвига, или «леса» дислокаций; σ_{∂} – амплитуда внутренних далекодействующих напряжений и её составляющие: $\sigma_{\partial}^{\text{пл}}$ – пластическая и $\sigma_{\partial}^{\text{упр}}$ – упругая.

Из таблицы следует, что наибольшей величиной ρ обладает пятая морфологическая составляющая (полностью разрушенная структура), наименьшей – глобулярный перлит. Также из представленной таблицы следует что во фрагментированной структуре величина скалярной плотности внутри фрагментов существенно меньше, чем в пластинчатом и разрушенном перлите. Полученный результат хорошо согласуется с литературными данными, а именно, фрагментация материала приводит к снижению скалярной плотности дислокаций в теле образованных фрагментов.

Установлено, что эксплуатация рельсов наравне с пластическим изгибом приводит к упругому искажению кристаллической решетки феррита.

Установлены немонотонные зависимости скалярной, избыточной плотности дислокаций, амплитуды кривизны-кручения кристаллической решетки, внутренних полей напряжений по радиусу скругления головки рельса («выкружка») при удалении от поверхности контакта «колесо – рельс».

Анализируя полученные данные, можно утверждать, 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 рельса. А именно, по мере приближения к поверхности контакта прочность металла увеличивается, причем наибольшему упрочнению подвергается приповерхностный слой рельса толщиной не более 2 мм. В-третьих, основным механизмом упрочнения металла является упрочнение некогерентными частицами $\Delta\sigma_{ор}$. Это объясняется тем, что в материале образуется полностью разрушенная структура, объемная доля которой быстро увеличивается и в приповерхностном слое занимает основной объем материала. Значительную долю в приповерхностном слое (0 – 2 мм) в упрочнение вносят внутренние далекодействующие напряжения, σ_{δ} внутренние напряжения сдвига («леса» дислокаций) $\Delta\sigma_{л}$, а также субструктурное $\Delta\sigma_{сс}$ упрочнение. Это объясняется тем, что по мере приближения к поверхности головки рельса совершенствуется фрагментированная субструктура. Самыми прочными морфологическими составляющими вблизи поверхности образца оказываются фрагментированный перлит.

Таблица 3. – Средние по материалу количественные параметры дислокационной субструктуры

Параметры	10 мм	2 мм	Поверхность
$\langle\rho\rangle\cdot 10^{-10}, \text{ см}^{-2}$	4,3	5,2	5,7
$\langle\rho_{\pm}\rangle\cdot 10^{-10}, \text{ см}^{-2}$	2,1	3,4	5,4
$\langle\chi\rangle = \langle\chi_{пл}\rangle + \langle\chi_{упр}\rangle, \text{ см}^{-2}$	520 + 0	855 + 15	1350 + 80
$\langle\sigma_{л}\rangle, \text{ МПа}$	410	450	475
$\langle\sigma_{\delta}\rangle = \langle\sigma_{\delta}^{пл}\rangle + \langle\sigma_{\delta}^{упр}\rangle, \text{ МПа}$	285 + 0	365 + 20	460 + 125

Однако, как следует из рисунка 2, кривая 6, субзеренная структура только зарождается в слое 2 мм $\rightarrow$ 0 (приповерхностном слое) и поэтому её вклад в упрочнение материала небольшой, поэтому упрочнение материала в основном обеспечивается фрагментированной и полностью разрушенной структурами.

Таблица 4. – Величины вкладов различных механизмов в упрочнение заэвтектоидной рельсовой стали в различных морфологических составляющих и в целом по материалу по радиусу скругления головки рельса

