

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»
(ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова»)

УДК 620.179

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор, В.В. Муравьев

Ижевск 2020

ВВЕДЕНИЕ	6
Глава 1 Контроль остаточных напряжений и трещин в головке рельсов	13
1.1 Характеристики выпускаемых рельсов	13
1.2 Приемо-сдаточные испытания рельсов	16
1.2 Возникновение остаточных напряжений при производстве рельсов..	18
1.2.1 Технология объёмной закалки.....	19
1.2.2 Технология дифференцированного термоупрочнения	20
1.2.3 Сравнение свойств стали при использовании объёмной закалки и дифференцированного термоупрочнения.....	21
1.3 Способы повышения долговечности рельсов при производстве.....	24
1.4 Методика приёмо-сдаточных испытаний по признаку остаточных напряжений согласно ГОСТ 51685-2013	25
1.5 Неразрушающий контроль трещин в головке рельсов и контроль напряжённо-деформированного состояния.....	28
1.5.1 Методы неразрушающего контроля рельсов	28
1.5.2 Методы оценки напряжённого состояния	29
1.5.3 Акустоупругий метод оценки напряжённого состояния	33
1.5.4 Неразрушающий контроль наличия дефекта в виде трещины в головке рельса.....	35
Выводы по первой главе.....	37
Глава 2 Методы оценки напряжённо-деформированного состояния и наработки рельса до появления усталостного дефекта	40
2.1 Расчёт напряжённого состояния рельса	40
2.1.1 Расчёт с использованием элементов теории упругости.....	40

2.2.2 Особенности расчёта напряжённо-деформированного состояния методом конечных элементов	42
2.3 Оборудование для экспериментальных исследований напряжённо-деформированного состояния рельса.....	46
2.4 Расчёт напряжений, получаемых методом акустоупругости при прозвучивании со стороны поверхности катания.....	51
2.5 Математический аппарат для расчёта усталостной долговечности рельса.....	55
Выводы по второй главе.....	58
Глава 3 Моделирование и экспериментальная оценка напряжённо-деформированного состояния рельса	59
3.1 Определение соотношений напряжений по элементам рельса.....	59
3.2 Моделирование напряжённо-деформированного состояния по критерию остаточных напряжений в шейке рельса	61
3.3 Моделирование напряжённо-деформированного состояния по критерию остаточных напряжений в подошве рельса	64
3.4 Моделирование напряжённо-деформированного состояния рельсов при эксплуатации методом.....	66
3.6 Исследование распределения напряжённо-деформированного состояния по сечениям рельса	71
3.7 Экспериментальное исследование зависимости между остаточными напряжениями по сечению и расхождением паза.....	74
3.8 Экспериментальное исследование зависимости между остаточными напряжениями в подошве рельса и напряжениями по сечению рельса.....	76
Выводы по третьей главе	78
Глава 4 Моделирование дефекта в головке рельса	80

4.1 Математическое моделирование НДС рельса с трещиной в головке	80
4.2 Математическое моделирование цикла живучести рельса	82
4.3 Анализ разрушения рельса, имеющего уровень напряжений 0,5 от первоначального.....	86
4.4 Анализ разрушения рельса, имеющего уровень напряжений 1,5 от первоначальных.....	89
4.5 Анализ влияния термических напряжений на развитие трещины в головке рельса.....	90
4.5.1 Анализ роста трещины в головке рельса при $\Delta T = -50$ °С.....	90
4.5.2 Анализ роста трещины в головке рельса при $\Delta T = -25$ °С.....	93
4.5.3 Анализ роста трещины в головке рельса при $\Delta T = +25$ °С.....	95
4.5.4 Анализ роста трещины в головке рельса при $\Delta T = +50$ °С.....	97
4.6 Анализ разрушения рельса, имеющего дефект в виде трещины в головке рельса.....	99
4.6.1 Влияние трещины глубиной 0,5 мм, расположенная в центре центра поверхности катания.....	99
4.6.2 Влияние трещины глубиной 1 мм, расположенная в центре центра поверхности катания.....	105
4.6.3 Влияние трещины глубиной 2 мм, расположенная в центре центра поверхности катания.....	108
4.6.4 Влияние трещины глубиной 3 мм, расположенная в центре центра поверхности катания.....	113
4.6.5 Влияние трещины глубиной 3 мм, расположенная на краю поверхности катания.....	116
4.6.6 Влияние трещины глубиной 3 мм, расположенная вне поверхности катания.....	119

4.7 Анализ результатов моделирования развития трещины.....	120
4.7.1 Анализ перехода рельса в остродефектное состояние при отсутствии поверхностных трещин в головке рельса	120
4.7.2 Анализ перехода рельса в остродефектное состояние при наличии поверхностной трещины в головке рельса	123
4.7.3 Математическая модель развития дефекта в виде трещины в головке рельса.....	127
Выводы по четвёртой главе	127
Заключение.....	130
Список литературы	133
Приложение А. Методика неразрушающего контроля напряжённого состояния рельсов при производстве	149
Приложение Б Акт о внедрении результатов диссертации в учебный процесс.....	161
Приложение В Акт об использовании результатов диссертации при контроле рельсов на ПАО ЧМК.....	163

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы.

Остаточные напряжения являются одной из наиболее часто встречающихся причин разрушения многих металлических конструкций, в том числе рельсов [1, 2]. Эти напряжения в сталях могут достигать предела текучести [3-9], 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 приёмосдаточных 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» [10]. 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 [11-13]. 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.

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 методика неразрушающего контроля, согласно которой уровень 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 острodefектную 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 минус 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 минус 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 острodefектное 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 острodefектное 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.), конференции 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.

Глава 1 Контроль остаточных напряжений и трещин в головке рельсов

1.1 Характеристики выпускаемых рельсов

Рельсы представляют собой стальные балки специального сечения, устанавливаемые на специальные опоры (чаще всего шпалы). В основном путь, образуемый рельсами, является двухниточным. Именно с рельсами взаимодействуют колёса подвижного состава. Очевидно, что качество рельсов имеет огромное влияние на безопасность движения подвижного состава, грузонапряжённость пути и возможность использования рельсов для скоростного движения. Также качество рельсов влияет на срок службы железнодорожного пути [14-20].

Материалом для изготовления рельсов выступает углеродистая сталь. В странах СНГ наибольшее распространение получили следующие типы рельсов: Р50, Р65, Р75 [10, 16, 21]. Число в маркировке рельса обозначает массу одного погонного метра рельса в килограммах. В настоящее время длины рельсов, производимых рельсопрокатными заводами в России, составляет 12,5, 25, 50 и, с недавнего времени, 100 м [10, 18, 20- 22]. Эскиз рельса Р65 представлен на рисунке 1.1.

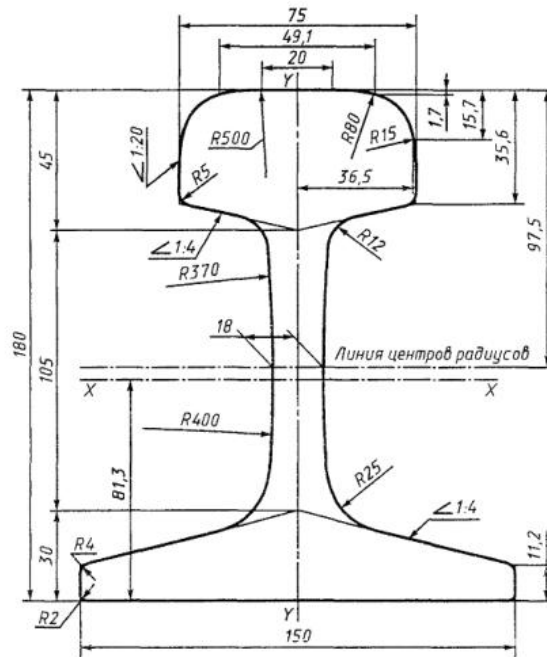


Рисунок 1.1 - Рельс Р65 в поперечном сечении

Рельсы являются ответственным элементом верхнего строения пути. Их эксплуатационная надежность непосредственно влияет на безопасность движения поездов и определяет экономическую эффективность работы железных дорог [21]. Ввиду постоянного увеличения грузонапряженности, осевых нагрузок и скорости движения поездов назрела потребность в рельсах более высокого качества [15, 18, 19, 22, 25-28,], что обуславливает применение специальных технологий термообработки рельса, вызывающих высокий уровень остаточных технологических напряжений [11-13, 18, 23 29-31].

При эксплуатации рельсы испытывают периодические знакопеременные нагрузки, изгибающие рельсы в вертикальной плоскости, также рельсы подвергаются действию горизонтальных сил в кривых участках, смятию, истиранию, ударом непосредственно частей тележек, удары являются особенно сильными, если на колёсах имеются дефекты [20]. Также рельсы подвергаются воздействию температур от минус 50 °С до +50 °С [32, 33], причём низкие температуры лежат ниже порога хладноломкости некоторых сталей [34].

В настоящее время наблюдается рост количества возникающих дефектов в головке рельсов [2, 21, 24, 35, 36] вследствие повышения грузонапряжённости и осевых нагрузок со стороны подвижного состава [6, 20].

Механические свойства рельса при испытании на растяжение и ударный изгиб должны соответствовать нормам, указанным в таблице 1.1 [10], где представлены следующие категории рельсов: В – рельсы термоупрочненные высшего качества, Т1 и Т2 – рельсы термоупрочненные, Н – рельсы нетермоупрочненные.

Таблица 1.1 - Механические свойства рельса Р 65 (ГОСТ Р 51685 - 2013)

Категория	Временное сопротивление, Н/мм ²	Предел текучести, Н/мм ²	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²
В	1290	850	12	35	15
Т1	1180	800	8	25	25
Т2	1100	750	6	25	15
Н	900	–	5	–	–

В зависимости от грузонапряжённости, количества проходящих поездов и скоростей движения подвижных составов выделяются 5 классов железнодорожных путей [25]. Для путей 1-го класса и путей скоростного движения могут применяться рельсы категории ДТ350 СС и ОТ 350 СС. В настоящее время крупнейшие металлургические комплексы страны (Западно-Сибирский металлургический комбинат «ЕВРАЗ», Челябинский металлургический комбинат) перешли к производству дифференцированно термоупрочнённых рельсов (категория ДТ 350) взамен объёмно-закалённых рельсов (категория ОТ 350) [10, 18, 24, 37].

1.2 Приемо-сдаточные испытания рельсов

В настоящее время имеет место тенденция увеличения грузонапряжённости железнодорожных перевозок: растёт как скорость движения подвижного состава, так масса вагонов [15, 17, 18, 22, 25, 27, 28]. В связи с этим возрастает нагрузка на железнодорожный путь, и повышаются требования к надёжности и износостойкости рельсов, разрабатываются новые технологии термоупрочнения рельсов [18, 23]. Требования к контролю и характеристикам рельса регламентированы в ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия» [10].

Изготовленный рельс должен отвечать многим требованиям, в частности таким, как геометрические размеры, химический состав, должны отсутствовать дефекты макроструктуры и внутренние дефекты, превышающие определённый порог, также регламентируются механические свойства рельсовой стали, твёрдость по сечению и длине рельсов, копровая прочность рельсов, остаточные напряжения в шейке рельсов, микроструктуру, маркировка, магнитная индукция, предел выносливости рельса, циклическая долговечность, скорость роста усталостной трещины, циклическая трещиностойкость, статическая трещиностойкость, остаточные напряжения в средней части подошвы рельса, однако в связи с невозможностью проведения контроля каждого из перечисленных параметров во всей выпускаемой продукции некоторые параметры контролируются с определённой периодичностью. Приемо-сдаточные испытания проводят поплавно, в партию допускается объединять рельсы в количестве не более 100 шт. Проведение испытаний на перечисленные параметры является обязательным на этапе освоения производства на опытных образцах [10].

На каждом рельсе методами неразрушающего контроля проводят испытания геометрических параметров, качество поверхности, маркировку, наличие внутренних дефектов, значение магнитной индукции на поверхности катания. Разрушающими методами исследуются химический состав, наличие дефектов макроструктуры, флокенов, химический состав, механические свойства

рельса. Испытания по **контролю остаточных напряжений в шейке рельсов** проводят на одной полнопрофильной пробе от одного рельса из партии. Для контроля микроструктуры отбирается одна проба. Также от каждого из шести рельсов отбирается полнопрофильная проба для **проведения испытаний по контролю значений остаточных напряжений** в средней части подошвы рельсов [10].

Идеальным с точки зрения обеспечения выпуска максимально надёжной и проверенной продукции является случай проведения неразрушающего контроля каждого контролируемой характеристики, что, в настоящее время, не представляется возможным. В связи с этим для большей части перечисленных характеристик проводится разрушающий контроль, результаты исследования по которому распространяются на партию (плавку) рельсов. Сплошной неразрушающий контроль согласно ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия» проводится следующими методами неразрушающего контроля [10]:

1. Ультразвуковой импульсный зеркально-теневой метод для выявления несплошностей и дефектов макроструктуры в области головки и шейки, не обнаруживаемых ультразвуковым эхо-методом [10];
2. Ультразвуковой импульсный эхо-метод для выявления несплошностей и дефектов макроструктуры в области головки, шейки и средней части подошвы [10];
3. Вихретоковый, магнитный, ультразвуковой или другой метод для выявления дефектов поверхности [10];
4. Оптический или другой метод для выявления дефектов в виде отклонений от прямолинейности, скручивания, формы и размеров поперечного сечения рельсов [10].

Возникновение дефектов также возможно во время транспортировки, монтажа и эксплуатации рельсов. В настоящее время в качестве нормативной документации применяется НТД/ЦП-93 [38]. Данный документ содержит каталог дефектов, возможные причины их возникновения и критерии, позволяющие

относить рельс к дефектным, остродефектным или оставлять в дальнейшей работе. Один из наиболее часто встречающихся и опасных дефектов – это дефект 21-го типа согласно НТД/ЦП-93 (поперечные трещины в головке рельса) [6, 21, 35, 36, 38]. Среди причин возникновения данного типа дефекта можно отметить высокое значение остаточных напряжений, являющихся одной из наиболее частых причин разрушения многих металлических конструкций, в том числе и рельсов [9]. Уровень напряжений в области дефекта может достигать предела текучести [2, 4-9]. Это приводит к ускоренному развитию дефектов и значительно снижает срок службы изделий. В современных рельсах основной причиной, по которым они изымаются из эксплуатации, являются дефекты, возникающие именно в головке рельса [9, 21, 24, 35, 36, 39-42].

1.2 Возникновение остаточных напряжений при производстве рельсов

Остаточные механические напряжения в рельсах возникают при производстве в процессе прокатки из-за неравномерности охлаждения элементов рельса при термической обработке, деформации рельса при правке и рихтовке, а также перераспределяются во время его эксплуатации [21, 42]. Остаточные напряжения являются одной из наиболее часто встречающихся причин разрушения многих металлических конструкций, в том числе рельсов [9].

В то же время одно из направлений в развитии железных дорог – увеличение их провозной способности за счёт повышения допустимой нагрузки на железнодорожное полотно и скоростей движения подвижных составов. Так, заметна тенденция роста максимальных осевых нагрузок железнодорожного состава: с 13 тс в 1900 до 20,5 тс в 1950-х годах и до 23-25 тс и 25-57 тс в настоящее время для грузовых вагонов и локомотивов соответственно [21]. Помимо возрастания величины осевых нагрузок можно отметить тенденцию увеличения скорости поездов: как грузовых, так и пассажирских. Одновременное течение этих двух тенденций значительно увеличивает силовое воздействие на

верхние элементы железнодорожного пути – рельсы, непосредственно воспринимающие нагрузку подвижного состава.

При этом от рельсов в значительной мере зависят объёмы работ по содержанию железнодорожного пути и время межремонтных интервалов. В связи с этим в [21] отмечается, что наиболее прогрессивной мерой повышения эксплуатационных качеств рельсов является термическое упрочнение.

Среди технологий термообработки рельса можно выделить следующие наиболее распространённые: объёмная закалка с использованием тепла печного нагрева [31, 43-45] и дифференцированное термоупрочнение рельсов с использованием тепла прокатного нагрева [23, 43, 46-49].

1.2.1 Технология объёмной закалки

Описание технологии объёмной закалки дано в [21]. После прокатки рельсы подаются магнитными кранами на загрузочный стеллаж рольганга, после чего они поступают в нагревательную печь, где прогреваются до температуры 800 °С, подаются в барабан, погружающий в рельсы в масло с большой скоростью. Общая продолжительность пребывания рельса в масляной ванне составляет 5 минут, за это время он охлаждается до 120-150 °С. После закалки рельсы подаются в отпускную печь, где прогреваются до 450°С, время отпуска составляет 2 ч.

В связи с тем, что шейка, подошва и особенно кромки шейки охлаждаются быстрее, чем массивная головка, то происходит искривление рельса. Для придания рельсу правильной геометрии используется правильная машина. Однако во время правки, особенно при значительной кривизне рельса, увеличивается пластическая деформация, что приводит к резкому росту значений остаточных напряжений, что в дальнейшем снижает ресурс рельса [21, 50-53].

В настоящее время на смену технологии объёмной закалки пришла технология дифференцированного термоупрочнения головки рельса [46].

1.2.2 Технология дифференцированного термоупрочнения

Одним из ключевых моментов современного технологического процесса производства рельсов являются максимальная экономическая эффективность и экологическая безопасность. Вследствие этого в настоящее время наибольшие признания в качестве закалочных сред получили экологически чистые: вода, воздух и их смеси [18, 23, 48, 47]. Для экономии энергии при производстве рельсов линии термической обработки встраивают в линию прокатного стана с целью использования тепла прокатного нагрева [47]. В настоящее время такая технология применяется на рельсовых предприятиях России (Западно-Сибирский металлургический комбинат, Челябинский металлургический комбинат), Японии (Nippon Steel), США (EVRAZ Pueblo) [18, 46, 47].

В качестве охлаждающей среды в настоящее время применяют следующие компоненты:

1. Водовоздушные смеси;
2. Воздух;
3. Водные растворы полимеров.

Попытки термообработки рельсов в воде до настоящего времени не увенчались успехом из-за значительной охлаждающей способности, что, в свою очередь, приводило к высоким значениям остаточных напряжений и образованием неблагоприятных игольчатых структур [46, 47].

Применение водовоздушной смеси сопряжено с использованием спрейеров или форсунок, для стабильной работы которых необходима тщательная водоподготовка и жёсткий контроль получаемой охлаждающей среды [47].

Применение водных растворов полимеров сопряжено с изменением их состава за счёт старения, неравномерного выноса полимера и воды при вынимании закаливаемых деталей из ванны, изменение концентрации полимера. Таким образом для получения однородной и стабильной структуры необходим жёсткий контроль этой охлаждающей среды, вызывающий трудности при

серийном производстве, а также приводящий к удорожанию производственного процесса [47].

Наиболее технологичной средой для закалки является воздух, не требующий специальной подготовки и обеспечивающий высокую контролируемость процесса. Среди недостатков использования воздуха в качестве охлаждающей среды можно выделить низкую охлаждающую способность, требующую применение легирования рельсовой стали. В качестве материала для изготовления рельсов используется сталь марки Э76ХФ или Э78ХСФ [47].

Закалка рельса типа Р65 из стали Э76ХФ производится при температуре рельса не ниже 845 °С. Давлении охлаждающей среды (воздуха) 4000 мм водного столба, длительность охлаждения составляет 90-105 с. Для рельсов типа Р65 из стали Э78ХСФ закалка производится от температуры свыше 825 °С в течение не менее 150 с; при давлении сжатого воздуха 1500 - 2200 мм вод. ст. - в течение не менее 110 с, охлаждающие форсунки располагаются со стороны головки рельса. [46].

Использование стали Э76Ф, использовавшейся при производстве рельс по технологии объемной закалки, не оправдано при использовании технологии дифференцированной закалки [43], так как рельсы после термической обработки обладают низкими значениями твердости, не соответствующим требованиям ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. Это связано с недостаточной охлаждающей способностью воздуха для этой марки стали по сравнению с маслом [43, 46, 53, 54].

1.2.3 Сравнение свойств стали при использовании объёмной закалки и дифференцированного термоупрочнения

В [23] установлено, что получаемая в процессе термической обработки микроструктура рельсовой стали имеет значительное влияние на уровень механических свойств рельсовой стали и работоспособность рельсов во время эксплуатации. Основное отличие сталей в различных технологиях по химическому составу - в содержании хрома, который необходим из-за

применения охлаждающей среды с низкой охлаждающей способностью (воздуха) [43, 43].

Согласно результатам исследования [23, 43, 43], микроструктура металла рельсов как при объёмной закалке, так и при дифференцированном термоупрочнении, представляет собой перлит. В рельсах, изготовленных по технологии объёмной закалки присутствуют разрозненные участки феррита в виде сетки.

Согласно ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна» величина зерна объёмнозакалённых рельсов оценивается номером 10-11, дифференцированно термоупрочнённых – величиной 6-8 [43].

Микроструктура объёмнозакалённого рельса представляет собой феррито-перлитную смесь. Основную долю перлита составляют регулярные колонии с правильным чередованием цементитных и ферритных пластинок. Также в пробе встречались участки вырожденного перлита с содержанием цементита различных форм и феррита в виде зёрен. Избыточный феррит, возникающий в том числе из-за наклёпа, присутствует как в виде сетки, так и в виде отдельных зёрен [43].

Основная микроструктура дифференцированно термоупрочнённых рельсов – это колонии дисперсного пластинчатого перлита со следами деформации (встречаются изогнутые и расколотые пластинки цементита). Аналогично со структурой объёмнозакалённых рельсов присутствуют участки вырожденного перлита [43]. При этом межпластинчатое расстояние в перлите дифференцированно термоупрочнённого рельса несколько больше и менее однородно ($0,14 \pm 0,6$ мкм, коэффициент вариации 40%), чем в объёмнозакалённых рельсах ($0,12 \pm 0,03$ мкм, коэффициент вариации 28%). Избыточный феррит также присутствует в виде сетки и отдельных зёрен, но в значительно меньших количествах, чем в объёмнозакалённых рельсах [43].

Обозначенные различия микроструктуры рельсов вызывают различия в механических свойствах рельсовой стали, характеристики которой приведены в

таблице 1.2 [10, 34, 55, 56]. Объёмнозакалённые рельсы относятся к категории Т1, дифференцированно термоупрочнённые – к категории ДТ 350.

Таблица 1.2 - Механические свойства стали в объёмнозакалённых и дифференцированно термоупрочнённых рельсах

Категория рельса	Механические свойства при растяжении				КСУ, Дж/см ² при +20 °С	Твёрдость, НВ				
	$\sigma_{т}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	δ , %	ψ , %		по сечению головки рельса, на расстоянии от поверхности катания			шейка	подошва
						0	22 мкм	10 мм		
Т1	930	1260	11	35	41	370	373	375	359	370
ДТ 350	910	1300	13	35	21	395	375	388	341	352

Дифференцированно термоупрочнённые рельсы отличаются более низкими значениями ударной вязкости и несколько более высокими значениями твёрдости на поверхности катания и по сечению головки, но более низкими значениями твёрдости в шейке и подошве по отношению к объёмнозакалённым рельсам [43]. Снижение величины ударной вязкости обусловлено более крупным зерном, что характерно для металла, термообработка которого была проведена непосредственно после прокатки. Повышение твёрдости при сопоставимых значениях прочности связано с уменьшением выделений феррита относительно объёмнозакалённых рельсов. Также по причине дифференцированного термоупрочнения (более интенсивное охлаждение головки рельса) твёрдость таких рельсов в шейке и подошве значительно ниже, чем у объёмнозакалённых рельсов [43].

Обозначенные свойства дифференцированно термоупрочнённых рельсов способствуют формированию более благоприятной эпюры остаточных напряжений после правки, что, в свою очередь обеспечивает более высокую

стойкость к возникновению контактно-усталостных дефектов и более длительный срок службы рельсов [43].

1.3 Способы повышения долговечности рельсов при производстве

В связи с актуальностью обозначенной проблемы, существует огромное множество различных разработок и предложений по повышению безопасности движения железнодорожного транспорта. Решения, направленные на повышение надёжности эксплуатации рельсового пути можно разбить на следующие группы:

1. Изменение конструкции рельса, разработка новой геометрии рельса;
2. Получение новой технологии изготовления рельсов, использование новых марок сталей;
3. Разработка новых способов и методик контроля рельсов.

К первой группе можно отнести множество технических решений, предлагающих изготовление рельсов самой разнообразной формы с большей несущей способностью, большей долговечностью и повышением других эксплуатационных качеств. Так, в запатентованном решении RU2224834C1 [57], предлагается использование рамной конструкции рельсового пути, а также изготовление шпал из металлопроката. При этом также снижаются требования к балластному несущему слою. В патенте RU2553490C1 [58], предлагается решение изготовления рельсов с полостью прямоугольной формы на одном из концов, и с прямоугольной консольной балкой с другой. Данное решение предлагается для использования его на высокоскоростных железнодорожных путях.

Помимо решений, предлагающих полностью переработать конструкцию рельса, существуют наработки, призванные усовершенствовать уже существующие типы рельсов. Так, решение, предлагаемое в патенте RU2012100278A [59], предлагает введение закруглений на концах рельса, кривизна которых равна радиусу колеса для снижения влияния ударных нагрузок на рельсы и ободья железнодорожных колес.

В патенте RU2073075C1 [60] предлагается техническое решение по введению утолщения в средней части шейки рельса. Толщина среднего утолщенного участка шейки, в котором расположены болтовые отверстия, составляет 1,3 - 1,8 от толщины шейки. Предполагается, что данное утолщение позволяет снизить уровень остаточных напряжений в шейке рельса, что повышает его долговечность и надежность. В техническом решении, предлагаемом патентом RU2013480C1 [61], предлагается ввести наклон головки относительно оси симметрии. Предполагается, что данное решение позволяет уменьшить уровень остаточных напряжений, и повысить долговечность рельса.

Ко второй группе относятся технические решения, касающиеся применения новых технологических решений при производстве рельса, а также применение новых марок сталей. Так, к решениям этой группы можно отнести уже описанный переход от технологии объёмной закалки рельса к технологии дифференцированного термоупрочнения, техническое решение, предлагаемое в патенте RU2010138913A [62] по изменению химического состава стали.

Перед описанием решений третьей группы, а именно методик контроля напряжённо-деформированного состояния рельса, необходимо описать уже применяемую методику согласно ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия».

1.4 Методика приёмо-сдаточных испытаний по признаку остаточных напряжений согласно ГОСТ 51685-2013

Пробы для определения остаточных напряжений как в шейке рельса, так и в подошве рельса отбираются на расстоянии не менее 3 м от торцов, от шести рельсов разных плавок и ручьев разливки [10].

Согласно п. 5.11 ГОСТ 51685-2013 по контролю остаточных напряжений в шейке рельсов, в рельсах допускается такой уровень остаточных напряжений, который приводит к расхождению паза на торце полнопрофильной пробы рельса после её прорезания на величину, не превышающую 2 мм (для рельсов категории

ДТ350. При этом допускаются остаточные напряжения, приводящие к схождению паза [10].

Контроль проводится на полнопрофильной пробе длиной 600 ± 3 мм. Прорезание паза осуществляется в холодном состоянии по нейтральной оси рельса на длину 400 ± 3 мм, при этом ширина прорезаемого паза составляет 6 ± 1 мм. Расхождение паза на торце определяют как разницу высоты рельса H_2-H_1 по оси до и после прорезания паза согласно схеме, приведённой на рисунке 1.2 [10].

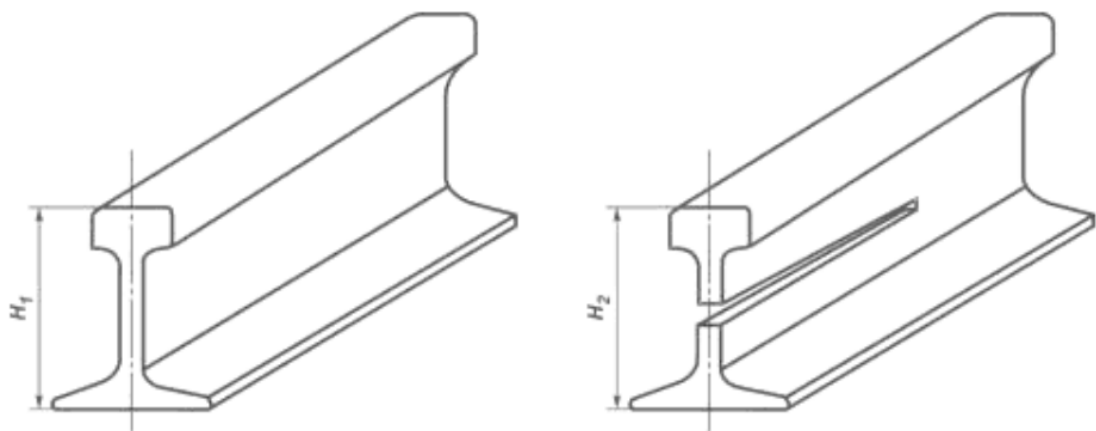


Рисунок 1.2 - Схема прорезания паза в рельсе для оценки значений остаточных напряжений в шейке рельса

В случае получения при проведении приёмо-сдаточных испытаний отрицательного результата контроля остаточных напряжений в шейке проводят повторные испытания на удвоенном количестве проб, отобранных от того же контрольного рельса. В случае получения отрицательного результата при проведении повторного контроля остаточных напряжений в шейке нетермоупрочнённые и дифференцированно упрочнённые рельсы признают не соответствующими ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия» [10], и повторяют процесс контроля на последующих рельсах до получения положительного результата.

В случае, если отрицательный результат контроля остаточных напряжений в шейке был получен для объёмнозакалённых рельсов, то 20 рельсов до отбора

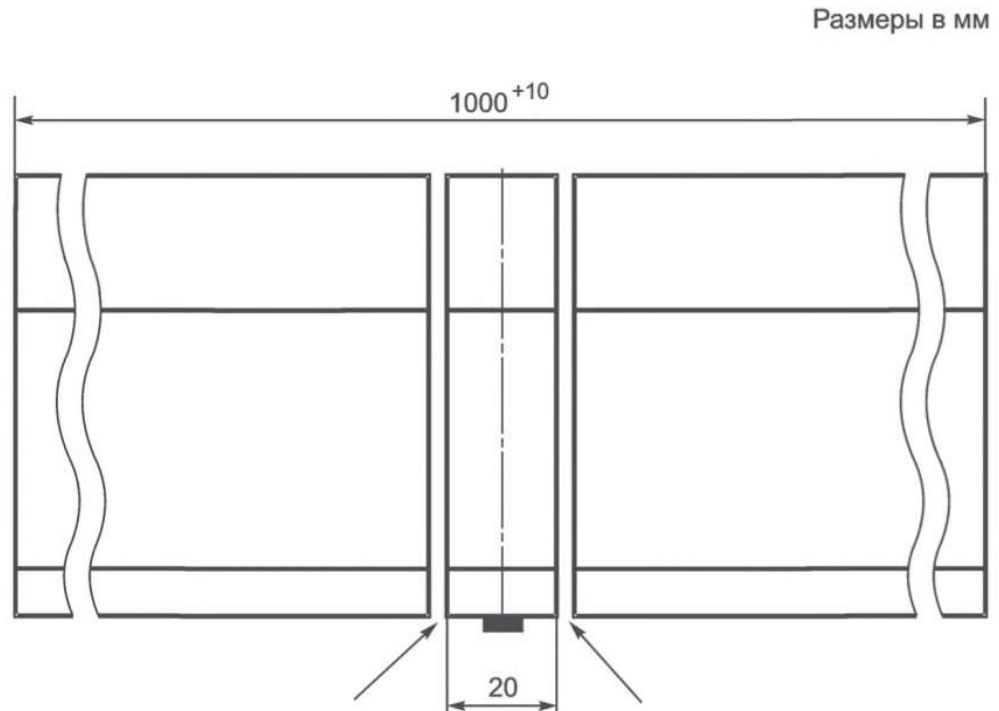
пробы и 80 рельсов после отбора пробы считают не соответствующими ГОСТ 51685-2013 [10].

Также при отрицательном результате контроля допускается проведение повторной термической обработки в виде отпуска 20 рельсов до отбора пробы и 80 рельсов после отбора пробы по технологическому потоку. После этого проводится повторный контроль механических свойств, ударной вязкости, твёрдости, копровой прочности и остаточных напряжений. В случае, если после проведения повторного отпуска параметры рельса всё ещё не соответствуют характеристикам, указанным в ГОСТ 51685-2013 [10], проводится высокий отпуск на твёрдость не более 321 НВ, после чего осуществляется приёмка партии рельсов как нетермоупрочнённых категории НТ260 [10].

Контроль остаточных напряжений в подошве рельса относится к периодическим испытаниям, и согласно п. 6.5 «Периодические испытания» ГОСТ 51685-2013 проводится не реже одного раза в три года. Определение уровня остаточных напряжений в подошве рельсов проводят на полнопрофильных пробах Пробы длиной $1,0 \pm 0,1$ м вырезают из шести рельсов с помощью холодной механической резки [10].

На опорной поверхности подошвы в средней части пробы необходимо провести абразивную зачистку на глубину от 0,3 до 0,5 мм, после чего к зачищенной области в продольном направлении прикрепляют тензодатчик согласно рекомендациям изготовителя датчика. Допустимая относительная погрешность датчика должна составлять не более $\pm 1\%$ [10].

Измерения выполняют до и после разрезки образца, также учитывают изменением его температуры. Разрезка должны быть выполнена холодным механическим способом, что схематично показано на рисунке 1.3. Повреждения тензодатчика при этом не допускаются [10].



Места резки показаны стрелками,
тензодатчик, прикрепленный к подошве образца, показан черным цветом.

Рисунок 1.3 - Схема резки полнопрофильной пробы рельса при испытаниях на величину остаточных напряжений в подошве рельса

После резки должен получиться поперечный образец (темplet) рельса толщиной 20 мм с наклеенным на подошву тензодатчиком. Разницу измеренных напряжений до и после разрезания образца необходимо взять с обратным знаком.

Согласно п. 5.20 ГОСТ 51685-2013 остаточные растягивающие напряжения в средней части подошвы рельсов не должны превышать 250 МПа [10].

1.5 Неразрушающий контроль трещин в головке рельсов и контроль напряжённо-деформированного состояния

1.5.1 Методы неразрушающего контроля рельсов

Неразрушающему контролю подвергаются рельсы по всей длине. Концевые участки рельсов, не проконтролированные при автоматизированном неразрушающем контроле, подлежат обрезке либо дополнительному

механизированному или ручному виду неразрушающего контроля [10]. Для выявления дефектов при производстве применяются следующие методы:

1. Ультразвуковой импульсный зеркально-теневой метод для выявления несплошностей и дефектов макроструктуры в области головки и шейки, не обнаруживаемых ультразвуковым эхо-методом [10, 14, 39];
2. Ультразвуковой импульсный эхо-метод для выявления несплошностей и дефектов макроструктуры в области головки, шейки и средней части подошвы [10, 14, 39];
3. Вихретоковый магнитный, магнитный, ультразвуковой или другой метод для выявления дефектов поверхности [10];
4. Оптический или другой метод для выявления дефектов в виде отклонений от прямолинейности, скручивания, формы и размеров поперечного сечения рельса [10].

