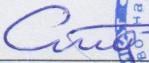


Утверждаю:

Директор департамента науки  
Санкт-Петербургского государственного  
электротехнического университета  
им. В.И. Ульянова (Ленина)  
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»),

Доктор технических наук, доцент,

 С.А. Тарасов

«14» декабря 2020 г.



### Отзыв

ведущей организации федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования «Санкт-  
Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

на диссертационную работу

Тапкова Кирилла Александровича

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

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности

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

Диссертационная работа Тапкова Кирилла Александровича посвящена  
вопросам разработки научно обоснованных подходов к методике контроля  
напряжённого состояния и оценки развития дефекта в виде трещины в  
головке рельсов по критерию остаточных напряжений на основе эффекта  
акустоупругости с использованием излучения и приема поперечно  
поляризованных объемных акустических волн. Возникающая за счет  
напряженного состояния анизотропия приводит к появлению разности  
скоростей волн с поляризациями вдоль и поперек направления остаточной  
поляризации. В работе математическое моделирование упруго-напряженного  
состояния рельс и соотнесение результатов экспериментальных

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Удмуртский федеральный исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук»

Вх. № 1285  
Дата 29.12.2020

исследований с полученными расчетным путем данными. Проведенные исследования позволили автору предложить методики контроля объекта исследования.

**Актуальность** выбранной темы определяется тем, что в настоящее время остаточные технологические напряжения контролируются лишь по косвенным признаком на ограниченной выборке рельсов разрушающими методами, при этом наличие высокого уровня остаточных технологических напряжений может вызвать преждевременный выход рельсов из строя.

Основными результатами диссертации можно считать следующее:

1. Теоретическое и вычислительное моделирование напряженно-деформированного состояния рельсов с использованием метода конечных элементов.

2. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния в железнодорожных после проката методом акустоупругости и установление наличия корреляции между разрушающими методами оценки напряжений в шейке рельса по расхождению паза и тензорезистивным методом оценки напряжений в подошве рельса с неразрушающим методом измерения напряженного состояния, основанном на эффекте акустоупругости.

3. Выявлены численные характеристики допустимых значений усредненного значения напряжения в рельсе методом акустоупругости и предложена на этой основе методика неразрушающего контроля.

4. Предложена математическая модель оценки остаточной наработки рельса с дефектами типа трещины до перехода в остродефектную категорию по критерию роста усталостной трещины в головке рельса в зависимости от уровня остаточных технологических напряжений и наработки рельса с учетом температурных воздействий.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 133 источников, а также трех приложений, содержащих разработанную методику неразрушающего контроля напряженного состояния рельсов и два акта внедрения. Объем диссертации без приложений 148 страниц. В работе содержится 18 таблиц и 85 рисунков. В приложениях представлена утвержденная методика неразрушающего контроля напряженного состояния рельсов при производстве, акт внедрения результатов диссертационного исследования в учебный процесс ФГБОУ ВО «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова» и акт об использовании результатов диссертационного исследования использованы при выполнении работ по исследованию напряженного состояния рельсов текущего производства на ПАО ЧМК.

Во введении на основании обзора текущего состояния вопросов контроля рельсов обоснована актуальность поставленной в диссертации задачи, приведена краткая характеристика цели и методов исследования, сформулированы полученные в работе научные и практические результаты.

В первой главе представлен краткий обзор контролируемых параметров рельсов текущего производства, среди которых особое внимание уделяется вопросу оценки значений остаточных напряжений в рельсе и существующих методов его контроля (подраздел 1.4). Дано описание неразрушающих методов тензометрирования, среди которых в качестве наиболее перспективного предлагается метод на основе акустоупругого эффекта (1.5.3), а также контроля дефектов в виде трещин с использованием этого же подхода.

Во второй главе приводится теоретический и экспериментальный подход к определению деформированного состояния рельса согласно теории упругости. Дан математический аппарат для расчёта напряжённо состояния, отмечены особенности использования метода конечных элементов. Также представлены методы математического анализа оценки возникновения и развития усталостного дефекта. Дано описание оборудования, используемого при экспериментальном исследовании напряжённого состояния методом акустической тензометрии (подраздел 2.3).

В третьей главе приведены результаты моделирования напряжённо-деформированного состояния рельса с использованием метода конечных элементов и экспериментального исследования напряжённого состояния рельса. Приведены соотношения между напряжениями по элементам рельса (головка, шейка, подошва), расхождением паза в рельсе, согласно которому в настоящее время проводится оценка уровня остаточных напряжений в рельсе и напряжениям в поверхностном слое подошвы рельса. Приводятся результаты экспериментального исследования, подтверждающие результаты моделирования. Дано описание напряжённого состояния рельса с учетом эксплуатационных нагрузок со стороны подвижного состава и возникающих температурных напряжений.

В четвертой главе описано математическое моделирование возникновения и роста усталостной трещины в головке рельса, оценка напряжённого состояния трещины, проведён анализ развития усталостной трещины в головке рельса при различном уровне остаточных технологических и температурных напряжений. Также проведена оценка влияния поверхностной трещины, находящейся на поверхности катания рельса, на развитие усталостной трещины в головке рельса.

В заключении работы приведены основные выводы диссертационного исследования.

Представленные материалы изложены достаточно последовательно и логично, позволяя понять взаимосвязь проведенных исследований, их необходимость и полноту.