Вклады	Перлит			Глобул. перлит	Полностью разр.	Субзеренная структура	Средние
	пласт.	фрагм.	разр.				
10 мм от поверхности головки рельса							
Об. доля, %	40	20	35	3	2	0	100
$\Delta\sigma_n$, МПа	35	35	35	35	35	—	35
$\Delta\sigma_{тв}$, МПа	80	120	80	80	100	—	88
$\Delta\sigma_3$, МПа	—	—	310	505	280	—	129
$\Delta\sigma_{перл}$, МПа	890	—	—	—	—	—	356
$\Delta\sigma_{cc}$, МПа	—	590	—	—	—	—	118
$\Delta\sigma_{ор}$, МПа	—	1280	480	100	1345	—	454
$\Delta\sigma_i$ МПа	475	340	380	335	490	—	410
$\Delta\sigma_{пл}$, МПа	235	335	305	315	440	—	286
$\Delta\sigma_{упр}$, МПа	0	0	0	0	0	—	0
$\Delta\sigma_\theta$, МПа	235	335	305	315	440	—	286
$\Sigma(\Delta\sigma_i)$, МПа	1535	2502	1392	1180	2418	—	1684
$\Sigma(\Delta\sigma_i P_i)$, МПа	614	500	487	35	48	—	1684
2 мм от поверхности головки рельса							
Об. доля, %	30	27	25	3	15	0	100
$\Delta\sigma_n$, МПа	35	35	35	35	35	—	35
$\Delta\sigma_{тв}$, МПа	80	150	80	80	120	—	105
$\Delta\sigma_3$, МПа	—	—	255	480	220	—	111
$\Delta\sigma_{перл}$, МПа	890	—	—	—	—	—	267
$\Delta\sigma_{cc}$, МПа	—	870	—	—	—	—	235
$\Delta\sigma_{ор}$, МПа	—	1300	340	95	1045	—	596
$\Delta\sigma_i$ МПа	500	410	420	345	510	—	453
$\Delta\sigma_{пл}$, МПа	295	380	345	335	510	—	364
$\Delta\sigma_{упр}$, МПа	0	0	0	0	135	—	20
$\Delta\sigma_\theta$, МПа	295	380	345	335	645	—	384
$\Sigma(\Delta\sigma_i)$, МПа	1585	2915	1253	1171	2242	—	1947
$\Sigma(\Delta\sigma_i P_i)$, МПа	476	787	313	35	336	—	1947
Поверхность головки рельса							
Об. доля, %	5	20	10	3	60	2	100
$\Delta\sigma_n$, МПа	35	35	35	35	35	35	35
$\Delta\sigma_{тв}$, МПа	80	180	80	80	150	90	142
$\Delta\sigma_3$, МПа	—	—	205	360	195	—	148
$\Delta\sigma_{перл}$, МПа	965	—	—	—	—	—	48
$\Delta\sigma_{cc}$, МПа	—	1465	—	—	—	1665	326
$\Delta\sigma_{ор}$, МПа	—	1125	340	200	805	580	760
$\Delta\sigma_i$ МПа	510	415	425	345	515	235	475
$\Delta\sigma_{пл}$, МПа	350	415	355	345	515	235	467
$\Delta\sigma_{упр}$, МПа	0	120	0	0	150	625	127
$\Delta\sigma_\theta$, МПа	350	535	355	345	665	860	587
$\Sigma(\Delta\sigma_i)$, МПа	1699	3482	1214	1163	2026	3261	2218
$\Sigma(\Delta\sigma_i P_i)$, МПа	85	696	121	35	1216	65	2218

где P_i – объемная доля каждой морфологической составляющей

На основании количественных параметров тонкой структуры и внутренних напряжений выполнена оценка механизмов упрочнения. Они были сделаны на основе широко апробированных выражений, приведенных в классических работах ведущих отечественных и зарубежных металлофизиков и металлосведов. Учитывались напряжения трения кристаллической решетки $\Delta\sigma_0$, твердорастворное упрочнение $\Delta\sigma_{\text{тв}}$, упрочнение за счет перлитной составляющей $\Delta\sigma_{\text{перл}}$, упрочнение внутренними напряжениями сдвига $\Delta\sigma_{\text{л}}$, упрочнение внутренними дальнедействующими напряжениями $\Delta\sigma_{\text{д}}$, структурное упрочнение $\Delta\sigma_{\text{сс}}$, упрочнение дисперсными частицами $\Delta\sigma_{\text{ор}}$, зернограничное упрочнение $\Delta\sigma_{\text{з}}$ (табл. 4).

