

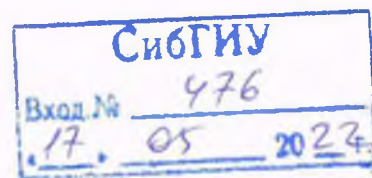
## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Кузнецова Романа Вадимовича  
«Структурно-фазовые состояния, дефектная субструктура и свойства  
длинномерных рельсов после экстремально длительной эксплуатации»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 01.04.07 Физика конденсированного состояния

**Актуальность диссертационной работы.** Железнодорожная сеть России – одна из самых протяженных в мире, а в настоящее время интенсивность железнодорожного движения и его грузонапряженность особенно высокая. Это вызывает необходимость повышения эксплуатационной стойкости длинномерных рельсов. Улучшение эксплуатационных характеристик рельсов невозможно без детального рассмотрения их поведения при длительной эксплуатации, анализа причин их изъятия и выявления факторов, способствующих их разрушению и потере эксплуатационных характеристик. Перед производителями рельсов стоит задача увеличить межремонтный тоннаж, повысить погонные нагрузки вагонов, осевые нагрузки и массу грузовых поездов. Учитывая огромную роль железных дорог в народном хозяйстве, производство рельсов, соответствующих современным условиям эксплуатации (в том числе, развитию высокоскоростного железнодорожного транспорта), приобретает все большую актуальность. В этой связи, тема диссертационной работы, посвященной установлению физической природы и закономерностей изменения структуры, фазового состава и механических свойств рельсов при сверхдлительной эксплуатации, обладает новизной и актуальностью.

**Научная новизна.** В диссертационной работе впервые получены новые результаты о структурно-фазовых состояниях, дислокационной субструктуре и механических свойствах длинномерных термоупрочненных рельсов в разных сечениях головки (на различных расстояниях от поверхности катания по центральной оси симметрии головки и вдоль радиуса скругления выкружки) после экстремально длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж 1770 млн. тонн брутто). Наиболее важными научными результатами диссертационной работы, с моей точки зрения, являются:

1. С использованием современных методов анализа структуры проведена классификация типов формирующейся микроструктуры, выявлен градиентный характер её изменения и определен относительный вклад разных типов микроструктуры вдоль центральной оси симметрии и радиуса скругления выкружки головки рельсового профиля.
2. Проведена количественная оценка всех параметров микроструктуры, включая скалярную и избыточную плотности дислокаций, распределение и долю вторичных фаз в зависимости от расстояния до поверхностей головки рельсов как вдоль центральной оси сим-



метрии головки, так и вдоль и радиуса скругления выкружки.

3. На основе полученных данных о микроструктуре рельсов предложено описание возможных механизмов превращения карбидной подсистемы и измельчения структуры, позволившие установить корреляцию и обобщить особенности формирования ультрамелкозернистых высокопрочных состояний, формируемых при экстремально длительной эксплуатации рельсов и при интенсивной пластической деформации углеродистых сталей другими методами.

4. Экспериментально выявленный градиентный характер изменения скалярной и избыточной плотности дислокаций и относительного содержания различных типов микроструктуры в сечении головки рельсов позволил описать с позиции физики конденсированного состояния градиентное изменение механических свойств рельсов после экстремально длительной эксплуатации.

**Научная и практическая значимость работы.** Научная значимость диссертационной работы заключается в том, что в ней сформирована база данных о закономерностях и механизмах формирования структуры, фазового состава и механических свойств в головке длинномерных дифференцированно закаленных рельсов после экстремально длительной эксплуатации. Полученные результаты позволили выявить и оценить вклады механизмов упрочнения поверхностных слоев рельсов по различным направлениям в головке рельсов. Научные результаты работы могут быть использованы для развития теории структурно-фазовых превращений при пластической деформации сталей, в том числе, с использованием методов интенсивной пластической деформации.

Практическая значимость полученных результатов подтверждена актами и справками об использовании результатов работы при разработке методик контроля технического состояния рельсов, обоснования сроков регламентных работ по проверке их состояния, для корректировки режимов дифференцированной закалки рельсов. Научные результаты, полученные в работе, могут быть использованы для научных исследований, проводимых в научных учреждениях и образовательных организациях, таких как Кузбасский государственный технический университет, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Институт физики твёрдого тела РАН, Институт физики металлов УрО РАН, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, Сибирский государственный университет путей сообщения, Сибирский государственный индустриальный университет.

Степень обоснованности и достоверности результатов, научных положений, выводов и заключения, сформулированных в диссертации, определяется корректностью поставленных задач, эффективностью использованных в работе современных методов физики конденсированного состояния, достаточным объемом экспериментального материала, его корректной статистической обработкой, сопоставлением полученных результатов с литературными данными. При анализе и обсуждении полученных результатов автор квалифицированно использует современные представления физики конденсированного состояния.