Ни один из перечисленных методов неразрушающего контроля не позволяет проводить оценку напряжённо-деформированного состояния рельсов. В то же время, как уже отмечалось ранее, высокие значения остаточных напряжений являются одной из наиболее часто встречающихся причин разрушения многих металлических конструкций [1-9].

1.5.2 Методы оценки напряжённого состояния

Согласно результатам патентного поиска, в настоящее время существует несколько технических решений, касающихся оценки напряжённо-деформированного состояния рельсов методами неразрушающего контроля.

Изобретение (патент RU2555070C1 [63]), позволяющее контролировать напряженно-деформированное состояние рельса с помощью регистрации сигналов, возбуждаемых непосредственно колесом при движении по железнодорожному полотну. Анализируется изменение спектра по сравнению с предыдущим передвижением подвижного состава. Одно из преимуществ данного метода – высокая степень автоматизации. Предполагается, что в результате

использования метода повысится безопасность движения поездов, производительность контроля, объективность контроля, однако применение этого метода не представляется возможным для проведения приёмо-сдаточных испытаний.

Следующим техническим решением (патент SU1779953A1 [64]) является предложение использование электрохимического способа измерения внутренних напряжений. Для этого вырезают из головки и шейки конкретного рельса образцы, разгруженные от внутренних напряжений, нагружают известными напряжениями и измеряют приращение соответствующих электрохимических потенциалов. После этого рассчитывают коэффициент пропорциональности между приращением напряжений и приращением электрохимических потенциалов. Затем проводят измерение стационарных электрических потенциалов непосредственно на рельсе, в середине шейки и в середине поверхности головки рельса, после чего по определённой формуле судят о величине остаточных напряжений в рельсах [64].

Однако данное техническое решение требует постоянной вырезки образцов рельса, в связи с чем контроль нельзя назвать полностью неразрушающим, хотя появляется возможность контроля всей длины рельса (за исключением вырезанных участков).

Среди известных методов, применяемых для определения напряжённо-деформированного состояния материалов, самым распространённым является метод тензометрии с использованием электрического тензометра с тензорезистором [1, 65, 66].

Принцип действия большей части устройств в таком случае основан на эффекте изменения электрического сопротивления материала пропорционально изменению его линейного размера. Данный метод предъявляет высокие требования к точности измерения сопротивления тензорезистора, вследствие чего используется, как правило, мостовая схема включения тензорезистора. Существуют также деление тензорезисторов по типу крепления: привариваемые и приклеиваемые.

Данный метод применяется для оценки уровня механических напряжений в подошве рельса [10], но согласно методике оценки уровня остаточных напряжений, описанной в ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия», является разрушающим, следовательно, его применение невозможно для проведения сплошного контроля рельсов.

Неразрушающим является рентгеноструктурный метод [67, 68], применение которого для исследования напряжённого состояния в металлах основано на явлении дифракции лучей при прохождении их сквозь кристаллическую решётку металла. Рентгеноструктурный анализ применяется для определения остаточного ресурса деталей, находящихся в работе, корректировки технологических процессов, вызывающих изменения в структуре материалов.

Данный метод является высокочувствительным к деформации кристаллической решётки, и основан на законе Вульфа-Брегга [68]. Действие остаточных напряжений вызывает различное смещение атомных плоскостей материала, что приводит к изменению периода решётки и брегговских углов дифракции. Изменение периода прямо пропорционально изменению величины остаточных деформаций. Напряжения вычисляются из уравнений упругости сплошных, однородных и изотропных сред. Необходимо отметить, что в отличие от тензорезистивного метода, учитывающего и пластическую, и упругую деформацию, рентгеноструктурный метод позволяет определять лишь упругую деформацию, с которой непосредственно связаны значения напряжений.

Несмотря на высокую эффективность, применение этого метода сопряжено со многими ограничениями, среди которых можно выделить такие, как необходимость проведения трудоёмкой процедуры электролитического травления поверхности и жёсткие требования по радиационной безопасности.

Анализ напряжённого состояния так же возможен методом измерения шумов Баркгаузена [65, 69, 70], который основан на связи между намагничиванием ферромагнетика и величиной механических напряжений. Основными факторами, определяющими глубину существования этого эффекта являются электропроводность и магнитная проницаемость испытываемого

материала. Интенсивность шумов имеет зависимость от напряжённого состояния и микроструктуры материала, а точность измерений напряжённого состояния – от совпадения микроструктуры испытываемого и калибровочного образцов.

Магнитошумовой метод основан на концепции индуктивного измерения амплитуды шумов Баркгаузена, генерация которых имеет место в ферромагнитной стали при прикладывании магнитного поля. Наличие остаточных напряжений влияет на способность доменов располагаться в направлении наиболее лёгкого намагничивания. В результате такого взаимодействия при сжимающих напряжениях в материале наблюдается снижение амплитуды шумов Баркгаузена во многих марках стали [70]

Среди недостатков метода необходимо выделить низкую чувствительность при измерениях на материалах с высокой твёрдостью, а также нелинейность характеристик при деформациях сжатия и значительную погрешность при сравнительно низких уровнях напряжений.

Также следует отметить метод, в основе которого лежит измерение коэрцитивной силы [65, 70]. Приращение коэрцитивной силы при сжатии и растяжении в области упругих деформаций составляет десятки процентов от начального уровня, при этом не наблюдается гистерезиса характеристик. В то же время, если напряжение превысило предел текучести, то наблюдается скачок коэрцитивной силы, и её увеличение в разгруженном состоянии.

Применение метода контроля напряжённо-деформированного состояния по величине коэрцитивной силы возможно для стальных изделий и металлоконструкций. Магнитные структуроскопы измеряют величину коэрцитивной силы локального участка металла, а индикаторы механического напряжения металла – нормальную составляющую напряжённости поля остаточной намагниченности над поверхностью локально намагниченного участка металла.

В случае одноосного напряжённого состояния материала перечисленные характеристики пропорциональны величине механического напряжения. Оценка величины напряжений проводится по эмпирически полученным диаграммам.

Однако различные значения остаточной намагниченности каждого конкретного рельса и необходимость изготовления образцов ограничивает применение данного метода при проведении сплошного контроля.

Среди новых методов контроля напряжённого состояния стоит также упомянуть метод магнитной памяти металла [65, 70], в основе которого лежит регистрация собственных магнитных полей, возникающий в локальных зонах концентрации напряжений. Недостаток метода – возможность лишь определения области концентрации напряжений и градиента напряжений в этой области.

1.5.3 Акустоупругий метод оценки напряжённого состояния

Среди наиболее перспективных и подходящих методов для неразрушающего контроля напряжённо-деформированного состояния можно выделить метод акустической тензометрии [32, 71-83], в основе которого лежит явление акустоупругости. В результате действия этого эффекта происходит изменение скорости распространения упругих волн под влиянием напряжённого состояния.

Для объяснения возникновения явления акустоупругости необходимо отметить, что закон Гука, согласно которому деформация и приложенные напряжения прямо пропорциональны, выполняется лишь приближённо. Более точная зависимость напряжения и деформации представляет функцию степенного ряда (степени выше второй не учитывают) [76]:

$$\sigma = C_1 \cdot \varepsilon + C_2 \cdot \varepsilon^2 \quad (1.1)$$

где σ – прикладываемое напряжение, Па; C_1 – модуль упругости, Па, ε – относительная деформация тела; C_2 - коэффициенты Мурнагана, Па.

Данное выражение является упрощённым, и не учитывает наличие и взаимодействие деформаций разных типов [76]. В то же время согласно [76] можно отметить, что:

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\varepsilon \cdot C_2}{C_1} \approx \frac{\sigma \cdot C_2}{C_1^2} \quad (1.2)$$

где Δc – изменение скорости упругой волны, м/с; c – исходная скорость упругой волны, м/с.

Величина $\Delta c/c$ имеет порядок около 10^{-4} , что предъявляет высокие требования к измерению скорости. В связи с тем, что вычисление скорости волны обычно происходит с помощью предварительного измерения времени прихода волны, накладываются определённые ограничения по толщине объекта.

Выражение (1.2) показывает, что изменение скорости пропорционально деформации, и как следствие, напряжению и объекте контроля с учётом коэффициента пропорциональности, называемого акустоупругим коэффициентом и определяемого упругими постоянными первого (модуль упругости) и второго (коэффициенты Мурнагана) порядка. В таком случае можно представить линейную зависимость между скоростью упругих волн в образце и прикладываемыми напряжениями:

$$c = c_0(1 + k \cdot \sigma), \quad (1.3)$$

$$k = \frac{C_2}{C_1^2} \quad (1.4)$$

где c — скорость звука в элементе рельса, м/с; c_0 — скорость звука при отсутствии напряжений, м/с; k — коэффициент акустоупругой связи м/Па·с; σ — величина напряжения, Па, C_1 — модуль упругости, Па, C_2 - коэффициенты Мурнагана, Па.

Среди важных преимуществ использования явления акустоупругости выделяется возможность контроля напряжённого состояния не только на поверхности, но и измерение напряжений внутри объекта контроля [71, 72, 73, 75, 78]. Также отмечается, что при наличии сжимающих напряжений скорость

распространения упругих волн увеличивается, при растягивающем характере напряжений происходит уменьшение величины скорости распространения упругих волн [76].

В настоящее время технологии измерения напряжённого состояния с использованием эффекта акустоупругости уже нашли применение в контроле натяга бандажей колёс железнодорожного транспорта [78], контроле напряжений в ободке железнодорожного колеса [73, 75, 82], измерении остаточных напряжений сварных швов и контроле напряжений [76] при затяжке резьбовых соединений [76]. Применение электромагнитноакустического преобразователя снижает требования к поверхности для последующего ввода и приёма волны [32, 77-79]. Перечисленные преимущества метода акустической тензометрии делает его одним из наиболее перспективным для измерения напряжённо-деформированного состояния рельсов.

1.5.4 Неразрушающий контроль наличия дефекта в виде трещины в головке рельса

При эксплуатации рельсов возможно появление и развитие дефектов различного типа, вызывающих, согласно НТД/ЦП-2-93 переход рельса в дефектную или остродефектную категорию. В случае перехода рельса в дефектную категорию принимаются различные меры, например такие, как более частый контроль и наблюдение за дефектным участком, снижение скорости подвижного состава, ремонтные работы и т.д. При переходе рельса в остродефектную категорию эксплуатация пути на данном участке запрещается, выполняется замена остродефектного рельса. Одна из наиболее частых причин возникновения дефектов во время эксплуатации – недостаточная контактно-усталостная прочность рельса, при этом отмечается, что до 50% дефектов возникает в головке рельса. Одним из наиболее опасных дефектов является дефект типа 21.2 – поперечная трещина в головке рельса. Данный дефект может привести к хрупкому излому рельса под проходящим составом.

При этом наиболее часто трещины образуются на в подповерхностном слое головки, и распространяются вглубь, что определяет необходимость использования специальных дефектоскопов для проведения неразрушающего контроля. Контроль головки рельса на предмет поиска трещин выполняется с использованием ультразвуковых дефектоскопов «РЕЛЬС-5», «ПОИСК-2», «ПОИСК-10Э», «АВИКОН-01» и др., которые содержат пару противоположно направленных наклонных пьезоэлектрических преобразователей [39]. Среди схем прозвучивания рельса можно отметить обнаружение дефекта прямым, однократно отражённым и многократно отраженным лучом. Помимо непосредственно части головки под поверхностью катания, также контролируются рабочие и нерабочие грани головки. После обнаружения дефекта в виде трещины дефектоскопной тележкой в автоматическом режиме, данные дефекты должны проверяться ручным пьезоэлектрическим преобразователем с измерением координат обнаруженных дефектов для точного определения дефектного сечения рельса и размеров дефекта [39].

В случае если трещина не пересекает вертикальную ось симметрии рельса, и не выходит на поверхность, допускается дальнейшая эксплуатация рельса с установкой шестидырных накладок с обеих сторон для повышения жёсткости рельса. При выходе поперечной трещины за вертикальную ось симметрии рельса, либо на поверхность, такой рельс признаётся остродефектным и подлежит замене без промедления [39].

Согласно положения о системе неразрушающего контроля рельсов [84], периодичность контроля рельсов зависит от скорости движения подвижного состава, расчётного выхода остродефектных рельсов на 1 км пути, пропущенного тоннажа рельсов, грузонапряжённости и протяжённости участка. Количество проверок имеет интервал от 1 раза в квартал до 60 раз в год [84].

При этом, как уже было отмечено ранее, одной из причин возникновения дефектов в рельсах является высокий уровень остаточных напряжений, потому для уточнения значения пропущенного тоннажа до возможного возникновения

дефекта в виде трещины предлагается также использовать результаты измерений напряжённого состояния рельса с использованием эффекта акустоупругости.

Выводы по первой главе

Одним из условий безопасной эксплуатации железнодорожного транспорта является надёжность железнодорожного пути, в частности такого элемента, как рельсы. С учётом сохранившейся тенденции роста скоростей и грузонапряжённости подвижного состава, к рельсам предъявляются повышенные требования. Одним из факторов, позволяющим делать вывод о пригодности рельса к работе и его безопасной эксплуатации является приёмо-сдаточный контроль рельсов, производимый на предприятии-изготовителе.

Среди параметров, контролируемых при проведении приёмо-сдаточных испытаний, можно отметить остаточные напряжения в шейке и поверхностном слое подошвы рельса. Остаточные напряжения оказывают большое влияние на долговечность изделия. Высокий уровень остаточных напряжений может вызывать ускоренное развитие дефектов, часто высокий уровень остаточных напряжений является причиной разрушения многих металлических конструкций [9], что делает анализ напряжённо-деформированного состояния рельсов актуальной задачей.

Остаточные напряжения появляются при изготовлении рельса и обусловлены проведением термической обработки, проводимой для улучшения характеристик стали и повышения износостойкости поверхности катания. Однако во время проведения термообработки как по технологии объёмной закалки с повторного нагрева, так и по технологии дифференцированного термоупрочнения с использованием тепла прокатного стана, отмечается неравномерность охлаждения поверхностных и внутренних слоёв рельса, особенно массивной головки. В связи со сложным профилем рельса, напряжённо-деформированное состояние, возникающее при термообработки, не является однородным по элементам рельса.

Согласно ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия» [10], они контролируются разрушающими методами контроля на выбранных из партии рельсах, а результаты контроля распространяются на всю партию. Так, для контроля величины остаточных напряжений в шейке рельса прорезается паз определённой геометрии, а вывод о соответствии уровня напряжений допустимому производится по измерению косвенного параметра – расхождению паза. Измерение напряжений в поверхностном слое подошвы производится с использованием тензорезистивного датчика, наклеенного на подошву. При этом из метрового отрезка рельса вырезается темплет, а полученное значение напряжений берётся с обратным знаком.

Неразрушающий контроль напряжённого состояния возможен с применением рентгеноструктурного метода, метода измерения шумов Баркгаузена, метода измерения коэрцитивной силы, однако отдельно необходимо выделить метод акустической тензометрии, в основе которого лежит эффект акустоупругости. Среди преимуществ данного метода можно выделить отсутствие необходимости зачистки поверхности перед проведением контроля и отсутствие необходимости в контактной жидкости (при использовании электромагнитно-акустических преобразователей), а также контроль напряжённого состояния не только в поверхностных слоях, но и в глубине материала. Перечисленные преимущества позволяют назвать данный метод одним из перспективных методов контроля напряжённо-деформированного состояния рельсов.

Применение акустической тензометрии, основано на эффекте акустоупругости, уже успело зарекомендовать себя при измерении напряжённого состояния железнодорожных колёс, при контроле натяга бандажей железнодорожных колёс, при контроле напряжений в резьбовых соединениях и контроле остаточных напряжений в сварных соединениях, однако в настоящее время отсутствует методика применения акустической тензометрии для проведения приёмо-сдаточного испытания рельсов, что и будет являться темой данной диссертации.

По результатам анализа источников сформулирована 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.

Для достижения цели необходимо решение следующих задач:

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.

Глава 2 Методы оценки напряжённо-деформированного состояния и наработки рельса до появления усталостного дефекта

2.1 Расчёт напряжённого состояния рельса

2.1.1 Расчёт с использованием элементов теории упругости

В нагруженном состоянии в теле в каждой точке сечения возникает нормальное напряжение σ , направление которого перпендикулярно сечению, а могут возникать касательные напряжения τ , лежащие в плоскости сечения. Напряжённое состояние в точке можно полностью определить с помощью тензора нормальных и касательных напряжений. Исследуемый объект можно представить состоящим из малых параллелепипедов, и выделить в теле материальную точку размерами dx , dy , dz [85], что представлено на рисунке 2.1.

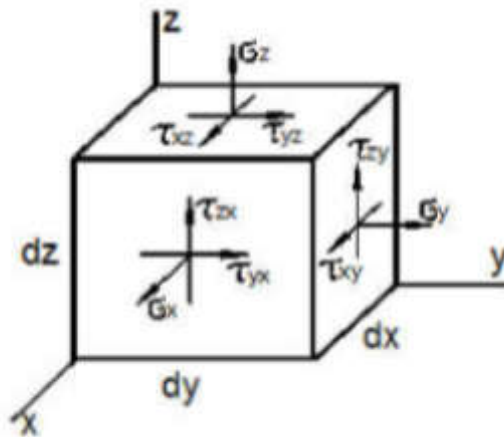


Рисунок 2.1 - Действующие нормальные и касательные напряжения

Так как расстояние между гранями такого кубика бесконечно мало, то на противоположных гранях параллелепипеда возникают одинаковые по величине, но противоположные по направлению напряжения. В таком случае вектора напряжений по осям S_x , S_y , S_z раскладываются на составляющие по координатным осям следующим образом [85]:

$$\begin{aligned}
S_x &= \sigma_x \cdot e_x + \tau_{yx} \cdot e_y + \tau_{zx} \cdot e_z; \\
S_y &= \tau_{xy} \cdot e_x + \sigma_y \cdot e_y + \tau_{zy} \cdot e_z; \\
S_z &= \tau_{xy} \cdot e_x + \tau_{yz} \cdot e_y + \sigma_z \cdot e_z.
\end{aligned}
\tag{2.1}$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальные значения напряжений, Па; e_x, e_y, e_z – единичные векторы, имеющие направление вдоль осей x, y, z соответственно; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zy}, \tau_{xz}, \tau_{zy}$ – касательные значения напряжений, Па.

Таким образом, совокупностью указанных напряжений можно полностью охарактеризовать напряжённое состояние тела. Эту совокупность записывают в виде квадратной матрицы – тензора напряжений Коши [85].

$$T_c = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix}
\tag{2.2}$$

Рассмотрим закон Гука для объёмного напряжённого состояния. Деформация по оси x при отсутствии температурных деформаций составит [85]:

$$\varepsilon_x^{\cdot} = \frac{\sigma_x}{E}
\tag{2.31}$$

где ε_x^{\cdot} – относительная деформация от напряжения σ_x ; E – модуль упругости, Па.

$$\varepsilon_x^{\ddot{}} = -\mu \frac{\sigma_y}{E}
\tag{2.4}$$

где $\varepsilon_x^{\ddot{}}$ – относительная деформация от напряжения σ_y , μ – коэффициент Пуассона.

$$\varepsilon_x^{\ddot{\ddot{}}} = -\mu \frac{\sigma_z}{E}
\tag{2.5}$$

где ε_x – относительная деформация от напряжения σ_x .

Полная деформация по оси x , будет равна сумме рассмотренных деформаций [85]:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_x - \mu \cdot \sigma_y - \mu \cdot \sigma_z). \quad (2.6)$$

Полная деформация по осям y и z рассчитывается аналогичным образом, и составляет [85]:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_y - \mu \cdot \sigma_x - \mu \cdot \sigma_z); \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_z - \mu \cdot \sigma_x - \mu \cdot \sigma_y). \quad (2.8)$$

2.2.2 Особенности расчёта напряжённно-деформированного состояния методом конечных элементов

Расчёт напряжённно-деформированного состояния с использованием метода конечных элементов состоит из следующих стадий [86, 87]:

1. Разбиение геометрической модели объекта на конечные элементы, задание величин действующих сил и напряжений, а также граничных условий.
2. Расчёт для каждого элемента матрицы жёсткости и вектора приведённой к узлам внешней нагрузки.
3. Формирование разрешающей системы линейных уравнений.
4. Решение полученной системы, определение деформаций и напряжений в элементах.

Запишем формулы Коши для плоского напряжённого состояния в виде [86, 87]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial}{\partial x} u + 0 \cdot v; \\ \varepsilon_y &= 0 \cdot u + \frac{\partial}{\partial y} v; \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial}{\partial y} u + \frac{\partial}{\partial x} v.\end{aligned}\tag{2.9}$$

где u – перемещение по оси ox , м, v – перемещение по оси oy , м. Тогда вектор деформаций ε и вектор перемещений q будут равны [86, 87]:

$$\begin{aligned}\{\varepsilon\} &= \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix}, \\ \{q\} &= \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix}\end{aligned}\tag{2.10}$$

Введём дифференцирующую матрицу L

$$L = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}\tag{2.11}$$

В таком случае формулы Коши для плоского напряжённого состояния примут вид:

$$\{\varepsilon\} = [L]\{q\}\tag{2.12}$$

В то же время для напряжённого состояния плоскости $xу$ можно записать [86, 87]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} \cdot (\sigma_x - \mu \cdot \sigma_y); \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} \cdot (\sigma_y - \mu \cdot \sigma_x);\end{aligned}\tag{2.13}$$

Если умножить ε_y на коэффициент Пуассона μ , и сложить с ε_x , то получим следующее выражение:

$$\varepsilon_x + \mu \cdot \varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_x - \mu \cdot \sigma_x^2)\tag{2.14}$$

Тогда:

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \mu^2} \cdot (\varepsilon_x + \mu \cdot \varepsilon_y).\tag{2.15}$$

Аналогично:

$$\sigma_y = \frac{E}{1 - \mu^2} \cdot (\varepsilon_y + \mu \cdot \varepsilon_x).\tag{2.16}$$

Составляющая касательных напряжений составит [86, 87]:

$$\tau_{xy} = \frac{E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{1 - \mu}{2} \cdot \gamma_{xy}.\tag{2.17}$$

В таком случае вектор напряжений можно записать в следующей форме:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.18)$$

При разбиении геометрической модели на конечные элементы возникает задача определения матрицы жёсткости. Согласно теории упругости [86, 87]:

$$\{N^P\} = [K^P]\{q^P\} + \{Q^P\} \quad (2.19)$$

где N^P – вектор реакций, K^P – матрица жёсткости элемента, q^P – вектор перемещений, Q^P – вектор внешней нагрузки к узлам.

В связи с тем, что сплошность в узле не нарушается, уравнение совместности деформаций в узле i для элементов m, n, p имеет вид [86, 87]:

$$\{q_i^p\} = \{q_i^m\} = \{q_i^n\} = \{q_i\} \quad (2.20)$$

Тогда уравнение для i -го узла (выше) примет вид [86, 87]:

$$\{N_{gi}^P\} = [K_{gi}^P] \begin{Bmatrix} q_i \\ q_j \\ q_k \end{Bmatrix} + \{Q_{gi}^P\} \quad (2.21)$$

Тогда $[K_{gi}^P]$ можно разбить на три квадратные матрицы, в результате чего уравнение примет вид [86, 87]:

$$\{N_{gi}^P\} = [K_{gii}^P]\{q_i\} + [K_{gij}^P]\{q_j\} + [K_{gik}^P]\{q_k\} + \{Q_{gi}^P\} \quad (2.22)$$

Аналогичным образом можно получить уравнения для всех узлов, в итоге получается система из n линейных уравнений и n неизвестных.

Расчёт получается тем точнее, чем меньше размер конечного элемента. С другой стороны, при уменьшении размера элемента значительно вырастает количество решаемых уравнений, что отрицательно сказывается на времени расчёта. В связи с этим применяется неравномерная разбивка на элементы.

Проверка точности расчёта осуществляется 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 [87].

Для анализа распределения напряжений в рельсе Р65 создана модель в программной среде COMSOL Multiphysics [88]. Для проведения моделирования был использован подключаемый модуль «Механика твердых тел». Вычисления проводились программно методом конечных элементов с использованием обобщённого закона Гука.

Используя нормативы ГОСТ 51685-2013, при моделировании напряженно-деформированного состояния рельса можно получить ориентировочные допустимые значения остаточных напряжений, возникающих в рельсе после его изготовления. Данные значения могут найти применение при дальнейшей верификации результатов расчета остаточных напряжений, полученных акустоупругим методом.

Расхождение головки и подошвы рельса появляется вследствие возникновения остаточных напряжений при проведении термоупрочнения рельса из-за неравномерного охлаждения [89-95].

2.3 Оборудование для экспериментальных исследований напряжённо-деформированного состояния рельса

В основу технологии измерений напряжений структуроскопом СЭМА в рельсах лежит явление акустоупругости [9]. В основе метода лежит зависимость скорости распространения ультразвуковых волн от механических напряжений,

связанных через акустоупругие коэффициенты [9, 32, 71-83,]. 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. Волны излучаются нормально к поверхности ввода с установкой излучающего и приемного преобразователя на поверхность контролируемого объекта. Регистрация импульсов осуществляется специально разработанным электромагнитно-акустическим структуроскопом СЭМА, внесенным в реестр средств измерений Госстандарта (госреестр № 61957-15) [9, 96, 97].

Характеристики прибора приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Технические характеристики структуроскопа СЭМА

Наименование характеристики	Значение характеристики
погрешность измерения времен прихода импульсов, нс	0,5
диапазон измерения временных интервалов, мкс	от 30 до 1000
материал контролируемых объектов	ферромагнитные стали
толщина контролируемого объекта, мм	от 20 до 500
амплитуда генератора зондирующих импульсов, кВ	2,0 кВ
рабочая частота, МГц	2,5 МГц
полоса пропускания усилителя, МГц	0,6-6,6 МГц
коэффициент усиления, дБ	66 дБ

Специализированное программное обеспечение позволяет одновременно наблюдать на мониторе прибора эхограммы многократных переотражений двух сдвиговых волн с взаимно-перпендикулярными плоскостями поляризации [98]. Использование в программе методов когерентного временного накопления и автокорреляционной обработки дало возможность обеспечить инструментальную

погрешность оценки напряжений ± 2 МПа. Для формирования поперечных волн использована методика на основе электромагнитно-акустического (ЭМА) способа возбуждения и приема волн с помощью прибора СЭМА, структурная схема которого представлена на рисунке 2.2 [98].

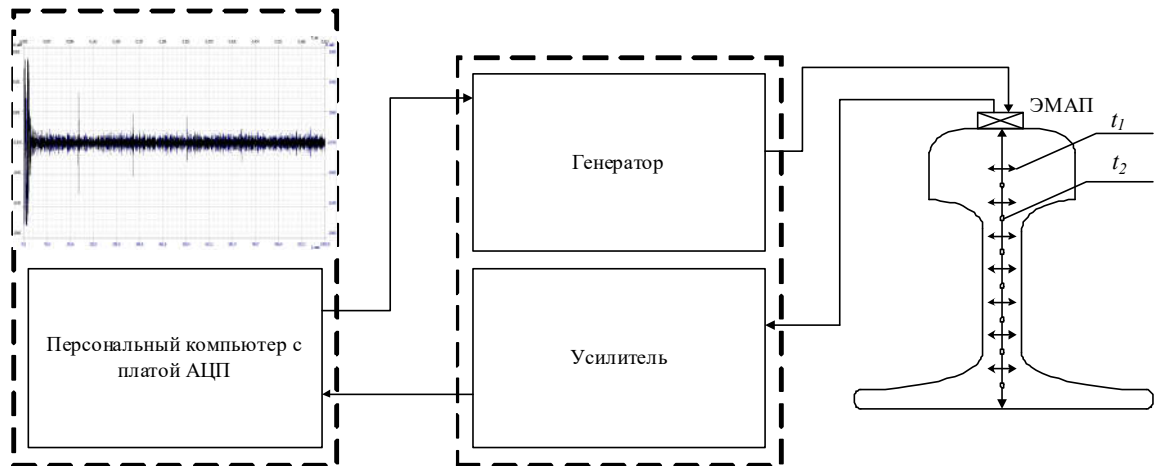


Рисунок 2.2 - Блок-схема структуроскопа СЭМА

Структуроскоп СЭМА включает в себя генератор электрических импульсов, формирующий мощный зондирующий электрический импульс, ЭМА преобразователь, возбуждающий и принимающий короткие акустические импульсы поперечных волн, усилитель и плату АЦП, встроенную в ЭВМ, на экране которого отображается осциллограмма отраженных импульсов от подошвы рельса [98], что схематично показано на рисунке 2.3 и рисунке 2.4.

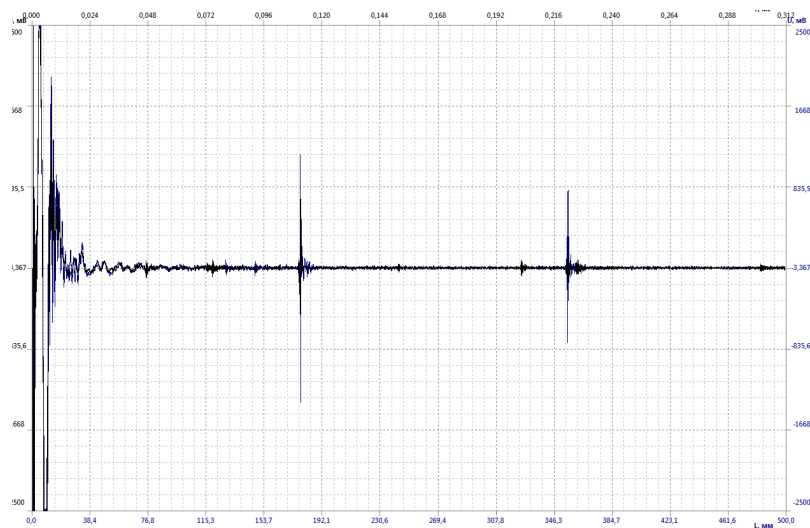


Рисунок 2.3 - Осциллограмма донных импульсов

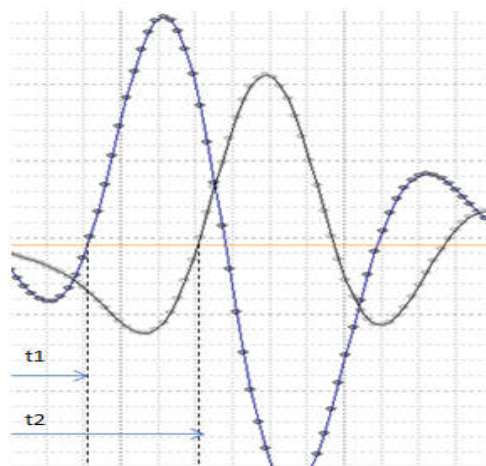


Рисунок 2.4 – Разность прихода импульсов взаимно ортогонально поляризованных волн

ЭМА преобразователь устанавливается на головку рельса, возбуждаются ортогонально поляризованные поперечные волны, которые отражаются от подошвы рельса и принимаются этим же ЭМА преобразователем [99]. Принятые сигналы обрабатываются в специализированном программном обеспечении Prince, в котором можно сравнивать импульсы двух принятых сигналов, измерять их амплитуду и разницу времен по переходу сигнала через ось абсцисс, что показано на рисунке 2.4 [9].

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 [9, 11, 13, 100-102]:

$$\sigma = D \left(\frac{t_1}{t_2} - 1 \right) \quad (2.23)$$

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

Акустоупругий коэффициент D может быть рассчитан по формуле [9]:

$$D = \frac{8\mu^2}{4\mu + n} \quad (2.242)$$

где μ - постоянная Ламе, n - постоянная третьего порядка Мурнагана. Для углеродистой рельсовой стали можно принять $\mu = 82$ ГПа, $n = 740$ ГПа, следовательно, $D = 131$ ГПа [9, 100-102].

Проверка величины акустоупругого коэффициента для рельсовой стали выполнена в лабораторных условиях путем создания в отрезке рельса напряженного состояния одноосного сжатия в направлении продольной оси на испытательной машине Instron 300DX [9, 11, 13, 102]. Оценка напряженного состояния рельсов проведена с использованием метода акустоупругости [12], основанного на измерении скорости распространения акустических волн при прозвучивании по высоте рельса поперечными волнами, ортогонально поляризованными в продольном и поперечном направлениях [12].

С учётом акустической анизотропии материала, напряженное состояние рельсов оценивается по формулам акустоупругости для одноосного напряженного состояния следующего вида [12, 103]:

$$\sigma = D \left(\frac{t_1}{t_2} \frac{t_{02}}{t_{01}} - 1 \right) = Da - Da_0 \quad (2.25)$$

$$a_0 = \frac{t_{02} - t_{01}}{t_{02}}, \quad (2.26)$$

$$a = \frac{t_2 - t_1}{t_2} \quad (2.27)$$

где Da — фактор акустической анизотропии материала, обусловленный вкладом напряженного состояния, текстуры проката и структуры после термической обработки; Da_0 — фактор, учитывающий вклад текстуры и структуры; t_1 и t_2 — значения измеряемых времен распространения сдвиговых волн, поляризованных в продольном и поперечном направлениях соответственно; t_{01} и t_{02} — значения времени распространения сдвиговых волн в отсутствие напряженного состояния; D — акустоупругий коэффициент, полученный экспериментально для исследуемой углеродистой стали ($D = -131$ ГПа) [12, 100-102].

Значения времени распространения сдвиговых волн t_{01} и t_{02} определяются по толщине фрагмента рельса, освобожденного от связи границ, изготовленного из одного рельса из партии для проведения испытаний по учету влияния структуры и текстуры [12].

2.4 Расчёт напряжений, получаемых методом акустоупругости при прозвучивании со стороны поверхности катания

В связи с тем, что волна распространяется в элементах рельса, имеющих разные напряжения, то необходимо установить связь между напряжениями в отдельных элементах рельса и интегральным значением напряжения, полученным после обработки эхограммы. Для ее установления было использовано соотношение линейной акустоупругости для одноосного напряженного состояния [76]:

$$C = C_0(1 + k\sigma) \quad (2.28)$$

где C — скорость звука в элементе рельса, м/с; C_0 — скорость звука при отсутствии напряжений, м/с; k — коэффициент акустоупругой связи, м/Па·с; σ — величина напряжения, Па.

В таком случае напряжения могут быть вычислены по формуле:

$$\sigma = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{C}{C_0} - 1 \right) \quad (2.29)$$

Прозвучивание рельса идёт со стороны поверхности катания, в результате чего ультразвуковая волна проходит все элементы рельса, а именно: головку, шейку и подошву. Каждый из элементов обладает своим напряжённо-деформированным состоянием, в результате чего механические напряжения, измеренные с поверхности катания рельса методом акустоупругости, будут являться интегральной характеристикой напряжённо-деформированного состояния рельса.