В пятой главе «Влияние длительной эксплуатации на структурно-фазовое состояние и упрочнение поверхности катания заэвтектоидной рельсовой стали по центральной оси» рассмотрено изменение по центральной оси головки рельсов морфологических составляющих структуры фазового состава, дефектной субструктуры и внутренних полей напряжений.

Выполненные ПЭМ исследования показали, что в отличие от морфологических составляющих при анализе по радиусу скругления выкружки зерен феррито-карбидной смеси обнаружено не было.

После эксплуатации по мере приближения к поверхности образца структура стали изменяется, причем наибольшие изменения видны в поверхностном слое (рис. 3). Видно, что наибольшие изменения происходят в не разрушенном перлите. В пластинчатом идеальном перлите прямые, параллельные друг другу пластины цементита разрезаются дислокационным скольжением до отдельных частей различной величины, которые могут искривляться и смещаться на значительные расстояния.

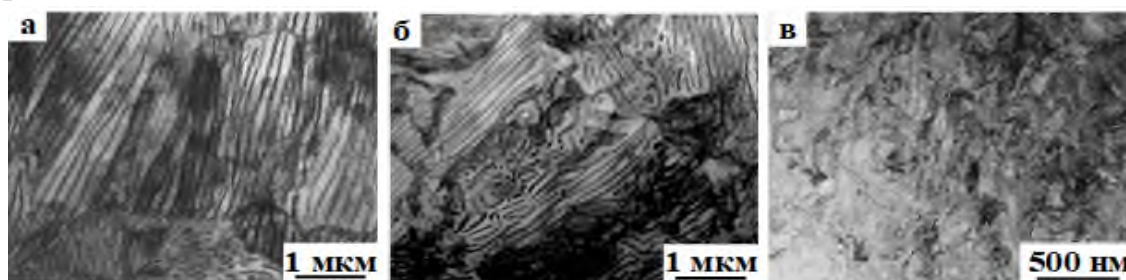


Рисунок 3 – Структура заэвтектоидной рельсовой стали на различных расстояниях от поверхности образца: а – 10 мм; б – 2 мм; в – поверхность.

Изображения получены методом STEM-анализа

Исходный пластинчатый идеальный перлит (рис. 3, а) постепенно превращается в разрушенный (рис. 3, б). Объемная доля пластинчатого идеального перлита постепенно уменьшается, и на поверхности образца он

практически отсутствует (рис. 3, в). Это хорошо видно как из табл. 5, так и из рис. 4, (кривые 1 и 3).

Таблица 5 – Параметры тонкой структуры заэвтектоидной стали

Поверхность катания		Не разрушенный пластинчатый		Разрушен ный перлит	Глобулярный перлит	Субзеренная структура
		идеальн ый	фрагмент ы			
10 мм от поверхности						
Об. доля		40%	20%	35%	5%	0
Размер фрагментов (субзерен), нм			90×420			
На границах	размер, нм		20×130	20×365	50	35×120
	расстояние, нм		60	105	95	110
	об. доля		5.7%	5%	3.6%	4.8%
Внутри	размер, нм	20	15			
	расстояние, нм	90	70			
	об. доля	12%	0.2%			
2 мм от поверхности						
Об. доля		20%	30%	45%	3%	2%
Размер фрагментов (субзерен), нм			70×270			110
На границах	размер, нм		20×90	20×290	65	40×155
	расстояние, нм		90	165	180	300
	об. доля		1.8%	2%	2.8%	2.4%
Внутри	размер, нм	20	15			
	расстояние, нм	90	70			
	об. доля	12%	0.2%			
Поверхность						
Об. доля		~1%	10%	0	0	90%
Размер фрагментов (субзерен), нм			50×160			80
На границах	размер, нм		15			15
	расстояние, нм		40			30
	об. доля		0.6%			1.0%
Внутри	размер, нм	15×20	15			10
	расстояние, нм	40	35			35
	об. доля	1.1%	0.7%			0.2%
В стыках	размер, нм					20
	расстояние, нм					100
	об. доля					0.01%

Одновременно происходит интенсивное формирование и совершенствование фрагментированной структуры, причем во всех морфологических составляющих. Во-первых, из разрезаемых пластин цементита мелкие частицы выносятся дислокациями на границы и в объем формирующихся фрагментов. Внутри и на границах фрагментов присутствуют частицы цементита (см. табл. 5).

