На правах рукописи

Тапков Кирилл Александрович

Научное обоснование методики оценки остаточных напряжений в дифференцированно-упрочненных рельсах на основе явления акустоупругости и математического моделирования

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ижевск – 2020

Работа выполнена на кафедре «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», (ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова»)

Научный руководитель: Муравьев Виталий Васильевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Бехер Сергей Алексеевич,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» (г. Новосибирск)

Мосягин Владимир Валентинович,
кандидат технических наук, начальник отдела методов и средств неразрушающего контроля ОАО «Радиоавионика» (г. Санкт-Петербург)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Защита диссертации состоится 22 января 2021 г. в 14 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.230.02 в УдмФИЦ УрО РАН по адресу: 426067, г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в библиотеке и на сайте УдмФИЦ УРО РАН, http://udman.ru/ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 426067, г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент Махнева Т.М. Махнева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Остаточные напряжения являются одной из наиболее часто встречающихся причин разрушения многих металлических конструкций, в том числе рельсов. Эти напряжения в сталях могут достигать предела текучести, оказывая существенное влияние на скорость развития дефектов в виде трещин, что, в свою очередь, может приводить к ускоренному выходу рельса из строя.

В настоящее время контроль величины остаточных напряжений при производстве проводится разрушающими методами на ограниченной выборке: не менее 1% для контроля напряжений в шейке рельса во время проведения приёмо-сдаточных испытаний и не менее шести полнопрофильных проб на партию для контроля напряжений в поверхностном слое подошвы рельса на этапе освоения производства согласно ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия». Контроль напряжений в шейке рельса выполняется по косвенному признаку путём измерения расхождения паза, прорезанного по шейке рельса. Расхождение паза более 2 мм не допускается. Контроль напряжений в средней части подошвы выполняется тензодатчиками при вырезке темплета из отрезка рельса длиной 1 м. Наличие растягивающих напряжений значением более 250 МПа не допускается. Результаты контроля распространяются на всю партию, что может не соответствовать фактическому уровню остаточных напряжений некоторых рельсов из партии.

Одним из самых перспективных методов неразрушающего контроля напряжённого состояния является метод акустической тензометрии. В основе данного метода лежит явление акустоупругости – изменения скорости упругих волн при возникновении напряжённого состояния.

Вследствие вышесказанного направление исследований, посвящённое контролю напряжённо-деформированного состояния рельсов неразрушающими методами, является актуальным.

Степень разработанности темы исследования

Вопросы исследования напряжённо-деформированного состояния рельсов и взаимодействие системы «колесо-рельс» рассматриваются такими исследователями, как Карпущенко Н.И., Грищенко В.А., Коган А.Я., Ромен Ю.С., Марков А.А., Шур Е.А., Третьякова В.В., Богданова В.М., Долгих Л.В., Федин В.М., Хлыст С.В., Бехер С.А., Волков К.В., Полевой Е.В., Темлянцев М.В., Покровский А.М., Муравьев В.В., Воронов Ю.В., Третьяков Д.Н., Shailesh Gokhale, El-Sayed H.M., Lotfy M., Akama M., Kiuchi, A., Peixoto D. F. C., de Castro P. M. S. T.

Вопросы применения метода акустоупругости для контроля напряжённо-деформированного состояния рассматриваются такими исследователями как: Аббакумов К.Е., Бобренко В.М., Бобров В.Т., Буденков Г.А., Гузь А.Н. Никитина Н.Е., Куценко А.Н., Углов А.Л., Муравьев В.В.,

Бехер С.А., Cuixiang PEI, Kazuyuki Demachi, E. Schneider, R. Herzer, R.B. Thompson, S.J. Warmley, J.C. Johnson, D. Utrata.

Анализ литературы по теме диссертации показал, что вопросы исследования напряжённо-деформированного состояния рельсов с использованием методов неразрушающего контроля являются актуальными и недостаточно изучены.

Цель работы:

Научное обоснование оценки напряжённого состояния и разработка методики оценки развития дефекта в виде трещины в головке рельсов по критерию остаточных напряжений на основе эффекта акустоупругости с использованием электромагнитно-акустического способа ввода-приема объемных волн.

Задачи исследования:

1. Моделирование напряжённо-деформированного состояния рельсов с использованием метода конечных элементов и анализ методов, средств контроля напряжённо-деформированного состояния рельсов, изготовленных по технологии дифференцированной закалки.

2. Экспериментальное исследование напряжённо-деформированного состояния в железнодорожных дифференцированно термоупрочнённых рельсах после проката методом акустоупругости и анализ наличия корреляции между разрушающим методом оценки напряжений в шейке рельса по расхождению паза и неразрушающим методом измерения напряженного состояния, основанном на эффекте акустоупругости.

3. Экспериментальное исследование напряжённо-деформированного состояния в железнодорожных дифференцированно термоупрочнённых рельсах после проката методом акустоупругости и анализ наличия корреляции между разрушающим тензорезистивным методом оценки напряжений в подошве рельса и неразрушающим методом измерения напряженного состояния, основанном на эффекте акустоупругости.

4. Исследование появления и роста трещины в головке рельса в зависимости от уровня остаточных технологических и термических напряжений и влияния трещины на переход рельса в дефектную и остродефектную категорию.

Объектом исследования является методика неразрушающего контроля напряжённо-деформированного состояния рельса методом акустоупругости.

Предметом исследования является оценка развития дефекта на основе данных математического моделирования по критерию остаточных напряжений, измеренных средствами неразрушающего контроля на основе явления акустоупругости при расположении преобразователя со стороны поверхности катания.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена основанная на эффекте акустоупругости неразрушающая методика, согласно которой уровень измеренных

остаточных напряжений минус 50 МПа - минус 80 МПа соответствует критериям расхождения паза в шейке рельса в 2 мм и критерию наличия напряжений в средней части подошвы не более 250 МПа.

2. Установлено наличие обратной линейной зависимости между значениями напряжений, получаемых методом акустической тензометрии при прозвучивании со стороны поверхности катания, и напряжениями в шейке рельса, оцениваемых по расхождению прорезанного паза в образце рельса. Расхождение паза не более 2 мм соответствует уровню остаточных напряжений по сечению рельса не менее минус 80 МПа.

3. Установлено наличие прямой линейной зависимости между значениями напряжений, получаемых методом акустической тензометрии при прозвучивании со стороны поверхности катания и напряжениями в поверхностном слое подошвы рельса, оцениваемых тензорезистивным методом после вырезки темплета из образца рельса. Значение напряжений в подошве не более 250 МПа соответствует уровню остаточных напряжений по сечению рельса не более минус 50 МПа.

4. Предложена математическая модель оценки остаточной наработки рельса до перехода в остродефектную категорию по критерию роста усталостной трещины в головке рельса в зависимости от уровня остаточных технологических напряжений и наработки рельса при различных значениях разности между фактической температурой и температурой закрепления рельса.

Теоретическая значимость работы

1. Установлено наличие обратной линейной зависимости между значениями напряжений, получаемых методом акустической тензометрии при прозвучивании со стороны поверхности катания, и напряжениями в шейке рельса, оцениваемых по расхождению прорезанного паза в образце рельса. Расхождение паза в 2 мм наблюдается при наличии напряжений -80 МПа при прозвучивании со стороны поверхности катания.

2. Установлено наличие прямой линейной зависимости между значениями напряжений, получаемых методом акустической тензометрии при прозвучивании со стороны поверхности катания и напряжениями в поверхностном слое подошвы рельса, оцениваемых тензорезистивным методом после вырезки темплета из образца рельса. Уровень напряжений в средней части подошвы в 250 МПа наблюдается при наличии напряжений -50 МПа при прозвучивании со стороны поверхности катания.