#### **Новизна научных положений, сформулированных в диссертации**

Автором разработана и научно обоснована методика неразрушающего контроля напряжённого состояния элементов рельса методом акустической тензометрии. Данная методика полностью охватывает оценку параметров напряжённого состояния рельсов, используемых согласно ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия». Также автором диссертации разработана математическая модель по оценке ресурса рельса по критерию развития усталостной трещины в головке рельса. Представленные автором результаты обладают научной новизной и получены впервые:

1) предложена основанная на эффекте акустоупругости неразрушающая методика, согласно которой уровень измеренных остаточных напряжений от -50 МПа до -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 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 зависимости между значениями напряжений, получаемых методом акустической тензометрии при прозвучивании со стороны поверхности катания и напряжениями в поверхностном слое подошвы рельса, оцениваемых тензорезистивным методом. Значение напряжений в подошве не более 250 МПа соответствует уровню остаточных напряжений по сечению рельса не более минус 50 МПа.

4) предложена математическая модель оценки остаточной наработки рельса до перехода в остродефектную категорию по критерию роста усталостной трещины в головке рельса в зависимости от уровня остаточных технологических и температурных напряжений и наработки рельса.

Степень достоверности и обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

**Достоверность и обоснованность результатов, полученных в диссертационной работе, определяется следующим:**

1. Корректное применение методов математического и компьютерного моделирования;
2. Подтверждением результатов теоретического исследования экспериментальными данными, полученными на сертифицированном оборудовании согласно утверждённым методикам;

### **Практическая значимость работы**

Автором разработана основанная на эффекте акустоупругости методика неразрушающего контроля напряжённого состояния рельсов, изготовленных по технологии дифференцированного термоупрочнения. Разработанная методика позволяет повысить надёжность эксплуатации рельсов за счёт возможности увеличения выборки контролируемых рельсов, либо возможности перехода к сплошному контролю напряжённого состояния рельсов. Также автором разработана математическая модель, позволяющая оценивать ресурс рельса в зависимости от уровня измеренных напряжений.

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». Результаты диссертационного исследования 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».

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования Тапкова К.А., рекомендуются к внедрению на металлургические комбинаты, выпускающие рельсы по технологии дифференцированного термоупрочнения, в частности на Челябинский металлургический комбинат (ПАО ЧМК, г. Челябинск), Западно-Сибирский металлургический комбинат (АО ЕВРАЗ ЗСМК, г. Новокузнецк), Нижнетагильский металлургический комбинат (АО ЕВРАЗ НТМК, г. Нижний Тагил), а также в структурные подразделения РЖД.

### **Полнота изложения в опубликованных работах положений и результатов диссертации**

Основные научные результаты диссертационного исследования опубликованы в 14 научных статьях, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК РФ для публикации основных результатов диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата наук.

Результаты исследования докладывались на конференциях всероссийского и международного уровня.

#### **Анализ автореферата диссертации.**

Основные положения диссертации достаточно полно раскрыты в автореферате и опубликованных автором научных работах. Текст и содержание автореферата соответствуют требованиям ВАК РФ.

Вместе с тем при рассмотрении работы были отмечены ряд недостатков, недочетов и упущений:

1. Не достаточно четко сформулированы допущения и приближения, используемые при разработке математической модели упруго напряженного состояния рельса. Например, наблюдается некоторое несоответствие используемой в расчете изотропной модели среды с анизотропной природой используемого акустоупругого эффекта.
2. Недостаточно уделено внимания использованной в среде COMSOL расчетной модели (геометрия сетки, вид элементарной ячейки и т.п.)
3. Две составляющие работы: анализ упруго-напряженного состояния и моделирование развития дефектного состояния в работе получились несколько обособленными – просилось более акцентированно отметить общую теоретическую базу этих двух ветвей исследования.
4. Ряд замечаний по представлению материала:
  - описки и ошибки в тексте (формула 2.242 вместо 2.24, ошибка в формуле 2.14 - квадрат не у того сомножителя, неверный индекс напряжения в ф-ле 2.16, не дописан (?) заголовок подраздела 3.4 и т.п.)
  - неточные или ошибочные термины (вектор деформаций – хотя это тензор, обычно используемые как значки производной по времени применены для обозначения компонент деформации, оюязанных разным напряжениям)

Приведенные замечания, однако, не носят принципиального характера, ставящего под сомнение значимость полученных в работе результатов и достоинств диссертационной работы Тапкова К.А.

Результаты рассмотрения диссертационной работы Тапкова К.А. позволяют сделать следующие выводы:

можно заключить, что диссертационная работа Тапкова Кирилла Александровича выполнена на высоком научном уровне и обладает актуальностью и законченностью. Заявленная цель исследования достигнута, полученные результаты обоснованы. Основные выводы по работе научно обоснованы. Полученные результаты имеют научную новизну и практическую ценность. Личный вклад автора работы существенен.

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» по следующим пунктам: 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».

### **Заключение**

Диссертационная работа «Научное обоснование методики оценки остаточных напряжений в дифференцированно-упрочненных рельсах на основе явления акустоупругости и математического моделирования» соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор – Тапков Кирилл Александрович – заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий».

Диссертационная работа представлена, и рассмотрена на заседании кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина). В заседании принимали участие: д.т.н., профессор Аббакумов К.Е., д.т.н. профессор Цаплев В.М., к.т.н., доцент Степанов Б.Г., к.т.н., доцент Шевелько М.М., к.т.н., доцент Коновалов С.И., к.т.н., доцент Коновалов Р.С., к.т.н. доцент Теплякова А.В., к.т.н., доцент Выогинова А.А., к.т.н., доцент Перегудов А.Н., ст.преп. Паврос К.С., ассист. Дурукан Я.

Отзыв на диссертацию заслушан и утвержден заседанием кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета имени В.И.Ульянова (Ленина) (СПБГЭТУ «ЛЭТИ») – протокол №5 от 09.12.2020.

Отзыв составили

зав. кафедрой электроакустики и ультразвуковой техники

д.т.н., проф.

Аббакумов Константин Евгеньевич

к.т.н., доц. кафедры электроакустики  
и ультразвуковой техники

Перегудов Александр Николаевич