Во-вторых, во фрагментированном перлите происходит образование новых дислокационных стенок как поперек, так и вдоль пластин α -фазы. Размер фрагментов уменьшается, а их объемная доля увеличивается (см. табл. 5, рис. 4, кривая 2).

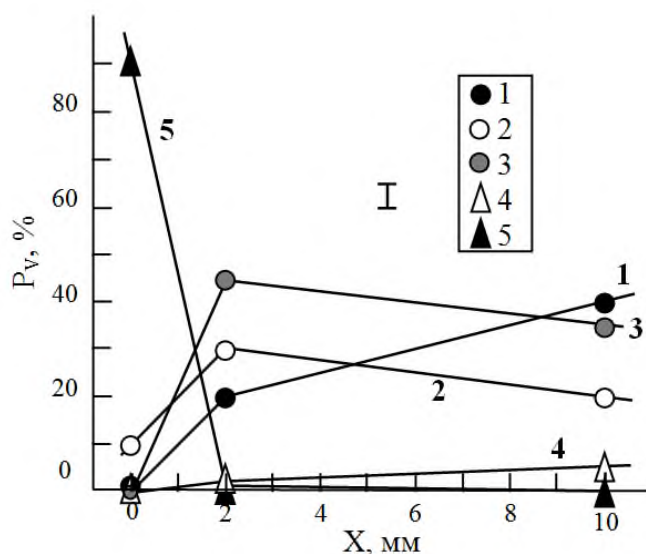


Рисунок 4 – Изменение объемных долей морфологических составляющих по центральной оси: 1 – пластинчатый не разрушенный перлит, 2 – фрагментированный, 3 – разрушенный, 4 – глобулярный, 5 – субзеренная структура

По мере приближения к поверхности границы фрагментов становятся все более четкими и резкими. Начинают образовываться изотропные (равноосные), либо близкие к ним фрагменты, средний размер которых составляет 80 нм. По границам фрагментов, как и прежде, присутствуют частицы цементита, но теперь они обладают округлой формой и малым размером (15 нм). Внутри образующихся фрагментов практически отсутствуют частицы карбидной фазы, а также, вследствие их малого размера, отсутствует дислокационная структура, что хорошо согласуется с литературными данными. В стыках бездислокационных фрагментов располагаются частицы карбидной фазы округлой формы, средний размер которых составляет 20 нм (см. табл.5). Фрагментированная структура

превращается в субзеренную (рис. 3, в), и в поверхностном слое объемная доля субзеренной структуры составляет 90% (табл. 5, рис. 4, кривая 5).

Были рассчитаны средние по материалу количественные параметры тонкой структуры. Их изменения приведены на рис. 5. Как следует из рис. 5, а, по мере приближения к поверхности головки рельса величина скалярной плотности в интервале 10 мм → 2 мм слабо возрастает, а затем (2 мм → 0) интенсивно убывает. Это объясняется тем, что в поверхностном слое основной объем материала (90%) составляет субзеренная структура, состоящая из практически бездислокационных субзерен. Поэтому величина средней по материалу скалярной плотности дислокаций ρ в поверхностном слое оказывается малой. Избыточная плотность дислокаций $\rho_{\pm}$ по мере приближения к поверхности вначале интенсивно возрастает, а затем уменьшается и постепенно сближается с величиной ρ , и вблизи поверхности их значения совпадают (рис. 5, а). Это означает, что практически все дислокации в материале оказываются избыточными.