3. Посредством моделирования установлена зависимость между остаточными напряжениями и развитием дефекта в виде усталостной трещины в головке рельса. При уровне напряжений минус 80 МПа в головке, минус 125 МПа в шейке рельса и 105 МПа в подошве рельса, что соответствуют расхождению паза в 2 мм, зарождение усталостной трещины происходит при пропущенном тоннаже 1846 млн. тонн брутто, при уровне напряжений, превышающим первоначальный в 1,5 раза зарождение трещины происходит при 1685 млн. тонн брутто, при уровне напряжений 0,5 от

первоначального зарождение трещины происходит при пропуске 1987 млн. тонн брутто. Также необходимо отметить, что при этом практически не изменяется скорость роста усталостной трещины, оцениваемой по тангенсу угла наклона (мм/цикл)

Практическая полезность работы

1. Разработанные в диссертации методики позволяют решить задачу неразрушающего контроля напряжённого состояния рельсов при проведении приёмо-сдаточных испытаний. Предложенные решения обеспечивают повышение надёжности эксплуатации рельсов за счёт проведения сплошного контроля, а также позволяют проводить более тщательный анализ производственного процесса.

2. Моделирование развития дефекта в виде трещины позволяют проводить оценку пропущенного тоннажа рельса до перехода в остродефектное состояние.

3. Результаты диссертации также использованы в учебном процессе высшей школы при подготовке соответствующих специалистов магистрантов по профилю 12.04.01 «Приборостроение» по дисциплине «Методы и средства структуроскопии».

4. Результаты диссертации использованы при выполнении испытаний по оценке остаточных напряжений в рельсах Р65 на базе Челябинского металлургического комбината (ПАО «ЧМК») при выполнении договора №ПМИКД-3-17/М «Исследование остаточных напряжений в рельсах ультразвуковым методом».

Методы исследования

В диссертации использован комплексный метод, включающий теоретические и экспериментальные исследования. Работа выполнялась с применением математического моделирования методом конечных элементов в программной среде Comsol Multiphysics, также в теоретических исследованиях был использован аналитический метод. В основе экспериментальных исследований напряжённо-деформированного состояния использован эффект акустоупругости с применением методов статистической обработки результатов исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенная методика расчёта по определению напряжённого состояния элементов рельса (головки, шейки, подошвы) по полученным данным экспериментального исследования рельса методом акустоупругости, при котором расхождение паза в 2 мм наблюдается при уровне напряжений в минус 80 МПа, а наличие напряжений в 250 МПа в средней части подошвы при уровне напряжений в минус 50 МПа.

2. Математическая модель определения напряжённо-деформированного состояния элементов рельса с учётом остаточных технологических и эксплуатационных напряжений, , возникающих при прохождении подвижного состава.

3. Методика контроля рельсов неразрушающим акустическим методом по соответствию уровня остаточных напряжений в шейке рельса, получаемых способом разрезки, и напряжений в поверхностном слое подошвы рельса, измеряемым тензорезистивным методом с вырезкой темплета.

4. Математическая модель по оценке наработки рельса до перехода в дефектное либо остродефектное состояние по критерию роста усталостной трещины в головке рельса при наличии вертикальной нагрузки со стороны подвижного состава в зависимости от уровня остаточных технологических напряжений.

Достоверность и обоснованность полученных в работе научно-технических результатов и выводов обеспечивается корректным применением апробированного математического аппарата при выполнении моделирования методом конечных элементов, также подтверждается проведением экспериментальных исследований, использованием аттестованных измерительных средств и согласованием с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на конференции Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства (Ижевск, 23–25 нояб. 2016 г.), конференции Приборостроение в XXI веке – 2017. Интеграция науки, образования и производства. (Ижевск, 22–24 нояб. 2017 г.), конфенеренции Приборостроение в XXI веке – 2018. Интеграция науки, образования и производства. (Ижевск, 12–14 дек. 2018 г.), VIII Международной конференции Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования (Россия, Ижевск, 23–24 апреля 2019 г.), V Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле. 2019 «ИННОВАЦИИ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ», Екатеринбург, 26-28 июня 2019 г., XV Всероссийской научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке - 2019. Интеграция науки, образования и производства» Ижевск, 20-22 ноября 2019 г., конференции Ижевского радиозавода, Ижевск, 23-25 мая 2018 г.

Личный вклад диссертанта. Результаты численных и экспериментальных исследований, модели и методики, представленные в диссертации, получены автором лично с использованием уникальной научной установки, разработанной на кафедре «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики». Выбор приоритетов, направлений и методов исследований и форм представления результатов, формирование структуры и содержания работы, формулирование основных положений выполнено совместно с научным руководителем.

Тематика работы соответствует п. 1 «Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.» и п. 3 - «Разработка, внедрение и испытания приборов, средств и

систем контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, имеющих лучшие характеристики по сравнению с прототипами» паспорта специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий».

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 14 публикациях, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК РФ для публикации основных результатов диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата наук.

Содержание работы

Введение содержит обоснование актуальности темы, формулировку цели и задачи работы, основные положения, выносимые на защиту и определяет содержание и методы выполнения работы.

В первой главе представлен краткий обзор контролируемых параметров рельсов текущего производства, среди которых особое внимание уделяется вопросу оценки значений остаточных напряжений в рельсе, обозначены причины возникновения остаточных напряжений в результате применяемых технологий изготовления и эксплуатации рельсов, а также приведён краткий анализ существующих современных методик контроля напряжённо-деформированного состояния.

Дано описание рельсов и их условий эксплуатации. В настоящее время крупнейшие металлургические комплексы страны (Западно-Сибирский и Нижне-Тагильский металлургические комбинаты «ЕВРАЗ», Челябинский металлургический комбинат «МЕЧЕЛ») производят дифференцированно термоупрочнённые рельсы (категория ДТ 350).

В процессе эксплуатации рельсы испытывают периодические знакопеременные нагрузки в вертикальной плоскости, подвергаются действию горизонтальных сил в кривых участках пути, смятию, истиранию, динамическим ударам колес, имеющих дефекты. Сезонные изменения температур вызывают появление температурных напряжений сжимающего и растягивающего типов при колебаниях температур от +50 до -50.

При изготовлении в головке рельса возможно появление трещин вследствие наличия закалочных напряжений (дефект 20.1 согласно НТД/ЦП-2-93), которые в дальнейшем ускоренно развиваются под действием продольных остаточных напряжений вкупе с периодически повторяющейся нагрузкой со стороны подвижного состава.

Среди неразрушающих методик в качестве одной из наиболее перспективных выделяется способ акустической тензометрии, в основе которого лежит явление акустоупругости – изменения скорости упругих волн при наличии напряжённого состояния.

Во второй главе описана методика расчёта напряжённо-деформированного состояния рельса, приведены элементы теории упругости. В соответствии с законом Гука и тензором напряжений Коши для бесконечно

малого параллелепипеда размерами *dx, dy, dz* с нормальными значениями напряжений σ и учётом закона Гука полная деформация равна :

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_x - \mu \cdot \sigma_y - \mu \cdot \sigma_z);$$
$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_y - \mu \cdot \sigma_x - \mu \cdot \sigma_z); \quad (1)$$
$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_z - \mu \cdot \sigma_z - \mu \cdot \sigma_y),$$

где ε_x, ε_y, ε_z – относительная деформация по оси *x*,*y*,*z* соответственно, *E* – модуль упругости, , μ – коэффициент Пуассона, σ_x, σ_y, σ_z – нормальные значения напряжений.

Рассмотрен принцип применения метода конечных элементов для расчёта напряжённо-деформированного состояния. Необходимость применения метода конечных элементов обоснована тем, что рельс имеет сложную картину распределения остаточных напряжений.