Толщина элемента рельса H , скорость распространения волны C , и время t прохождения его волной в случае постоянного значения скорости связаны формулой:

$$H = tC \quad (2.30)$$

Данная формула (2.30) позволяет получить выражение для расчета интегрального напряжения, измеренного при прозвучивании по высоте рельса. С учётом того, что скорость будет изменяться в каждом элементе рельса, для времени t_{int} прихода излучённой волны справедливо соотношение:

$$t_{int} = 2 \cdot \left(\frac{H_h}{C_h} + \frac{H_w}{C_w} + \frac{H_b}{C_b} \right) \quad (2.31)$$

где H_h – высота головки рельса, м; C_h – скорость распространения волны в головке рельса, м/с; H_w – высота шейки рельса, м; C_w – скорость распространения волны в шейке рельса, м/с; H_b – высота подошвы рельса, м; C_b – скорость распространения волны в подошве рельса, м/с. Коэффициент 2 появляется из-за прохождения волной двойной высоты рельса (излучение и приём отражённой от подошвы рельса волны осуществляется с поверхности катания рельса).

В то же время, если t_{int} – это время прихода отражённой волны, будет справедливо соотношение:

$$t_{int} = 2 \cdot \frac{H_R}{C_{int}} \quad (2.32)$$

где H_R – высота рельса, равная сумме высот головки рельса H_h , шейки рельса H_w , подошвы рельса H_b , м; C_{int} – средняя скорость звука в рельсе, м/с. В таком случае справедливо равенство:

$$\frac{H_R}{C_{int}} = \frac{H_h}{C_h} + \frac{H_w}{C_w} + \frac{H_b}{C_b} \quad (2.33)$$

В то же время измеренная скорость распространения ультразвуковой волны – это средняя скорость на измеряемом участке:

$$C_{int} = \frac{H_R}{t_h + t_w + t_b}; \quad (2.34)$$

Данное выражение можно преобразовать:

$$C_{int} = \frac{C_h \cdot t_h + C_w \cdot t_w + C_b \cdot t_b}{t_h + t_w + t_b}; \quad (2.35)$$

В то же время

$$C_{int} = C_0 \cdot (1 + k \cdot \sigma_{int}); \quad (2.36)$$

$$C_0 \cdot (1 + k \cdot \sigma_{int}) = \frac{C_h \cdot t_h + C_w \cdot t_w + C_b \cdot t_b}{t_h + t_w + t_b};$$

$$k \cdot \sigma_{int} = \frac{C_h \cdot t_h + C_w \cdot t_w + C_b \cdot t_b}{C_0(t_h + t_w + t_b)} - 1;$$

$$k \cdot \sigma_{int} = \frac{C_h \cdot t_h + C_w \cdot t_w + C_b \cdot t_b - C_0 \cdot t_h - C_0 \cdot t_w - C_0 \cdot t_b}{C_0(t_h + t_w + t_b)};$$

$$k \cdot \sigma_{int} = \frac{C_h \cdot t_h + C_w \cdot t_w + C_b \cdot t_b - C_0 \cdot t_h - C_0 \cdot t_w - C_0 \cdot t_b}{C_0(t_h + t_w + t_b)};$$

$$k \cdot \sigma_{int} = \frac{t_h(C_h - C_0) + t_w(C_w - C_0) + t_b(C_b - C_0)}{C_0(t_h + t_w + t_b)}; \quad (2.37)$$

В то же время согласно (1.3):

$$C = C_0(1 + k\sigma)$$

Тогда:

$$k \cdot \sigma_{int} = \frac{t_h(C_0 + C_0 \cdot k \cdot \sigma_h - C_0) + t_w(C_0 + C_0 \cdot k \cdot \sigma_w - C_0)}{C_0(t_h + t_w + t_b)} + \frac{t_b(C_0 + C_0 \cdot k \cdot \sigma_b - C_0)}{C_0(t_h + t_w + t_b)}; \quad (2.38)$$

$$k \cdot \sigma_{int} = \frac{t_h \cdot k \cdot C_0 \cdot \sigma_h + t_w \cdot k \cdot C_0 \cdot \sigma_w + t_b \cdot k \cdot C_0 \cdot \sigma_b}{C_0(t_h + t_w + t_b)}; \quad (2.39)$$

Таким образом, справедливо равенство:

$$\sigma_{int} = \frac{t_h \cdot \sigma_h + t_w \cdot \sigma_w + t_b \cdot \sigma_b}{t_h + t_w + t_b}; \quad (2.403)$$

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 [90, 91]:

$$\sigma_{int} = \frac{\sigma_h \cdot H_h + \sigma_w \cdot H_w + \sigma_b \cdot H_b}{H_h + H_w + H_b} \quad (2.41)$$

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

2.5 Математический аппарат для расчёта усталостной долговечности рельса

Использование современных электронно-вычислительных машин при расчёте напряжённого состояния методом конечных элементов позволяют с высокой точностью определить значения напряжений в той или иной точке объекта [104-109]. Благодаря этому появляется возможность оценки накопления повреждений в объекте, анализа количества циклов, при котором дефект в изделии может развиваться до критического состояния.

Одним из наиболее распространённых методов расчёта накопления усталостных повреждений является метод анализа кривой Веллера ($S-N$ кривая) [107, 110-115], представляющая собой график, где по оси абсцисс откладывается десятичный логарифм количества циклов, а по оси ординат расположен размах напряжений в цикле. Значение напряжений σ_B , вызывающее разрушение при количестве циклов $N=1$ называется пределом прочности, значение напряжений σ_1 , не вызывающее разрушение при количестве циклов $N=10^8$ – пределом выносливости [115]. Данные характеристики зависят от химического состава, термообработки и других параметров материала [55, 56, 115-118]. Для рельсов минимально допустимые значения регламентируются ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия», и составляют $\sigma_B=1180$ МПа и $\sigma_1=370$ МПа [10].

Расчёт роста усталостных повреждений проводится на основании кривой Веллера ($S-N$ кривая) [107, 110-115], однако при расчёте возникает необходимость учитывать реальный цикл нагружения, характеризуемый показателем $\Delta\sigma_R$ – размах напряжений в цикле, МПа. Также величина $\Delta\sigma_R$ может быть выражена в относительных величинах, как правило, относительно предела прочности. Одной из основных точек кривой Веллера, согласно [119] выступает размах напряжений $\Delta\sigma_C$ в цикле при общем количестве циклов $2 \cdot 10^6$. В таком случае аппроксимация кривой Веллера происходит по следующим правилам:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_R^m N_R &= \Delta\sigma_C^m \cdot 2 \cdot 10^6, m = 3 \text{ при } N \leq 5 \cdot 10^6; \\ \Delta\sigma_R^m N_R &= \Delta\sigma_D^m \cdot 5 \cdot 10^6, m = 5 \text{ при } N > 5 \cdot 10^6; \end{aligned} \quad (2.42)$$

где N_R – количество циклов до разрушения на кривой Веллера, $\Delta\sigma_D$ – размах напряжений в цикле при общем количестве циклов до разрушения $5 \cdot 10^6$.

Во время расчёта количества циклов до разрушения необходимо разбить работу изделия на участки по диапазонам прикладываемых нагрузок. На каждом из таких участков возможно посчитать N_{Ri} – значение выносливости (кол-во

циклов до разрушения при постоянном значении) при данном по следующей формуле [119]:

$$N_{Ri} = \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} - N_R \quad (2.43)$$

где $\Delta\sigma_i$ - относительный диапазон прикладываемых напряжений (относительно предела прочности); $\Delta\sigma_C$ - относительное значение предела прочности при количестве циклов $2 \cdot 10^6$; γ_{Mf} - поправочный коэффициент, равный отношению $\Delta\sigma_C$ к пределу прочности материала.

Коэффициент повреждений D_d рассчитывается по следующей формуле (правило Минэра [119]):

$$D_d = \sum_i^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \quad (2.44)$$

где n_{Ei} - количество циклов работы изделия при нагрузке $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_i$. γ_{Ff} - поправочный коэффициент эквивалентности цикла к циклу с постоянными нагрузками, отображённому на кривой Веллера. В связи с тем, что рассматриваемый цикл рельса имеет постоянный диапазон напряжений и нагрузок в цикле, коэффициент γ_{Ff} принимается равным единице.

Оценка количества циклов до разрушения, основанная на значении напряжений, проводится по следующему критерию [119]:

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} = \sqrt[3]{D_d} \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}}, \quad (2.45)$$

где $\sigma_{E,2}$ - эквивалентное значение амплитуды цикла по напряжениям, при котором разрушение происходит при количестве циклов $2 \cdot 10^6$.

Выводы по второй главе

В настоящее время возможно проведение расчёта напряжённо-деформированного состояния рельсов с высокой точностью благодаря применению ЭВМ и метода конечных элементов. Современные программные комплексы, такие как COMSOL Multiphysics позволяют разбить геометрическую модель рельса на неравномерную сетку (для повышения скорости обработки) и автоматизировать процесс вычисления напряжённо-деформированного состояния объекта.

Для экспериментального исследования напряжённого состояния рельсов используется явление акустоупругости – изменения скорости акустической волны при наличии напряжённого состояния. Применение электромагнитно-акустического способа ввода не требует наличия контактной жидкости, однако из-за геометрических особенностей рельса ввод наиболее удобен со стороны поверхности катания.

Необходимо отметить, что при вводе акустического сигнала со стороны поверхности катания, волна проходит по всему сечению рельса, то есть головку, шейку и подошву. Каждый из элементов имеет различные размеры. В этом случае возникает проблема сопоставления напряжений, полученных при измерении прибором СЭМА и напряжений в элементах рельса, получаемых при расчёте методом конечных элементов. Для такого сопоставления была выведена формула (2.41):

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

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

Глава 3 Моделирование и экспериментальная оценка напряжённо-деформированного состояния рельса

3.1 Определение соотношений напряжений по элементам рельса

Методика измерения напряжённо-деформированного состояния и применяемое оборудование подробно описано в главе 2.3 настоящей диссертации

Для дальнейшего исследования и проведения математического моделирования напряжённо-деформированного состояния рельса был проведён эксперимент по разрезанию рельса на отдельные элементы (головка, шейка, подошва) с целью измерения напряжённого состояния элементов. Схематично рез показан на рисунке 3.1.

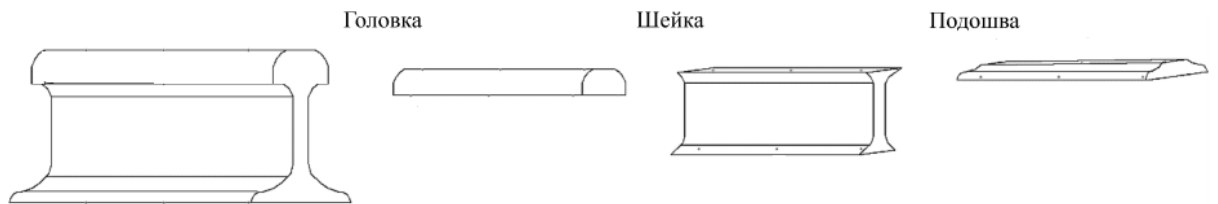


Рисунок 3.1 - Схема разрезания рельса по элементам

Предполагалось, что разрезание рельса на элементы не будет оказывать значимого влияния на напряжённое состояние элементов, так как рез производился холодными пилами [13, 93].

Данное утверждение было подтверждено совпадением проведенных до разрезания экспериментальных измерений остаточных продольных напряжений структуроскопом СЭМА по сечению рельса и расчётных значений показаний структуроскопа СЭМА согласно (2.41). Результаты измерений и расчёта представлены в таблице 3.1. В графе рельс указан порядковый номер рельса, номер плавки и индекс рельса, а также изготовитель (ЗСМК – Западно-Сибирский металлургический комбинат, ЧМК – Челябинский металлургический комбинат)

Таблица 3.1 - Результаты экспериментального исследования напряжённого состояния элементов рельса

№	Рельс	Головка , МПа	Шейка, МПа	Подошва , МПа	Сечение рельса (расчёт), МПа	Сечение рельса (эксперимент), МПа
1	188019 103 1н ЧМК	-62	-102	89	-62	-60
2	27853 В404 ЗСМК	-48	-83	78	-49	-50
3	27849 В101 ЗСМК	-56	-93	78	-57	-58
4	182019 103 2н ЧМК	-88	-132	98	-85	-78
5	15098 А401 ЗСМК	-58	-76	69	-49	-43

Для дальнейшего анализа и определения наличия зависимости между напряжённым состоянием элементов необходимо работать с приведёнными значениями напряжений. В качестве такого опорного значения для каждого рельса было выбрано значение напряжений в головке этого рельса. Результаты представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Приведённые значения остаточных напряжений по элементам рельса

	Головка	Шейка	Подошва
Рельс №1	1	1,631	-1,432
Рельс №2	1	1,736	-1,642
Рельс №3	1	1,674	-1,396
Рельс №4	1	1,499	-1,113
Рельс №5	1	1,301	-1,181
Усреднённые значения	1	1,568	-1,353

Полученное усреднённое соотношение было использовано для определения распределения остаточных напряжений по элементам рельса для дифференцированно-термоупрочнённых рельсов типа Р65 при выполнении математического моделирования [89-93].

3.2 Моделирование напряжённо-деформированного состояния по критерию остаточных напряжений в шейке рельса

Моделирование напряженно-деформированного состояния в программе COMSOL Multiphysics позволило соотнести уровни значений напряжений в элементах рельса с расхождением паза при проведении измерений согласно ГОСТ 51685—2013. В модели было сделано допущение, что эти напряжения вызывают внешние распределённые силы, имеющие продольное направление. Соотношение и создаваемый характер напряжений между внешними распределёнными соответствует распределению напряжений по элементам рельса, полученным в п. 3.1 (таблица 3.1).

В качестве граничных условий была выбрана неподвижная поверхность – противоположный разрезу торец рельса. На первом этапе было произведено моделирование расхождения головки и подошвы рельса при наличии разреза согласно ГОСТ 51685-2013, и сопоставлено значения распределенных сил с расхождением паза. На втором этапе моделирования было произведено сопоставление распределенных сил и напряжений, возникающих в рельсе. Для моделирования была создана 3D-модель рельса типа Р65.

На первом этапе было произведено моделирование расхождения головки и подошвы рельса при наличии паза согласно ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия» [3, 89]. К шейке была приложена распределённая сила, создающая напряжение σ_w в шейке рельса, σ_h в головке рельса, σ_b в подошве рельса, причём согласно соотношениям, полученным в таблице 3.2 [13, 93]:

$$\sigma_h = 0,638 \cdot \sigma_w; \quad (3.1)$$

$$\sigma_b = 0,863 \cdot \sigma_w. \quad (3.2)$$

Данные соотношения были получены согласно п. 3.1 (таблица 3.1). Результаты моделирования расхождения паза при заданных уровнях напряжений в элементах рельса и расчет значения интегрального напряжения по формуле (2.41) представлены на рисунке 3.2 и сведены в таблицу 3.3. Распределение усредненных по длине отрезка рельса напряжений, соответствующих расхождению паза на 2 мм представлены на рисунке 3.3 [89].

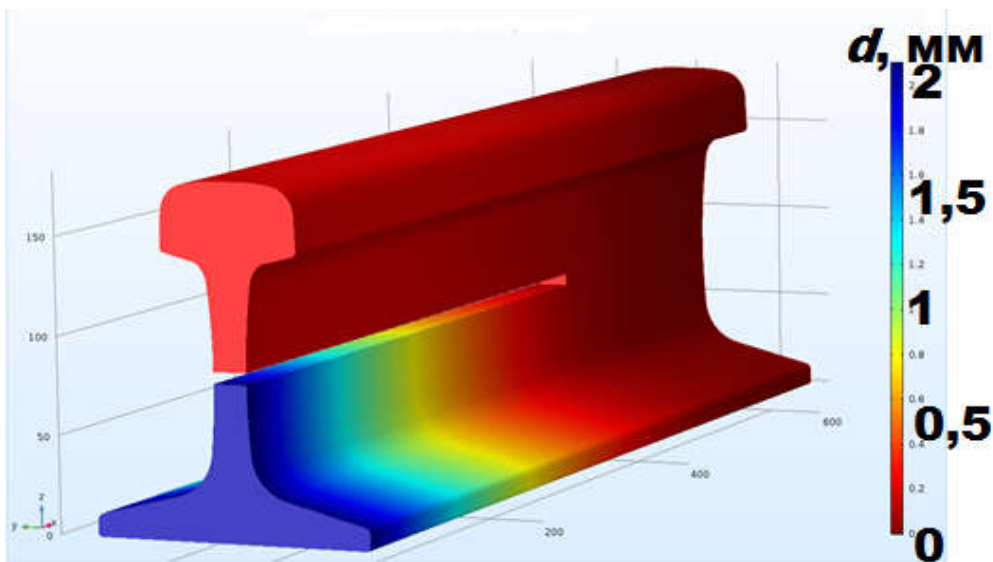


Рисунок 3.2 - Смоделированное расхождение паза

Таблица 3.3 Результаты моделирования связи расхождения паза и напряжений, измеренных структуроскопом СЭМА

Расхождение паза, мм	Головка, МПа	Шейка, МПа	Подошва, МПа	Отрезок рельса (прозвучивание со стороны головки), МПа
0,34	-12	-20	17	-12
0,51	-18	-30	26	-18
0,67	-25	-40	34	-25
0,84	-31	-50	43	-31
1,00	-37	-60	51	-37
1,16	-43	-70	60	-43
1,32	-49	-80	68	-49
1,47	-55	-90	77	-55
1,63	-62	-100	85	-62
1,78	-68	-110	94	-68
1,94	-74	-120	102	-74
2,01	-77	-125	106	-77
2,09	-80	-130	111	-80
2,23	-86	-140	119	-86
2,53	-99	-160	136	-99

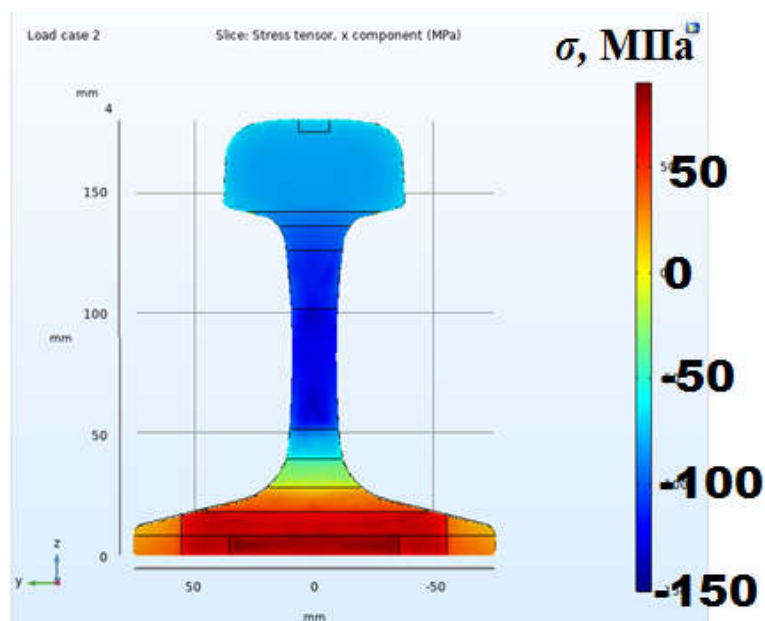


Рисунок 3.3 - Распределение усредненных по длине отрезка рельса напряжений, соответствующих расхождению паза на 2 мм

Согласно ГОСТ 51585—2013, при превышении значения расхождения паза в 2 мм рельс признается бракованным, что соответствует уровню напряжений: в головке рельса — минус 77, шейке — минус 125 и подошве — +106 МПа (см. таблицу 3.3). Сжимающие напряжения в шейке рельса компенсируются растягивающими в подошве. Уровень напряжений, получаемый прибором СЭМА 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.

3.3 Моделирование напряжённно-деформированного состояния по критерию остаточных напряжений в подошве рельса

Цель моделирования заключалась в оценке напряжённного состояния элементов рельса при критическом уровне остаточных напряжений в подошве рельса согласно ГОСТ 51685-2013 (250 МПа). Моделирование произведено

методом конечных элементов в программной среде COMSOL Multiphysics [91, 93].

В качестве начальных условий при моделировании были выбраны напряжения в поверхностном слое подошвы (250 МПа), неподвижность середины сечения рельса и экспериментальное соотношение напряжений между элементами рельса [91]. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.4.

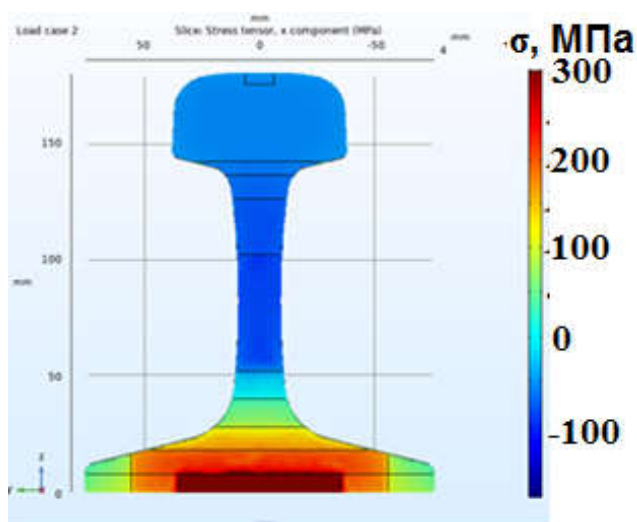


Рисунок 3.4 - График распределения напряжений в рельсе при значении растягивающих напряжениях в подошве 250 МПа

Средневзвешенные значения напряжений по элементам рельса, получаемые при прозвучивании элементов прибором СЭМА, а также средневзвешенное значение напряжений при прозвучивании целого сечения рельса со стороны головки, рассчитаны по (2.41) и сведены в таблицу 3.4. Таким образом, критический уровень остаточных напряжений в подошве в 250 МПа достигается при значении остаточных напряжений по сечению рельса в -52 МПа.

Таблица 3.4 – Средневзвешенные значения напряжений в элементах рельса при значении напряжений в поверхностном слое подошвы 250 МПа

Фрагмент рельса	Напряжение, при измерении с поверхности катания рельса, МПа
Сечение рельса	- 52
Головка	- 51
Шейка	- 90
Подошва	89

3.4 Моделирование напряжённо-деформированного состояния рельсов при эксплуатации методом

Во время нагружения рельса со стороны колеса подвижного состава возникают высокие значения контактных напряжений. Вес подвижного состава имеет направление вертикально вниз (F_z) что проиллюстрировано на рисунке 3.5. Согласно справочным данным [4, 120], нагрузка колеса вагона может достигать значения 11 т. при применении тележки ЦНИИ-ХЗ. В этом случае статическая нагрузка на одно колесо составит около 108 кН, при этом в зоне контакта могут наблюдаться высокие значения напряжений [121-123]. Зона контакта представляет собой эллипс с шириной 12,5 и длиной 9,5 мм [123], то есть имеет площадь 95 мм².

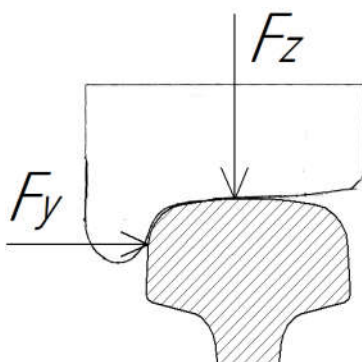


Рисунок 3.5 - Прикладываемые нагрузки со стороны подвижного состава

Процесс моделирования проводился для прямолинейных участков рельса, но несмотря на это на них всё равно присутствует боковая нагрузка F_y , прикладываемая гребнем колеса при наезде на рельс под некоторым углом. Данная сила может достигать значений в 66 кН [123-126], что, в свою очередь, сопоставимо с вкладом вертикальной нагрузки.

Очевидно, что в процессе эксплуатации рельса возникает необходимость учёта не только статической, но и динамической составляющей. Согласно [127] значения сил динамического нагружения превосходит статическую силу в 1,6 раза.

К технологическим остаточным напряжениям, возникающим в процессе производства, суммируются напряжения, возникающие вследствие колебаний температуры относительно температуры закрепления рельса. Изменение на 1°C влечёт за собой прирост напряжений на 2,5 МПа [32, 68, 83]. Результаты моделирования суммарных напряжений по элементам рельса сведены в таблицу 3.5, где ΔT – значение разности фактической температуры и температуры закрепления рельса.

Таблица 3.5 – Результаты моделирования значений продольных напряжений в элементах рельса

$\Delta T, ^\circ\text{C}$	Продольные значения напряжений в элементе, МПа		
	головка	шейка	подошва
+50	-299	-250	-40
+25	-141	-186	18
0	-77	-122	75
-25	-13	-60	143
-50	44	4	187

Результаты моделирования во время прохождения подвижного состава при различных значениях разницы между фактической температурой и температурой

закрепления представлены на рисунках ниже. Напряжённое состояние при $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$ представлено на рисунке 3.6, при $\Delta T=-25^{\circ}\text{C}$ на рисунке 3.7, при $\Delta T=-50^{\circ}\text{C}$ на рисунке 3.8, при $\Delta T=+25^{\circ}\text{C}$ на рисунке 3.9, при $\Delta T=+50^{\circ}\text{C}$ на рисунке 3.10.

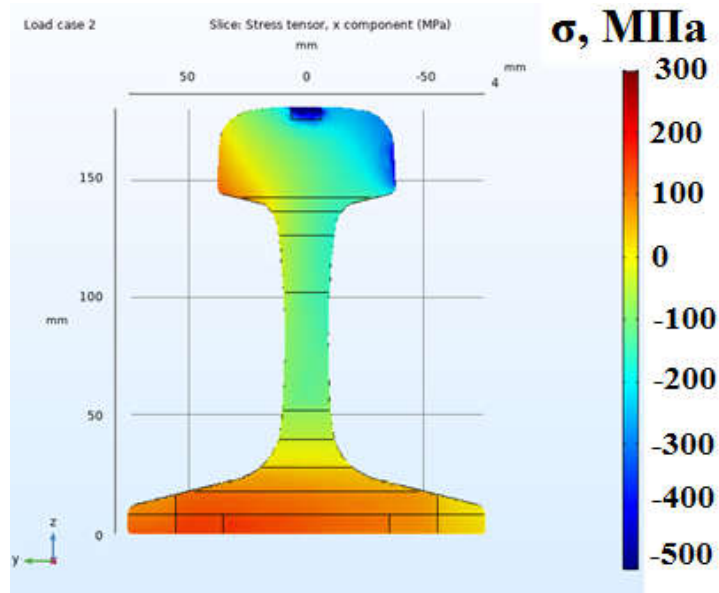


Рисунок 3.6 - Напряжения при прохождении поезда при отсутствии разницы между температурой закрепления и фактической

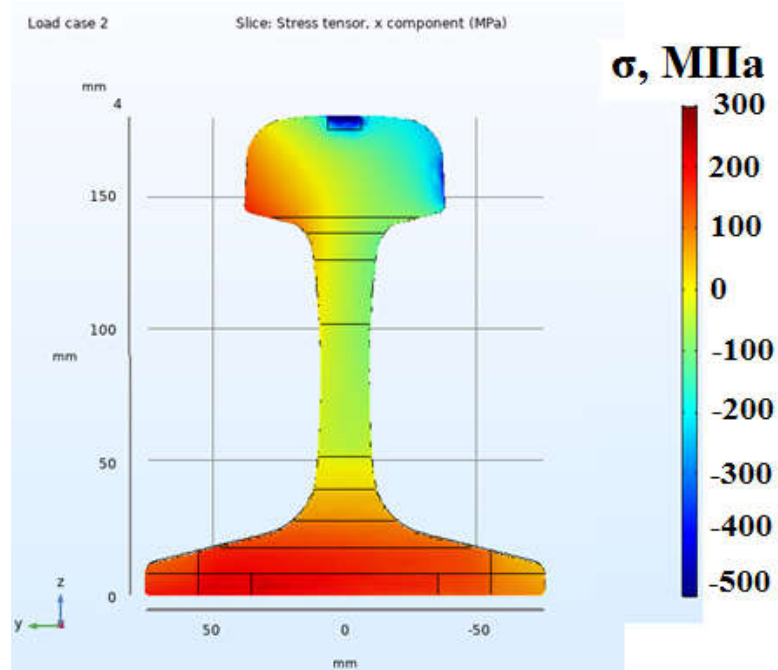


Рисунок 3.7 - Напряжения при прохождении поезда при разнице между фактической температурой и температурой закрепления в минус 25 °С

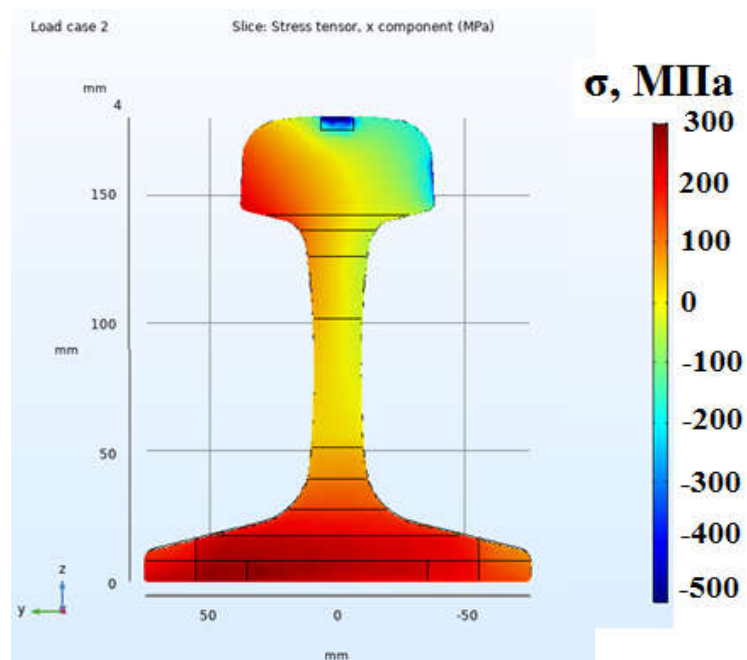


Рисунок 3.8 - Напряжения при прохождении поезда при разнице между фактической температурой и температурой закрепления в минус 50 °С

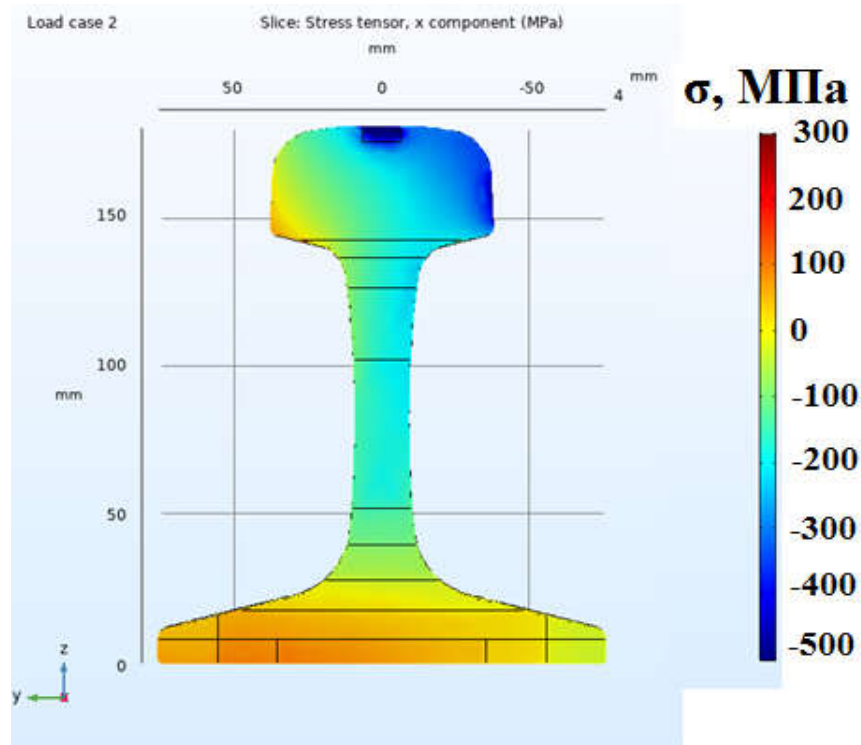


Рисунок 3.9 - Напряжения при прохождении поезда при разнице между фактической температурой и температурой закрепления в $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$

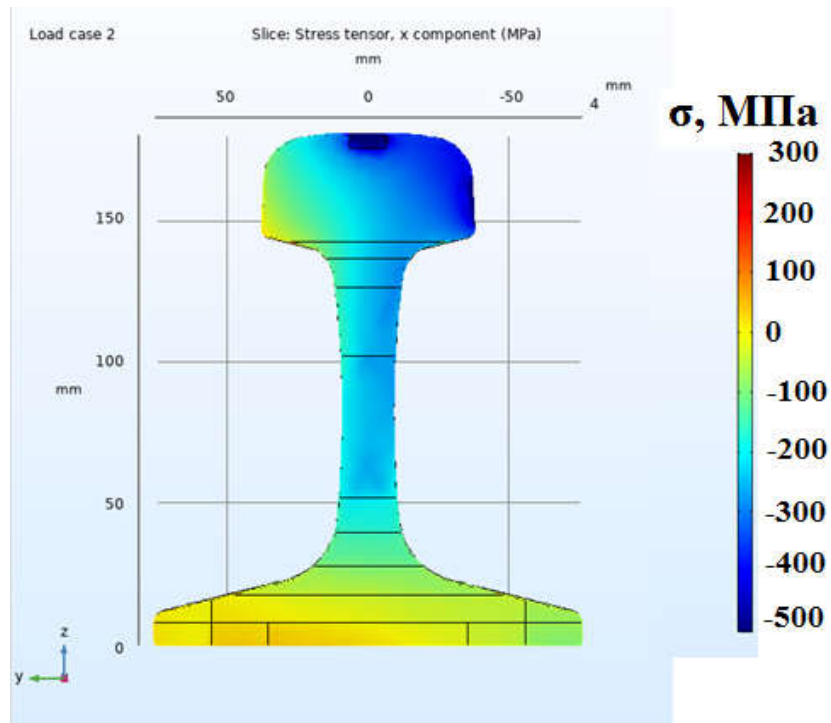


Рисунок 3.10 - Напряжения при прохождении поезда при разнице между фактической температурой и температурой закрепления в $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$

В таблице 3.6 представлены результаты средних напряжений и напряжений в подповерхностном слое в головке рельса. Напряжения в подповерхностном слое – это напряжения, измеряемые центре под контактной площадкой на глубине 3 мм.

Таблица 3.6 - Моделирование значений напряжений в рельсе при прохождении подвижного состава

$\Delta T, ^\circ\text{C}$	Продольные значения напряжений в элементе, МПа			
	головка	подповерхностный слой поверхности катания	шейка	подошва
+50	-235	-780	-242	15
+25	-189	-714	-180	71
0	-124	-649	-111	133
-25	-48	-605	-53	182
-50	-52	-600	9	240

3.6 Исследование распределения напряжённо-деформированного состояния по сечениям рельса

Для обоснования необходимости разработки методов неразрушающего контроля рельсового проката и несостоятельности оценки напряжений в рельсе при контроле лишь одного участка рельса (методика согласно ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия») были проведены экспериментальные исследования напряжённного состояния сечений отрезков рельсов. Напряженно-деформированное состояние отрезков рельсов оценивалось с использованием структуроскопа СЭМА [96, 97] методом акустической тензометрии согласно формуле (2.41) [89-91].