На основе данных о структурно-фазовом состоянии рельсовой стали и дефектной субструктуры по центральной оси, выполнен количественный анализ механизмов упрочнения в зависимости от расстояния до поверхности головки рельса. Установлено, что основными механизмами упрочнения являются упрочнение внутренними упругими локальными напряжениями, а также субструктурное упрочнение и упрочнение некогерентными частицами

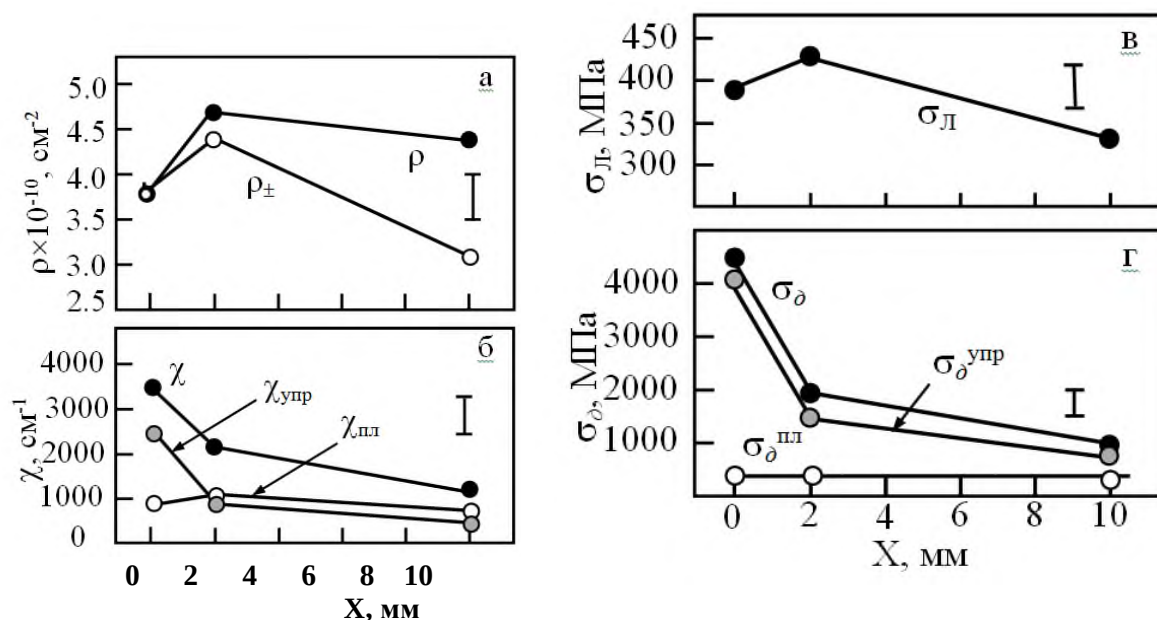


Рисунок 5 – Влияние длительной эксплуатации на изменение средних количественных параметров тонкой структуры по мере приближения к поверхностному слою образца

Таблица 6 – Величины вкладов различных механизмов в упрочнение рельсовой стали в различных морфологических составляющих на различных расстояниях от поверхности головки рельса