Согласно исследованиям, описанным в литературном обзоре, напряжённое состояние рельса является плоским. В таком случае вектор напряжений можно записать в следующей форме:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

При разбиении геометрической модели на конечные элементы возникает задача определения матрицы жёсткости. Для каждого i-го элемента, а также с учётом сплошности тела:

$$\{\boldsymbol{N_{gi}^P}\} = [\boldsymbol{K_{gii}^P}]\{\boldsymbol{q_i}\} + [\boldsymbol{K_{gij}^P}]\{\boldsymbol{q_j}\} + [\boldsymbol{K_{gik}^P}]\{\boldsymbol{q_k}\} + \{\boldsymbol{Q_{gi}^P}\} \quad (3)$$

где NP – вектор реакций, KP – матрица жёсткости элемента, qP – вектор перемещений, QP – вектор внешней нагрузки к узлам. i – номер конечного элемента. Аналогичным образом можно получить уравнения для всех узлов, в итоге получается система из n линейных уравнений и n неизвестных.

Проверка точности осуществлена при помощи повторного расчёта с элементами, уменьшенными на 20-30% относительно предыдущего расчёта. В том случае, если результаты расчётов отличаются менее, чем заданная

погрешность расчёта, то считается, что погрешность модели находится в допустимых пределах.

Применение метода конечных элементов для рельса Р65 проведено программной среде COMSOL Multiphysics. Для проведения моделирования использован подключаемый модуль «Механика твердых тел».

Экспериментальные исследования напряжённо-деформированного состояния проводились структуроскопом СЭМА, внесенным в реестр средств измерений Госстандарта (госреестр № 61957-15). В основе его работы лежит зависимость скорости распространения ультразвуковых волн от механических напряжений, связанных через акустоупругие коэффициенты. Скорости распространения волн определяют по результатам измерений времени пробега импульсов сдвиговых волн, поляризованных в ортогональных направлениях относительно оси рельса эхо-импульсным поляризационно-временным методом. Ввод и прием сдвиговых волн осуществляется с использованием бесконтактных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей.

ЭМА преобразователь устанавливается на головку рельса, возбуждаются ортогонально поляризованные поперечные волны, которые отражаются от подошвы рельса и принимаются этим же ЭМА преобразователем.

Разница во времени прохождения импульсов, поляризованных вдоль и перпендикулярно продольной оси рельса, пропорциональна значению остаточных напряжений. Значения времени распространения поперечных волн t_1 и t_2 по одному участку рельса используются для вычисления остаточных напряжений σ по формуле:

$$\sigma = D\left(\frac{t_1}{t_2} - 1\right) \tag{4}$$

где D – коэффициент упруго-акустической связи для исследуемого материала.

Акустоупругий коэффициент D может быть рассчитан по формуле:

$$D = \frac{8\mu^2}{4\mu + n} \tag{5}$$

где μ - постоянная Ламе, n - постоянная третьего порядка Мурнагана. Для углеродистой рельсовой стали можно принять μ = 82 ГПа, n = -740 ГПа, следовательно, D =-131 ГПа.

В то же время акустическая волна, введённая с поверхности катания, проходит путь через все элементы рельса (головку, шейку, подошву),

имеющих разное напряжённое состояние, в связи с чем возникает необходимость установить связь между напряжениями в отдельных элементах рельса и интегральным значением напряжения, полученным после обработки эхограммы. Для ее установления использована линейная зависимость между скоростью и напряжениями согласно эффекту акустоупругости:

$$C = C_0(1 + k\sigma) \tag{6}$$

где C — скорость звука в элементе рельса; C_0 — скорость звука при отсутствии напряжений; k — коэффициент акустоупругой связи; σ — величина напряжения.

Из этого соотношения получаем, что:

$$\sigma_{int} = \frac{t_h \cdot \sigma_h + t_w \cdot \sigma_w + t_b \cdot \sigma_b}{t_h + t_w + t_b}; \tag{7}$$

где σ_{int} — значение напряжений, получаемых при прозвучивании со стороны головки рельса, МПа; σ_h , σ_w , σ_b — напряжения в головке, шейке и подошве рельса соответственно, МПа; t_h, t_w, t_b — время, за которое волна проходит в вертикальном положении по головке, шейке и подошве рельса. Если предположить, что $t_h \approx H_h / C_0, t_w \approx H_w / C_0, t_b \approx H_b / C_0$, то получим приближенное соотношение, связывающее напряжения и геометрические размеры элементов рельса

$$\sigma_{\text{int}} = \frac{\sigma_h \cdot H_h + \sigma_w \cdot H_w + \sigma_b \cdot H_b}{H_h + H_w + H_b} \tag{8}$$

где H_h, H_w, H_b — путь, проходимый волной в вертикальном сечении по головке, шейке и подошве рельса соответственно.

Третья глава посвящена моделированию и экспериментальному исследованию напряжённо-деформированного состояния рельса. Приведены полученные зависимости связи напряжённого состояния в элементах рельса (головка, шейка, подошва) со значением напряжений, полученными при прохождении акустической волны через все элементы со стороны поверхности катания. Установлена связь между значениями напряжений в элементах рельса и расхождением головки и подошвы при прорезании паза в рельсе, и связь между значением напряжений в элементах рельса по отношению к напряжениям в середине подошвы рельса.

Для изучения напряжённо-деформированного состояния проведён эксперимент с разрезкой рельса на элементы: головка, шейка и подошва

Примем напряжение в головке за σ_w, в шейке рельса, σ_h в головке рельса, σ_b в подошве рельса, тогда в соответствии с результатами эксперимента:

$$\sigma_h=0{,}638\cdot\sigma_w$$
$$\sigma_b=0{,}863\cdot\sigma_w \quad (9)$$

Моделирование напряженно-деформированного состояния в программе COMSOL Multiphysics позволило соотнести уровни значений напряжений в элементах рельса с расхождением паза при проведении испытаний на превышение уровня остаточных напряжений в шейке рельса. Результаты моделирования максимально допустимого значения расхождения паза в 2 мм рельсе представлены на рисунке 1.

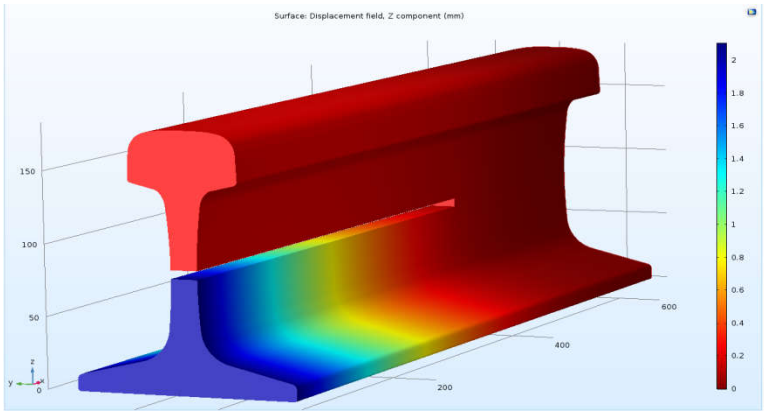

Рисунок 1 Моделирование расхождения паза в рельсе

На первом этапе произведено моделирование расхождения головки и подошвы рельса при наличии разреза в рельсе, и сопоставлены значения распределенных сил с расхождением паза. На втором этапе моделирования произведено сопоставление распределенных сил и напряжений, возникающих в рельсе.

При превышении значения расхождения паза более чем 2 мм, рельс признается бракованным, что согласно результатам моделирования соответствует уровню напряжений: в головке рельса минус 77, шейке минус 125 и подошве + 106 МПа. Уровень напряжений, получаемый методом акустоупругости при прозвучивании со стороны головки, оценивается в минус 77 МПа. Таким образом, превышение (по модулю) значения 77 МПа может означать несоответствие уровня остаточных напряжений установленным.