Анализ содержания работы. Диссертация включает в себя введение, 6 разделов (глав), основные выводы, список литературы из 220 наименований, 5 приложений. Она изложена на 146 страницах машинописного текста, содержит 55 рисунков и 9 таблиц. Текст диссертации оформлен в соответствии с ГОСТом, хорошо иллюстрирован. Основное содержание работы опубликовано в 19 работах, в том числе в 10 статьях в журналах, входящих в Перечень, рекомендованный ВАК для публикации результатов диссертационных исследований, 2-х статьях в зарубежных и переводных изданиях, а также в трудах всероссийских и международных конференций.

В первом разделе приведен анализ литературных данных отечественных и зарубежных авторов по влиянию различных внешних факторов на изменение структуры и свойств рельсов при эксплуатации. На основе анализа обоснованы цели и задачи настоящего исследования.

Второй раздел включает в себя подробное описание материала исследований, методов исследования структуры и механических свойств.

В третьем разделе приведены результаты исследования структуры, фазового состава и механических свойств рельсов в исходном состоянии (после дифференцированной закалки), а также их эволюции на глубине до 10 мм от поверхности катания по разным направлениям в головке после экстремально длительной эксплуатации. Автором выполнена 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. Представлены данные о скалярной плотности дислокаций и предложены физические механизмы возникновения полей напряжений, создаваемые избыточной плотностью дислокаций. Выполнен анализ распределения прочностных и пластических свойств по сечению рельсов. Показано, что наиболее высокие прочностные характеристики получены на образцах, изготовленных из верхней части головки ближе к поверхности катания ( $\sigma_T$  – 870-880 МПа и  $\sigma_B$  – 1270 МПа).



В четвертом разделе представлены результаты исследования градиента микроструктуры и прочностных свойств по радиусу скругления рабочей выкружки и центральной оси симметрии головки рельсов. Выявлены морфологические типы структуры и их соотношения в разных частях головки рельсов. Анализ изменения типов микроструктуры по разным направлениям позволил автору выявить и обосновать различия термомодеформационного преобразования структуры и прочностных свойств металла рельсов вдоль радиуса рабочей выкружки и вдоль центральной оси головки. При оценке деформационного преобразования структуры перлита показано, что объемная доля цементита у поверхности головки всегда ниже, чем на глубине 10 мм, и на основе этих данных сделано предположение об обезуглероживании поверхностного слоя металла рельсов в процессе сверхдлительной эксплуатации и о перераспределении атомов углерода между карбидами и дефектами структуры.

В пятом разделе проведена количественная оценка механизмов упрочнения поверхностных слоев рельсов по разным направлениям в головке. Были учтены вклады, обусловленные трением решетки, межфазными границами, дислокационной субструктурой, частицами карбидной фазы, внутренними полями напряжений, твердорастворным упрочнением, перлитной составляющей в структуре стали. Показано, что субструктурное упрочнение является основным механизмом упрочнения металла в поверхностном слое рабочей выкружки после пропущенного тоннажа 1770 млн. тонн, а для поверхности катания – это механизм, связанный с внутренними полями напряжений. При количественной оценке относительного содержания углерода на структурных элементах стали в разделе показано, что в исходном состоянии углерод содержится преимущественно в частицах цементита, а после эксплуатации рельсов он частично перераспределяется на дефекты кристаллического строения стали (дислокации, границы зерен и субзерен).

В шестом разделе приведены сведения об апробации результатов работы.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

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

Автореферат и опубликованные работы полно отражают основное содержание диссертации. Диссертационная работа написана технически грамотным языком, в хорошем стиле и имеет логическую структуру.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, п.п. 1 и 7 (п.1 «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неоргани-

ческих 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»).

В качестве **замечаний** к диссертации можно отметить следующее:

1. В разделе 4.1. диссертации (в частности, на стр. 74, 79) указано, что формирование ультрамелкозернистой структуры у поверхности «рабочей выкружки» вызвано динамической рекристаллизацией стали в процессе эксплуатации. Сама по себе возможность развития динамической рекристаллизации в условиях холодной «интенсивной пластической деформации» стали не вызывает возражений, но применительно к результатам диссертационной работы этот механизм формирования зеренной структуры, по-видимому, не будет единственно возможным и определяющим. Во-первых, температуры, при которых происходит воздействие, не велики. Во-вторых, на ПЭМ изображениях наблюдали перпендикулярные межфазным границам малоугловые границы в ферритных ламелях на этапе формирования субзеренной структуры (например, рис. 4.4). А на микродифракционных картинах, соответствующих ультрамелкозернистой структуре, присутствуют значительные азимутальные размытия рефлексов. То есть электронно-микроскопические данные указывают на формирование большеугловых границ деформационного происхождения, которые, вероятно, превалируют в ультрамелкозернистой структуре исследуемой стали.