Вклады	Не разрушенный пластинчатый перлит		Разрушенн ый перлит	Глобуляр ный перлит	Субзеренная структура	В материале
	идеальны й	фрагмент и- рованный				
10 мм от поверхности головки рельса						
Об. доля	40%	20%	35%	5%	0%	100%
$\Delta\sigma_n$, МПа	35	35	35	35	—	35
$\Delta\sigma_{тв}$, МПа	80	120	80	80	—	90
$\Delta\sigma_3$, МПа	—	—	310	505		135
$\Delta\sigma_{перл}$, МПа	915	—	—	—	—	365
$\Delta\sigma_{сс}$, МПа	—	590	—	—	—	120
$\Delta\sigma_{ор}$, МПа	—	970	390	475	—	500
$\Delta\sigma_{л}$ МПа	500	335	350	380	—	410
$\Delta\sigma_{пл}$, МПа	360	335	350	380	—	350
$\Delta\sigma_{упр}$, МПа	0	3840	0	0	—	770
$\Delta\sigma_0$, МПа	360	4175	350	380	—	1120
2 мм от поверхности головки рельса						
Об. доля	20%	30%	45%	3%	2%	100%
$\Delta\sigma_n$, МПа	35	35	35	35	35	35
$\Delta\sigma_{тв}$, МПа	80	100	100	80	80	95
$\Delta\sigma_3$, МПа	—	—	275	435	—	135
$\Delta\sigma_{перл}$, МПа	915	—	—	—	—	180
$\Delta\sigma_{сс}$, МПа	—	830	—	—	1360	275
$\Delta\sigma_{ор}$, МПа	—	1020	255	215	405	440
$\Delta\sigma_{л}$ МПа	515	430	400	400	280	430
$\Delta\sigma_{пл}$, МПа	515	430	375	365	280	415
$\Delta\sigma_{упр}$, МПа	25	5135	0	0	0	1545
$\Delta\sigma_0$, МПа	540	5565	375	365	280	1960
Поверхность головки рельса						
Об. доля	~1%	10%	0	0	90	100%
$\Delta\sigma_n$, МПа	35	35	—	—	35	35
$\Delta\sigma_{тв}$, МПа	80	210	—	—	210	210
$\Delta\sigma_3$, МПа	—	—	—	—	—	—
$\Delta\sigma_{перл}$, МПа	1120	—	—	—	—	10
$\Delta\sigma_{сс}$, МПа	—	1430	—	—	1875	1830
$\Delta\sigma_{ор}$, МПа	—	1070	—	—	1435	1400
$\Delta\sigma_{л}$ МПа	575	445	—	—	380	390
$\Delta\sigma_{пл}$, МПа	575	445	—	—	380	390
$\Delta\sigma_{упр}$, МПа	40	2280	—	—	4255	4060
$\Delta\sigma_0$, МПа	615	2725	—	—	4635	4450

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

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Используя методы сканирующей, просвечивающей электронной микроскопии, измерения микротвердости и трибологических 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 из заэвтектидной стали после пропущенного тоннажа на экспериментальном кольце РЖД 187 млн. тонн брутто .

1. В поверхностном слое основной объем материала ($\sim 90\%$) составляет субзеренная структура, отсутствующая в исходном состоянии. Установлены немонотонные зависимости параметров тонкой структуры от расстояния до поверхности катания по центральной оси. Микротвердость поверхностного слоя существенно ($\approx$ в 2 раза) увеличивается, параметр износа и коэффициент трения снижается в ≈ 3 и 1,2 раза, соответственно.

2. Выявлен градиентный характер изменения вдоль радиуса скругления выкружки скалярной и избыточной плотности дислокаций, внутренних полей напряжений, амплитуды кривизны-кручения решетки. На поверхности основной объем материала ($\approx 60\%$) занимает феррито-карбидная смесь, а субзеренная структура только начинает формироваться ($\approx 2\%$). Амплитуда напряжений формирующихся у межфазной границы на порядок выше амплитуды у внутрифазных границ.

3. Множественные преобразования структуры головки рельсов наиболее интенсивно происходят в слоях до 2 мм от поверхности. Независимо от места расположения (выкружка или поверхность катания) основным механизмом разрушения пластин цементита является механизм растворения с последующим выделением в объеме пластин феррита наноразмерных (5-7 нм) частиц карбида железа. В поверхностном слое реализуются оба механизма – растворение и разрушение путем перерезания движущими дислокациями.

4. Установлено немонотонное изменение объемных долей морфологических составляющих по центральной оси головки рельсов и радиусу скругления выкружки. Во всех морфологических составляющих происходит формирование и совершенствование фрагментированной структуры, внутри и на границах которой образуются частицы цементита.

Происходит образование новых дислокационных стенок вдоль и поперек пластин α -фазы. Это приводит к увеличению объемной доли фрагментированной структуры и уменьшению размеров фрагментов.