Результаты измерений напряжённного состояния метровых отрезков рельсов представлены в таблице 3.7. Измерения выполнялись по нескольким сечениям, находящихся от центра отрезка рельса на расстоянии минус 250; 0 и 250 мм соответственно, погрешность составила ± 5 МПа.

Таблица 3.7 - Результаты измерения напряжённого состояния в метровых отрезках рельсов

№	Рельс	Уровень напряжений по сечениям рельса при прозвучивании со стороны головки, МПа		
		-250 мм	0 мм	250 мм
1	15098 А401 (1)	-40	-20	-35
2	15098 А401 (2)	-55	-40	-65
3	15098 А401 (3)	-75	-45	-60
4	15098 А401 (4)	-45	-55	-45
5	15098 А401 (5)	-30	-40	-35
6	27896 В304	-30	-45	-55
7	27896 В201	-85	-85	-90
8	27896 В204	-85	-80	-85
9	27896 В203	-45	-75	-60
10	27896 В201	-40	-65	-75
11	22164 В203	-60	-80	-65

Дополнительно исследованы полуметровые отрезки рельсов. Измерения значений остаточных напряжений выполнялись по сечениям, находящимся на расстоянии 70 и 250 мм от края рельса. Результаты измерений представлены в таблице 3.8

Таблица 3.8 - Результаты измерения напряжённого состояния в полуметровых отрезках рельсов

№	Рельс №	Уровень напряжений по сечениям рельса при прозвучивании со стороны головки, МПа	
		70 мм	250 мм
1	27853 В404	-30	-20
2	25499 А202	-55	-35
3	26442 А403	-90	-90
4	27896 В301	-15	-5
5	27849 В101	-50	-15
6	27896 В101	-15	-5
7	27896 В104 (1)	-35	-35
8	27896 В 104 (2)	-55	-25

Таким образом, при экспериментальном исследовании внутренних напряжений в выборке из 19 рельсовых отрезков было установлено, что значения напряжений по разным сечениям могут иметь значительные различия [3, 53, 89]. Для наглядности графики распределения напряжений по сечениям полуметровых рельсовых отрезков представлены на рисунке 3.11, по сечениям метровых рельсовых отрезков представлены на рисунке 3.12.

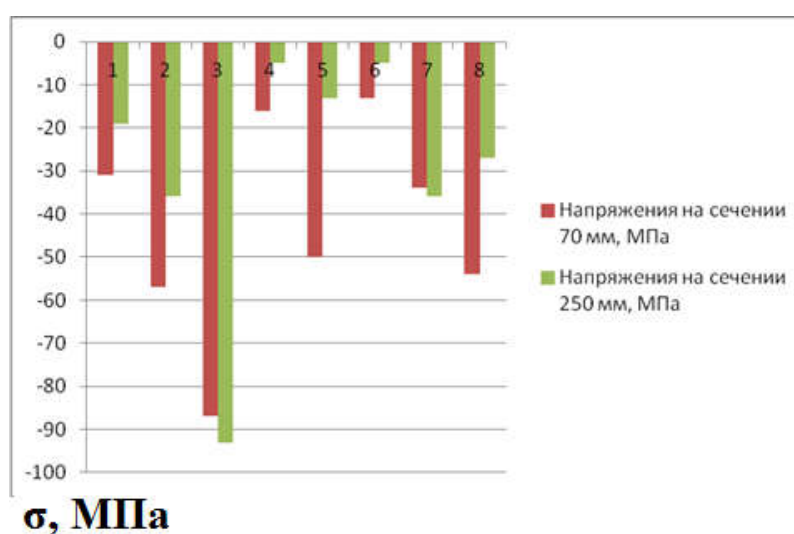


Рисунок 3.11 - Распределение напряжений по сечениям полуметровых отрезков рельсов

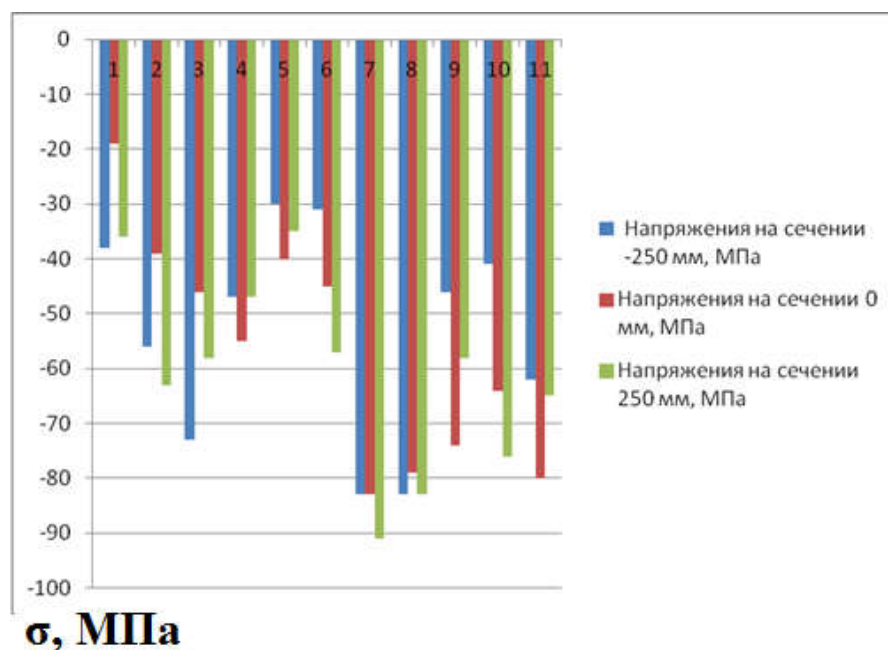


Рисунок 3.12 - Распределение напряжений по сечениям метровых отрезков рельсов

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.

3.7 Экспериментальное исследование зависимости между остаточными напряжениями по сечению и расхождением паза

Согласно ГОСТ 51685-2013 остаточные напряжения в шейке рельса контролируются косвенным методом – по измерению расхождения головки и подошвы рельса после прорезания паза [10], что схематично показано на рисунке 1.2. При превышении значения расхождения паза в 2 мм (для рельса типа Р65), напряжения в шейке рельса признаются не соответствующим ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия» [10].

Было проведено экспериментальное исследование проверки наличия зависимости между значениями напряжения, измеренными прибором СЭМА по сечению рельса, и значениями расхождения шейки и головки рельса при прорезании паза для оценки остаточных напряжений в шейке рельса. Изначально проводилась подготовка отрезка рельса согласно п. 7.14 ГОСТ 51685-2013 [10], после чего проводилось измерение значения напряжений прибором СЭМА по сечению рельса. Затем также согласно п. 7.14 ГОСТ 51685-2013 [10] проводилось прорезание паза, и проведены измерения расхождения головки и подошвы рельса [91]. Результаты измерений сведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 - Результаты измерений расхождения паза и напряжений (СЭМА)

Номер партии	№	Значение расхождения головки и подошвы рельса, мм	Измеренные прибором СЭМА значения напряжений, МПа
К278	1	1,45	-60
	2	1,25	-40
	3	1,15	-35
	4	1,70	-75
К277	1	1,45	-55
	2	1,55	-70
К354	1	1,30	-30
	2	1,60	-45
	3	1,70	-50

Для наглядности результаты прорезания паза также показаны на рисунке 3.13.

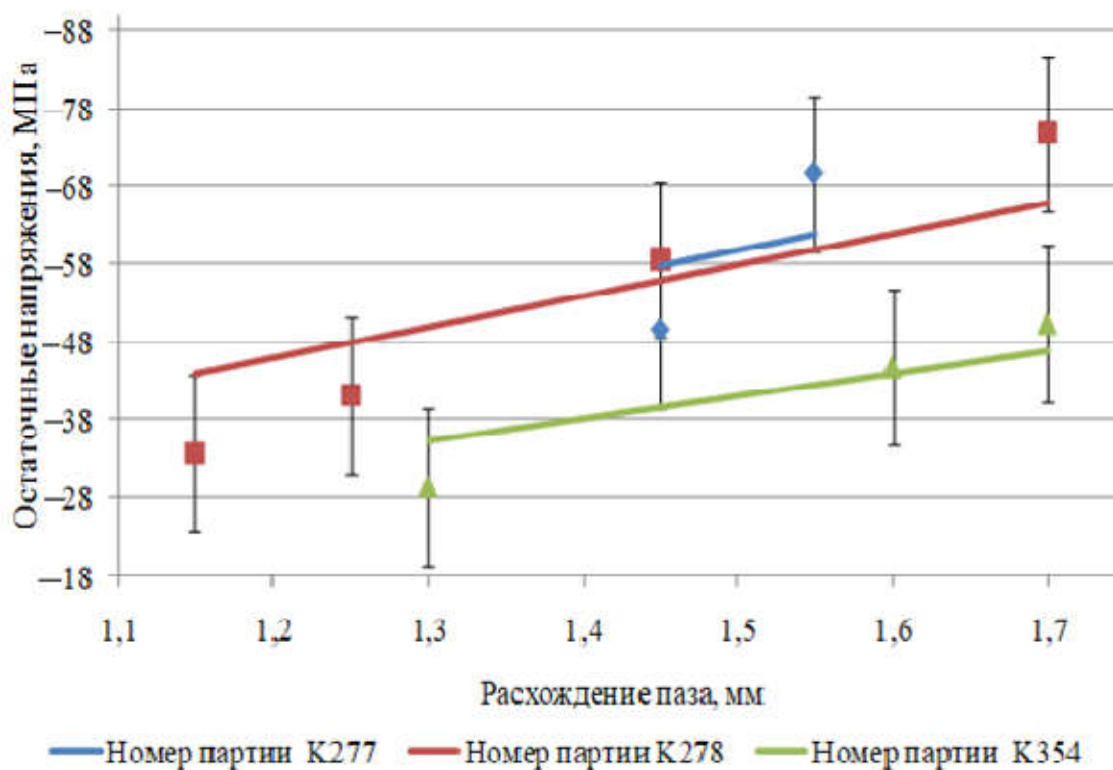


Рисунок 3.13 - Экспериментальная зависимость измеренных напряжений (СЭМА) и расхождение паза рельса

3.8 Экспериментальное исследование зависимости между остаточными напряжениями в подошве рельса и напряжениями по сечению рельса.

Согласно ГОСТ 51685-2013 некоторые метровые отрезки рельсов подверглись исследованию на измерение уровня остаточных напряжений в подошве с применением тензорезистора, после чего полученные значения остаточных напряжений были сопоставлены со значениями напряжений, получаемых при прозвучивании СЭМА [96, 97] со стороны головки рельса в сечении 0 мм (середина рельса). Полученные результаты сведены в таблице 3.10. Погрешность измерений прибором СЭМА составила ± 5 МПа.

Таблица 3.10 - Результаты полученной экспериментальной зависимости между напряжениями

№	Рельс	Напряжения при прозвучивании СЭМА со стороны головки, МПа	Напряжения, полученные при измерении тензорезистором со стороны подошвы, МПа
1	27853 В404	- 20	284
2	25499 А202	- 40	256
3	26442 А403	- 45	268
4	15098 А401 (1)	- 45	265
5	15098 А401 (2)	- 55	261
6	15098 А401 (3)	- 80	248
7	15098 А401 (4)	- 80	227
8	27896 В304	- 85	249
9	22164 В203	- 90	195

График зависимости между напряжениями представлен на рисунке 3.14. Таким образом, достижение критического значения уровня растягивающих остаточных напряжений в подошве происходит при значении минус 50 МПа при прозвучивании прибором СЭМА, что коррелирует с результатами, полученными при моделировании. Таким образом, показания структуроскопа $|\sigma| < 50$ МПа (при прозвучивании сечения рельса) могут свидетельствовать о превышении критического уровня в $\sigma = 250$ МПа (согласно ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия» [10]) остаточных напряжений в подошве [91].

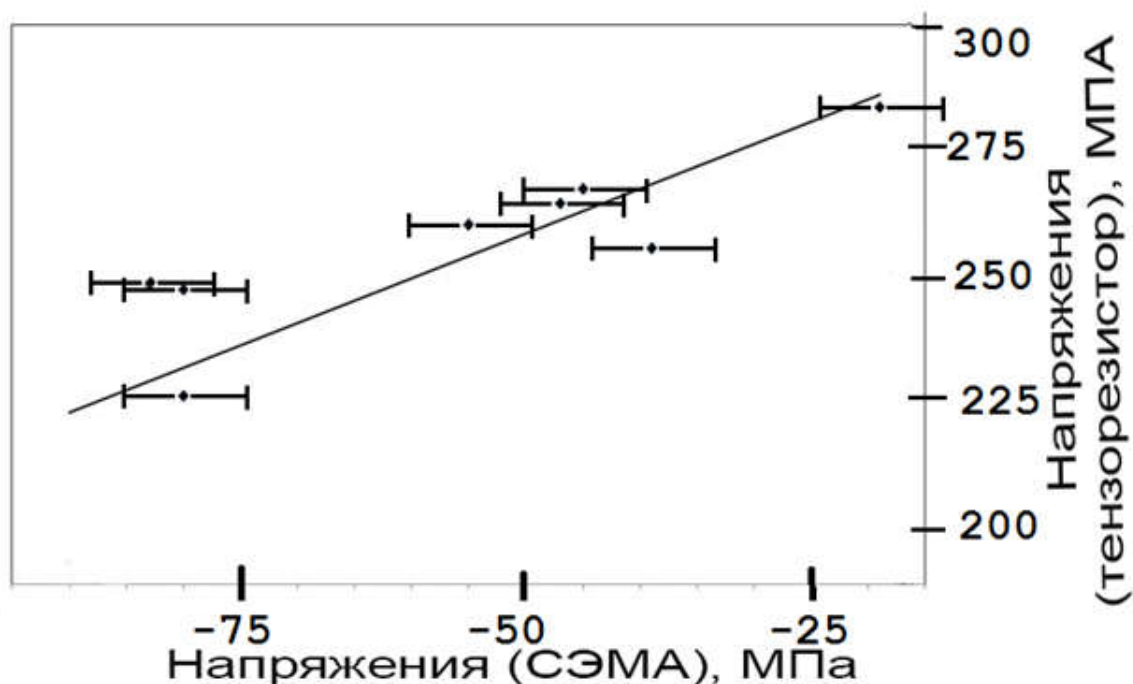


Рисунок 3.14 - Полученная экспериментальная зависимость между напряжениями, измеренными структуроскопом СЭМА и тензорезистивным методом.

Выводы по третьей главе

Данные экспериментального исследования подтверждают результаты математического моделирования напряжённо-деформированного состояния рельсов методом конечных элементов. В целом по напряжениям, полученным с использованием прибора СЭМА, наблюдается корреляция как с параметром расхождения паза, так и с параметром остаточных напряжений в подошве рельса. Однако, как показали результаты экспериментального исследования зависимости расхождения паза от измеренных напряжений рельсов партии К354, обнаруженная линейная зависимость при сохранении тангенса угла наклона может смещаться по оси напряжений. Таким образом, обозначенный метод измерения напряжений не может в полной мере заменить методику, предложенную ГОСТ 51685-2013, но может дополнить для проведения

сплошного контроля, и выявления областей рельса, где была нарушена технология изготовления.

Сопоставление результатов оценки напряжений в подошве рельса и напряжений, полученным с использованием прибора СЭМА показывает превышение критического уровня растягивающих напряжений в поверхностном слое подошвы рельса в 250 МПа (согласно ГОСТ 51685-2013) при $\sigma_{int} > -50$ МПа.

На основе данных, полученных при моделировании в главе 2 и экспериментальном исследовании, описанном в главе 3, разработана методика неразрушающего контроля рельсов, представленная в приложении А.

Глава 4 Моделирование дефекта в головке рельса

4.1 Математическое моделирование НДС рельса с трещиной в головке

Описание модели. Моделирование выполнялось в среде COMSOL Multiphysics [88]. Изучалось напряжённо-деформированное состояние усталостной трещины. Размер трещины был выбран в 2 мм, возможный для обнаружения существующими ультразвуковыми дефектоскопами типа АВИКОН или РДМ [128], широко распространёнными для контроля рельсов ОАО «РЖД» [39, 128]. Местом возникновения трещины выбрано место наибольшей концентрации напряжений при прохождении подвижного состава, под поверхностью катания на глубине 3 мм [104, 117, 129]. Результаты моделирования напряжений при прохождении подвижного состава с максимальной нагрузкой представлены на рисунке 4.1 [130, 131].

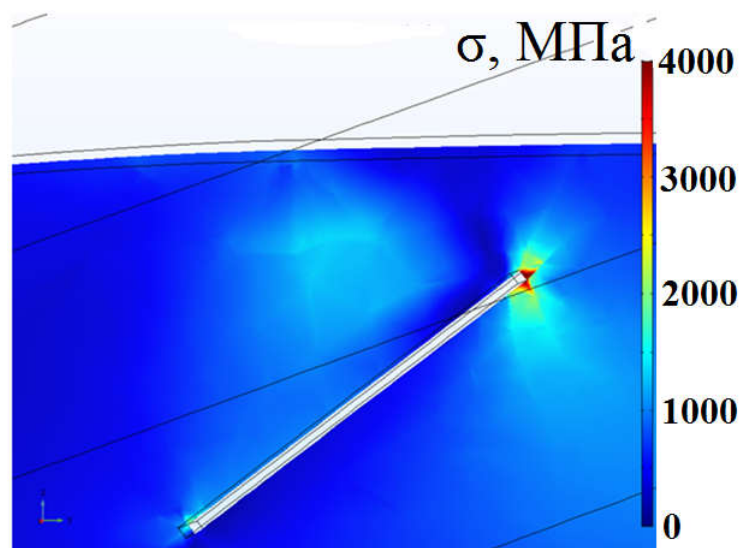


Рисунок 4.1 - Результаты моделирования напряжений при прохождении подвижного состава

На рисунке 4.2 показаны результаты моделирования напряжённо-деформированного состояния рельса с трещиной при отсутствии прохождения подвижного состава, но при наличии остаточных напряжений [130, 131].

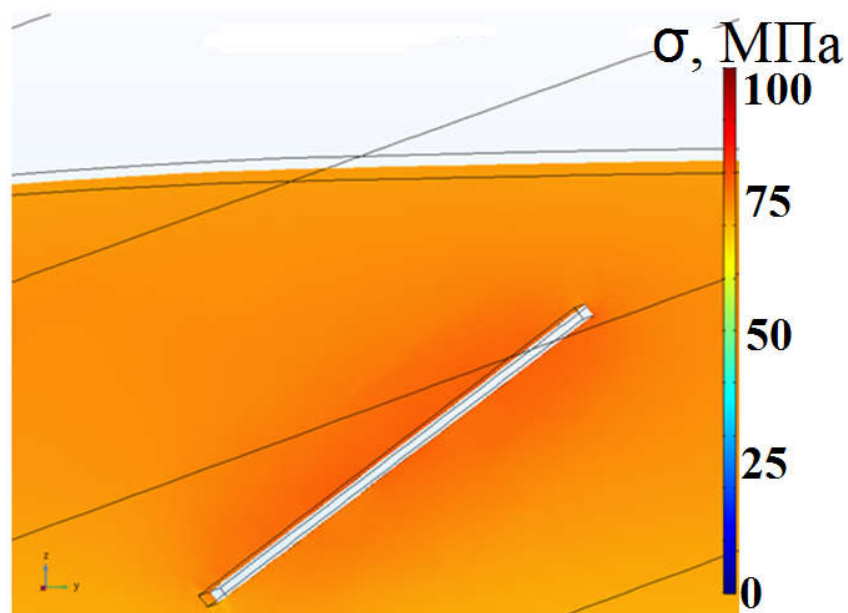


Рисунок 4.2 – Напряжённое состояние при отсутствии подвижного состава и наличии остаточных технологических напряжений

Для проведения анализа значения сведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Смоделированные значения напряжений

	Без нагрузки подвижного состава	С нагрузкой подвижного состава
Максимальные напряжения в рельса по направлению от трещины к вертикальной оси симметрии, МПа	75	700
Максимальные напряжения в остром крае трещины	82	4540
Максимальные напряжения в рельса по направлению от трещины к поверхности, МПа	78	1346

Согласно данным таблицы, в области острой трещины напряжения выше в несколько раз, чем предел текучести (для термоупрочнённых сталей $\sigma_{0,2}=800$ МПа), что будет вызывать быстрый рост трещины. В случае, если трещина

пройдёт через вертикальную ось симметрии рельса, то такой рельс будет отнесён к категории острodefектных и должен быть немедленно заменён.

4.2 Математическое моделирование цикла живучести рельса

Для определения очага зарождения трещины и её роста была создана модель усталостного разрушения в программе COMSOL Multiphysics [88]. Характеристики материала были взяты наименее допустимые согласно ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия» [10] и представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Характеристики рельсовой стали

Параметр	Значение
Предел прочности, МПа	1180
Предел текучести, МПа	800
Удлинение при разрыве, %	8,0
Сужение при разрыве, %	25.0

При расчёте масса грузовой тележки с вагоном и грузом ЦНИИ-ХЗ была принята значением 93 т (максимальная масса брутто для данного типа тележек [4, 120]). Описание прикладываемой нагрузки со стороны подвижного состава, влияние наложения остаточных технологических и температурных напряжений приведено в главе 3 настоящей диссертации. Стоит отметить, что, как правило, ресурс рельса рассчитывает в млн. тонн брутто, в то время как программная среда COMSOL считает количество циклов до разрушения [88]. Для перевода количества циклов в пропущенный тоннаж брутто можно воспользоваться формулой:

$$m(\text{брутто}) = \frac{m_g \cdot N_1 \cdot 4}{n} \quad (4.1)$$

где $m(\text{брутто})$ – пропущенный тоннаж в т., $m_{\text{в}}$ – масса вагона с грузом, т., N_1 – количество циклов нагружения, n – количество колёс вагона, множитель 4 обусловлен двумя факторами. Во-первых, путь является двуниточным, в результате чего пропущенный тоннаж увеличивается в два раза, во-вторых, по каждой нитке пути проходит $n/2$ колёс, однако множитель n находится в знаменателе, и множитель 2 переносится в числитель. При расчёте масса $m_{\text{в}}$ грузовой тележки с вагоном и грузом ЦНИИ-ХЗ была принята значением 93 т (максимальная масса брутто для данного типа тележек [4, 120]). Описание прикладываемой нагрузки со стороны подвижного состава, количество колёс на вагон $n=8$.

Механизм разрушения исследовался по $S-N$ кривой, аппроксимированной согласно данным для стали Э76ХФ из ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия». В таком случае предел прочности составил $\sigma_{\text{в}}=1180$ МПа, предел выносливости $\sigma_{-1}=370$ МПа [10].

При моделировании выбрано стандартное значение количества шпал 2000 шт. на 1 километр пути, значение модуля деформации грунта принято за 70 МПа [120, 132]. Модель представляет собой участок рельса длиной 2 м, при этом крайние шпалы и подошва рельса на них жёстко закреплены. Изгибные моменты, возникающие вследствие наличия продольных напряжений в рельсе (как температурных, так и остаточных технологических), не учитываются.

Размер сетки конечных элементов переменный: вблизи поверхности катания (исследуемая область, отмеченная на рисунке 4.3) размер элементов колеблется от 0,2 мм до 0,5 мм, в остальной области от 1 до 3 мм. Погрешность расчёта модели составляет 5 %. Моделирование выполнялось в программной среде COMSOL Multiphysics.

Результатом расчёта модели выступает расположении трещины при заданном количестве циклов. Одним нагрузочным циклом является прохождение одного колеса. На практике наработка рельса оценивается в млн. тонн брутто. Перерасчёт количества циклов к млн. тонн брутто осуществляется по формуле (4.1).

Далее на рисунках будет приводиться графики развития трещины в области, близкой к области катания. Это связано с тем, что трещина в головке в основном развивается в подповерхностном слое головки рельса [104, 117, 129], что схематично показано на рисунке 4.3.

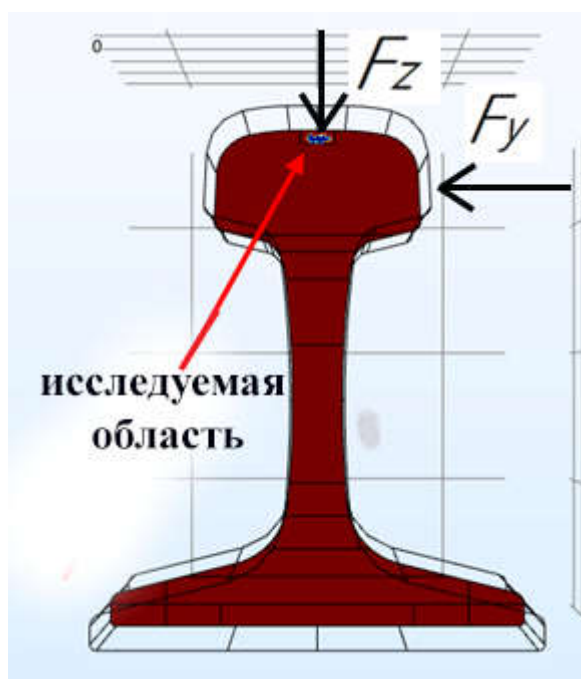


Рисунок 4.3 - Исследуемая область и прикладываемые силы

Для анализа наличия либо отсутствия зависимости между уровнем остаточных технологических напряжений также была создана модель рельса со значениями напряжений по элементам, соответствующим расхождению паза в 2 мм согласно ГОСТ 51685-2013. Таким образом, напряжения в головке, шейке и подошве соответственно составили: минус 77 МПа, минус 125 МПа, 106 МПа [90].

Зарождение трещины происходит при $7,94 \cdot 10^7$ циклов, что равносильно 1846 млн. тонн брутто. Очаг трещины расположен на глубине 3,8 мм, и на расстоянии 1,9 мм от вертикальной оси симметрии рельса, что видно на рисунке 4.4. Также образуется ещё один очаг на глубине 3,9 мм и на расстоянии 0,2 мм от вертикальной оси симметрии рельса.

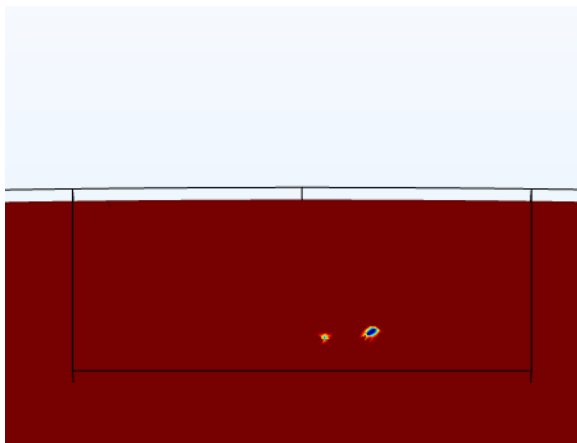


Рисунок 4.4 - Зарождение трещины при наработке 1846 млн. тонн брутто

При $7,95 \cdot 10^7$ циклов, что равносильно 1848 млн. тонн брутто два очага начинают объединяться в одну трещину, размером которой не превышают более 1,5 мм, что показано на рисунке 4.5.

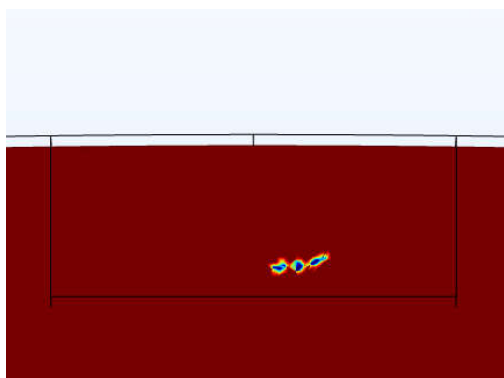


Рисунок 4.5 - Развитие трещины при наработке 1848 млн. тонн брутто

При $8,1 \cdot 10^7$ циклов, что равносильно 1883 млн. тонн брутто трещины в головке сливаются в одну размером порядка 5,1 мм, что соответствует рисунке

4.6. В связи с тем, что данная поперечная трещина, относящаяся к дефекту 21.2 НТД/ЦП-2-93 (каталог дефектов рельса) [38], проходит через центр рельса, то такой рельс относится к категории остродефектных и подлежит дальнейшей замене.

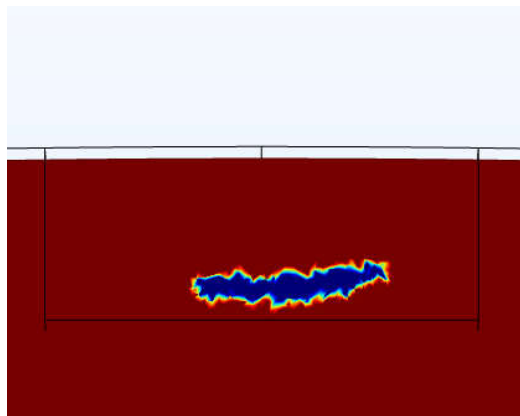


Рисунок 4.6 - Развитие трещины при наработке 1883 млн. тонн брутто

4.3 Анализ разрушения рельса, имеющего уровень напряжений 0,5 от первоначального

Для анализа наличия либо отсутствия зависимости между уровнем остаточных технологических напряжений также была создана модель рельса со значениями напряжений по элементам, не превышающим половины от первоначальных (расхождение паза согласно ГОСТ 51685-2013 менее 2 мм). Таким образом, напряжения в головке, шейке и подошве соответственно составили: минус 38,5 МПа, минус 62,5 МПа, 53 МПа [90].

Зарождение трещины происходит при $8,55 \cdot 10^7$ циклов, что соответствует 1987 млн. тонн брутто, что превышает количество циклов до появления трещины в случае наличия максимально допустимых напряжений. Зарождение трещины происходит на глубине 3,5 мм от поверхности катания, на расстоянии 2,0 мм от вертикальной оси симметрии рельса, что соответствует рисунку 4.7.

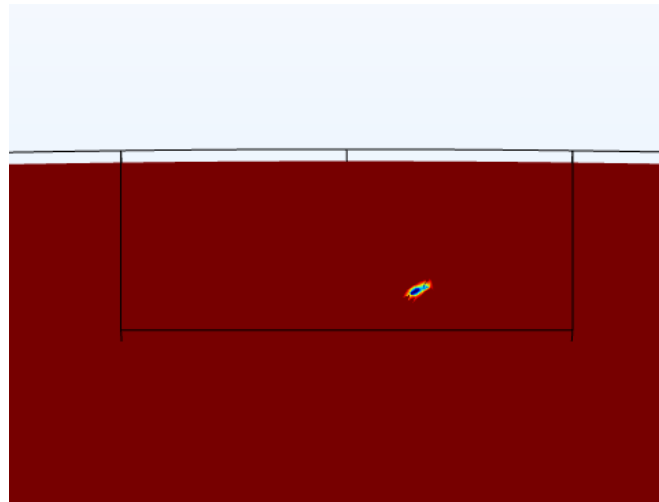


Рисунок 4.7 - зарождение трещины при наработке 1987 млн. тонн брутто при напряжениях 0,5 от первоначальных

Размера в 4 мм трещина достигает при $8,65 \cdot 10^7$ циклов, что соответствует 2011 млн. тонн брутто и показано на рисунке 4.8. В связи с тем, что трещина проходит через середину рельса, согласно НТД/ЦП-2-93 [38] рельс переходит в категорию остродефектных.

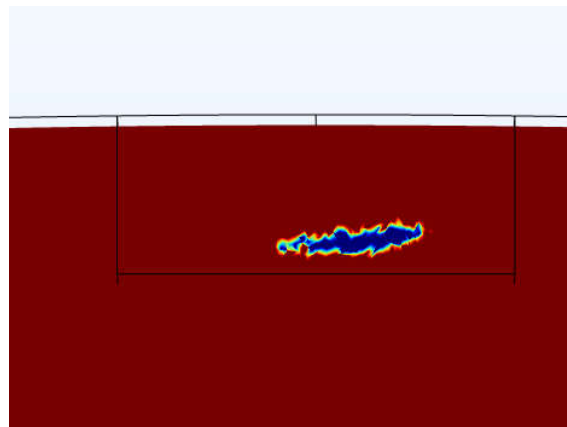


Рисунок 4.8 - Развитие трещины при наработке 2011 млн. тонн брутто при напряжениях 0,5 от первоначальных

Таким образом, уменьшение остаточных технологических напряжений положительным образом сказывается на долговечности рельса до его перехода в остродефектную категорию.

В случае продолжения эксплуатации такого рельса трещина продолжает свой рост, и к моменту $8,7 \cdot 10^7$ циклов, что соответствует 2023 млн. тонн брутто её длина составляет 6 мм (48% ширины контактного пятна поверхности катания), что показано на рисунке 4.9.

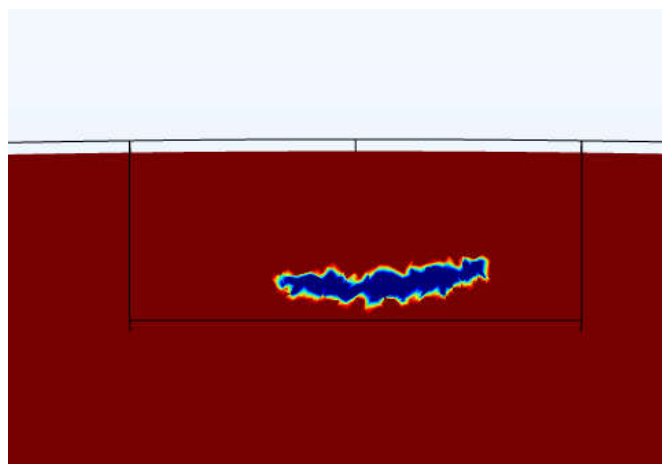


Рисунок 4.9 - Развитие трещины при наработке 2023 млн. тонн брутто при напряжениях 0,5 от первоначальных

При количестве циклов $8,9 \cdot 10^7$, что соответствует 2069 млн. тонн брутто, размер трещины составляет 8 мм, что составляет 65% ширины контактного пятна, что соответствует рисунку 4.10.

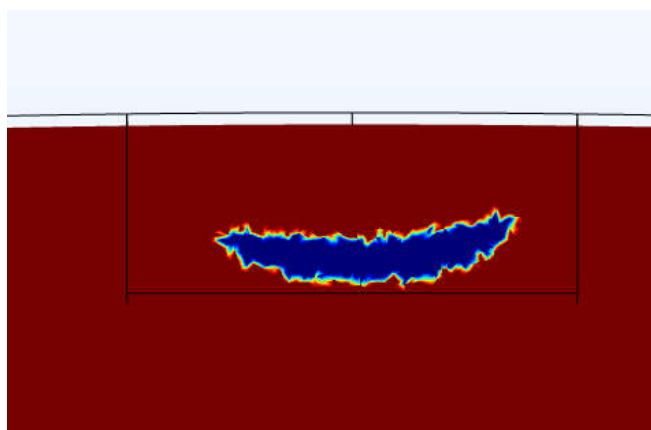


Рисунок 4.10 - Развитие трещины при наработке 2069 млн. тонн брутто при напряжениях 0,5 от первоначальных

4.4 Анализ разрушения рельса, имеющего уровень напряжений 1,5 от первоначальных

Помимо моделей с 50% уровнем остаточных технологических напряжений, для анализа наличия либо отсутствия зависимости была создана модель рельса со значениями напряжений по элементам, превышающим первоначальный уровень в 1,5 раза (расхождение паза согласно ГОСТ 51685-2013 более 2 мм). Таким образом, напряжения в головке, шейке и подошве соответственно составили: минус 115,5 МПа, минус 187,5 МПа, 159 МПа [90].