Аналогично проведено моделирование напряжённо-деформированного состояния рельса по критерию остаточных напряжений. Максимально допустимый уровень остаточных напряжений в подошве в 250 МПа достигается при значении остаточных напряжений по сечению рельса в минус 52 МПа.

Для оценки влияния напряжений в рельсе на развитие дефекта в виде трещины в головке рельса исследовано напряжённо-деформированное состояние рельса при эксплуатации. С одной стороны, на рельс, помимо остаточных технологических напряжений, действует нагрузка со стороны подвижного состава. Согласно справочным данным, нагрузка колеса может достигать значения 11 т. при применении тележки ЦНИИ-Х3. В этом случае статическая нагрузка на одно колесо составит около 108 кН. Зона контакта представляет собой эллипс с шириной 12,5 и длиной 9,5 мм, и имеет площадь 95 мм^2.

Процесс моделирования проведен для прямолинейных участков рельса, при этом присутствует боковая нагрузка F_y, прикладываемая гребнем колеса при наезде на рельс под некоторым углом. Данная сила может достигать значений в 66 кН, что, в свою очередь, сопоставимо с вкладом вертикальной нагрузки. Результаты моделирования при условии максимально допустимого уровня остаточных технологических напряжений представлены на рисунке 2.

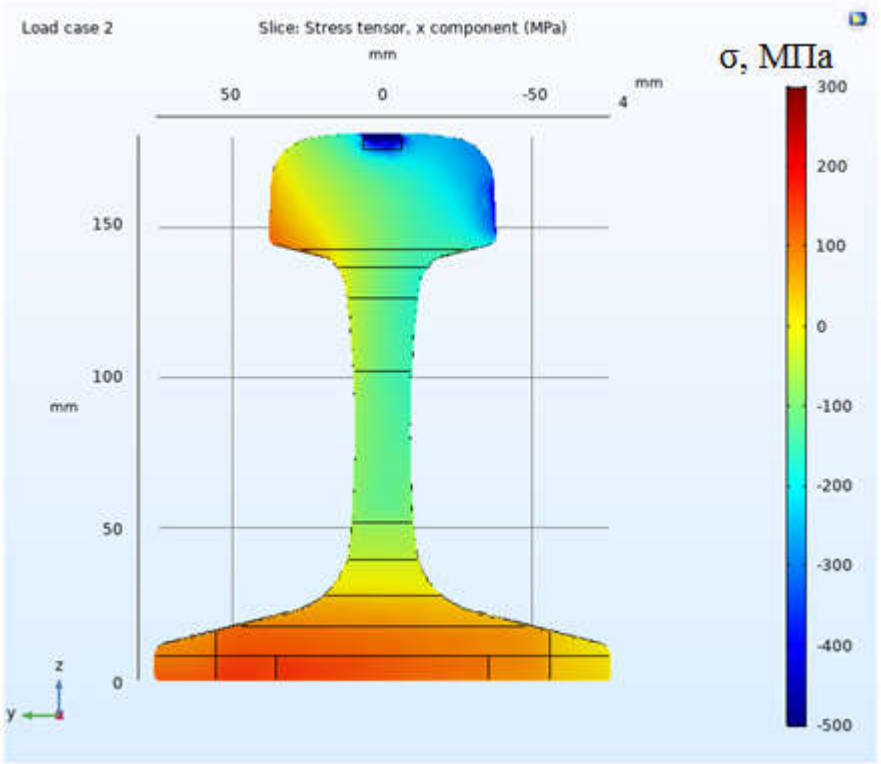

Рисунок 2 Напряжения при прохождении поезда при отсутствии разницы между температурой закрепления и фактической

Также к технологическим остаточным напряжениям, возникающим в процессе производства, добавляются напряжения, возникающие вследствие колебаний температуры относительно температуры закрепления рельса. Наложение этих напряжений добавлено к существующему напряжённому состоянию рельса. Результаты моделирования при соответствующей разнице между фактической температурой и температурой закрепления представлены в таблице 1.

Таблица 1 Значения напряжений в элементах рельса

ΔT, °C	Продольные значения напряжений в элементе, МПа	
	Головка	Поверхностный слой подошвы
+50	-202	52
+30	-152	102
+10	-102	157
0	-77	180
-10	-52	204
-30	-2	252
-50	48	310

Для анализа разброса напряжений по сечениям одного рельса проведены экспериментальные исследования напряжённого состояния отрезков рельсов. Для метровых отрезков измерения проводились по нескольким сечениям, находящихся от центра отрезка рельса на расстоянии -250; 0 и 250 мм соответственно, погрешность составила ±5 МПа. Для полуметровых отрезков измерения проводились по двум сечениям, находящимся на расстоянии 70 и 250 мм от центра. погрешность составила ±3 МПа. Результаты представлены на рисунке 3 и 4.

