

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР



"Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина"

ГНЦ ФГУП "ЦНИИчермет им. И.П. Бардина"

105005 г. Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2  
Тел.: +7 (495) 777-93-01; факс: +7 (495) 777-93-00  
e-mail: [chermet@chermet.net](mailto:chermet@chermet.net)  
[www.chermet.net](http://www.chermet.net)

« 21 » 04 2022 Год № 1252-1/10  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор  
Государственного научного центра Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина»

  
  
В.В. Семенов

Отзыв

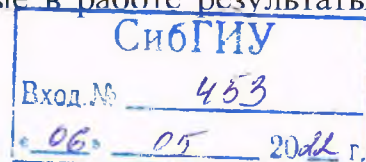
Ведущей организации на диссертационную работу

Кузнецова Романа Вадимовича

«Структурно-фазовые состояния, дефектная субструктура и свойства длинномерных рельсов после экстремально длительной эксплуатации », представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния

**Актуальность темы диссертационной работы.**

В связи с ростом интенсивности движения и грузонапряженности железных дорог возникает необходимость дальнейшего повышения надежности и эксплуатационной стойкости рельсов. Начиная с 2013 г в России начато производство длинномерных дифференцированно закаленных рельсов. Совершенствование технологии их производства возможно лишь при глубоком анализе механизмов формирования структуры, фазового состава и свойств и их эволюции при ультра длительной эксплуатации. Экстремально длительная эксплуатация инициирует сложные процессы в рельсах, приводящие к эволюции структурно-фазовых состояний и ухудшению механических свойств. Накопленные повреждения могут стать причиной выхода рельсов из строя, что наносит значительный экономический ущерб. Полученные в работе результаты



будут несомненно полезны при создании рельсов специального назначения: для высокоскоростного движения, низкотемпературной надежности, повышенной контактно-усталостной износостойкости. В этой связи 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) является безусловно актуальной проблемой физики конденсированного состояния.

### **Научная новизна.**

К новым научным результатам, полученным автором, можно отнести следующие:

1. Проведены комплексные количественные исследования структуры, фазового состава, дефектной субструктуры, механических свойств на различном расстоянии от поверхности катания по центральной оси и по радиусу скругления выкружки 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов после экстремально длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж 1770 млн. тонн брутто).

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

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

### **Обоснованность и достоверность результатов**

Результаты, представленные в диссертационной работе, являются научно обоснованными и достоверными, так как опираются на глубокий анализ многочисленных работ отечественных и зарубежных исследователей.

Они определяются корректностью поставленных задач, обоснованностью применяемых методов и методик исследования, достаточностью экспериментального материала для статистической обработки, сопоставлением полученных результатов с данными других авторов, в частности, с основополагающими работами отечественных и зарубежных исследователей, а также привлечением при обсуждении полученных результатов современных представлений физики конденсированного состояния.

### **Научная и практическая значимость работы**

**Научная значимость** результатов 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 по центральной оси и радиусу скругления головки рельсов.

**Практическая значимость** результатов диссертации подтверждена актами и справками. Она заключается в том, что выявленные закономерности формирования структуры, фазового состава, дефектной субструктуры и механических свойств головки рельсов могут быть использованы для корректировки режимов дифференцированной закалки, обеспечивающих требуемый комплекс свойств. Результаты, полученные в работе, могут быть использованы в практике научных исследований, проводимых в научных и образовательных учреждениях (Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, Институт машиноведения



им. А.А. Благонравова РАН, Институт физики металлов Уральского отделения РАН, Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Благонравова РАН, Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии имени И.П. Бардина, Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов», Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, Сибирский государственный университет путей сообщения) для развития основ деформационных структурно-фазовых превращений в сталях с перлитной структурой.

### **Анализ содержания работы**

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. 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.

**Первая и вторая главы** посвящены анализу литературных источников и описанию материалов и методов исследований. Обоснованы цели и решаемые задачи.

**В третьей главе** 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. Проведена количественная оценка параметров микроструктуры зерен перлита, проанализированы частотные распределения величины перлитных колоний и межпластинчатого расстоя-

ния в них вдоль центральной оси симметрии головки и радиуса скругления рабочей выкружки. Автором приведены значения скалярной и избыточной плотности дислокаций и отмечено формирование изгибных контуров экстинкции, свидетельствующих о формировании внутренних полей напряжений. Анализируя механические свойства, автор отмечает, что они удовлетворяют требованиям стандарта, при этом наиболее высокие прочностные характеристики отмечены на образцах, изготовленных из верхней части головки ближе к поверхности катания ( $\sigma_T$  - 870-880 МПа и  $\sigma_B$  - 1270 МПа). Микротвердость на глубине 10 мм имеет наименьшие значения 1274-1285 МПа для центральной оси симметрии и радиуса выкружки, соответственно.