Зарождение трещины происходит при $7,25 \cdot 10^7$ циклов, что соответствует 1685 млн. тонн брутто, что меньше количества циклов до появления трещины в случае наличия максимально допустимых напряжений. Образуются два очага трещин на глубине 3,5 мм, и расстоянии от вертикальной оси симметрии рельса в 0,6 мм и 1,7 мм соответственно, что соответствует рисунку 4.11.

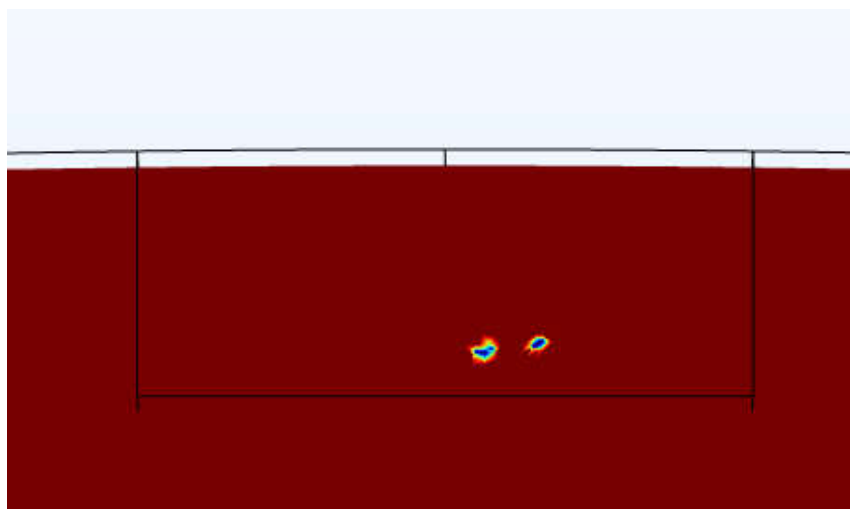


Рисунок 4.11 - Зарождение трещины при наработке 1685 млн. тонн брутто при напряжениях 1,5 от первоначальных

При количестве циклов $7,35 \cdot 10^7$, что соответствует 1709 млн. тонн брутто, общая длина трещины составляет 3,8 мм, также образовавшаяся поперечная трещина проходит через центр рельса, таким образом, такой рельс признаётся острodefектным, что соответствует рисунку 4.12.

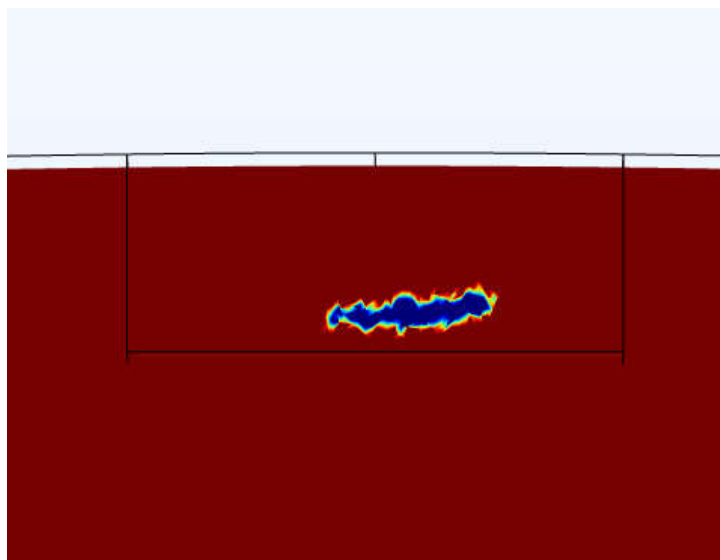


Рисунок 4.12 - Зарождение трещины при наработке 1709 млн. тонн брутто при напряжениях 1,5 от первоначальных

Таким образом, высокий уровень остаточных технологических напряжений отрицательно влияет на долговечность рельса.

4.5 Анализ влияния термических напряжений на развитие трещины в головке рельса

Помимо остаточных технологических напряжений, рельс в пути также подвергается воздействию термических напряжений, влияние которых на напряжённое состояние рельса было рассмотрено в главе 2 настоящей диссертации. В качестве параметра для оценки уровня термических напряжений выбрана разность ΔT между фактической температурой рельса и температурой закрепления рельса в плетть. При $\Delta T=0$ °С цикл разрушения рельса повторяет исследованный цикл разрушения при напряжениях, соответствующих расхождению паза в 2 мм.

4.5.1 Анализ роста трещины в головке рельса при $\Delta T=-50$ °С

При значении $\Delta T=50$ °С возникновение усталостной трещины происходит при количестве циклов $9,54 \cdot 10^7$, что соответствует 2218 млн. тонн брутто, очаг

трещины расположен на расстоянии 3,3 мм от вертикальной оси симметрии рельса и на глубине 3,4 мм от поверхности катания, что показано на рисунке 4.13.

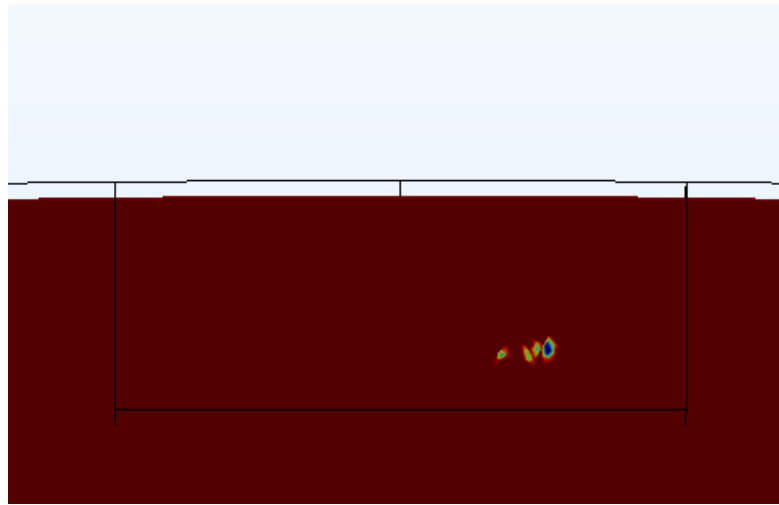


Рисунок 4.13 - Зарождение трещины при наработке 2218 млн. тонн брутто при $\Delta T = -50\text{ }^{\circ}\text{C}$

К количеству циклов $9,55 \cdot 10^7$, что соответствует 2220 млн. тонн брутто, трещина вырастает до размера 1,73 мм, что показано на рисунке 4.14.

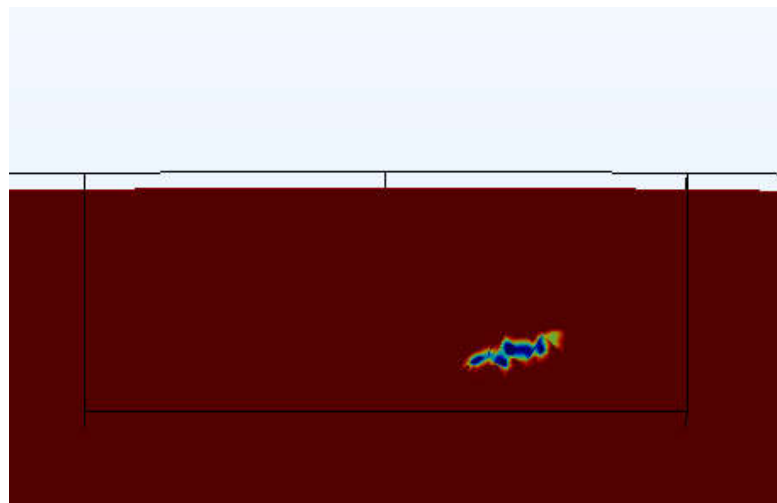


Рисунок 4.14 - Развитие трещины при наработке 2220 млн. тонн брутто при $\Delta T = -50\text{ }^{\circ}\text{C}$

При наработке $9,6 \cdot 10^7$, что соответствует 2232 млн. тонн брутто, размер трещины составляет 2,9 мм, что показано на рисунке 4.15.

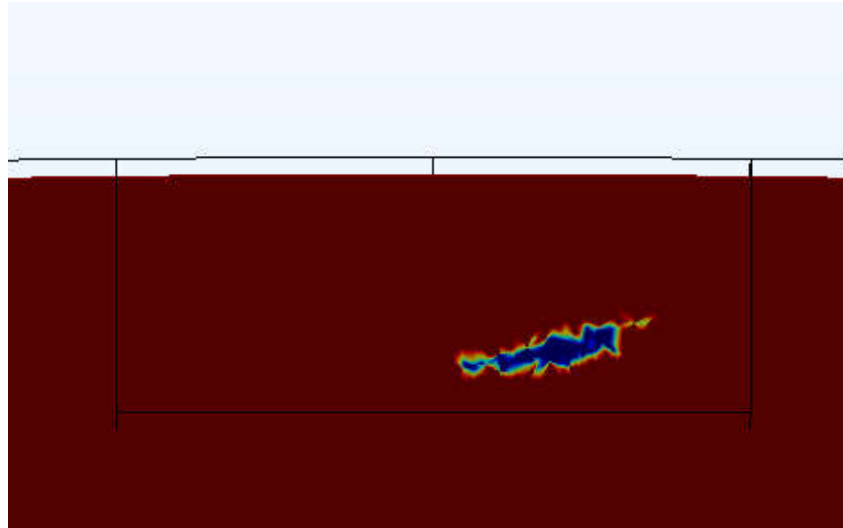


Рисунок 4.15 - Развитие трещины при наработке 2232 млн. тонн брутто при $\Delta T = -50 \text{ }^\circ\text{C}$

При наработке $9,65 \cdot 10^7$, что соответствует 2243 млн. тонн брутто, трещина имеет длину 4,7 мм и проходит через вертикальную ось симметрии рельса, согласно каталогу дефектов рельсов НТД/ЦП-2-93 [38] такой рельс признаётся остродефектным. Местоположение трещины показано на рисунке 4.16.

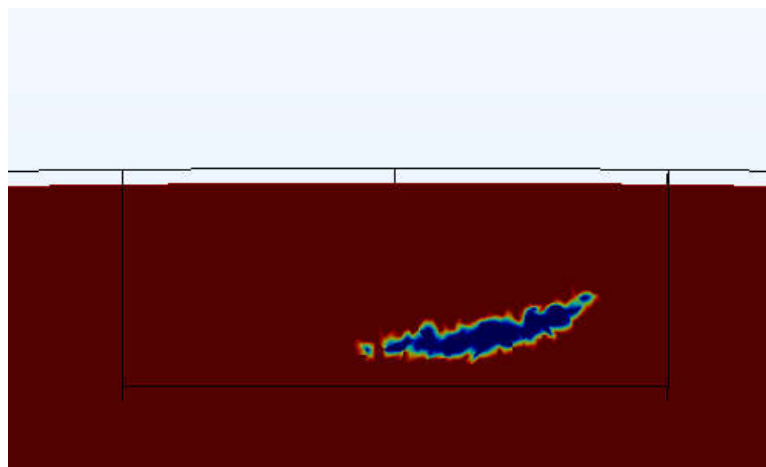


Рисунок 4.16 - Развитие трещины при наработке 2243 млн. тонн брутто при $\Delta T = -50 \text{ }^\circ\text{C}$

4.5.2 Анализ роста трещины в головке рельса при $\Delta T = -25^\circ\text{C}$

При значении $\Delta T = -25^\circ\text{C}$ возникновение усталостной трещины происходит при количестве циклов $8,87 \cdot 10^7$, что соответствует 2062 млн. тонн брутто, очаг трещины расположен на расстоянии 0,51 мм от вертикальной оси симметрии рельса и на глубине 3,6 мм от поверхности катания, что показано на рисунке 4.17.

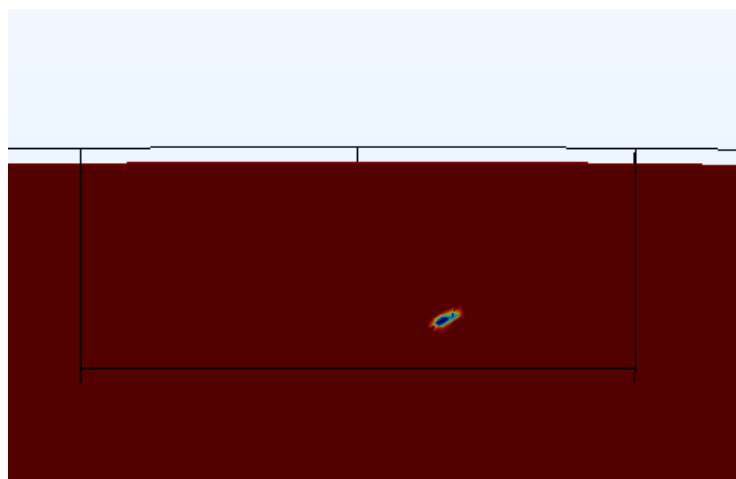


Рисунок 4.17 – Зарождение трещины при наработке 2062 млн. тонн брутто при $\Delta T = -25^\circ\text{C}$

К количеству циклов $8,9 \cdot 10^7$, что соответствует 2069 млн. тонн брутто, трещина вырастает до размера 2,2 мм, что показано на рисунке 4.18.

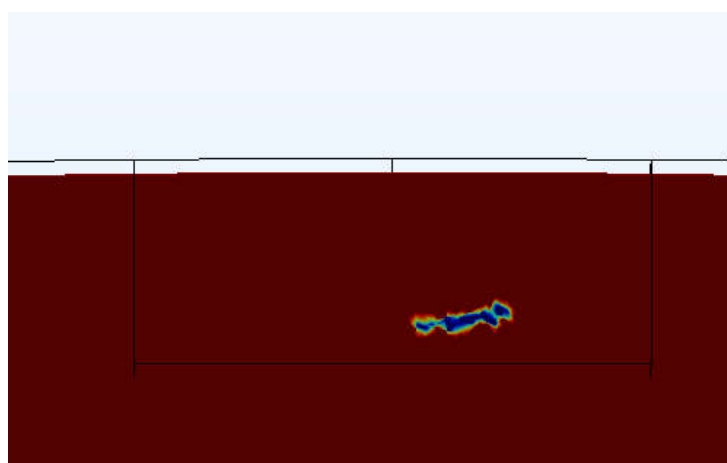


Рисунок 4.18 - Развитие трещины при наработке 2069 млн. тонн брутто при $\Delta T = -25^\circ\text{C}$

При наработке $8,95 \cdot 10^7$, что соответствует 2080 млн. тонн брутто, размер трещины составляет 3,6 мм, что показано на рисунке 4.19. Из-за пересечения вертикальной оси симметрии рельса трещиной такой рельс признаётся остродефектным.

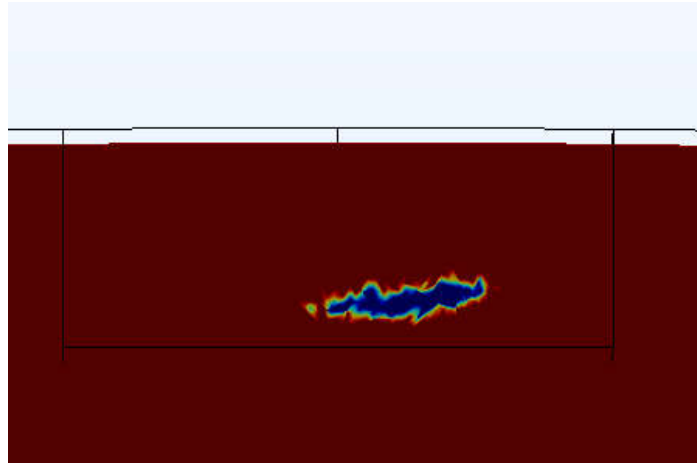


Рисунок 4.19 - Развитие трещины при наработке 2080 млн. тонн брутто при $\Delta T = -25 \text{ }^\circ\text{C}$

При наработке $9 \cdot 10^7$, что соответствует 2092 млн. тонн брутто, трещина имеет длину 5 мм, что показано на рисунке 4.20.

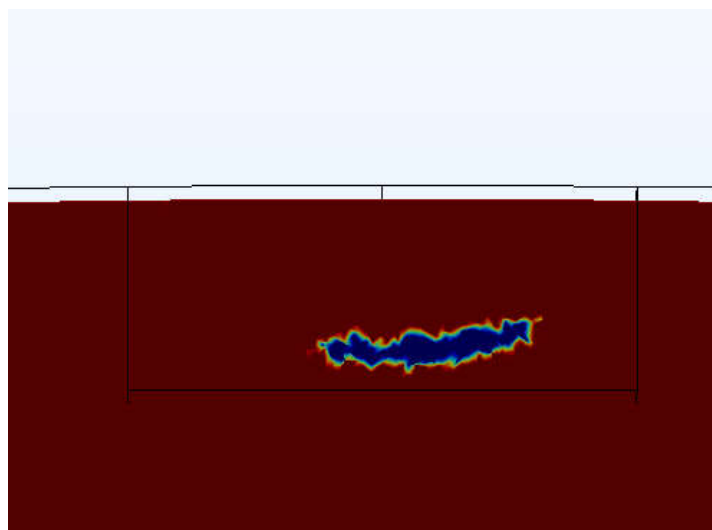


Рисунок 4.20 - Развитие трещины при наработке 2092 млн. тонн брутто при $\Delta T = -25 \text{ }^\circ\text{C}$

4.5.3 Анализ роста трещины в головке рельса при $\Delta T=+25$ °С

При значении $\Delta T=+25$ °С возникновение усталостной трещины происходит при количестве циклов $6,78 \cdot 10^7$, что соответствует 1576 млн. тонн брутто, очаг трещины расположен на расстоянии 0,61 мм от вертикальной оси симметрии рельса и на глубине 3,8 мм от поверхности катания, что показано на рисунке 4.21.

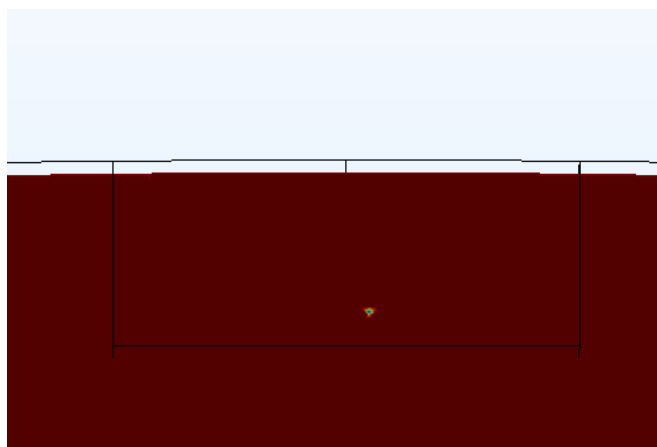


Рисунок 4.21 - Зарождение трещины при наработке 1576 млн. тонн брутто при $\Delta T=+25$ °С

К количеству циклов $6,8 \cdot 10^7$, что соответствует 1581 млн. тонн брутто, трещина достигает длины 1,5 мм, что показано на рисунке 4.22.

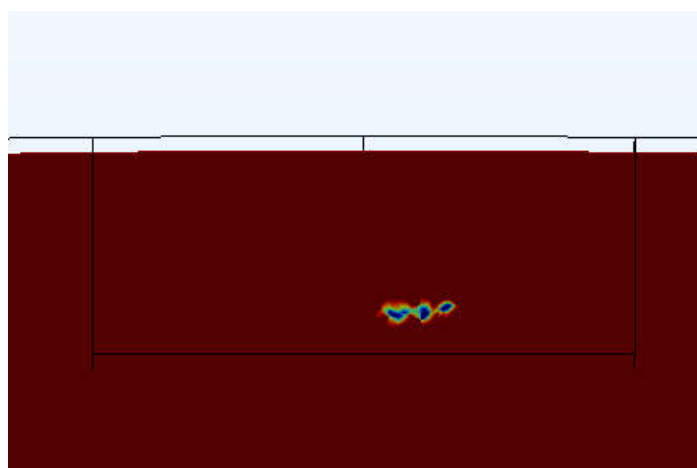


Рисунок 4.22 - Развитие трещины при наработке 1581 млн. тонн брутто при $\Delta T=+25$ °С

При наработке $6,85 \cdot 10^7$, что соответствует 1592 млн. тонн брутто, размер трещины составляет 2,7 мм, и проходит через вертикальную ось симметрии рельса, согласно каталогу дефектов рельсов НТД/ЦП-2-93 [38] такой рельс признаётся остродефектным. Местоположение трещины показано на рисунке 4.23.

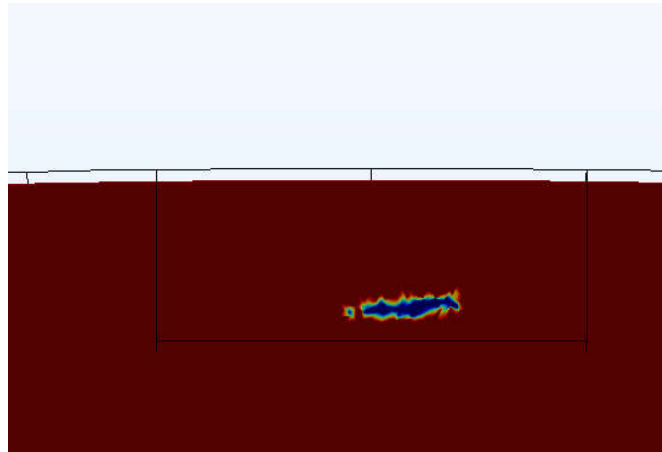


Рисунок 4.23 - Развитие трещины при наработке 1592 млн. тонн брутто при $\Delta T = +25$ °С

При наработке $6,9 \cdot 10^7$, что соответствует 1604 млн. тонн брутто, трещина имеет длину 4,2 мм. Местоположение трещины показано на рисунке 4.24.

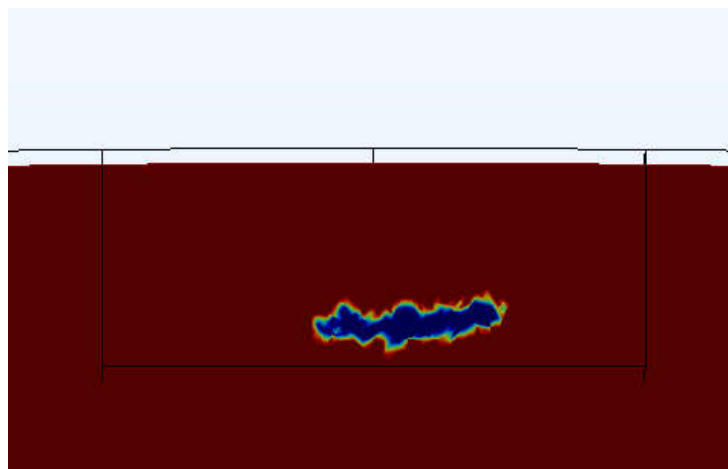


Рисунок 4.24 - Развитие трещины при наработке 1604 млн. тонн брутто при $\Delta T = +25$ °С

4.5.4 Анализ роста трещины в головке рельса при $\Delta T=+50$ °С

При значении $\Delta T=+50$ °С возникновение усталостной трещины происходит при количестве циклов $5,43 \cdot 10^7$, что соответствует 1262 млн. тонн брутто, очаг трещины расположен на расстоянии 0,82 мм от вертикальной оси симметрии рельса и на глубине 3,8 мм от поверхности катания, что показано на рисунке 4.25.

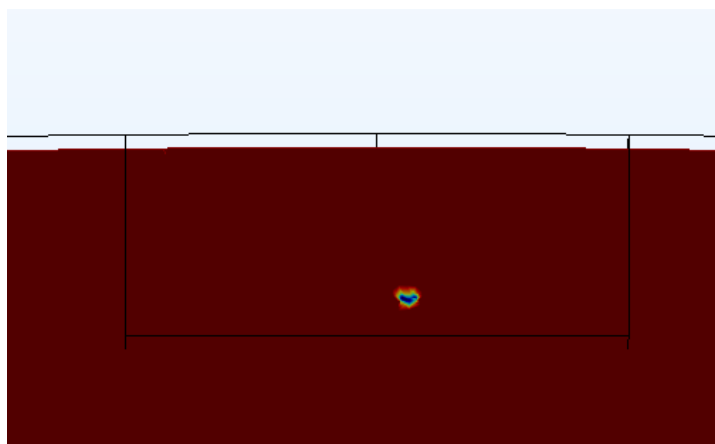


Рисунок 4.25 - Зарождение трещины при наработке 1262 млн. тонн брутто при $\Delta T=+50$ °С

К количеству циклов $5,45 \cdot 10^7$, что соответствует 1267 млн. тонн брутто, трещина достигает длины 1,8 мм, что показано на рисунке 4.26.

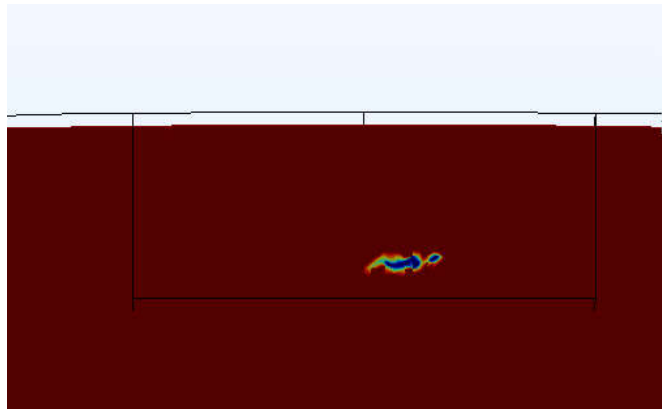


Рисунок 4.26 - Развитие трещины при наработке 1267 млн. тонн брутто при $\Delta T = +50\text{ }^{\circ}\text{C}$

При наработке $5,48 \cdot 10^7$, что соответствует 1274 млн. тонн брутто, размер трещины составляет 2,4 мм, и проходит через вертикальную ось симметрии рельса, согласно каталогу дефектов рельсов НТД/ЦП-2-93 [38] такой рельс признаётся остродефектным. Местоположение трещины показано на рисунке 4.27.

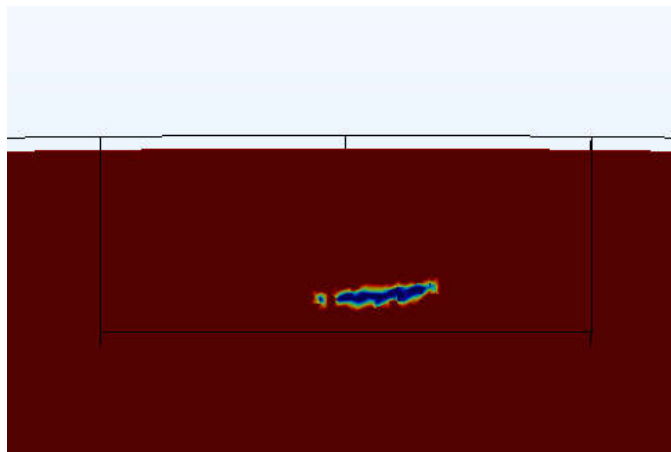


Рисунок 4.27 - Развитие трещины при наработке 1274 млн. тонн брутто при $\Delta T = +50\text{ }^{\circ}\text{C}$

При наработке $5,55 \cdot 10^7$, что соответствует 1290 млн. тонн брутто, трещина имеет длину 4,1 мм. Местоположение трещины показано на рисунке 4.28.

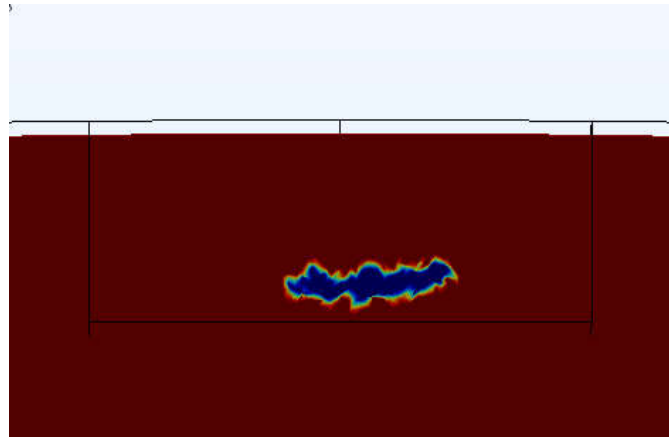


Рисунок 4.28 - Развитие трещины при наработке 1290 млн. тонн брутто при $\Delta T = +50$ °С

4.6 Анализ разрушения рельса, имеющего дефект в виде трещины в головке рельса

Во время производства рельса возможно появление трещин (дефект 10.2 согласно каталогу дефектов рельса НТД/ЦП-2-93 [38]). Для анализа влияния такой трещины на долговечность рельса в модель была добавлена трещина по центру поверхности катания, раскрытием 0,1 мм [133] и длиной 9,5 мм (по длине контактной плоскости колесо-рельс [123]). Уровень остаточных технологических напряжений выбран соответствующим расхождению паза в 2 мм: -77 МПа в головке рельса, -125 МПа в шейке рельса и 106 МПа в подошве рельса.

4.6.1 Влияние трещины глубиной 0,5 мм, расположенная в центре центра поверхности катания

Рост трещины от нижнего её края начинается при $4 \cdot 10^4$ циклов, что соответствует 0,93 млн. тонн брутто. При этом нижний край трещины начинает распространяться в сторону поверхности катания, что приведёт к дальнейшему выкрашиванию, что соответствует рисунку 4.29.

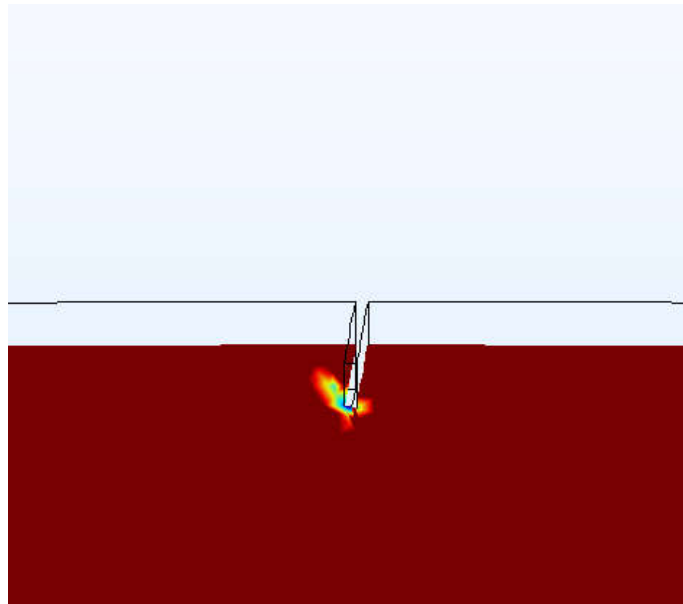


Рисунок 4.29 - Развитие трещины при наработке 0,93 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 0,5 мм

К моменту $8,5 \cdot 10^4$ (1,98 млн. тонн брутто) раскрытие трещины увеличивается до 0,16 мм, что соответствует рисунку 4.30. Трещина также растёт вглубь головки рельса.

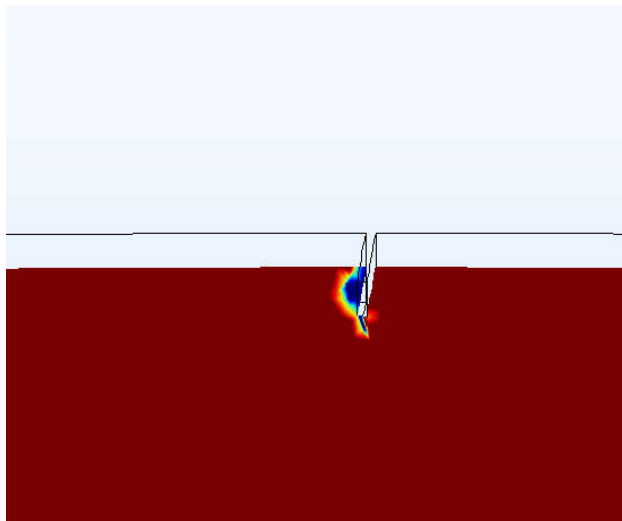


Рисунок 4.30 - Развитие трещины при наработке 1,98 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 0,5 мм

При наработке $1 \cdot 10^5$ (2,33 млн. тонн брутто) на поверхности катания появляется выкрашивание шириной 0,4 мм, что соответствует рисунку 4.31.

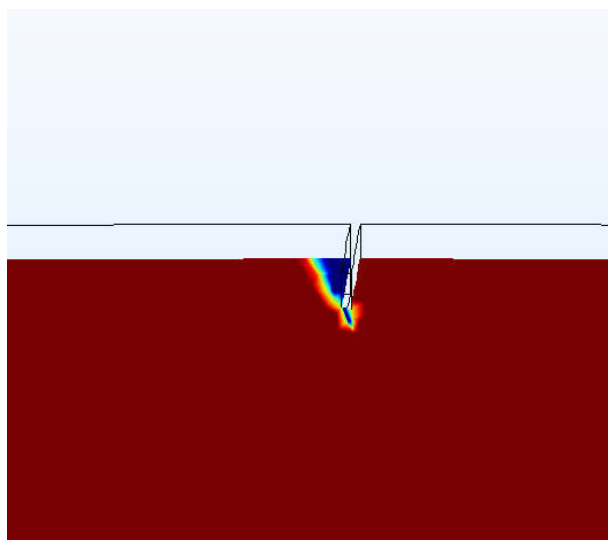


Рисунок 4.31 - Развитие трещины при наработке 2,33 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 0,5 мм

При достижении $5 \cdot 10^5$ циклов (11,6 млн. тонн брутто) ширина области выкрашивания увеличивается до 0,55 мм, что соответствует рисунку 4.32.

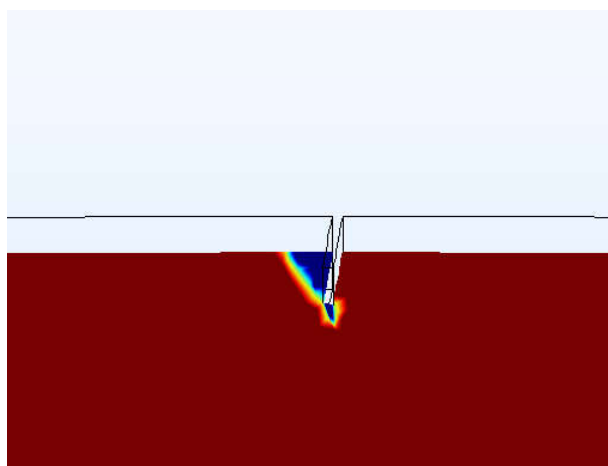


Рисунок 4.32 - Развитие трещины при наработке 11,6 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 0,5 мм

При наработке $3 \cdot 10^7$ циклов (697,5 млн. тонн брутто) ширина области выкрашивания составит 0,77 мм, что соответствует рисунку 4.33. На этом рост области выкрашивания заканчивается. Для дефекта 10.2 согласно НТД/ЦП-2-93

[38] данный размер меньше максимального допустимого в 3 мм, поэтому рельс не относится к дефектным.