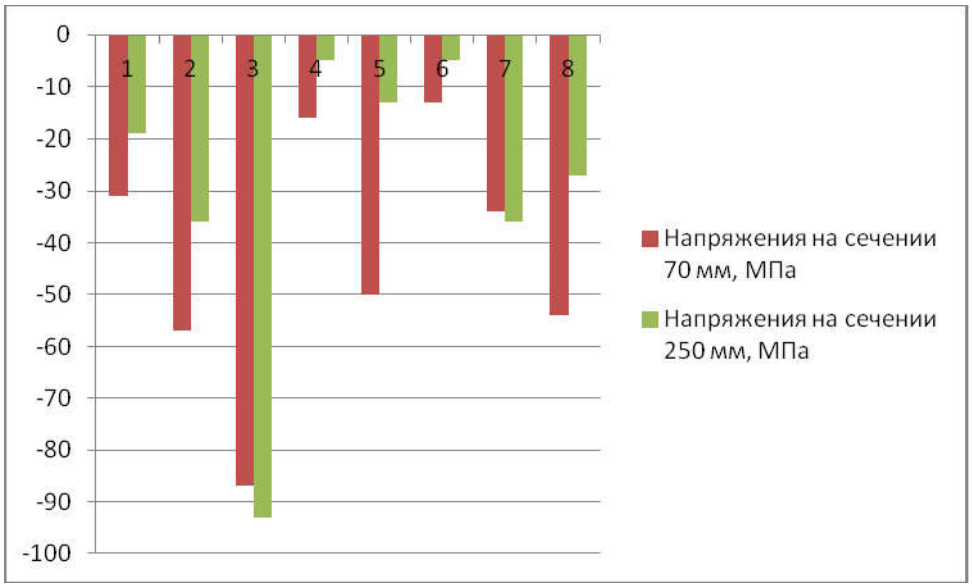

Рисунок 3 Распределение напряжений по сечениям полуметровых отрезков рельсов

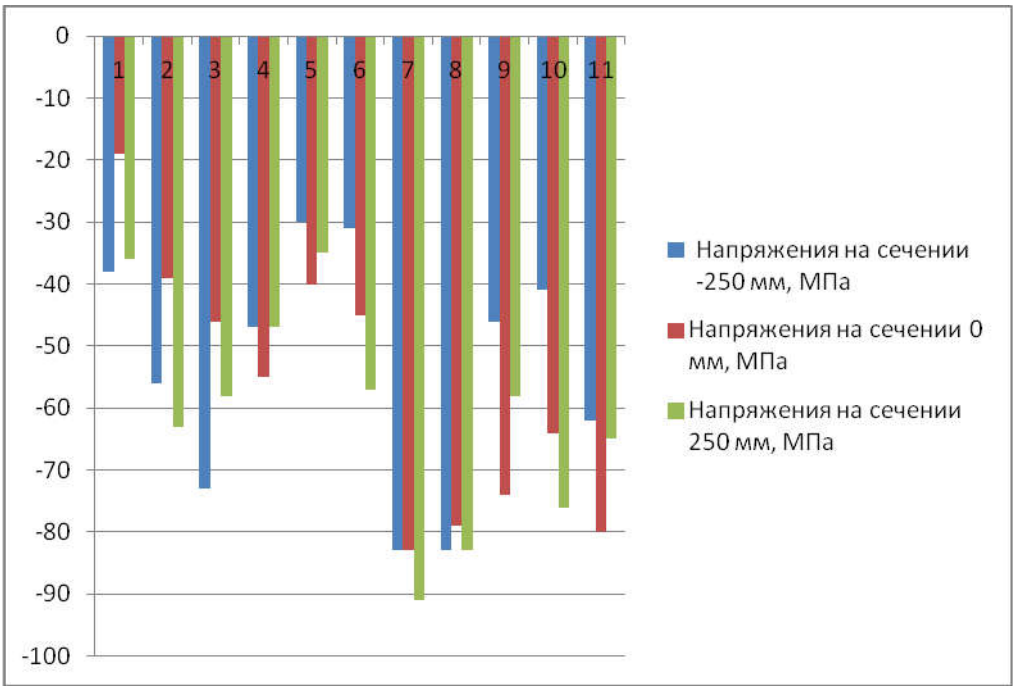

Рисунок 4 Распределение напряжений по сечениям метровых отрезков рельсов

Таким образом, при экспериментальном исследовании внутренних напряжений в выборке из 19 рельсовых отрезков установлено, что значения напряжений по разным сечениям могут иметь значительные различия, что может говорить о существовании разброса напряжённого состояния даже в пределах одного рельса.

Проведено экспериментальное исследование проверки наличия зависимости между значениями напряжения, измеренных методом акустоупругости по сечению рельса, и значениями расхождения шейки и головки рельса при прорезании паза для оценки остаточных напряжений в шейке рельса. Результаты экспериментального исследования дополнительно подтвердили адекватность модели, построенной в программной среде Comsol Multiphysics. Результаты представлены на рисунке 5.

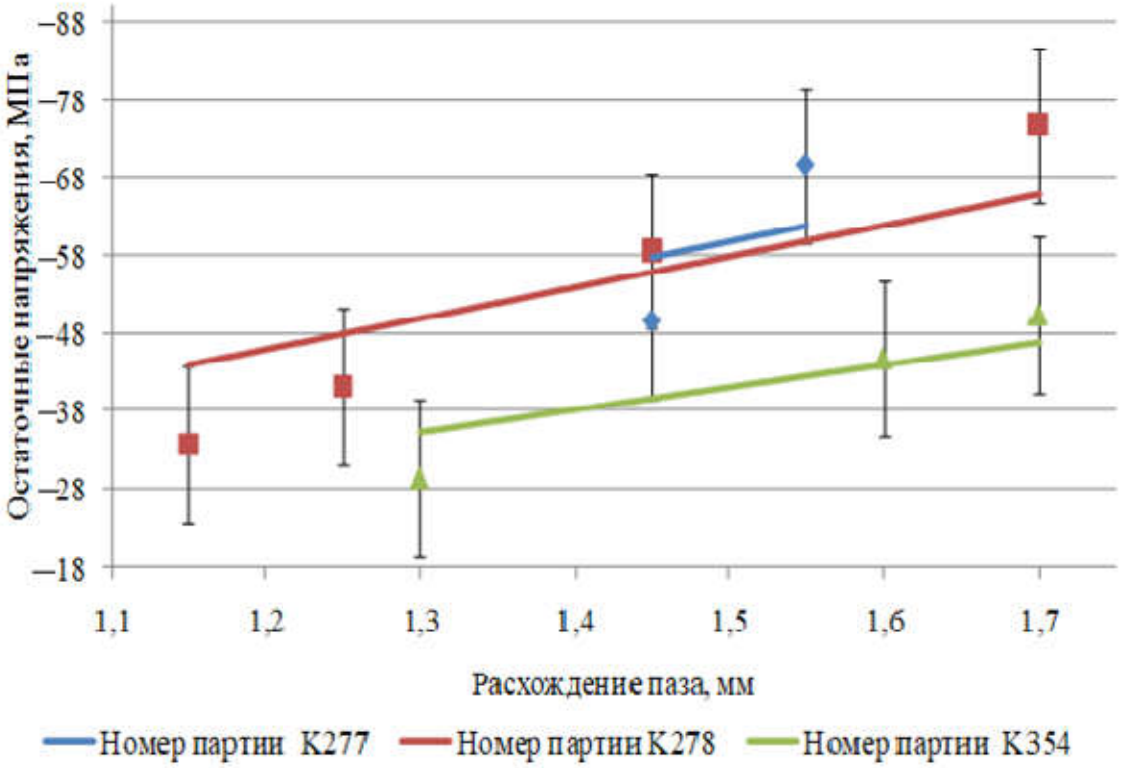

Рисунок 5 Экспериментальная зависимость между измеренными методом акустоупругости напряжениями и расхождением пазе в рельсе.

В то же время проведено экспериментальное исследование наличия связи между напряжениями, измеренными методом акустоупругости со стороны поверхности катания, и напряжениями в поверхностном слое подошвы рельса, измеренными с применением тензорезистора. Погрешность измерений установкой СЭМА составила ±5 МПа. Результаты представлены на рисунке 6. Полученные данные дополнительно подтверждают адекватность модели, созданной в программной среде Comsol Multiphysics.

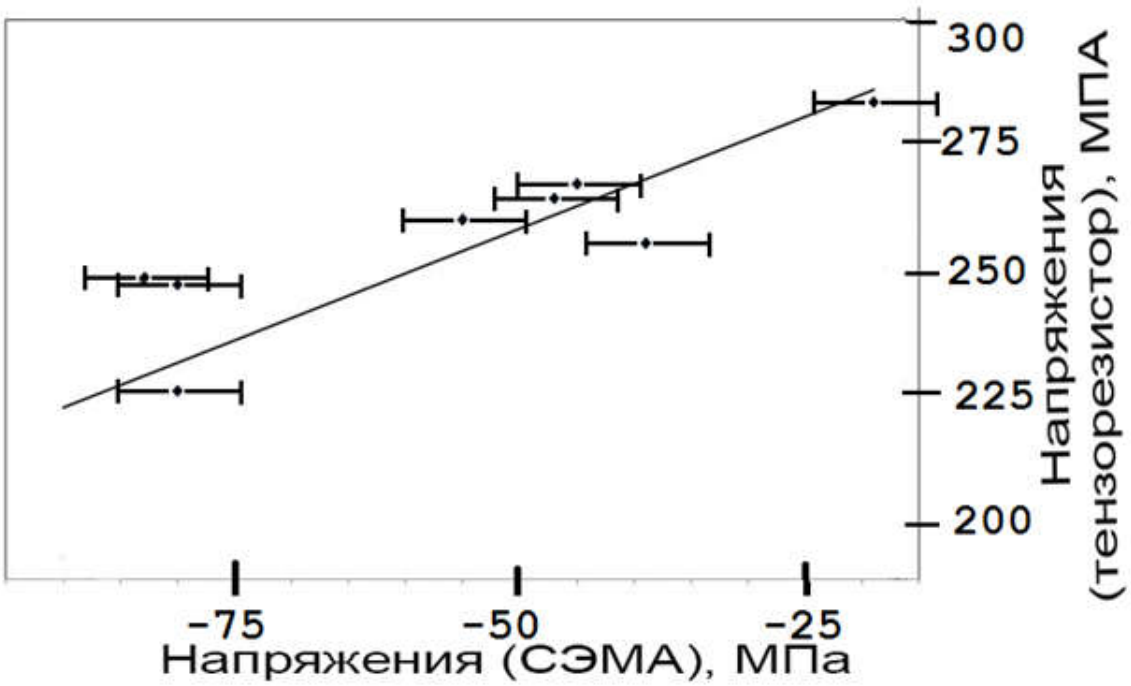

Рисунок 6 Полученная экспериментальная зависимость между напряжениями, измеренными методом акустоупругости и тензорезистивным методом.