2. В разделе 4 автор работы обсуждает индуцированное деформацией растворение цементита и значительное уменьшение концентрации углерода у поверхностей катания и выкружки (таб. 4.1, стр. 91 диссертации) в исследуемых рельсах после длительной эксплуатации. Данные рентгеновского фазового и структурного анализа в разделе 5.2. свидетельствуют о том, что в феррите растворяется малое количество углерода, либо его нет совсем при удалении от поверхностей катания или выкружки (таб. 5.3, стр. 101 диссертации). Основываясь на этих данных, при расчете концентрации углерода на дефектах структуры и при заполнении таблицы 5.3. автор работы полагает, что концентрация углерода во всех частях рельсов остается неизменной. Исходя из вышеизложенного открытым остался вопрос: происходит ли обезуглероживание рабочих поверхностей рельсов или/и перераспределение атомов углерода в структуре?

3. Вызывает интерес различие в морфологии трещин контактной усталости, представленных на рисунке 4.1. К сожалению, в работе нет развернутого описания различий в макроструктуре для участков рабочей и нерабочей выкружки. Можно ли предположить, что различия в напряженном состоянии этих частей рельсов вызывают разные последовательности структурных превращений или они влияют только на их полноту и завершен-

ность? Можно ли предположить, как влияют описанные в разделе 4 структурно-фазовые превращения (на микроуровне) в стали на механизмы формирования контактных трещин на макроуровне?

4. На рисунке 5.1. приведены зависимости предела текучести, рассчитанного с учетом различных упрочняющих факторов, от расстояния до поверхности головки рельсов. Из текста диссертации не ясна позиция автора о том, почему рассчитанный предел текучести немонотонно изменяется при увеличении пропущенного тоннажа. Как можно сопоставить рассчитанные данные с механическими свойствами стали, приведенными в разделе 3?

5. В работе представлены результаты теоретической оценки предела текучести исследуемых образцов стали в зависимости от расстояния до поверхности головки рельсов, выполненной в предположении аддитивного вклада разных механизмов упрочнения. При проведении анализа остались не раскрытыми несколько вопросов:

- Почему для оценки дисперсионного твердения в случае формирования наноразмерных частиц карбидов в феррите автор использовал модифицированное соотношение Орована для некогерентных включений? Какие экспериментальные данные свидетельствовали о потере когерентности кристаллических решеток матрицы и таких частиц?

- Обосновано ли аддитивное сложение вкладов разных механизмов упрочнения при оценке предела текучести для ансамбля зерен с разным распределением фаз?

- Оценка внутренних полей напряжений проведена на микроскопическом уровне, но она используется для расчета макроскопического параметра – предела текучести стали. Будут ли значимы локальные микронапряжения в пределах зерна или субзерна в этом случае?

6. Автору работы не удалось избежать неточностей и опечаток при подготовке рукописи. В ряде случаев допущена небрежность в оформлении диссертационной работы. На графиках зависимостей скалярной и избыточной плотности дислокаций от расстояния не приведены доверительные интервалы (рис. 4.12, 4.25). Подписи к рисункам не всегда исчерпывающие (например, рис. 1.3. и 1.4. имеют одинаковые подписи), в тексте диссертации отсутствует ссылка на таблицу 2.1 и в самой таблице нет пояснения, чем различаются данные в разных строках, и т.п.

**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 актуальная научная задача, имеющая важное значение для физики конденсированного состояния и заключающаяся в установлении физической природы упрочнения, в выявлении закономерностей и сравнительном анализе структуры, фазового состава 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 (пропущенный тоннаж 1770 млн тонн брутто). Автор диссертации, Кузнецов Роман Вадимович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Даю согласие на обработку персональных данных.

**Официальный оппонент**

доктор физико-математических наук, доцент, заведующая лабораторией физики иерархических структур в металлах и сплавах ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения» Сибирского отделения Российской академии наук, специальность 01.04.07 Физика конденсированного состояния

Астафурова  
Елена Геннадьевна

Подпись Е.Г. Астафуровой удостоверяю

Ученый секретарь ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения» Сибирского отделения РАН  
кандидат физико-математических наук



Н.Ю. Матолыгина

Астафурова Елена Геннадьевна,  
Заведующий лабораторией физики иерархических структур в металлах и сплавах,  
ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН),  
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4  
тел.: +7-903-913-2339 (моб.), +7-9822-286865 (раб.)  
e-mail: [elena.g.astafurova@ispms.ru](mailto:elena.g.astafurova@ispms.ru)

Дата подписания отзыва 16 мая 2022 г.