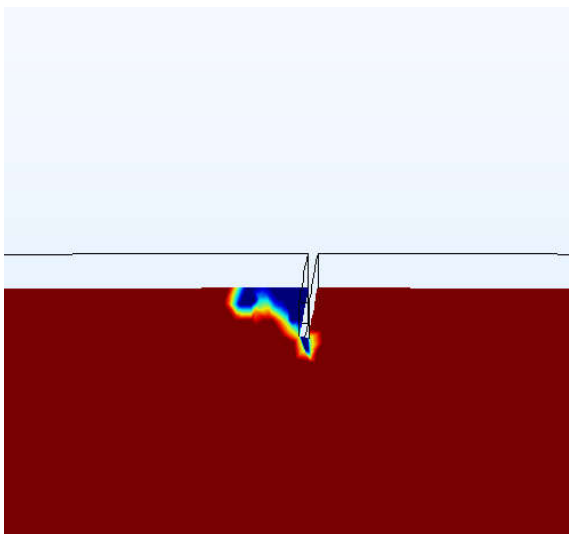


Рисунок 4.33 - Развитие трещины при наработке 697,5 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 0,5 мм

При количестве циклов $7,9 \cdot 10^7$ (1836 млн. тонн брутто) на глубине 3,7 мм от поверхности катания и на расстоянии 0,54 мм от вертикальной оси симметрии рельса образуется новая трещина, что соответствует рисунку 4.34.

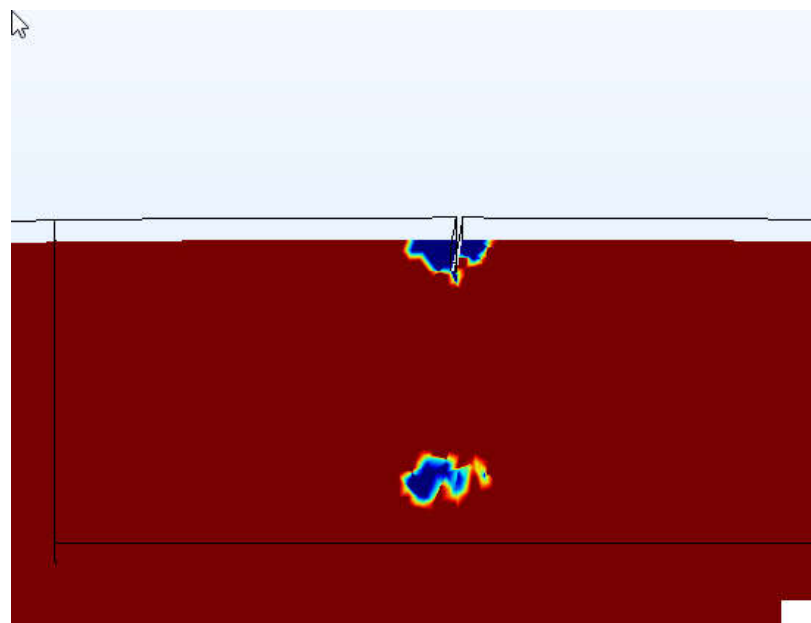


Рисунок 4.34 - Развитие трещины при наработке 1836 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 0,5 мм

При наработке $7,95 \cdot 10^7$ (1883 млн. тонн брутто) трещина под поверхностью катания достигает длины 1,4 мм, и проходит через вертикальную ось симметрии рельса, что является недопустимым для дефекта 21.2 из каталога НТД/ЦП-2-93 [38], рельс относится к категории остродефектных. Развитие отображено на рисунке 4.35.

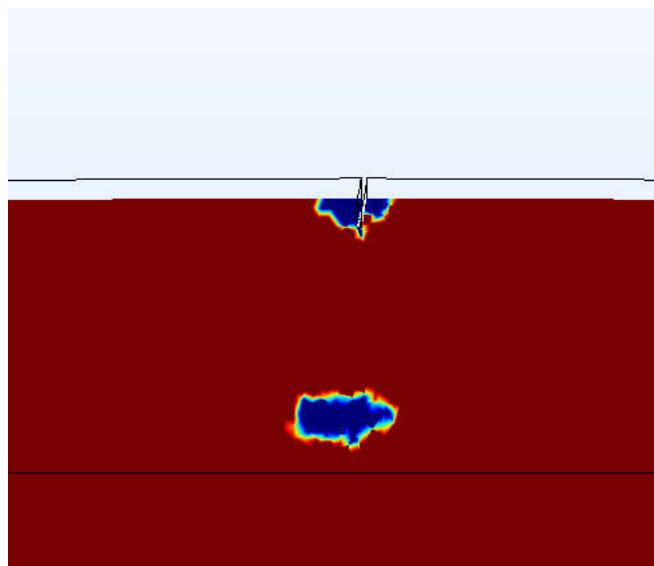


Рисунок 4.35 - Развитие трещины при наработке 1883 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 0,5 мм

При наработке $8,2 \cdot 10^7$ (1906 млн. тонн брутто) длина трещины достигает 3,1 мм, при этом ширина области выкрашивания также остаётся на уровне 0,77 мм, что соответствует рисунку 4.36.

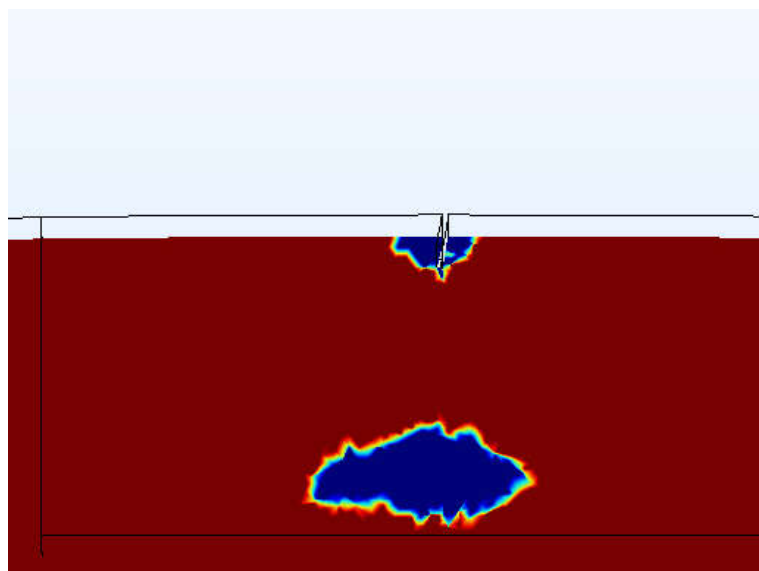


Рисунок 4.36 - Развитие трещины при наработке 1906 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 0,5 мм

4.6.2 Влияние трещины глубиной 1 мм, расположенная в центре центра поверхности катания.

Рост трещины раскрытием 0,1 мм [133] и глубиной 1 мм от нижнего её края начинается при $4 \cdot 10^4$ циклов, что соответствует 0,93 млн. тонн брутто. При этом нижний край трещины начинает распространяться в сторону поверхности катания, что приведёт к дальнейшему выкрашиванию, что соответствует рисунку 4.37.

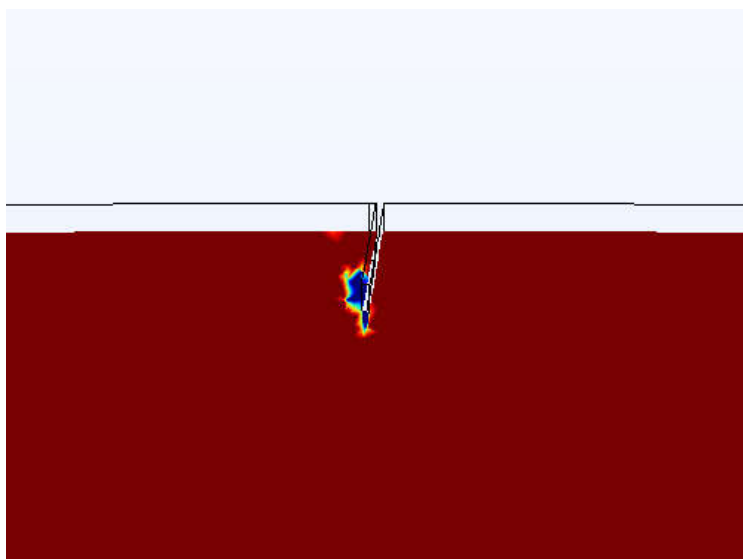


Рисунок 4.37 - Развитие трещины при наработке 0,93 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 1 мм

К моменту достижения количества циклов $1 \cdot 10^5$ (2,33 млн. тонн брутто) происходит выкрашивание на ширину 0,7 мм, что соответствует рисунку 4.38.



Рисунок 4.38 - Развитие трещины при наработке 2,33 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 1 мм

При наработке $1,5 \cdot 10^5$ циклов (3,49 млн. тонн брутто) ширина области выкрашивания составляет 0,9 мм, что соответствует рисунку 4.39.

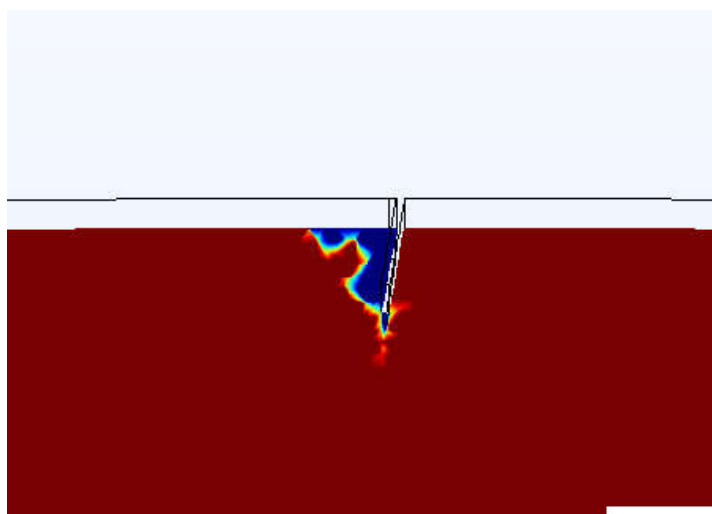


Рисунок 4.39 - Развитие трещины при наработке 3,49 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 1 мм

К моменту наработки $1 \cdot 10^7$ (232,5 млн. тонн брутто) ширина области выкрашивания вырастает до 1,4 мм, что соответствует рисунку 4.40.

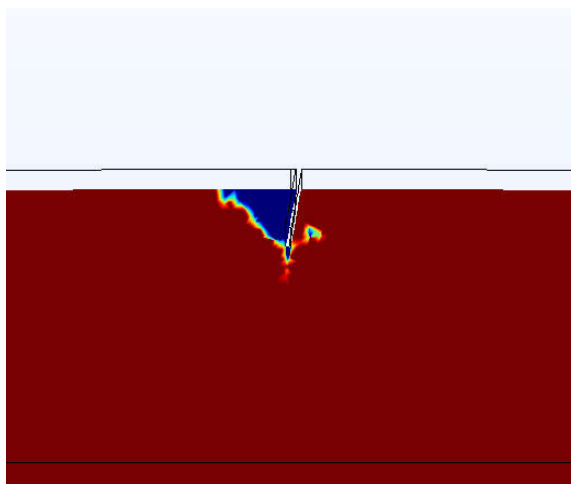


Рисунок 4.40 - Развитие трещины при наработке 232,5 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 1 мм

При наработке $6,5 \cdot 10^7$ (1511 млн. тонн брутто) ширина области выкрашивания вырастает на 0,56 мм до 1,96 мм. При этом на глубине 2,5-3,5 мм под поверхностью катания появляется трещина, проходящая через вертикальную ось симметрии рельса, что соответствует рисунку 4.41.

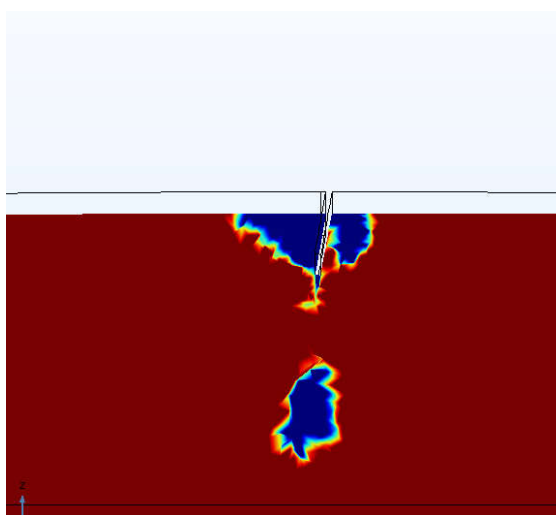


Рисунок 4.41 - Развитие трещины при наработке 1511 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 1 мм

Для дефекта 10.2 согласно НТД/ЦП-2-93 [38] ширина области выкрашивания меньше максимального допустимого в 3 мм, поэтому рельс не относится к дефектным по данному критерию, однако рельс начинает относиться

к категории остродефектных по дефекту 21.2 – поперечная трещина, проходящая через вертикальную ось симметрии рельса.

К моменту наработки $7,5 \cdot 10^7$ (1743 млн. тонн брутто) трещина развивается на глубину до 5 мм от поверхности катания, а также соединяется с областью выкрашивания, что соответствует рисунку 4.42.

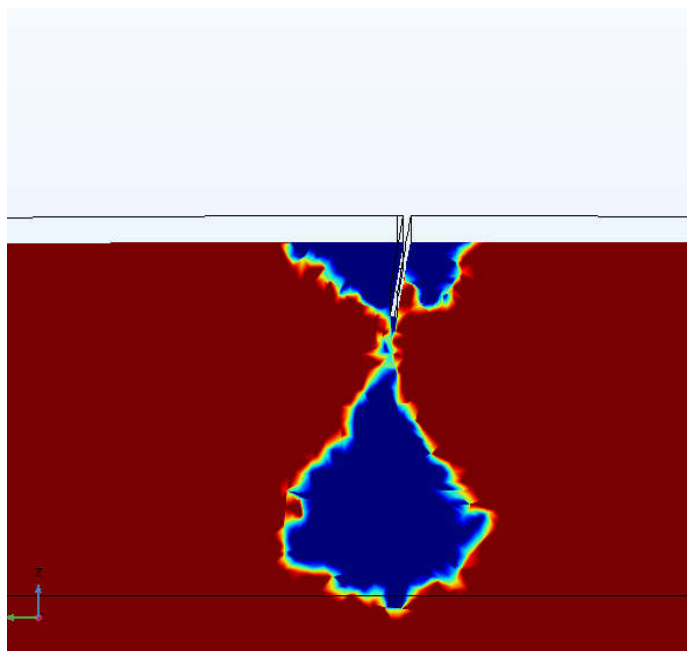


Рисунок 4.42 - Развитие трещины при наработке 1743 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 1 мм

4.6.3 Влияние трещины глубиной 2 мм, расположенная в центре центра поверхности катания

Рост трещины раскрытием 0,1 мм и глубиной 2 мм от нижнего её края начинается при $1 \cdot 10^4$ циклов, что соответствует 0,23 млн. тонн брутто. При этом нижний край трещины начинает распространяться в сторону поверхности катания, что приведёт к дальнейшему выкрашиванию, что соответствует рисунку 4.43.

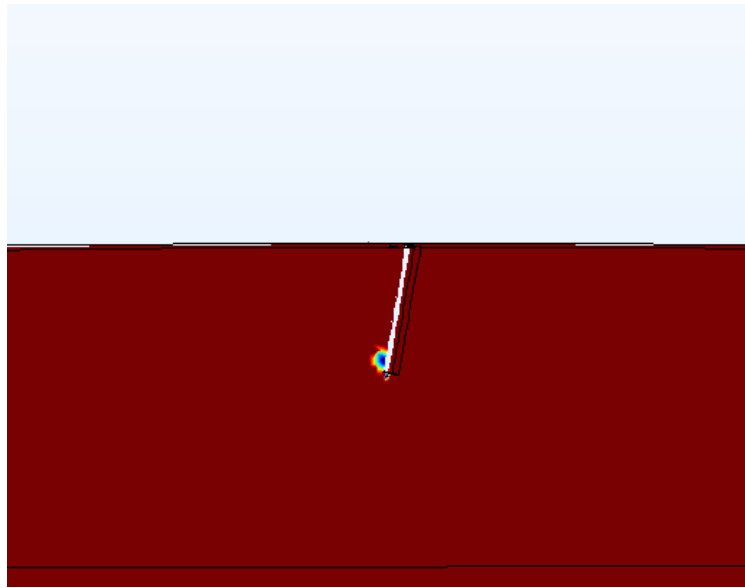


Рисунок 4.43 - Развитие трещины при наработке 0,23 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 2 мм

При наработке $5 \cdot 10^4$ (1,16 млн. тонн брутто) появляется новый очаг трещины на поверхности катания, что соответствует рисунку 4.44.

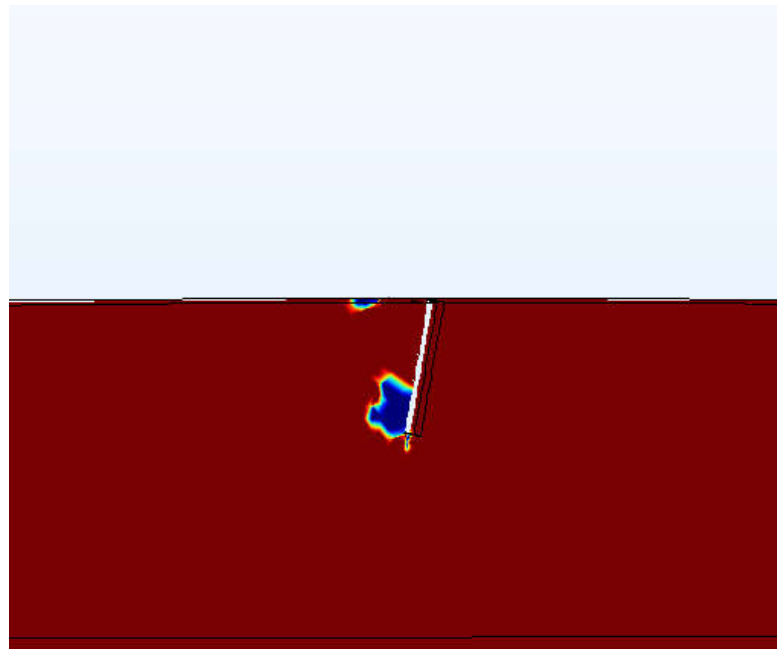


Рисунок 4.44 - Развитие трещины при наработке 1,16 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 2 мм

К моменту наработки $1 \cdot 10^5$ (2,32 млн. тонн брутто) трещины сливаются и происходит выкрашивание на ширину 1,8 мм, что соответствует рисунку 4.45.

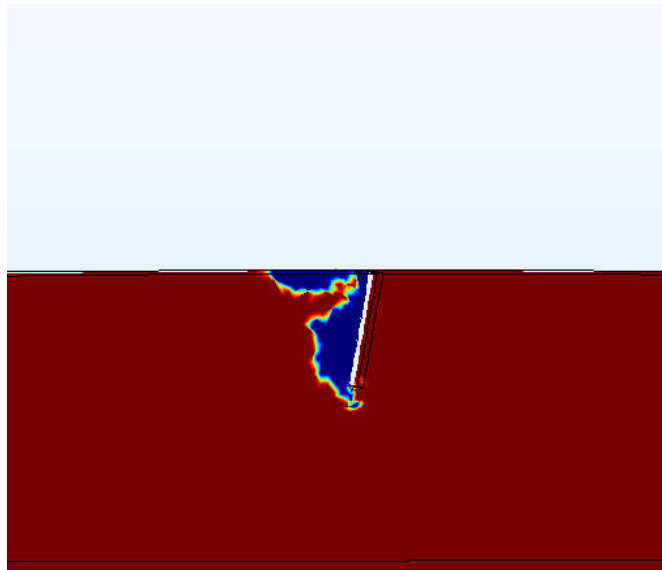


Рисунок 4.45 - Развитие трещины при наработке 2,32 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 2 мм

При наработке рельса $1 \cdot 10^6$ (23,3 млн. тонн брутто) начинается рост трещины вглубь головки рельса. Ширина области выкрашивания остаётся прежней: 1,8 мм, что соответствует рисунку 4.46.

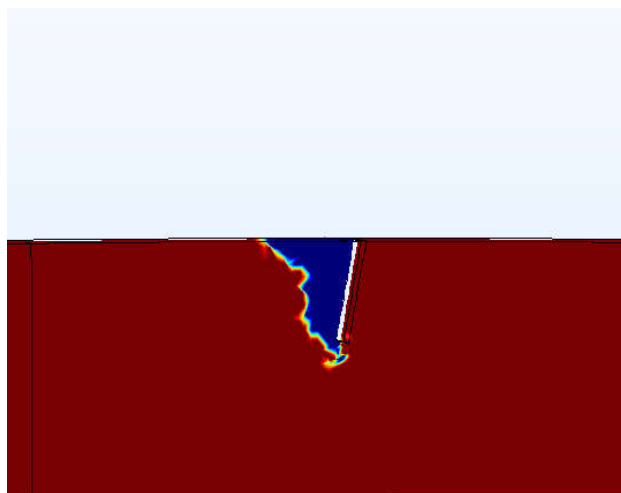


Рисунок 4.46 - Развитие трещины при наработке 23,3 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 2 мм

При достижении количества циклов $1 \cdot 10^7$ (232,5 млн. тонн брутто) ширина области выкрашивания вырастает до 2,2 мм, что соответствует рисунку 4.47.

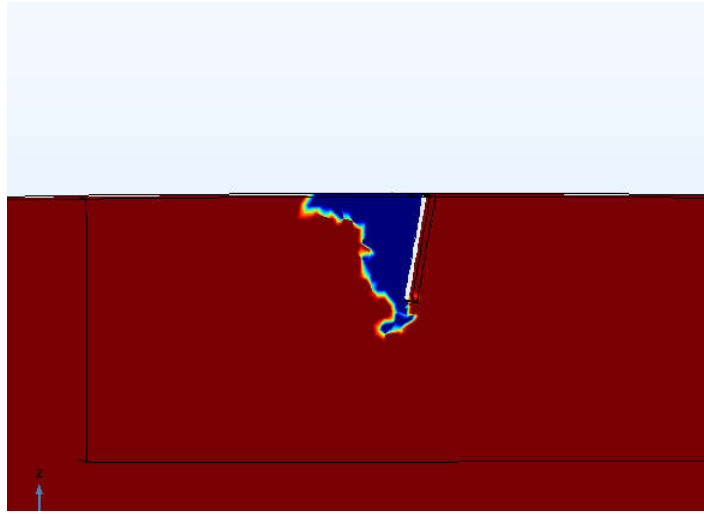


Рисунок 4.47 - Развитие трещины при наработке 232,5 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 2 мм

При достижении наработки $3 \cdot 10^7$ циклов (697,5 млн. тонн брутто) ширина области выкрашивания достигает 3,5 мм. Для дефекта 10.2 согласно НТД/ЦП-2-93 [38] данный размер превышает максимального допустимый в 3 мм, рельс переходит в категорию дефектных, что соответствует рисунку 4.48.



Рисунок 4.48 - Развитие трещины при наработке 697,5 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 2 мм

При наработке $5 \cdot 10^7$ циклов (1162 млн. тонн брутто) появляются очаги выкрашивания с противоположной стороны трещины, при этом сама трещина распространяется на глубину 4,5 мм от поверхности катания. Также трещина начинает проходить через вертикальную ось симметрии рельса, что согласно НТД/ЦП-2-93 [38] позволяет отнести рельс к остродефектной категории. Развитие трещины показано на рисунке 4.49.

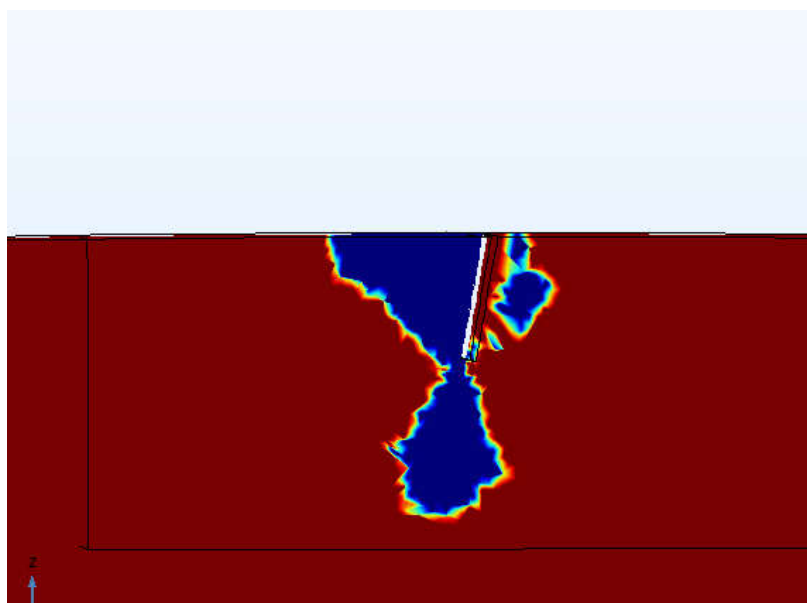


Рисунок 4.49 - Развитие трещины при наработке 1162 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 2 мм

При наработке $7 \cdot 10^7$ циклов (1627 млн. тонн брутто) ширина выкрашивания увеличивается до 4 мм, трещина распространяется на глубину до 5,5 мм от поверхности катания, что соответствует рисунку 4.50.

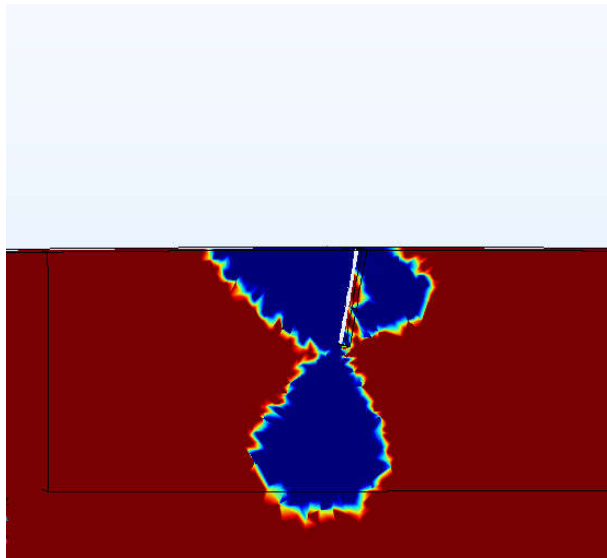


Рисунок 4.50 - Развитие трещины при наработке 1627 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 2 мм

4.6.4 Влияние трещины глубиной 3 мм, расположенная в центре центра поверхности катания

Рост трещины от нижнего её края начинается при $1 \cdot 10^4$ циклов, что соответствует 0,23 млн. тонн брутто. При этом нижний край трещины начинает распространяться в сторону поверхности катания, что приведёт к дальнейшему выкрашиванию, что соответствует рисунку 4.51.

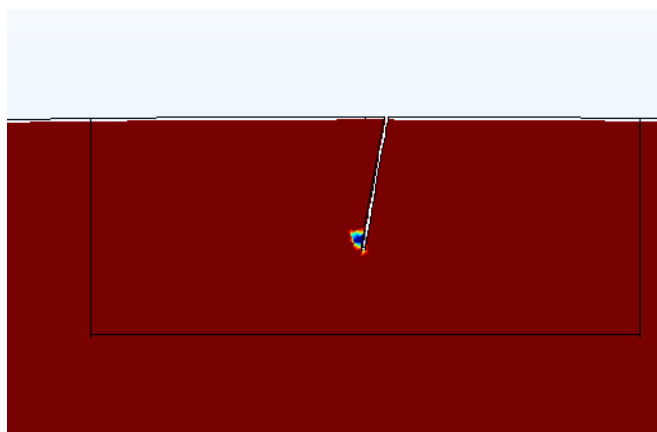


Рисунок 4.51 - Развитие трещины при наработке 0,23 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 3 мм

При наработке $8 \cdot 10^4$ циклов (1,86 млн. тонн брутто) ширина области выкрашивания составляет 1,5 мм, при этом выкрашивание начинается от нового очага трещины, возникшего на поверхности, что соответствует рисунку 4.52.

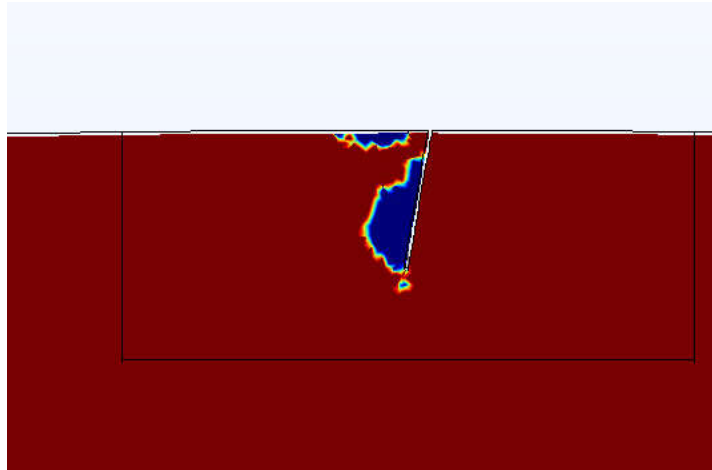


Рисунок 4.52 - Развитие трещины при наработке 1,86 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 3 мм

При достижении количества циклов $9 \cdot 10^4$ (2,1 млн. тонн брутто) трещины объединяются, ширина области выкрашивания составляет 1,65 мм, что соответствует рисунку 4.53.



Рисунок 4.53 - Развитие трещины при наработке 2,1 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 3 мм

При наработке $2 \cdot 10^7$ (465 млн. тонн брутто) ширина области выкрашивания составляет 3 мм (рисунок). При этом появляется ещё один очаг зарождения поверхностной трещины на расстоянии 0,5 мм от поверхности катания, что соответствует рисунку 4.54.

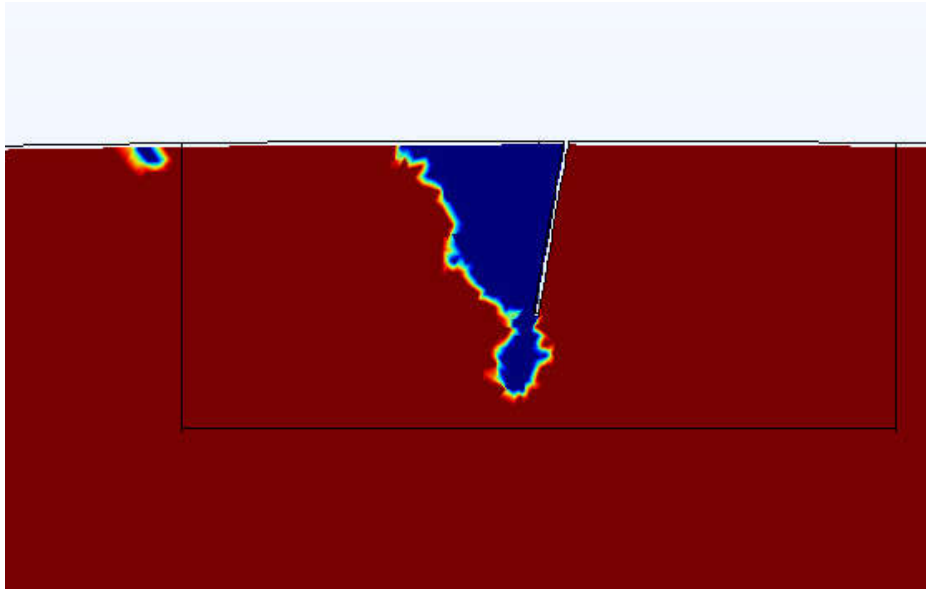


Рисунок 4.54 - Развитие трещины при наработке 465 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 3 мм

Для дефекта 10.2 согласно НТД/ЦП-2-93 [38] ширина выкрашивания начинает превышать максимального допустимый в 3 мм, рельс переходит в категорию дефектных.

При наработке $5 \cdot 10^7$ (1162 млн. тонн брутто) очаги зарождения трещины появляются с обеих сторон от поверхности катания, также существующая трещина растёт вглубь поверхности катания и начинает пересекать вертикальную ось симметрии рельса, в результате чего рельс переходит в категорию остродефектных по дефекту 21.2 согласно НТД/ЦП-2-93 [38], что соответствует рисунку 4.55.

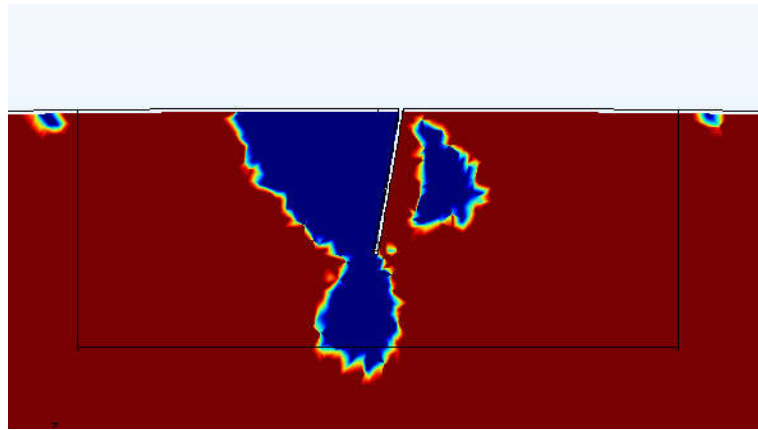


Рисунок 4.55 - Развитие трещины при наработке 1162 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 3 мм

4.6.5 Влияние трещины глубиной 3 мм, расположенная на краю поверхности катания

Рост трещины начинается при $1 \cdot 10^5$ циклов, что соответствует 2,3 млн. тонн брутто. Также при этом появляется область выкрашивания около трещины вне поверхности катания, что соответствует рисунку 4.56.