В соответствии с результатами моделирования и экспериментальным исследованием напряжённого состояния рельсов, предложена методика неразрушающего контроля рельсов, основанная на эффекте акустоупругости. Так, Если уровень напряжений σ>-80 МПа, то сечение рельса признаётся соответствующим по критерию остаточных напряжений в шейке рельса, если уровень напряжений σ<-50 МПа сечение рельса признаётся соответствующим по критерию остаточных напряжений в поверхностном слое подошвы рельса.

В четвёртой главе приведено моделирование влияния приложенных напряжений на скорость роста трещины при наличии производственного дефекта в виде закалочной трещины на поверхности головки рельса. Моделирование выполнялось в среде COMSOL Multiphysics. На первом этапе изучалось напряжённо-деформированное состояние трещины. Результаты моделирования напряжений при прохождении подвижного состава с максимальной нагрузкой представлены на рисунке 7. Уровень продольных напряжений в головке составляет – 80 МПа.

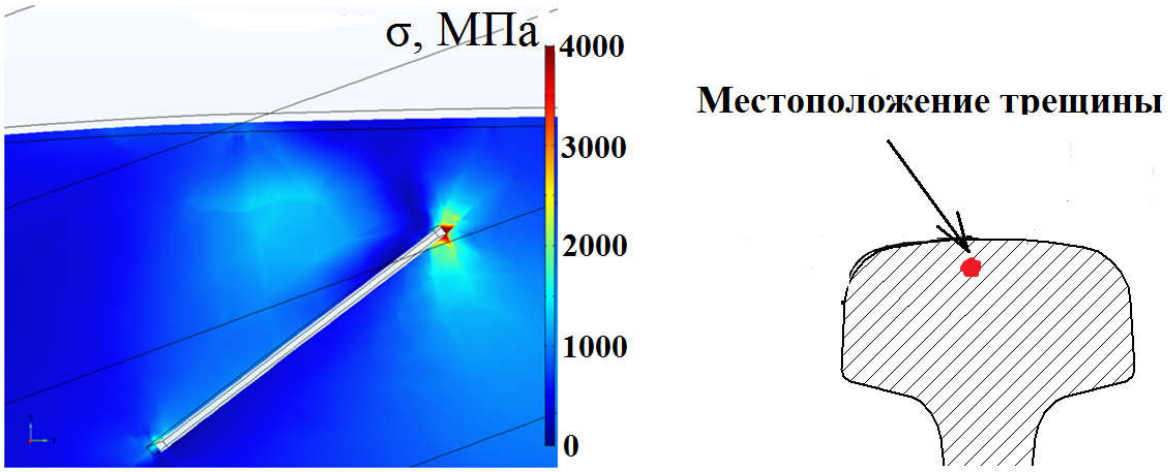

Рисунок 7 Результаты моделирования главных напряжений при наличии трещины в головке рельса при прохождении подвижного состава

На рисунке 8 показаны результаты моделирования напряжённо-деформированного состояния рельса с трещиной при отсутствии прохождения подвижного состава, но при наличии остаточных напряжений.

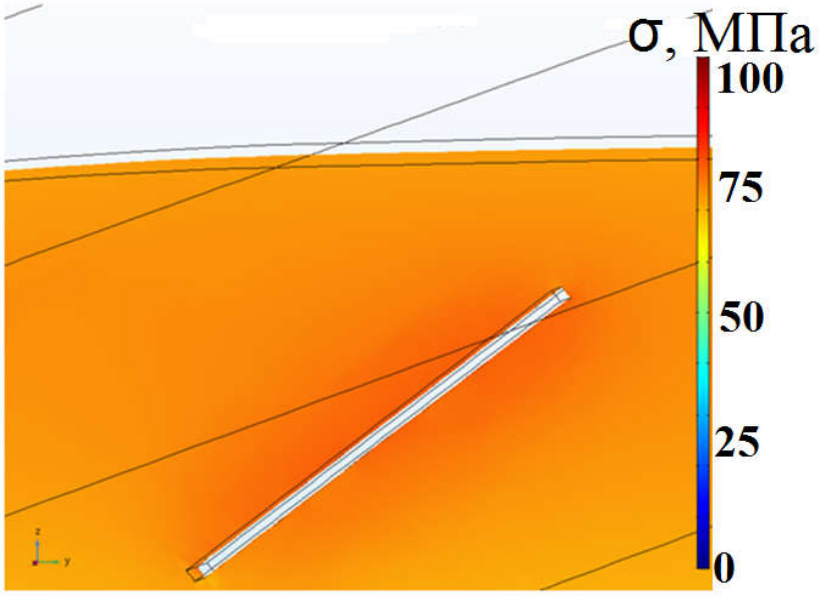

Рисунок 8 НДС трещины в головке при наличии остаточных технологических напряжений и отсутствии нагрузки со стороны подвижного состава

Таким образом, в области острой трещины напряжения выше в несколько раз, чем предел текучести (для термоупрочнённых сталей $\sigma_{0,2}$=800 МПа), что вызывает быстрый рост трещины. В случае, если трещина пройдёт через вертикальную ось симметрии рельса, то такой рельс относится к категории остродефектных и должен быть немедленно заменён.

Также отмечается, что продольные напряжения (остаточные и температурные) практически не влияют на НДС трещины в отличие от

вертикальных напряжений, возникающих при прохождении подвижного состава.

Для оценки влияния остаточных напряжений на развитие дефекта в виде трещины в головке рельса проведено моделирование разрушения по аппроксимированию *S-N* кривой разрушения. Зависимость скорости роста трещины от уровня остаточных напряжений представлена на рисунке 9.

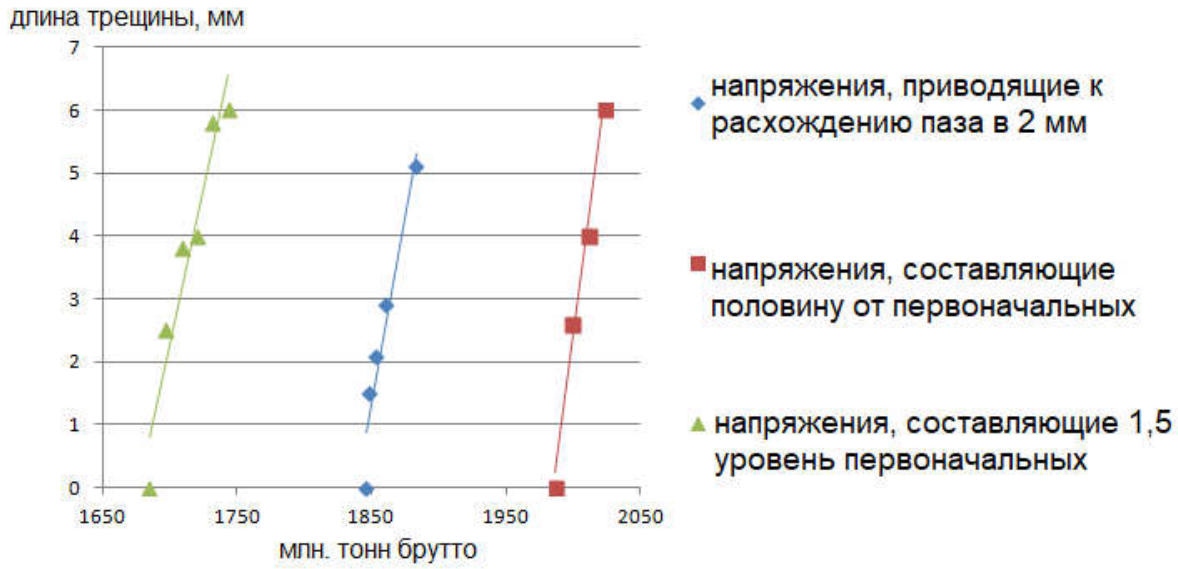

Рисунок 9 Скорость роста трещины в рельсе при различном уровне остаточных напряжений

В то же время во время эксплуатации на рельс оказывают влияние термические напряжения, оцениваемые по параметру ΔT разностью между температурой закрепления и фактической температурой рельса. Результаты моделирования наработки рельса до перехода в остродефектное состояние по критерию роста усталостной трещины в головке рельса представлены на рисунке 10.