5. Вне зависимости от направления исследования во всех морфологических составляющих дислокационная субструктура представляет дислокационные сетки. Установлен градиентный характер количественных параметров такой структуры в зависимости от расстояния до поверхности катания по разным направлениям. Выявлены и проанализированы источники формирования экстинкционных контуров.

6. Основными механизмами упрочнения головки рельсов по центральной оси являются упрочнение внутренними дальнедействующими напряжениями, в основном упругого характера, а также субструктурное упрочнение и упрочнение некогерентными частицами. По радиусу скругления головки рельсов – упрочнение некогерентными частицами: внутренними дальнедействующими полями напряжений, создаваемыми избыточной плотностью дислокаций, внутренними напряжениями сдвига (от «леса» дислокаций) и субструктурное упрочнение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Попова, Н.А. Формирование внутренних напряжений в рельсах при длительной эксплуатации / Н.А. Попова, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, М.А. Порфирьев, Е.Л. Никоненко, Р.Е. Крюков, В.В. Шляров // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2023. – №1. – с. 62-71.

2. Попова, Н.А. Формирование внутренних полей напряжений на поверхности рельсов при эксплуатации / Н.А. Попова, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, М.А. Порфирьев, Е.Л. Никоненко, Р.Е. Крюков, А.Н. Гостевская // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2023. – Т. 20. – № 2. – с. 244-253.

3. Порфирьев, М.А. Эволюция структурно-фазового состояния и свойств рельсов из заэвтектоидной стали при длительной эксплуатации / М.А. Порфирьев, В.Е. Громов, Р.Е. Крюков // Известия вузов. Черная металлургия. – 2023. – Т.66. – № 3. – с. 327-329.

4. Иванов, Ю.Ф. Эволюция тонкой структуры рельсов из заэвтектоидной стали при длительной эксплуатации. Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, М.А. Порфирьев, Р.Е. Крюков, В.В. Шляров, Е.В. Полевой // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2023. – № 2. – с. 27-35.

5. Попова, Н.А. Влияние длительной эксплуатации на структурно-фазовое состояние заэвтектоидной рельсовой стали / Н.А. Попова, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, М.А. Порфирьев, Е.Л. Никоненко, Ю.А. Шлярова // Материаловедение. – 2023. – № 10. – с. 17-28. [N. A. Popova, V. E. Gromov, Yu. F. Ivanov, M. A. Porfiryev, E. L. Nikonenko, and Yu. A. Shlyarova Effect of Long-Term Operation on Structural-Phase State of Hypereutectoid Rail Steel. Inorganic Materials: Applied Research, 2024, Vol. 15, No. 4, P. 968–977]

6. Иванов, Ю.Ф. Формирование градиентных структурно-фазовых состояний в головке рельсов специального назначения после эксплуатации / Ю.Ф. Иванов, М.А. Порфирьев, В.Е. Громов, Р.Е. Крюков, Ю.А. Шлярова // Деформация и разрушение материалов. – 2023. – № 11. – с. 33-38. [Ivanov, Yu. F. Formation of Gradient Structural-Phase States in the Head of Special-Purpose Rails during Operation / Yu. F. Ivanov, M. A. Porfir'ev, V. E. Gromov [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). – 2024. – Vol. 2024, No. 2. – P. 298-304. – DOI 10.1134/S0036029524700575. – EDN FVLLZZ.]

7. Gromov, V. Evolution of Cementite Substructure of Rails from Hypereutectoid Steel during Operation / V. Gromov, Y. Ivanov, M. Porfiriev, Yu. Shliarova // Metals. – 2023. – №13. – 1688. <https://doi.org/10.3390/met13101688>

8. Gromov, V. E. Formation of microscopic internal stresses in rails during long-term operation / V. E. Gromov, M. A. Porfiryev, R. E. Kryukov, V. V. Shlyarov // CIS Iron and Steel Review. – 2023. – Vol. 26. – pp. 92-97.

9. Иванов, Ю.Ф., Структурно-фазовые состояния в головке рельсов специального назначения после длительной эксплуатации / Ю.Ф. Иванов, М.А. Порфирьев, В.Е. Громов, Р.Е. Крюков, Ю.А. Шлярова // Металлы. – 2023. – № 6. – С. 53-58.