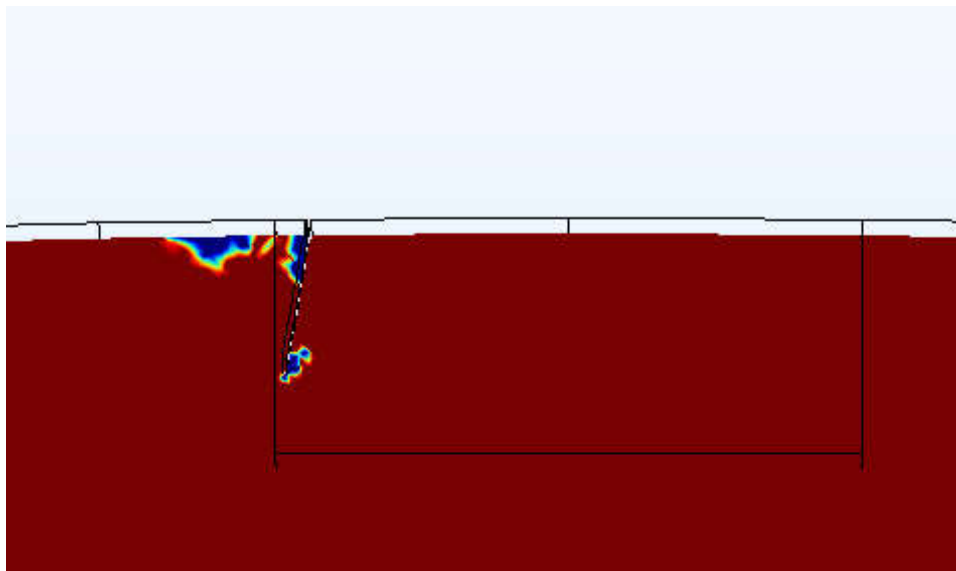


Рисунок 4.56 - Развитие трещины при наработке 2,3 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 3 мм, расположенной на краю поверхности катания

При наработке $5 \cdot 10^5$ циклов (11,6 млн. тонн брутто) трещины сливаются, и общее выкрашивание составляет 2,8 мм, что соответствует рисунку 4.57.

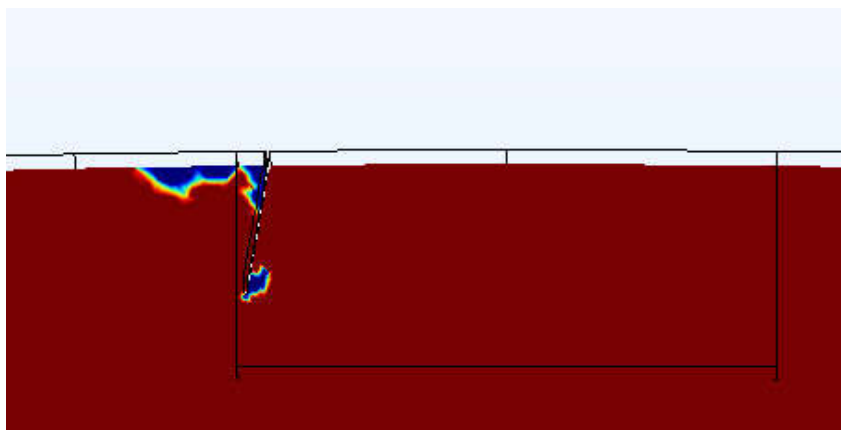


Рисунок 4.57 - Развитие трещины при наработке 11,6 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 3 мм, расположенной на краю поверхности катания

При достижении наработки $8 \cdot 10^6$ (186 млн. тонн брутто) область выкрашивания увеличивается до 3,1 мм. Для дефекта 10.2 согласно НТД/ЦП-2-93 [38] ширина выкрашивания начинает превышать максимального допустимый в 3 мм, рельс переходит в категорию дефектных, что соответствует рисунку 4.58.

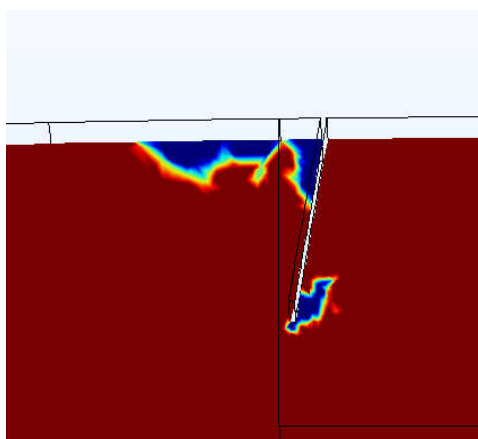


Рисунок 4.58 - Развитие трещины при наработке 2,3 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 3 мм, расположенной на краю поверхности катания

К моменту наработки $8 \cdot 10^7$ (1860 млн. тонн брутто) величина выкрашивания составляет 5,25 мм, что соответствует рисунку 4.59.

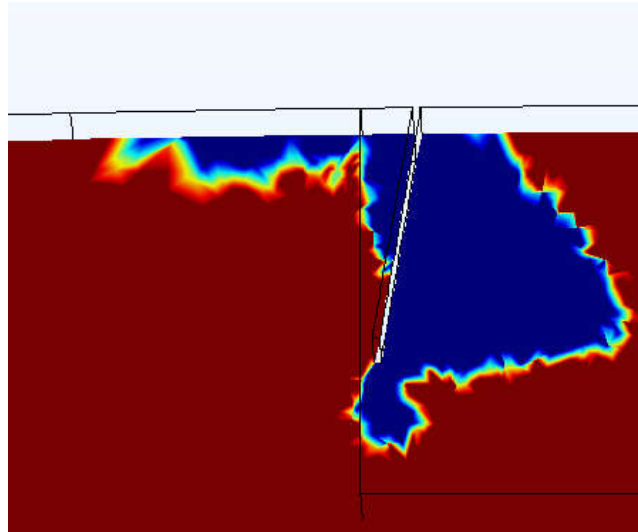


Рисунок 4.59 - Развитие трещины при наработке 1860 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 3 мм, расположенной на краю поверхности катания

При достижении наработки $8,1 \cdot 10^7$ (1883 млн. тонн брутто) трещина распространяется под поверхностью катания, и проходит через вертикальную ось симметрии рельса, в результате чего рельс признаётся остродефектным по дефекту 21.2 [38]. Развитие трещины показано на рисунке 4.60.

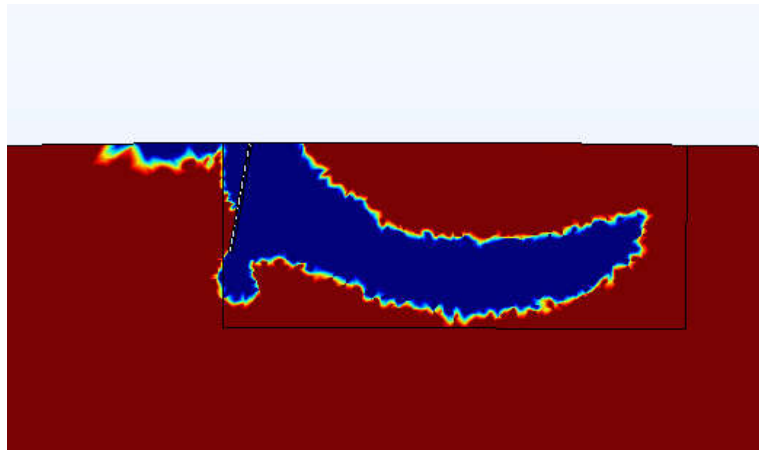


Рисунок 4.60 - Развитие трещины при наработке 1883 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 3 мм, расположенной на краю поверхности катания

4.6.6 Влияние трещины глубиной 3 мм, расположенная вне поверхности катания

Трещина, расположенная на расстоянии 15 мм от вертикальной оси симметрии рельса (вне поверхности катания), согласно полученным результатам не влияет на развитие трещины в головке рельса и выкрашивание, что соответствует рисунку 4.61. Ниже показано развитие трещины при наработке $9 \cdot 10^7$ (2092 млн. тонн брутто).

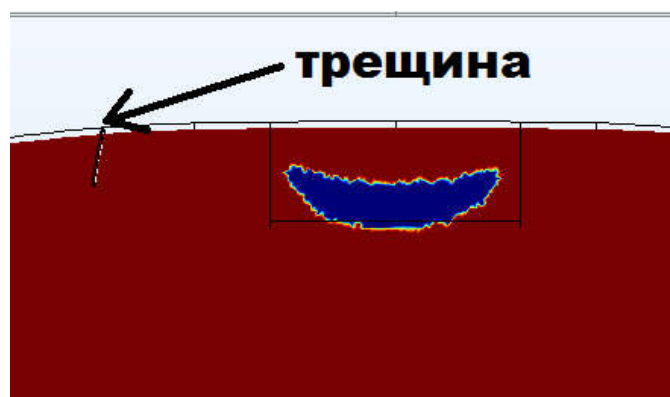


Рисунок 4.61 - Развитие трещины при наработке 2092 млн. тонн брутто при наличии трещины на поверхности катания глубиной 3 мм, расположенной вне поверхности катания

4.7 Анализ результатов моделирования развития трещины

4.7.1 Анализ перехода рельса в остродефектное состояние при отсутствии поверхностных трещин в головке рельса

На рисунке 4.62 приведён график зависимости роста трещины от количества циклов для модели с разным уровнем остаточных технологических напряжений. По оси абсцисс – пропущенный тоннаж, млн. тонн брутто, по оси ординат – размер трещины.

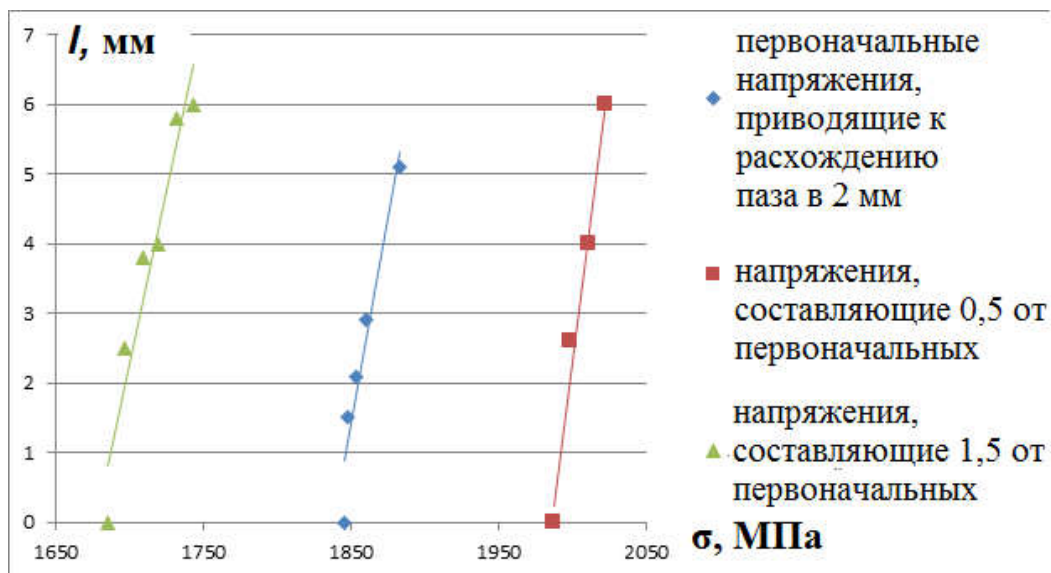


Рисунок 4.62 - Развитие трещины при различном уровне остаточных напряжений в рельсе

Таким образом, очевидно, что превышение максимально допустимого уровня остаточных технологических напряжений ускоряет рост трещины, в то же время верно и обратное утверждение: при снижении уровня остаточных технологических напряжений увеличивается количество циклов, при котором рельс может работать до отнесения его в категорию остродефектных.

Согласно полученным результатам моделирования, при отсутствии поверхностных трещин рельс переходит в категорию остродефектных по росту трещины и пересечения трещиной вертикальной оси симметрии рельса. При

уровне напряжений, соответствующих значению расхождения паза в 2 мм переход рельса в остродефектную категорию происходит при 1883 млн. тонн брутто, при уровне напряжений, составляющий 0,5 от первоначального – при 2011 млн. тонн брутто, при уровне напряжений, превышающий первоначальный в 1,5 раза - при 1709 млн. тонн брутто. На рисунке 4.63 представлена зависимость наработки рельса до перехода в остродефектное состояние (ресурс рельса) в зависимости от уровня остаточных технологических напряжений в случае измерения со стороны поверхности катания методом акустоупругости.

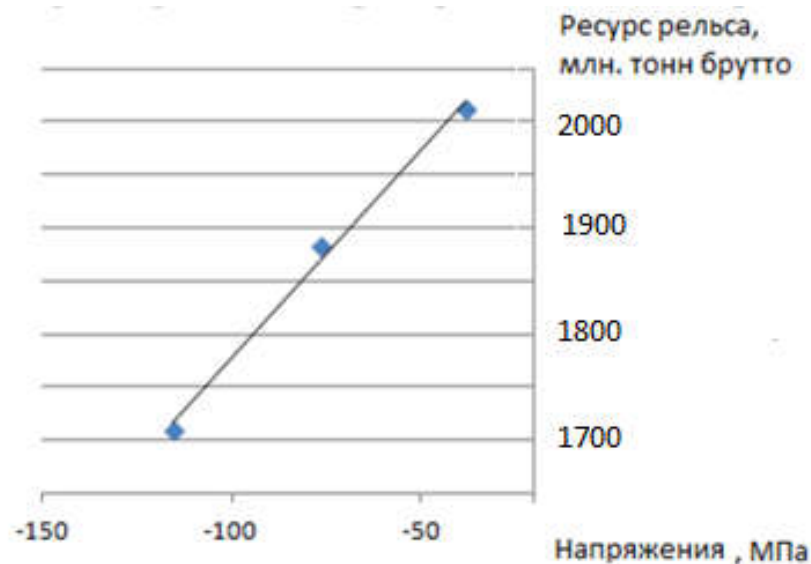


Рисунок 4.63 - Переход рельса в остродефектное состояние в зависимости от уровня остаточных технологических напряжений

В то же время температурные напряжения также оказывают влияние на развитие дефекта в виде трещины в головке рельса. Согласно исследованиям из главы 2 настоящей диссертации, в головке рельса после изготовления устанавливаются сжимающий характер напряжений. В то же время, понижение фактической температуры ниже температуры закрепления рельса вызывает рост растягивающих температурных напряжений, что в свою очередь снижает суммарный уровень напряжений в головке рельса. Аналогично превышение фактической температуры закрепления рельса вызывает рост сжимающих

температурных напряжений, что приводит к повышению суммарного уровня напряжений в головке. График зависимости между наработкой рельса (млн. тонн брутто) до перехода в остродефектное по дефекту 21.2 согласно НТД/ЦП-2-93 состояние и разницей ΔT между температурой закрепления и фактической температурой представлен на рисунке 4.64.

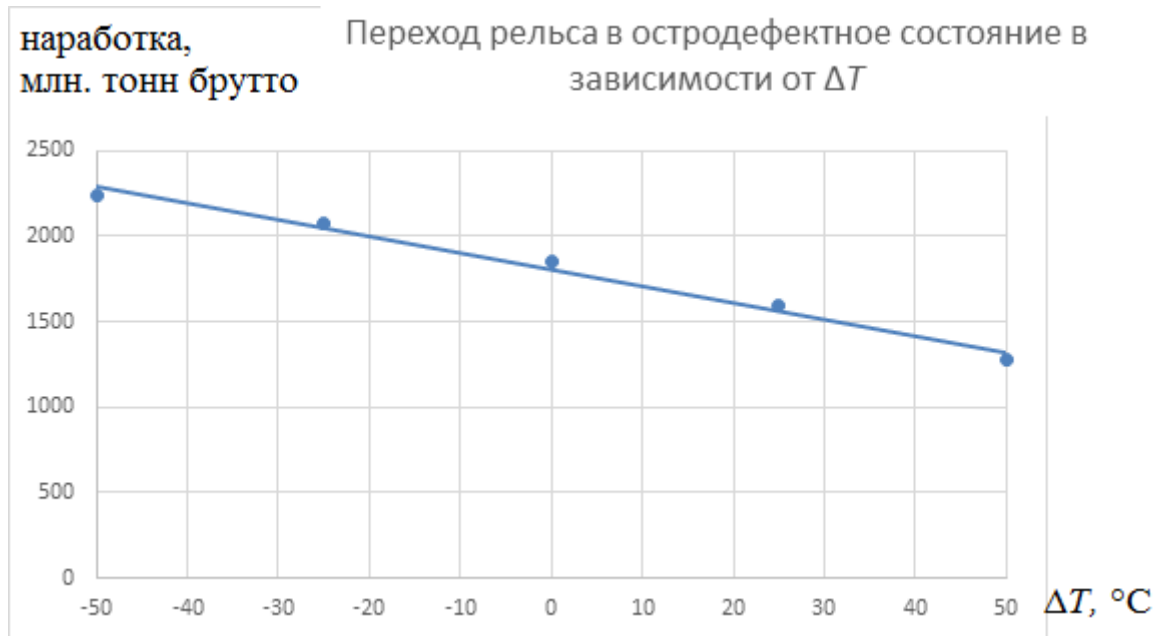


Рисунок 4.64 - Анализ перехода рельса в остродефектное состояние по критерию развития усталостной трещины в головке рельса при различном значении ΔT

Несмотря на то, что согласно графика при отрицательных значениях ΔT наработка рельса до перехода в остродефектное состояние увеличивается до 2243 млн. тонн брутто при $\Delta T = -50\text{ }^\circ\text{C}$ взамен 1883 млн. тонн брутто при $\Delta T = 0\text{ }^\circ\text{C}$, такой режим работы рельса нельзя считать рекомендованным. Это связано с тем, что при росте растягивающих температурных напряжений хоть и происходит снижение уровня напряжений в головке рельса (со значения минус 77 МПа при $\Delta T = 0\text{ }^\circ\text{C}$ до значения 44 МПа при $\Delta T = -50\text{ }^\circ\text{C}$), но одновременно происходит значительное увеличение уровня напряжений в подошве рельса (со значения 75 МПа при $\Delta T = 0\text{ }^\circ\text{C}$ до значения 187 МПа при $\Delta T = -50\text{ }^\circ\text{C}$), что может вызывать ускоренное развитие дефектов в подошве рельса.

В то же время рост сжимающих напряжений в головке рельса (со значения минус 77 МПа при $\Delta T=0$ °С до значения минус 299 МПа при $\Delta T=+50$ °С) при превышении фактической температуры над температурой закрепления рельса приводит к ускоренному развитию усталостной трещины в головке рельса. Так, наработка рельса до перехода в остродефектное состояние уменьшается до 1274 млн. тонн брутто при $\Delta T=+50$ °С взамен 1883 млн. тонн брутто при $\Delta T=0$ °С.

4.7.2 Анализ перехода рельса в остродефектное состояние при наличии поверхностной трещины в головке рельса

Во время производства рельса возможно появление трещин (дефект 10.2 согласно каталогу дефектов рельса НТД/ЦП-2-93). Для анализа влияния такой трещины на долговечность рельса в модель была добавлена трещина по центру поверхности катания, раскрытием 0,1 мм и длиной 9,5 мм (по длине контактной плоскости колесо-рельс) различной глубины: 0,5 мм, 1 мм, 2 мм, 3 мм. Уровень остаточных технологических напряжений выбран соответствующим расхождению паза в 2 мм: минус 77 МПа в головке рельса, минус 125 МПа в шейке рельса и 106 МПа в подошве рельса.

При наличии поверхностной трещины в головке рельса происходит выкрашивание поверхности катания. Результаты моделирования ширины области выкрашивания в зависимости от наработки рельса приведены в таблице 4.3. Ширина области выкрашивания 0,1 мм соответствует раскрытию трещины и обозначает, что процесс выкрашивания ещё не начался.

Таблица 4.3 - Ширина области выкрашивания при различной длине трещины

Наработка, млн. тонн брутто	Ширина области выкрашивания при различной длине трещины, мм			
	0,5	1	2	3
1	0,1	0,1	0,1	0,1
2	0,16	0,6	1,6	1,86
10	0,55	0,9	1,8	2,1
200	0,68	0,9	2,1	3,0
500	0,77	0,95	2,5	3,2
700	0,77	0,98	3,2	3,5
1200	0,78	1,4	3,7	3,8
1900	0,79	1,7	3,9	5,1

Согласно каталогу дефектов НТД/ЦП-2-93 рельс признаётся дефектным и подлежит дальнейшей замене, если ширина области выкрашивания составит более 3 мм (дефект 10.2). Рельс, с глубиной трещины 2 мм переходит в категорию дефектных к наработке 700 млн. тонн брутто, рельс с глубиной трещины 3 мм переходит в категорию дефектных к моменту наработки 200 млн. тонн брутто. При глубине трещины 0,5 мм и 1 мм выкрашивание не достигает размеров 3 мм, в результате чего по дефекту 10.2 рельс признаётся пригодным к эксплуатации.

Однако наличие поверхностной трещины также может оказывать влияние на развитие усталостной трещины в головке рельса (дефект 21.2). В таблице 4.4 представлены данные о наработке рельсов до перехода в остродефектную категорию по дефекту 21.2 (усталостная трещина в головке рельса).

Таблица 4.4 - Переход рельса в дефектную/остродефектную категорию при различной глубине трещины

Глубина трещины, мм	Наработка рельса до перехода в остродефектную категорию по дефекту 21.2, млн. тонн брутто	Наработка рельса до перехода в дефектную категорию по дефекту 10.2, 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 дефекту 10.2 (выкрашивание) соответственно при 698 млн. тонн брутто и 186 млн. тонн брутто.

Также был проведён анализ влияния трещины глубиной 3 мм от поверхности катания на переход рельса в дефектную. Результаты сведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Переход рельса в дефектную/остродефектную категорию при различном расположении трещины

Расположение трещины	Наработка рельса до перехода в остродефектную категорию по дефекту 21.2, млн. тонн брутто	Наработка рельса до перехода в дефектную категорию по дефекту 10.2, 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	1883	-

Таким образом, трещины, находящиеся на поверхности катания, вызывают переход рельса в дефектную категорию по выкрашиванию поверхности катания (дефект 10.2) при наработке рельса 186 млн. тонн брутто. При этом трещина, находящаяся по центру поверхности катания, также вызывает ускоренное развитие усталостной трещины в головке рельса (дефект 21.2), так, переход в остродефектную категорию происходит при 1162 млн. тонн брутто при наличии трещины по центру поверхности катания, при 1883 млн. тонн брутто при наличии трещины на краю поверхности катания и при 1883 млн. тонн брутто при отсутствии трещины. Наличие трещины вне поверхности катания, на расстоянии 15 мм от вертикальной оси симметрии рельса, не оказывает влияния на развитие дефектов в рельсе: переход в остродефектную категорию по усталостной трещине в головке рельса (дефект 21.2) происходит при 1883 млн. тонн брутто, выкрашивания не происходит.

4.7.3 Математическая модель развития дефекта в виде трещины в головке рельса

В изученном диапазоне изменения остаточных технологических напряжений и температурных напряжений зависимости наработки рельса до перехода в остродефектное состояние близки к линейным зависимостям (рисунок 4.63 и рисунок 4.64). 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:

$$W_l = (2162 + 3,92 \cdot \sigma_A - \sum_{i=1}^N \frac{t_i}{t_{sum}} \cdot 9,69 \cdot \Delta T_i) - W_p \quad (4.2)$$

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 фактической температурой и температурой закрепления рельса, °С, W_p – наработка рельса, млн. тонн брутто.

Выводы по четвёртой главе

1. Обнаружена прямая зависимость между количеством циклов до зарождения трещины в зависимости от уровня остаточных технологических напряжений. Так, 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 согласно ГОСТ 51685-2013, 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).

2. Эксплуатация рельса при снижении фактической температуры относительно температуры закрепления рельса приводит снижению суммарных напряжений в головке рельса, и, как следствие, к увеличению наработки рельса до перехода в остродефектное состояние с 1883 млн. тонн брутто при $\Delta T=0$ °С до 2243 млн. тонн брутто при $\Delta T=-50$ °С. Тем не менее, такой режим работы не может быть рекомендован в связи со значительным ростом напряжений в подошве рельса со значения 75 МПа при $\Delta T=0$ °С до значения 185 МПа при $\Delta T=-50$ °С, что может вызывать ускоренное развитие дефектов в подошве рельса. Повышение фактической температуры относительно температуры закрепления рельса в связи с ростом суммарных напряжений в головке рельса вызывает снижение наработки рельса до перехода в остродефектное состояние до 1274 млн. тонн брутто при $\Delta T=+50$ °С взамен 1883 млн. тонн брутто при $\Delta T=-0$ °С.

3. Наличие трещины в центре поверхности катания раскрытием 0,1 мм и глубиной 0,5 мм не оказывает влияния на развитие усталостной трещины в головке рельса, наличие трещины глубиной 1 мм снижает наработку рельса до перехода в остродефектное состояние до 1511 млн. тонн брутто взамен 1883 млн. тонн брутто, при трещинах глубиной 2 и более мм рельс переходит в категорию дефектных по критерию выкрашивания на поверхности катания.

4. Трещина глубиной 3 мм, расположенная в центре поверхности катания вызывает переход рельса в дефектную категорию по критерию выкрашивания (наработка 186 млн. тонн брутто) на поверхности катания, данная трещина также ускоряет развитие усталостной трещины (1162 млн. тонн брутто взамен 1883 млн. тонн брутто при отсутствии трещины). Трещина глубиной 3 мм, находящаяся на краю поверхности катания, также вызывает переход рельса в дефектную категорию по критерию выкрашивания (наработка 186 млн. тонн брутто), однако не влияет на развитие усталостной трещины в головке рельса (переход в остродефектную категорию при 1883 млн. тонн брутто). Трещина

глубиной 3 мм, находящаяся вне поверхности катания, не вызывает выкрашивания и не оказывает влияния на рост усталостной трещины в головке рельса.

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.

Заключение

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 $\sigma > 80$ МПа при установке датчика со стороны поверхности катания. Недопустимое значение остаточных напряжений в подошве в 250 и более МПа соответствует $\sigma < 50$ 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.

В результате проведённых исследований разработана и научно обоснована модель рельса, учитывающая влияние остаточных технологических, температурных и эксплуатационных напряжений со стороны подвижного состава. Данная модель позволяет оценивать напряжение в элементах (головке, шейке, подошве) рельса с помощью акустической тензометрии, реализованной в структуроскопе СЭМА и позволяет сопоставлять измеренные значения напряжений с признаками, по которым остаточные напряжения контролируются согласно ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия».

В качестве перспектив развития темы диссертации можно выделить экспериментальное исследование напряжений в области дефекта рельса, исследование развития дефектов в головке и шейке рельса для создания всеобъемлющей математической модели по оценке наработки рельса до перехода в дефектное и остродефектное состояние, экспериментальная проверка полученной математической модели. Предполагается, что выполнение данных задач повысит безопасность эксплуатации железнодорожного пути, а также вызовет в будущем более широкое применение и развитие методов акустической тензометрии.

Список литературы

1. Хайбуллина Л.В. Методы и средства контроля напряжённо-деформированного состояния металлоконструкций опасных производственных объектов нефтегазовой отрасли//Вестник молодого учёного УГНТУ – 2015 - №4 – С.39-47.
2. Иванов П.С., Лесун А.Ф., Букин М.Н., Петров А.А., Чурашов О.А., Шулепова Н.Г., Зайцев Н.И., Родионов А.В. Классификация дефектов рельсов//Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта – 2005, №8 – С. 8-12.
3. Муравьёв, 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. Муравьёв, К. А. Тапков // Приборы и методы измерений - 2017. – Т. 8, № 3. – С. 263-270. (DOI 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270)
4. Muravev V.V., Тапков К.А., 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.
5. 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.
6. Вансович К.А., Аистов И.П. Анализ трехмерного напряженного состояния в вершине поверхностных усталостных трещин/К.А. Вансович, И.П. Аистов//Современные технологии. Системный анализ. Моделирование – 2017. – Т. 56, №4. – С 27-33. – DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).33-40
7. Вансович К.А. Модель роста усталостных поверхностных трещин за цикл нагружения «Нагрузка-разгрузка»//Омский научный вестник – 2017 - №3(153) – С. 49-53.

8. Fei Ding, Miaolin Feng, Yanyao Jiang. Modeling of fatigue crack growth from a notch // International Journal of Plasticity – Vol. 23 (2007) – pp. 1167–1188
9. Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Гущина Л.В. Связь внутренних напряжений и механических свойств дифференцированно-упрочненных рельсов с параметрами акустических волн//Сталь – 2018 - №10 – С. 64-67 (Muraviev V.V., Volkova L.V., Platunov A.V., Guschina L.V. Acoustic assesement if the internal stress and mechanical properties of differentially hardened rail//Steel in translation – 2018 – No. 10, pp. 690-694. DOI: 10.3103/S0967091218100078)
10. ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия»
11. Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Булдакова И.В. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов методами конечных элементов и акустоупругости.- Деформация и разрушение материалов – 2017 - №1 – С 41-44.
12. Муравьев В.В., Якимов А.В., Казанцев С.В. Распределение остаточных напряжений и скорости головной волны в рельсах//Фундаментальные проблемы современного материаловедения – 2019, №3, Т.16 – С. 370-376. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2019.03.013
13. Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Булдакова И.В. Остаточные напряжения в рельсах по результатам разрушающих и неразрушающих испытаний//Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций, XII международная конференция: Сборник материалов (Екатеринбург, 21-25 мая 2018 г.) – С. 52.
14. Неразрушающий контроль рельсов при их эксплуатации и ремонте/ А.К. Гурвич, Б.П. Довнар, В.Б. Козлов, Г.А. Круг, Л.И. Кузьмина, А.Н. Матвеев; Под ред. канд. техн. наук А.К. Гурвича. – М.: Транспорт, 1983, - 318 с.
15. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года. [Электронный ресурс]: портал «Железнодорожник». URL: <http://железнодорожник.рф/reforma> (дата обращения 15.01.2017)

16. Руководство по дефектоскопии рельсов мобильными средствами контроля: Учеб. пособие/ М.П. Брандис, С.И. Зоика, В.А. Лончак, Д.М. Марандиць. – К.: S. n., 2005 (Tirogr. Balacron). – 207 с. ISBN 9975-9829-5-6
17. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Перегудов О.А., Морозов К.В., Семин А.П. Дegradaция структуры и свойств металла рельсов при длительной эксплуатации//Успехи физики металлов – 2016, т. 17 – С. 253-296. DOI: 10.15407/ufm.17.03.253
18. Хлыст С.В., Кузьмиченко В.М., Резанов В.А., Борц А.И., Шур Е.А. Перспективная технология производства рельсов для высокоскоростного и тяжеловесного движения//Вестник ВНИИЖТ – 2013, №6 – С.14-20.
19. Ромен Ю.С., Бороненко Ю.П. Гармонизация профилей рельса и колесной пары//Вестник ВНИИЖТ – 2016, №4, Т.75 – С. 201-206. DOI: 10.21780/2223-9731-2016-75-4-201-206
20. Полухин П.И., Грдина Ю.В., Зарвин Е.Я. «Прокатка и термическая обработка железнодорожных рельсов». М.: Металлургия, 1962. - 431с.
21. Термически упрочненные рельсы. Под ред. А.Ф. Золотарского. М., «Транспорт», 1976. 264 с. Авт.: А.Ф. Золотарский, Я.Р. Раузин, Е.А. Шур, А.В. Великанов, Л.П. Мелентьев, О.С. Скворцов, И.З. Генкин.
22. Богданов В.М. Обеспечение устойчивой работы системы колесо-рельс на отечественных и зарубежных железных дорогах//Вестник ВНИИЖТ – 2010, №2 – С. 10-14
23. Полевой Е.В., Добужская А.Б., Темлянцев М.В. Влияние скорости охлаждения на формирование структуры рельсовой стали, микролегированной ванадием и ниобием//Вестник ПНИПУ – 2016, №4, Т.18 – С. 7-20. DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.01
24. Карпущенко Н.И., Труханов П.С. Оценка и прогнозирование надежности рельсов в различных эксплуатационных условиях//Известия Транссиба – 2016, №2(26) – С. 118-126.

25. Распоряжение ОАО «РЖД» №3212р от 31.12.2015 об утверждении и введении в действие «Положения о системе ведения путевого хозяйства ОАО «РЖД».

26. Железнодорожный путь / Т.Г. Яковлева, Н.И. Карпущенко, С.И. Клинов, Н.Н. Путря, М.П. Смирнов; Под ред. Т.Г. Яковлевой. М.: Транспорт. 1999. 405 с.

27. Богданов В.М., Михайлова Н.В. Развитие исследований в области взаимодействия пути и подвижного состава//Вестник ВНИИЖТ – 2016, №4, Т.75 – С.256-260. DOI: 10.21780/2223-9731-2016-75-4-256-260.

28. Третьяков В.В., Петропавловская И.Б., Певзнер В.О., Громова Т.И., Третьянов И.В., Шапетько К.В., Смелянская И.С., Томиленко А.С. Воздействие на путь вагонов с повышенной осевой нагрузкой//Вестник ВНИИЖТ – 2016, №4, Т.75 – С.233-238. DOI: 10.21780/2223-9731-2016-75-4-233-238.

29. Громов, В.Е. Микроструктура закаленных рельсов. /Громов В.Е., Юрьев А.Б., Морозов К.В., Иванов Ю.Ф. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2014.- 213 с

30. Муравьев В.В., Бояркин Е.В. Неразрушающий контроль структурно-механического состояния рельсов текущего производства по скорости ультразвуковых волн. – Дефектоскопия -2003 - №3 – С 24-33.

31. Покровский А.М., Воронов Ю.В., Третьяков Д.Н. Численное моделирование температурно-структурного и напряженного состояний в процессе закалки железнодорожного рельса // Известия высших учебных заведений. Машиностроение – 2016, №6(675) – С 13-20. DOI: 10.18698/0536-1044-2016-6-13-20.

32. Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Байтеряков А.В. Акустические методы оценки структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов // Сварка и диагностика: сборник докладов международного форума (Екатеринбург, 24–25 ноября 2015 г.) — Екатеринбург : УрФУ, 2015. — С. 285-290.

33. Керенцев Д.Е., Пономарёв Ю.К. Влияние остаточных технологических напряжений и тепловых эксплуатационных нагрузок на прочность железнодорожных колёс//Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета – 2015, №3, Т. 14, Ч.2 – С. 336-344.

34. Марочник сталей и сплавов/В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.Под общ. ред В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с. ISBN 5-217-00509-2

35. Шур Е.А., Борц А.И., Сухов А.В., Абдурашитов А.Ю., Базанова Л.В., Заграничек К.Л. Эволюция повреждаемости рельсов с дефектами контактной усталости//Вестник ВНИИЖТ – 2015, №3 – С. 3-9.

36. Коган А.Я., Абдурашитов А.Ю. Прогнозирование отказов рельсов по дефектам контактно-усталостного происхождения//Вестник ВНИИЖТ – 2014, №4 – С. 3-7.

37. 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.

38. Классификация дефектов рельсов НТД/ЦП-2-93, утверждён Министерством путей сообщения 22.03.1993.

39. Марков А.А., Шпагин Д.А. Ультразвуковая дефектоскопия рельсов, - СПб.: «Образование – Культура». 1999. – 230 с. (про УЗ методы)

40. Справочник инженера-путейца. Под ред. В.В. Басилова и М.А. Чернышева. Т.1. «Транспорт», 1972, стр. 768.

41. Гостев Г.А. Проблемы эксплуатации и неразрушающего контроля рельсов с приведённым износом//Современные технологии. Системный анализ. Моделирование – 2018, №1 (57) – С. 90-94. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.1(57).90-94

42. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Морозов К.В., Перегудов О.А., Юрьев А.Б. Физическая природа упрочнения рельсов в процессе длительной эксплуатации//Известия высших учебных заведений. Черная металлургия – 2016, №6, Т.59 – С. 414-419. DOI: 10.17073/0368-0797-2016-6-414-419

43. Полевой Е.В., Добужская А.Б., Темлянцев М.В. Сравнительный анализ микроструктуры и свойств дифференцированно и объемнотермоупрочненных рельсов//Вестник Сибирского государственного индустриального университета – 2016, №2 (16) – С. 18-22.