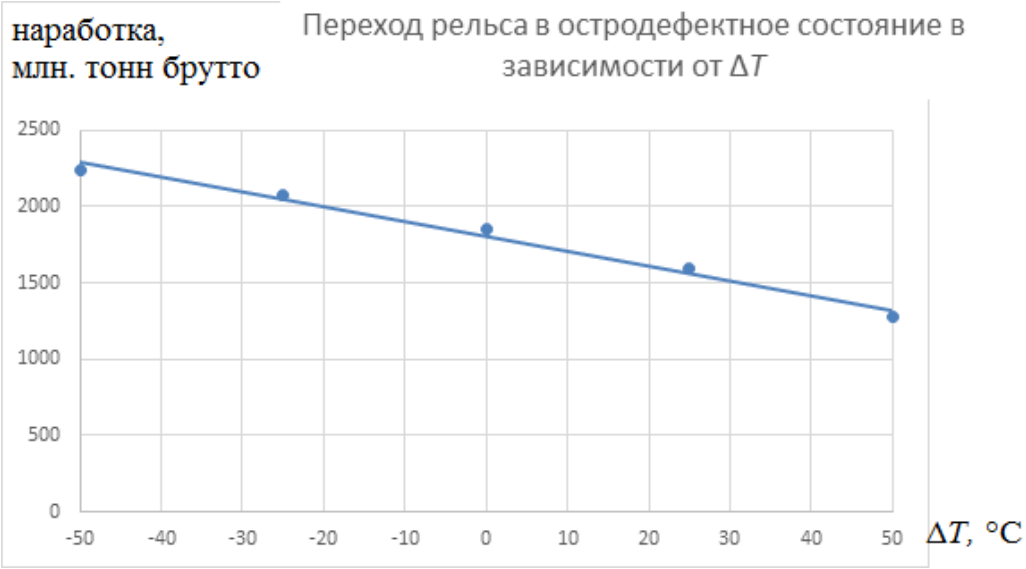

Рисунок 10 Переход рельса в остродефектную категорию при различном значении ΔT

Для головки рельса установлена обратная зависимость между переходом рельса в остродефектную категорию и ΔT разностью между температурой закрепления и фактической температурой рельса. Так, при ΔT=50 °С указанная наработка составляет 2243 млн. тонн брутто, при ΔT=-0 °С наработка составляет 1883 млн. тонн брутто, при ΔT=+50 °С наработка составляет 1274 млн. тонн брутто.

В то же время, во время производства в головке возможно появление поверхностных трещин, что при эксплуатации рельса может привести к выкрашиванию поверхности катания (дефект 10.2), а также повлиять на рост усталостной трещины. Для анализа влияния такой трещины в центре поверхности катания была добавлена поверхностная трещина раскрытием 0,1 мм, охватывающая по длине всю поверхность катания (9,5 мм), с различным значением глубины. Результаты моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Переход рельса в дефектную/остродефектную категорию при различной глубине трещины

Глубина трещины, мм	Наработка рельса до перехода в остродефектную категорию по критерию роста усталостной трещины, млн. тонн брутто	Наработка рельса до перехода в дефектную категорию по критерию выкрашивания поверхности катания, млн. тонн брутто
трещина отсутствует	1883	-
0,5	1883	-
1	1511	-
2	1162	698
3	1162	186

Таким образом, наличие поверхностной трещины глубиной до 0,5 мм не оказывает влияние на развитие усталостной трещины в головке рельса,

наработка до перехода в остродефектную категорию составляет 1883 млн. тонн брутто. Наличие трещины глубиной 1 мм вызывает ускоренный рост усталостной трещины, переход в категорию остродефектных происходит при наработке 1511 млн. тонн брутто. При наличии трещин глубиной 2 мм и 3 мм рельс переходит в категорию дефектных и требует замены по критерию выкрашивания поверхности катания соответственно при 698 млн. тонн брутто и 186 млн. тонн брутто.

Помимо анализа влияния глубины поверхностной трещины, была проведена оценка влияния расположения поверхностной трещины раскрытием 0,1 мм, охватывающая по длине всю поверхность катания (9,5 мм), глубиной 3 мм. Результаты моделирования наработки рельса в зависимости от расположения поверхностной трещины представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Переход рельса в дефектную/остродефектную категорию при различном расположении трещины

Расположение трещины	Наработка рельса до перехода в остродефектную категорию по критерию роста усталостной трещины, млн. тонн брутто	Наработка рельса до перехода в дефектную категорию по критерию выкрашивания поверхности катания, млн. тонн брутто
Трещина отсутствует	1883	-
Трещина по центру поверхности катания	1162	186
Трещина на краю поверхности катания	1883	186
Трещина на расстоянии 15 мм от центра поверхности катания (вне поверхности катания)	1883	-

Таким образом, трещины, находящиеся на поверхности катания, оказывают влияние на переход рельса в дефектную категорию по критерию выкрашивания вне зависимости от расположения внутри поверхности катания. При этом влияние поверхностных трещин на переход рельса в остродефектную категорию по критерию роста усталостной трещины уменьшается по мере удаления трещины от центра поверхности катания. Трещины до 3 мм, расположенные вне поверхности катания не оказывают влияния на переход рельса в дефектную категорию по критерию выкрашивания поверхности катания и не оказывают вляния на переход рельса в остродефектную категорию по критерию роста усталостной трещины.

Отмечается, что в изученном диапазоне зависимости ресурса рельса от остаточных технологических напряжений и температурных напряжений близки к линейным зависимостям. В таком случае, при отсутствии на поверхности катания трещин поверхностных трещин глубиной более 0,5 мм

при применении методов регрессионного анализа была получена зависимость, позволяющая оценить остаточный ресурс рельса W_l, млн. тонн брутто:

$$W_l = (2162 + 3{,}92 \cdot \sigma_A - \sum_{i=1}^{N} \frac{t_i}{t_{sum}} \cdot 9{,}69 \cdot \Delta T_i) - W_p \qquad (10)$$

где σ_A – напряжение, измеренное методом акустоупругости при измерении со стороны поверхности катания, МПа, t_i – время эксплуатации рельса при разнице температур между фактической температурой и температурой закрепления рельса, месяцев, t_{sum} – общее время эксплуатации рельса, месяцев, ΔT_i – разница между между фактической температурой и температурой закрепления рельса, ° С, W_p – наработка рельса, млн. тонн брутто.