10. Попова, Н.А. Оценка механизмов упрочнения, формирующих предел текучести в заэвтектоидной стали / Н.А. Попова, В.Е. Громов, Е.Л. Никоненко, Ю.Ф. Иванов, М.А. Порфирьев, В.В. Шляров, Р.Е. Крюков // Известия вузов. Физика. – 2024. – Т. 67, № 2. – DOI: 10.17223/00213411/67/2/8.

11. Иванов, Ю.Ф. Разрушение пластинчатого перлита в поверхности катания рельсов при длительной эксплуатации / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, М.А. Порфирьев, Р.Е. Крюков, В.В. Шляров // Ползуновский вестник. – 2023. – № 4. – С. 191-198.

12. Громов, В.Е. Эволюция субструктуры цементита рельсов из заэвтектоидной стали при эксплуатации / Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Порфирьев М.А., Шлярова Ю.А. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2024. – Т. 21, № 3. – С. 273-282.

13. Popova, N.A. Evaluation of mechanisms for strengthening of surface layers of long rails in different directions under continuous operation / N.A. Popova, V.E. Gromov, A.I. Potekaev, E.L. Nikonenko, A.A. Klopotov, M.A.

Porfiriev, O.A. Kondratova, V.I. Borodin // Russian Physics Journal. – 2024. – Vol. 67, No. 8. – DOI: 10.1007/s11182-024-03226-w.

14. В.Е. Громов, А.Б. Юрьев, А.А. Юрьев, С.В. Коновалов, М.А. Порфирьев, А.А. Серебрякова. Антология структурно-фазовых состояний и свойств российских рельсов XXI века. Новокузнецк: «Полиграфист», 2024. – 181 с.

15. Н.А. Попова, Ю.А. Шлярова, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, М.А. Порфирьев Структурно-фазовое состояние и механизмы упрочнения длинномерных рельсов из заэвтектоидной стали при длительной эксплуатации. Новокузнецк: «Полиграфист», 2025. – 169 с.

16. Попова Н.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Никоненко Е.Л., Порфирьев М.А. Джемела П.В. Влияние дислокационной структуры на упрочнение заэвтектоидной рельсовой стали // Деформация и разрушение материалов. 2025. – № 9. – С. 2 – 12.

17. Попова Н.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Никоненко Е.Л., Порфирьев М.А. Джемела П.В., Козырев Н.А. Роль дислокационной субструктуры в упрочнении рельсов из заэвтектоидной стали при эксплуатации // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2025. – №3. – С. 51 –62.

18. Yuriev A.B., Yuriev A.A., Gromov V.E., Konovalov S.V., Porfiriev M.A., Litovchenko I.Yu., Popova N.A. Structural and phase states and properties of rails made of hypereutectoid steel after long-term operation // Russian Physics Journal. – 2025. – V. 68. – Issue. 9 – P. 2 – 7. – DOI: 10.1007/s11182-025-03569-у

19. Попова Н.А., Громов В.Е., Юрьев А.Б., Никоненко Е.Л., Порфирьев М.А., Упрочнение поверхностных слоев головки длинномерных рельсов при длительной эксплуатации // Известия вузов. Черная металлургия. 2025. – Т. 68(6). – С. 572-580. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-6-572-580>.

20. Попова Н.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Порфирьев М.А., Козырев Н.А., Никоненко Е.Л., Куницына Т.С., Литовченко И.Ю., Джемела П.В. Эволюция структурно-фазового состояния рельсов из заэвтектоидной стали при длительной эксплуатации // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2025. – №4. – С. 110 – 126.

21. Эволюция тонкой структуры и механизмы упрочнения рельсов при длительной эксплуатации / В.Е. Громов, А.Б. Юрьев, М.А. Порфирьев, О.А. Перегудов, Н.А. Попова. – Новокузнецк: «Полиграфист», 2026. – 103 с.