44. Скобло Т.С., Сапожков В.Е. Особенности технологии закалки железнодорожных рельсов с индукционного нагрева токами высокой частоты (ТВЧ)//сборник трудов конференции «Ключевые проблемы современной науки» (15-17 апреля 2011 года, Пермь) – 2011 – С. 3-15.

45. Шур Е.А. К вопросу о совершенствовании расчетов рельсов на прочность//Вестник ВНИИЖТ – 2016, №4, Т.75 – С. 207-216. DOI: 10.21780/2223-9731-2016-75-4-207-216.

46. Волков К.В., Полевой Е.В., Темлянцев М.В., Атконова О.П., Юнусов А.М., Сюсюкин А.Ю. Моделирование воздушоструйной закалки с печного нагрева железнодорожных рельсов// Журнал Вестник Сибирского государственного индустриального университета – 2014 - № 3 (9) - С. 17-23.

47. Полевой Е.В., Темлянцев М.В., Юнусов А.М., Атконова О.П. Опыт воздушоструйной термической обработки головки железнодорожных рельсов стали марки Э76Ф с использованием тепла прокатного нагрева//Вестник Сибирского государственного индустриального университета – 2015 - №1 (11) - С. 5-10.

48. Шестаков А.Н., Пшеничников П.А., Хлыст С.В., Корнева Л.В., Кириченко М.Н., Павлов В.В., Иванов А.Г., Кузьмиченко В.М. Патент на способ «Способ дифференцированной термообработки профилированного проката, в частности рельса, и устройство для его осуществления». Номер патента RU2369646

49. Резанов В.А., Федин В.М., Башлыков А.В., Фимкин А.И., Земан С.К. Дифференцирование закалка сварных стыков рельсов//Вестник ВНИИЖТ – 2013, №2 – С. 28-34. ISSN 2223-9731.

50. Муравьев В.В., Волкова Л.В., Громов В.Е., Глезер А.М. Оценка остаточных напряжений в рельсах с использованием электромагнитно-акустического способа ввода-приема волн // Деформация и разрушение материалов - 2015. № 12 - С. 34–37.

51. Серенко А.Н. Оценка влияния остаточных напряжений на кинетику развития усталостных трещин в сварных соединениях. Часть I//Вісник Приазовського державного технічного університету – 2011, №22. – С 156-161.

52. Mirkovic N., Brajovic L., Malovic M. Methods for determination of residual stress in rail//Papers of XVIII scientific-expert conference on railways Railcon'18 – 2018, pp. 113-116

53. 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.

54. Покровский А.М., Ю.В. Воронов, Пья Пью Аунг. Математическое моделирование термических напряжений в железнодорожном рельсе из бейнитной стали при ускоренной нормализации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. №4 - С 76-87. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-4-76-87

55. Bruce Boardman. Fatigue resistance of steels//ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys – 1990, vol. 1 – pp. 673-688.

56. Marohnic T., Basan R., Franulovic M. Evaluation of methods for estimation of cyclic stress-strain parameters from monotonic properties of steels//Metals – 2017, No. 7, Vol. 17 – pp. 1-15. DOI: 10.3390/met7010017

57. Остапчук В.В. Патент RU2224834C1 на изобретение «Рельсовый путь».

58. Сердечный А.С., Сердечный А.А. Патент RU2553490C1 на изобретение «Рельсовый путь прямолинейной высокоскоростной железной дороги».

59. Зиньковский А.Т. Патент RU2012100278А на изобретение «Железная дорога и способ ее эксплуатации».

60. Кацнельсон Г.А., Кацнельсон Е.Г. Патент RU2073075C1 на изобретение «Железнодорожный рельс».

61. Есаулов В.П., Таран Ю.Н. и др. Патент RU2013480C1 на изобретение «Железнодорожный рельс»/

62. Джайсвал Ш., Смит Г.М., Кэрролл Р. Патент RU2010138913А на изобретение «Рельсовая сталь с превосходным сочетанием характеристик износостойкости и усталостной прочности при контакте качения».

63. Костюк О.А. Патент RU2555070C1 на изобретение «Способ контроля продольно-напряженного состояния рельсовых плетей бесстыкового пути».

64. Видревич М.Б., Сахнов В.С., Силин Р.И., Пан А.В. Патент SU1779953A1 на изобретение «Способ контроля напряженного состояния рельса».

65. Быченко В.А., Кинжагулов И.Ю., Беркутов И.В., Марусин М.П., Щерба И.Е. Применение лазерно-ультразвукового генератора для определения напряжённо-деформированного состояния специальных материалов изделий//Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики – 2013 - №4(86) – С. 107-114.

66. P.J. Whithers and H.K.H Bhadeshia, Overview Residual stress Part 1 – Measurement techniques, Material Science and Technology 17 (2001), P 355-365.

67. Антонов А.А., Летуновский А.П. Возможности оценки остаточных напряжений в сварных конструкциях//В мире НК – 2018 – №1 (т.21) – С. 10-12. DOI: 10.12737/article_5aaf8356d7dbe1.54756766

68. Карабутов А.А., Жаринов А.Н., Ивочкин А.Ю., Капильный А.Г., Карабутов А.А. (мл.), Ксенофонов Д.М., Кудинов И.А., Симонова В.А., Мальцев В.Н. Лазерно-ультразвуковая диагностика продольных напряжений рельсовых плетей//Управление большими системами: сборник трудов – 2012, т. 38 – С. 183-204.
69. Степанов А.П., Степанов М.А. Метод магнитного контроля и диагностики напряжённого состояния элементов стальных конструкций, имеющих осесимметричное сечение//Современные технологии. Системный анализ. Моделирование – 2016 - №1(49) – С. 60-68.
70. V. Hauk. Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods / Elsevier Science, 1997 – 640 p. ISBN 9780-4448-247-69
71. Don Bray, Don E. Bray inc. Ultrasonic measurement using Lcr Wave. Journal of Pressure Vessel Technology – 2008, No. 3, Vol. 124 – pp.143-146.
72. Cuixiang PEI and Kazuyuki DEMACHI. Numerical Simulation of Residual Stress Measurement with acoustic wave//E-journal of advanced Maintance – 2010/2011, Vol.2 – pp. 160-168.
73. E. Schneider, R. Herzer. Ultrasonic evaluation of Stresses in the Rims of Railroad wheels//Materials of ECNDT'98 (June 1998), Vol. 3 No. 6. Электронный ресурс NDT net. [Режим доступа: <https://www.ndt.net/article/ecndt98/rail/306/306.htm>]. Дата обращения: 12.04.2017
74. Shailesh Gokhale. Determination of applied stresses in rails using the acoustoelastic effect of ultrasonic waves//Thesis by Shailesh Gokhale Texas A&M University – 2007 – 100 p
75. J. Deputat, J. Szelazek, A. Kwaszczynska-Klimek and A. Miernik : Experiences in Ultrasonic Measurement of Rail Residual Stresses. O. Orringer et al. (eds.), "Residual Stress in Rails", KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1, pp.169-183, (1992)
76. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль/И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.:ил.

77. Степанова Л.Н., Бехер С.А., Курбатов А.Н. и др. Исследование напряженного состояния рельса с использованием акустоупругости и тензометрии. - Изв. вузов. Строительство. – 2013. - №7. - С.103-109.
78. Муравьев В.В., Волкова Л.В., Лапченко М.А. Ультразвуковой контроль остаточных напряжений в бандажах локомотивных колес при производстве. – Дефектоскопия 2015. № 5. С. 3-16.
79. Муравьев В.В., Стрижак В.А., Пряхин А.В. Исследование внутренних напряжений в металлоконструкциях методом акустоупругости. – Заводская лаборатория. Диагностика материалов – 2016 – Т. 82, №12 – с 52-57.
80. Муравьев В.В. Акустоупругий метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов//Территория NDT - 2017, №1(21) - С. 26-29.
81. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л., Харитонов В.Б., Чаплыгин В.Н. Оценка накопления дефектов при усталости акустическим методом. Проблемы машиностроения и надежности машин. 1994. № 4. С. 103-107.
82. Буденков Г.А., Муравьев В.В., Коробейникова О.В. Исследование напряженно-деформированного состояния ободьев цельнокатаных вагонных колес методом акустической тензометрии. //Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2009. - Том 6. - №3. - с. 111-117.
83. Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Куликов В.А. Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов//Дефектоскопия – 2016, №7 – С. 12-20.
84. Положение о системе неразрушающего контроля рельсов и эксплуатации средств рельсовой дефектоскопии в путевом хозяйстве железных дорог ОАО "РЖД" утверждённое распоряжением ОАО "РЖД" № 2714р от 27.12.2012
85. Бураго Н.Г. Моделирование разрушения упругопластических тел//Вычислительная механика сплошных сред – 2008, Т.4, №4 – С. 5-20.

86. Рудаченко А.В., Исследование напряжённо-деформированного состояния трубопроводов: учебное пособие / А.В. Рудаченко, А.Л. Саруев; - Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 136 с.
87. Уланов А.М. Основы метода конечных элементов: лекции, - Самара: изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева, 2011. – 19 с.
88. Красников Г.Е., Нагорнов О.В., Старостин Н.В. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 184 с.
89. 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)
90. В.В. Муравьев, К.А. Тапков, С.В. Леньков. К вопросу контроля остаточных напряжений в дифференцированно термоупрочнённых рельсах // Дефектоскопия. – 2018 - № 10 – С 3-9. (V.V. Murav'ev, К.А. Тапков, 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)
91. 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, К.А. Тапков, 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)
92. 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.

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

94. Тапков К.А., 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.

95. Muravev V.V., Тапков К.А., 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.

96. Стрижак В.А., Пряхин А.В., Обухов С.А., Ефремов А.Б. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей. — Интеллектуальные системы в производстве, 2011, № 1. С. 243 — 250.

97. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Стрижак В.А. Оценка остаточных напряжений в ободьях вагонных колес электромагнитно-акустическим методом // Дефектоскопия. № 8. 2011. С. 16 — 28.

98. Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Булдакова И.В., Гущина Л.В. Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 13–23. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-13-23

99. Муравьев В.В., Якимов А.В., Волкова Л.В., Платунов А.В. Исследование двухосного напряжённного состояния в рельсах Р65 методом акустоупругости//Интеллектуальные системы в производстве – 2019 - №1 (17), С19-25. DOI: 10.22213/2410-9304-2019-1-19-25.

100. R.B. Thompson, S.J. Warmley, J.C. Johnson, D. Utrata. Elastic and acoustoelastic properties of railroad rail. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation – 1995, Vol. 14 - pp. 1891 – 1898.

101. Muraviev V.V., Volkova L.V., Platunov A.V., Guschina L.V. Acoustic assessment of the internal stresses and mechanical properties of differentially hardened rail//Steel in translation – 2018, No. 10, Vol. 48 – pp. 690-694. DOI: 10.3103/S0967091218100078

102. Муравьев В.В., Балобанов Е.Н., Печина Е.А. Определение коэффициентов упругоакустической связи ферромагнитных металлов//Вестник ИжГТУ – 2013, №2(58) – С. 108-112.

103. ГОСТ Р 52731-2007. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования.

104. El-sayed H. M., Lotfy M., Zohny H. N. El-din, Riad H. S. Prediction of fatigue crack initiation life in railheads using finite element analysis // Ain Shams Engineering Journal. Volume 9, issue 4, 2018, pp. 2329-2342. DOI: 10.1016/j.asej.2017.06.003

105. Augyl M. Fatigue Analysis of Welded Structures Using the Finite Element Method/ Gotenburg, Sweden. (2012). 56 p. ISSN no. 1652-9146

106. Peixoto, D. F. C., de Castro P. M. S. T. Near threshold fatigue crack propagation in railways' steels: Comparison of two testing techniques // Theoretical and applied fracture mechanics. 2015. Volume: 80, pp. 73-78 Part: A Special Issue: SI. DOI: 10.1016/j.tafmec.2015.06.008

107. Финкель В.М. Портрет трещины. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1989. – 192 с., ил.

108. Akama M., Kiuchi, A. Fatigue Crack Growth under Non-proportional Mixed Mode I/III Loading in Rail and Wheel Steel // Tetsu to Hagane-Journal of the iron and steel institute of Japan. Volume 104, issue 11, 2018, pp. 689-698. DOI: 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2018-059

109. Zahra S. Hosseini, Mohsen Dadfarnia , Brian P. Somerday, Petros Sofronis, Robert O. Ritchie. On the theoretical modeling of fatigue crack growth // Journal of the Mechanics and Physics of Solids – Vol. 121 (2018) – pp. 341–362.
110. Poeppelman, Chad M., "Axial and torsion fatigue of high hardness steels" (2011). Theses and Dissertations. 678 p.
111. Shripad T. Revankar, Brian Wolf, Jovica R. Roznic. Metal Fatigue Crack Growth Models // International Journal of Advanced Engineering Applications, Vol.1, Iss.4, pp.85-91 (2012)
112. Strzelecki P., Sempruch J., Tomaszewski T. Analysis of selected mathematical models of high-cycle S-N characteristics//Technical Sciences – 2017 – Vol. 20 (3) – pp. 227-240. DOI: 10.31648/ts.5424.
113. Н.Г. Бураго, Журавлев А.Б., Никитин И.С. Модели многоосного усталостного разрушения и оценка долговечности элементов конструкций//Механика твёрдого тела – 2011 - №6 – С. 22-33
114. Петин С.В., Гучинский Р.В. S-N-критерии усталости материалов для расчётов ресурса конструкций: проблемы применения//Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; Специальный выпуск 2: 96–103. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-96-103
115. Николаева Е.А. Основы механики разрушения. Учебное пособие. Пермь: Издательство Пермского гос. тех. ун-та, 2010. — 103 с.
116. Вахромеев А.М. Определение циклической долговечности материалов конструкций транспортных средств: методические указания / А.М. Вахромеев. – М.: МАДИ, 2015. – 64 с.
117. Тихомиров В.М. Исследование усталостной прочности рельса с термомеханическим повреждением//Известия Транссиба – 2013 - №1 (13) - С. 101-106
118. Хибник Т.А., Кольцун Ю.И. Кинетическая диаграмма медленного роста усталостной трещины. Подростание трещины // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета) – 2011 – №3 (27) – С 110-116.

119. EUROCODE 3: Design of Steel Structures. Part 1–9: Fatigue. BS EN 1993-1-9: 2014. P. 36.
120. Расчет железнодорожного пути на прочность: метод. указания / сост. Е.В. Филатов, Д.Н. Насников. – Иркутск : ИрГУПС, 2016. – 59 с.
121. Skrypnik R., Nielsen Jens C. O., Ekh M., Palsson, Bjorn A. Metamodelling of wheel-rail normal contact in railway crossings with elasto-plastic material behavior // Engineering with computers. Volume 35, issue 1, 2019, pp. 139-155. DOI: 10.1007/s00366-018-0589-3
122. Thin-Lin Horng. The study of contact pressure analyses and prediction of dynamic fatigue life for linear guideways system//Modern mechanical engineering – 2013, No. 3 – pp. 69-76. DOI: 10.4236/mme.2013.32010
123. Воробьев А.А. Сорокин П.Г. Исследование напряжённого состояния пятна контакта колеса и рельса//Новые материалы и технологии в машиностроении – 2004, №3 – С. 8-18.
124. Коган А.Я. Поперечные горизонтальные силы, возникающие от действия продольных температурных сил в рельсовых плетях бесстыкового пути и передаваемые на подшпальное основание//Вестник ВНИИЖТ – 2011, №5 – С. 10-13.
125. Ромен Ю.С. Факторы, обуславливающие процессы взаимодействия в системе колесо-рельс при движении поезда в кривых//Вестник ВНИИЖТ – 2015, №1 – С. 17-26
126. Ромен Ю.С. Сулов О.А., Баляева А.А. Определение сил взаимодействия в системе колесо-рельс на основании измерения напряжений в шейке рельса//Вестник ВНИИЖТ – 2017, №6, Т. 76 – С. 354-361. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-6-354-361
127. Муравьев В.В., Муравьева О.В. Физические основы и технологии акустико-эмиссионного контроля на железнодорожном транспорте / Учебное пособие. - Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2014. - 398 с.
128. Ультразвуковые рельсовые дефектоскопы: справочное пособие / В. В. Волков; Фил. Гос. образовательного учреждения высш. проф. образования

"Сибирский гос. ун-т путей сообщ." - Томский техникум ж.-д. трансп. - Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2010. - 37 с. : ил.

129. Долгих Л.В., Федин В.М., Борц А.И., Базанов Ю.А. Результаты циклических испытаний старогодных рельсов после фрезерования с предварительным индукционным отжигом//Вестник ВНИИЖТ – 2011, №4 – С. 50-52.

130. V.V. Muravev, К.А. Тапков 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.

131. 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.

132. Бондаренко И. А. Методика расчета характеристик стабилизирующего слоя / И. А. Бондаренко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - 2007. - Вип. 14. - С. 76-80.

133. Nascimento M.P., Souza R.C., Pigatin W.L., Voorwald H.J.C. Effects of surface treatments on the fatigue strength of AISI 4340 aeronautical steel//International journal of Fatigue – 2001 – Vol. 23 – pp.607-618

**Приложение А. Методика неразрушающего контроля
напряжённого состояния рельсов при производстве**

Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего образования
«Ижевский государственный технический университет имени М.Т.
Калашникова»

СОГЛАСОВАНО

Заведующий лабораторией
Экзаменационного центра по
неразрушающему контролю

 А.В. Платунов

« 15 » 06 2020 г.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и
инновационной деятельности



 А.Н. Копысов

« 15 » 06 2020 г.

**МЕТОДИКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЁННОГО
СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ**

Ижевск 2020.

1 Введение

Одним из заданий работы является контроль значений остаточных напряжений в рельсах акустическим методом с использованием бесконтактных электромагнитно-акустических (далее – ЭМАП), поперечными волнами в вертикальном и поперечно-осевом направлениях структуроскопом «СЭМА». Применение данной методики предполагается в лабораторных условиях. Функциональная схема структуроскопа «СЭМА» представлена на рисунке 1.

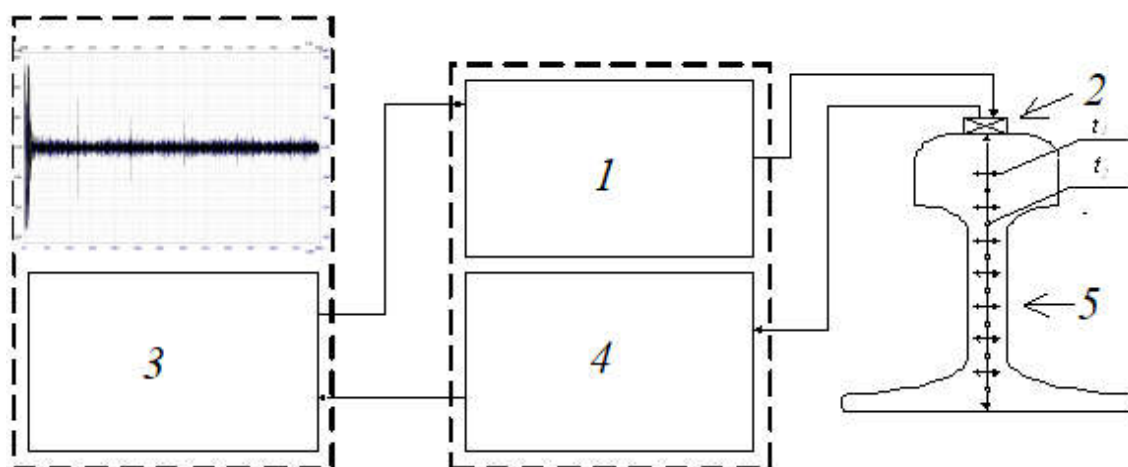


Рисунок 1 - Функциональная схема структуроскопа СЭМА

1 - генератор электрических импульсов; 2 – ЭМАП;

3 – персональный компьютер; 4 - усилитель; 5 – объект контроля (рельс)

В рельсе (объект контроля, далее - ОК) 5 с помощью электромагнитно-акустического преобразователя ЭМАП 2, возбуждаются акустические импульсы, которые после прохождения в ОК и отражения от дна ОК регистрируются ЭМАП 2, преобразующим акустические колебания в электрические импульсы, затем импульсы поступают в усилитель 4, оцифровываются в АЦП и поступают на компьютер 3, где происходит их дальнейшая обработка и отображение. Генератор электрических импульсов 1, питающий ЭМАП 2,.

Для анализа распределений внутренних напряжений измеряются скорости (время прихода) поперечной ультразвуковой волны в рельсе,

поляризованной в двух направлениях. Остаточные напряжения можно оценить по формуле:

$$\sigma = D \cdot \frac{\Delta t_r}{t_2} \quad (1)$$

где D – коэффициент упруго-акустической связи для применяемой рельсовой стали, ГПА; Δt_r – разница между временем прихода волн, мкс; t_2 – время прихода волны, поляризованной перпендикулярно направлению прокатки рельса, мкс.

2 Подготовка к выполнению испытаний и требования к рабочему месту

Для подключения используемого оборудования необходимо наличие электрической розетки сети 220В, 50 Гц на расстоянии не более 3 м от места проведения исследований.

Рабочее место должно удовлетворять возможности доступа к торцам исследуемых рельсов или иметь возможность продольного перемещения рельсов.

Испытания должны проводиться в следующих климатических условиях:

- температура окружающего воздуха, $25 \pm 15^\circ\text{C}$;
- относительная влажность воздуха, от 45 до 80 %;
- атмосферное давление, от 630 до 800 мм рт. ст.;
- местное освещение не хуже 500 лк.

Основные и вспомогательные средства для проведения испытаний указаны в таблице 1.

К проведению испытаний допускается персонал, прошедший обучение, изучивший техническую документацию по проведению контроля

структуроскопом «СЭМА» и остальное оборудование, указанное в таблице 1, прошедший инструктаж по технике безопасности и ознакомленный с настоящим Проектом проведения работ.

Количество необходимого персонала для выполнения работ: 2.

Таблица 1 – Основные и вспомогательные средства.

№	наименование	зав.номер	КОЛ-ВО
1	кабель сетевой	-	1
2	Преобразователь электромагнито-акустический П411-2,5	T05	1
3	Преобразователь электромагнито-акустический П411-2,5	T06	1
4	Клавиатура Genius GK-100011 (KB-110X)	XP15AS872010	1
5	Мышь Genius GM-050008U Netscroll 100	130233804404	1
6	Структуроскоп СЭМА	S07	1
7	Флеш-память Transcend 8Gb USB	-	1
8	Рулетка металлическая 3 м	-	1
9	Маркер (белый)	-	1
10	Магнит постоянный 10x10x4	-	2
11	Провод одножильный 3 м	-	1
12	Фильтр сетевой «Гарнизон», 3 м, 220В, 50Гц, 10А, 2,2 кВт	-	1
13	Удлинитель сетевой, 10 м	-	1
14	Мел, кусковой	-	1
15	Установленная система Windows		1
16	Установленный пакет Microsoft Excel		1
17	Установленное ПО ПРИНЦ X		1
18	Установленное ПО Sensitive		1

3 Технология установки измерительного оборудования

ЭМАП структуроскопа «СЭМА» устанавливаются на рельс по схеме, приведенной на рисунке 2 на поверхность катания головки рельса. При контроле ЭМАП специальных требований к поверхности ввода волны не предъявляется.

Расчет времени исследования одного сечения рельса приведен в таблице 2 и таблице 3.

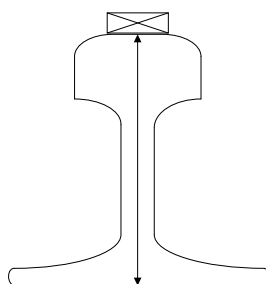


Рисунок 2 – Схемы установки ЭМАП на рельс

Таблица 2 – Нормы времени на проведение измерений на одном сечении

№ п/п	Наименование процедуры	Временные затраты, минут		
		На одну операцию	Кол-во операций на сечение	всего
1	Разметка сечения рельса по определённому интервалу от торца либо соседнего исследуемого сечения	0,5	1	0,5
2	Монтаж оборудования на исследуемое сечение рельса	0,5	1	0,5
3	Измерение разности времени прихода импульсов поперечных волн при излучении в вертикальном направлении с поверхности катания	0,5	5	2,5
4	Определение значений остаточных напряжений	0,5	5	2,5
5	Протоколирование, анализ результатов	1	1	1
ИТОГО				7

Таблица 3– Нормы времени на вспомогательные операции

№ п/п	Наименование процедуры	Временные затраты, минут		
		На одну операцию	Количество операций на сечение	всего
1	Монтаж измерительного оборудования	20	1	20
2	Проверка работоспособности	10	1	10
3	Демонтаж оборудования	20	1	20
ИТОГО				50

4 Методика испытаний

4.1 Проверка на соответствие комплектности оборудования

4.1.1 Проверить наличие и размещение всего необходимого оборудования в соответствии с правилами подготовки к выполнению испытаний и требованиями к рабочему месту из настоящей программы испытаний.

4.1.2 В результате проверки комплектности оборудования и качества выполнения работ отмечается в программе в п.1 таблицы 4 «соответствует/не соответствует» (в случае не соответствия указываются не соответствия).

4.2 Проверка работоспособности структуроскопа «СЭМА»

4.2.1 Провести включение и предварительную настройку структуроскопа «СЭМА» в порядке, соответствующем эксплуатационной документации.

4.2.2 Установить ЭМАП на головку рельса со стороны поверхности катания согласно рисунку 2;

4.2.3 Проверить работоспособность оборудования путем регистрации донных акустических сигналов от подошвы с амплитудой, превышающей уровень пиковых шумов оборудования на 6 дБ или среднеквадратичного значения шума в канале на 12 дБ;

4.2.4 В результате проверки работоспособности структуроскопа отметить в пункте 2 таблицы 4 соответствие или не соответствие.

4.3 Проведение измерений по сечению рельса

4.3.1 Провести мелом либо маркером разметку сечений рельса по которым будет проводиться измерение. Рекомендуется проведение не менее 10-ти измерений по сечениям рельса на расстоянии от торца не менее чем 5% длины исследуемого рельса;

4.3.2 Установить ЭМАП на головку рельса со стороны поверхности катания согласно рисунку 2. Штрих, нанесённый маркером либо мелом на сечение рельса, должен совпадать с центром ЭМАП;

4.3.3 Провести регистрацию донных акустических сигналов от подошвы. Убедиться, что амплитуда полученного сигнала превышает уровень пиковых шумов оборудования на 6 дБ или среднеквадратичного значения шума в канале на 12 дБ, иначе изменить коэффициент усиления «СЭМА» в программной среде ПРИНЦ Х.

4.3.4 Сохранить полученную осциллограмму;

4.3.5 Пункты 4.3.2-4.3.4 повторить 5 раз.

4.3.6 В случае, если расчёт и анализ результатов планируется выполнять на другом ПК, скопировать файлы полученных осциллограмм на флеш-память (п. 7 в Таблице 1).

4.4 Определение уровня остаточных напряжений (возможно выполнение на другом ПК)

4.4.1 Открыть папку с сохранёнными осциллограммами, полученными по первому сечению;

4.4.2 Открыть файл с первой полученной осциллограммой в программе Sensitive;

4.4.3 На рабочей области выделить и приблизить зону первого донного сигнала;

4.4.4 Перейти во вкладку «Замеры», после чего нажать на кнопку «Границы» и выделить область прихода донного сигнала. В область выделения не должен попадать шум;

4.4.5 Нажать на кнопку «Расчёт». В центральной области под осциллограммой должно появиться значение Δt_r , показывающее разность времени прихода донных сигналов между каналом В и каналом А;

4.4.6 Занести данные по Δt_r в Таблицу 3;

4.4.7 Определить время прихода донного импульса волны t_2 , поляризованной перпендикулярно оси симметрии рельса (обычно канал В) посредством наведения курсора мыши на пик первого донного импульса соответствующего канала. Значение появится в левом углу под осциллограммой ($T=...$ мкс). Результат занести в таблицу 4;

4.4.8 Повторить пункты 4.4.2 – 4.4.7 для оставшихся осциллограмм по сечению;

4.4.9 Повторить 4.4.1-4.4.8 для оставшихся сечений;

4.4.10 Провести расчёт напряжений σ для каждой полученной осциллограммы по всем сечениям по формуле (1). При отсутствии данных модулю акустоупругой связи применяемой рельсовой стали принять модуль $D=145$ ГПа.

4.5 Протоколирование, анализ результатов

4.5.1 Произвести вычисление среднего арифметического напряжений по каждому сечению рельса;

4.5.2 Произвести вычисление случайной погрешности согласно методике оценки погрешностей;

4.5.3 Сделать выводы о соответствии уровня напряжений в сечении с учётом погрешности заданным

4.5.3.1 Если уровень напряжений $\sigma > 80$ МПа, признать сечение рельса соответствующим критерию по остаточным напряжениям в шейке рельса, о чём сделать отметку в таблице 4.

4.5.3.2 Если уровень напряжений $\sigma < 50$ МПа. Признать сечение рельса соответствующим критерию по остаточным напряжениям в поверхностном слое подошвы рельса, о чём сделать отметку в таблице 4.

4.5.3.3 Если уровень напряжений $\sigma < 80$ МПа, признать сечение рельса несоответствующим критерию по остаточным напряжениям в шейке рельса, о чём сделать отметку в таблице 4.

4.5.3.4 Если уровень напряжений $\sigma > 50$ МПа. Признать сечение рельса несоответствующим критерию по остаточным напряжениям в поверхностном слое подошвы рельса, о чём сделать отметку в таблице 4.

4.5.4 Сделать вывод о соответствии измеренных остаточных напряжений критериям, установленными в ГОСТ 51685-2013.

4.5.4.1 Признать рельс соответствующим критерию по остаточным напряжениям в шейке рельса в случае, если ему соответствуют 90% и более сечений рельса. Сделать отметку в таблице 4. Иначе поставить отметку «Не соответствует»

4.5.4.2 Признать рельс соответствующим критерию по остаточным напряжениям в шейке рельса в случае, если ему соответствуют 90% и более сечений рельса. Сделать отметку в таблице 4. Иначе поставить отметку «Не соответствует».

4.5.5 В случае не соответствия рельса критерию по остаточным напряжениям в шейке рельса, необходимо дополнительно отобрать по одному рельсу изготовленному до и после рельса, исследованного по данной методике. Провести разрушающие испытания по п.7.14 согласно ГОСТ 51685-2013. В случае соответствия рельсов ГОСТ 51685-2013, признать партию годной. В обратном случае продолжить испытания по п.7.14 согласно ГОСТ 51685-2013 до получения результатов испытаний, удовлетворяющих ГОСТ 51685-2013.

5.5.6 В случае не соответствия рельса критерию по остаточным напряжениям в поверхностном слое подошвы рельса, необходимо дополнительно отобрать по одному рельсу изготовленному до и после рельса, исследованного по данной методике. Провести разрушающие испытания по п.7.23 согласно ГОСТ 51685-2013. В случае соответствия рельсов ГОСТ 51685-2013, признать партию годной. В обратном случае продолжить испытания по п.7.23 согласно ГОСТ 51685-2013 до получения результатов испытаний, удовлетворяющих ГОСТ 51685-2013.

Таблица 4 – Протокол испытаний рельса.

Расстояние от торца, м	№ измерения	Δt_r , нс	t_2 , мкс	σ , МПа	$\Delta\sigma$, МПа	Соответствие по напряжениям в шейке рельса	Соответствие по напряжениям в подошве рельса
	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	ИТОГО:						
	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	ИТОГО:						
	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	ИТОГО:						
Соответствие уровня остаточных напряжений в шейке рельса заданным:							
СООТВЕТСТВУЕТ/НЕ СООТВЕТСТВУЕТ							
Соответствие уровня остаточных напряжений в поверхностном слое подошвы рельса заданным:							
СООТВЕТСТВУЕТ/НЕ СООТВЕТСТВУЕТ							

Таблица 5 – Контрольный лист.

№	Содержание испытаний	Отметка о выполнении, результат	Пункт методики
1	Проверка на соответствие комплектности оборудования	СООТВЕТСТВУЕТ/НЕ СООТВЕТСТВУЕТ	4.1
2	Проверка работоспособности структуроскопа «СЭМА»	СООТВЕТСТВУЕТ/НЕ СООТВЕТСТВУЕТ	4.2
3	Измерение разности времени прихода импульсов поперечных волн структуроскопом «СЭМА»	ВЫПОЛНЕНО/НЕ ВЫПОЛНЕНО	4.3
4	Определение уровня остаточных напряжений в сечении	ВЫПОЛНЕНО/НЕ ВЫПОЛНЕНО	4.4
5	Оформление и анализ результатов	ВЫПОЛНЕНО/НЕ ВЫПОЛНЕНО	5

Разработано:

аспирант, ведущий инженер кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики»

Тапков К.А.

СОГЛАСОВАНО

Заведующий кафедрой «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики»

В.В.Муравьев

« 15 » 06 2020 г.

**Приложение Б Акт о внедрении результатов диссертации в
учебный процесс**

УТВЕРЖДАЮ
Ректор ФГБОУ ВО «Ижевский
государственный технический
университет имени
М.Т. Калашникова» д.э.н.,
профессор В.П. Грахов

« 07 » 07 2020 г.




АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Тапкова Кирилла Александровича

Комиссия в составе: председатель – председатель УМС 12.00.00 «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии» д.т.н., профессор О.В. Муравьева, члены комиссии – доцент кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики» к.т.н. В.А. Стрижак, доцент кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики» к.т.н. С.А. Мурашов составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Тапкова К.А. «Научное обоснование методики оценки остаточных напряжений в дифференцированно-упрочненных рельсах на основе явления акустоупругости и математического моделирования» внедрены в учебный процесс подготовки магистров по направлению 12.04.01 «Приборостроение» в виде лабораторных работ по дисциплине программы «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» при изучении дисциплины «Методы и средства структуроскопии».

Председатель комиссии

Члены комиссии


_____ О.В. Муравьева


_____ В.А. Стрижак


_____ С.А. Мурашов

**Приложение В Акт об использовании результатов диссертации при
контроле рельсов на ПАО ЧМК**

07.07.2020 № 68/ 01-116а

**ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени
М.Т. Калашникова»
Кафедра «Приборы и методы
измерений, контроля,
диагностики»
Зав. кафедрой
Муравьеву В.В.****ул. Студенческая, 7,
г. Ижевск
426069**

В соответствии с договором №ПМИКД-3-17/М (№10016915) от 20.01.2017 между ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» и ПАО «ЧМК» проведены работы по теме: «Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости с целью усовершенствования продукции». Работы проводились согласно Техническому заданию ПАО «ЧМК». По результатам проведенных работ представлен Отчет. Материалы диссертационной работы аспиранта кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики» Тапкова К.В. по теме «Научное обоснование методики оценки остаточных напряжений в дифференцированно-упрочненных рельсах на основе явления акустоупругости и математического моделирования» использованы при выполнении данных работ.

**Начальник отдела-
Зам. начальника ЦНКМ ПАО «ЧМК»
3 уровень по акустическому виду НК
Удостоверение №РО-0139****С.Я. Молоканов**