**В четвертой главе** приведены результаты формирования градиентов структурно-фазовых состояний по центральной оси симметрии головки рельсов и вдоль радиуса скругления выкружки. Выполнен анализ преобразования зерен и колоний пластинчатого перлита. Во-первых выявлены зерна, сохранившие структуру пластинчатого перлита с фрагментированными пластинами феррита; во-вторых наблюдаются колонии перлита, пластины цементита в которых разбиты на фрагменты, сдвинутые относительно друг друга; в-третьих – колонии перлита, пластины цементита в которых разделены на отдельные частицы карбида округлой формы; в-четвертых – зерна перлита с наноразмерными частицами цементита; в-пятых – зерна феррита с субмикрозеренной структурой. Анализ количественных параметров этих структур по разным направлениям в головке рельсов позволил сделать вывод о существенно более высоком уровне термометформационного преобразования металла рельсов вдоль радиуса рабочей выкружки, по сравнению с металлом рельсов вдоль центральной оси. Анализируя градиентный характер изменения скалярной и избыточной плотности дислокаций по сечению головки рельсов, автор приходит к заключению, что длительная эксплуатация способствует кратному увеличению внутренних упругих полей напряжений металла поверхностного слоя головки рельсов, независимо от области анализа структуры материала.

Показано, что эксплуатация рельсов сопровождается деформационным преобразованием структуры перлита, одним из проявлений которого является разрушение и растворение пластин цементита. Выявленная в поверхностных слоях потеря углерода, по мнению автора, 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.

**В пятой главе** проведена количественная оценка механизмов упрочнения поверхностных слоев головки рельсов по разным направлениям и перераспределение атомов углерода. Они были сделаны на основе широко апробированных выражений, приведенных в классических работах ведущих отечественных и зарубежных металлофизиков и металловедов. Установлено, что 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.

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. 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.

**В шестой главе** описано применение результатов диссертационной работы в промышленности, в учебном процессе и научной деятельности.

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

Диссертационная работа написана грамотно, в хорошем стиле и логически построена. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают основ-



ное содержание диссертации. Она развивает новое направление исследований формирования и эволюции структуры, фазового состава, дефектной субструктуры и механических свойств длинномерных дифференцированно закаленных рельсов в условиях экстремально длительной эксплуатации и интенсивной пластической деформации.

### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует специальности 01.04.07. - Физика конденсированного состояния пп. 1 и 7 (п. 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», п.7 «Технические и технологические приложения физики конденсированного состояния»).

### **Замечания**

1. В первой обзорной главе проведен анализ работ по формированию «белого» слоя на поверхности рельсов. Однако результаты этого анализа в работе не используются.

2. Автор оценивает аддитивный предел текучести рельсовой стали путем суммирования значений вкладов различных механизмов упрочнения. Это не совсем корректно, так как рассмотренные механизмы упрочнения взаимосвязаны. Особенно это касается вкладов упругой и пластинческой составляющей внутренних полей напряжений. Неудачен и термин «аддитивный» предел текучести, речь в работе идет о суммарном его значении.

3. Рассматривая градиентный характер изменения параметров структуры и субструктуры, автор делает выводы на основании зависимостей, полученных лишь по трем точкам (см. например рис.4.12, 4.25). Это обедняет

физическую интерпретацию закономерностей.

4. На рисунках 4.10 и 4.23 в виде гистограмм представлено относительное содержание различных типов структуры головки рельсов на разных расстояниях вдоль центральной оси и по радиусу скругления выкружки. Их лучше бы представить в виде схемы изменения структуры поверхностных слоев при экстремально длительной эксплуатации.

5. Не во всех разделах работы приводится объяснение установленным закономерностям. Чаще всего, автор просто констатирует полученные результаты.

Указанные замечания не имеют системного характера и не снижают общей положительной оценки работы.

### **Заключение**

По уровню решаемых задач, объему выполненных экспериментальных исследований, их актуальности, обоснованности вынесенных на защиту положений, достоверности и научной новизне полученных результатов, их научной и практической значимости диссертация Кузнецова Р.В. отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с пунктом 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. Она является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная задача, имеющая важное значение для физики конденсированного состояния и заключающаяся в установлении природы упрочнения, в выявлении закономерностей и сравнительном анализе структуры, фазового состава, дефектной субструктуры и механических свойств, формирующихся на различных расстояниях по центральной оси и по радиусу скругления выкружки в головке 100 метровых дифференцированно закаленных рельсов в процессе экстремально длительной эксплуатации. Автор диссертации Кузнецов Роман Вадимович заслуживает присуждения ему ученой степени



кандидата технических наук по специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Кузнецова Романа Вадимовича рассмотрена, а отзыв утвержден на заседании научно-технического совета Научного центра металловедения и физики металлов ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина». За предложенное заключение проголосовали единогласно. Протокол № 04/2 от 13 апреля 2022 г.

Заместитель председателя научно-технического совета Научного центра металловедения и физики металлов ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»,  
к.т.н.



Ковалев Анатолий Иванович

Ученый секретарь научно-технического совета Научного центра металловедения и физики металлов ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»,  
к.ф.-м.н.



Филиппова Варвара Петровна