Основные выводы работы следующие:

1. Получена зависимость, описывающая связь остаточных технологических напряжений по элементам рельса (головка, шейка, подошва), и напряжения, полученные с использованием структуроскопа СЭМА при вводе волн со стороны поверхности катания. Согласно полученной модели проведено сопоставление уровня напряжений, полученные с использованием структуроскопа СЭМА методом акустической тензометрии, применяемой методикой контроля остаточных напряжений в шейке рельса, где напряжения оцениваются по косвенному параметру – расхождению паза, сопоставление с применяемой методикой контроля остаточных напряжений в средней части подошвы, где напряжения оцениваются тензорезистивным методом. Недопустимое расхождение паза в 2 мм и более соответствует σ>-80 МПа при установке датчика со стороны поверхности катания. Недопустимое значение остаточных напряжений в подошве в 250 и более МПа соответствует σ<-50 МПа при установке датчика со стороны поверхности катания.

2. Проведённое моделирование показало отсутствие влияния трещины длиной 2 мм на НДС рельса при отсутствии нагрузки со стороны подвижного состава. В то же время при наличии нагрузки со стороны подвижного состава в малой области края острой трещины могут появляться напряжения до 4540 МПа, превышающие предел текучести применяемой стали Э76ХФ (не менее 800 МПа), что ведёт к ускоренному развитию существующего дефекта.

3. Определено, что наличие производственного дефекта в виде поверхностной трещины в головке рельса раскрытием 0,1 мм и глубиной 0,5 мм не оказывает влияние на развитие усталостной трещины в головке рельса, при наличии производственного дефекта в виде трещины раскрытием 0,1 мм и глубиной 1 мм рельс переходит в остродефектное состояние при наработке 1511 млн. тонн брутто взамен 1883 млн. тонн брутто при отсутствии

трещины, при наличии производственного дефекта в виде трещины раскрытием 0,1 мм и глубиной 2 мм и 3 мм на поверхности катания рельс переходит в дефектную категорию по критерию выкрашивания при наработке 186 млн. тонн брутто. При этом трещина глубиной 3 мм и раскрытием 0,1 мм, находящаяся вне поверхности катания, не оказывает влияния на развитие усталостной трещины и выкрашивание поверхности головки.

4. Предложена методика неразрушающего контроля остаточных напряжений в рельсе, основанная на эффекте акустоупругости, позволяющая соотнести разрушающие и неразрушающие методы контроля опасного напряжённого состояния рельса по критерию остаточных напряжений в шейке рельса (при измерении со стороны поверхности катания $\sigma<-80$ МПа), и по критерию остаточных напряжений в подошве рельса (при измерении со стороны поверхности катания $\sigma>-50$ МПа). Отмечается, что в случае соответствия напряжений в рельсе указанным и при отсутствии поверхностных трещин раскрытием не более 0,1 мм и глубиной не более 1 мм наработка рельса в остродефектное состояние составляет не менее 1500 млн. тонн брутто.

5. Предложена математическая модель, позволяющая оценить остаточную наработку рельса до перехода в остродефектное состояние по критерию развития усталостной трещины в головке рельса в зависимости от остаточных технологических напряжений и наработки рельса при различных значениях ΔT – разницы между фактической температурой и температурой закрепления рельса.

Список публикаций

1. Тапков К.А. Моделирование напряжённо-деформированного состояния дифференцированно термоупрочнённых рельсов. Интеллектуальные системы в производстве. – 2018 – Т. 16 №2. С 78-83. ISSN 1813-7911 (DOI 10.22213/2410-9304-2018-2-78-83)

2. . В.В. Муравьев, К.А. Тапков, С.В. Леньков. К вопросу контроля остаточных напряжений в дифференцированно термоупрочненных рельсах // Дефектоскопия. – 2018 - № 10 – С 3-9. (V.V. Murav'ev, K.A. Tapkov, S.V. Len'kov. On the Question of Monitoring Residual Stresses in Selectively Heat-Strengthened Rails // Russian Journal of Non-destructive testing. – 2018, Vol. 54, Issue 10, pp 675–681 2018. ISSN 1061-8309. DOI: 10.1134/S106183091810008X)

3. В.В. Муравьев, К.А. Тапков, С.В. Леньков. Неразрушающий контроль внутренних напряжений в рельсах при изготовлении с использованием метода акустоупругости// Дефектоскопия. – 2019 - № 1 – С 10-16. (V.V. Muravev, K.A. Tapkov, S.V. Lenkov. In-Production Nondestructive Testing of Internal Stresses in Rails Using Acoustoelasticity Method // Russian Journal of Non-destructive testing. – 2019, Vol. 55, Issue 11, pp 8–14. ISSN 1061-8309. DOI: 10.1134/S1061830919010078)

4. Муравьев В. В., Тапков К. А. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при изготовлении. Evaluation of Strain-Stress State of the Rails in the Production / В. В. Муравьев, К. А. Тапков // Приборы и методы измерений. - 2017. – Т. 8, № 3. – С. 263-270. (DOI 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270)

5. Muravev V.V., Tapkov K.A., Volkova L.V., Platunov A.V.. Strain Stress Model of the Rail with Crack in its Head and Estimation of its Operational Lifetime//Materials Science Forum, Vol. 970 – 2019, pp 177-186.

6. Муравьев В.В., Тапков К.А., Возможности использования акустоупругого метода для контроля дифференцированно закаленных рельсов. Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 23–25 нояб. 2016 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. С 272-275 – 716 с. – 32,2 МБ (PDF). ISBN (Электронное издание) 978-5-7526-0767-7.

7. Муравьев В.В., Тапков К.А., К вопросу приемочного контроля остаточных напряжений в рельсах. Приборостроение в XXI веке – 2017. Интеграция науки, образования и производства. сб. материалов XIII Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 22–24 нояб. 2017 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. – С 260-269 - 741 с. ISBN 978-5-7526-0800.

8. Муравьев В.В., Тапков К.А., Моделирование напряженно-деформированного состояния рельса при эксплуатации. Приборостроение в XXI веке – 2018. Интеграция науки, образования и производства. сб. материалов XIV Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 12–14 дек. 2018 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. – С 205-212 - 332 с. ISBN 978-5-7526-0810-0.

9. V.V. Muravev, K.A. Tapkov Strain-stress modeling of a crack in a rail. Материалы VIII Международной конференции Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования (Россия, Ижевск, 23–24 апреля 2019 г.) : в 2 т. Т. 1. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, 2019. – С 393-397.

10. Муравьев В. В., Тапков К. А., Волкова Л.В., Платунов А. В. Моделирование напряжённо-деформированного состояния рельса с трещиной в головке и оценка времени безопасной работы такого рельса//SIBTEST - 2019 Сборник тезисов докладов V Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле. 2019 «ИННОВАЦИИ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ», Екатеринбург, 26-28 июня 2019 г. – 2019, С 66-67.

11. Якимов А. В., Муравьев В. В., Тапков К. А., Андреев А. В. Исследование распределения остаточных напряжений в рельсах методом акустоупругости//сборник материалов XV Всероссийской научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке - 2019. Интеграция науки, образования и производства» Ижевск, 20-22 ноября 2019 г. С 170-176.

12. Тапков К.А. Моделирование напряжённо-деформированного состояния рельсов для проведения контроля прибором СЭМА //Материалы конференции Ижевского радиозавода 23-25 мая 2018 г., г. Ижевск – 2018, С. 53-60.

13. Tapkov K.A., Stresses in the bottom of the rail, News of science and education, №6, 2018, Vol. 5, Sheffield, Science and education LTD. P. 3-6. ISSN 2312-2773.

14. Muravev V.V., Tapkov K.A., Modelling of the strain-stress state of the rail. Nauka I Studia, №4, 2017, Tom 11, Techniczne nauki, Przemysl P. 31-34. ISSN 1561-6894.

Подписано в печать ____.____.20_____ г.
Печать офсетная усл. печ. л.1,2
Тираж _____ экз.
Отпечатано в _____
Адрес