

Утверждаю:

Проректор по научной работе

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», д.т.н., профессор, заведующий кафедрой микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры

 В.А.Тупик

«12» сентября 2022 г.

## ОТЗЫВ

Ведущей организации, федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» на диссертацию Тапкова Кирилла Александровича «Разработка методики оценки остаточных напряжений в дифференцированно термоупрочнённых рельсах по данным акустического тензометрирования», выполненную на кафедре «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки).

Диссертационная работа К.А. Тапкова посвящена разработке методики оценки продольных остаточных напряжений в дифференцированно термоупрочнённых рельсах на стадии изготовления по данным акустического тензометрирования и результатов разрушающих испытаний.

**Актуальность** выбранной темы определяется тем, что в настоящее время согласно ГОСТ 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия» контроль остаточных технологических напряжений

проводится на ограниченной (не менее 1%) выборе рельсов с использованием разрушающих методов. Контроль проводится лишь по косвенным признакам: расхождению головки и подошвы рельса при прорезании паза в шейке рельса, а также тензорезистивным методом для оценки напряжений в подошве рельса при отладке производства. В то же время, высокий уровень остаточных напряжений может вызывать развитие дефектов в виде трещин и способствовать преждевременному выходу рельсов из строя. Автором диссертационного исследования К.А. Тапковым предлагается методика на основе акустического тензометрирования рельса, позволяющая проводить контроль сечения рельса без его разрушения.

**Работа** состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и четырёхприложений. Список литературы включает в себя 147 источников. Общий объём работы составляет 132 страницы. В работе содержится 13 таблиц и 14 рисунков. В приложениях представлен акт внедрения результатов диссертационного исследования в учебный процесс ФГБОУ ВО «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова», сведения об использовании результатов диссертационной работы при выполнении договоров по оценке остаточных напряжений в рельсах Р65 на ПАО ЧМК и по исследованию остаточных напряжений в рельсах Р65 на ЕВРАЗ ЗСМК, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Введение** раскрывает суть и направление диссертационного исследования.

**В первой главе** представлен краткий обзор контролируемых параметров рельсов текущего производства, среди которых особое внимание уделяется вопросу оценки значений остаточных напряжений в рельсе. Дано описание неразрушающих методов тензометрирования, среди которых в качестве наиболее перспективного предлагается метод акустического тензометрирования. Отмечается, что используемые в настоящее время методы неразрушающего контроля имеют своей целью поиск дефектов в

виде трещины зеркально-теневым методом, при этом отсутствуют неразрушающие методики оценки остаточных напряжений.

**Во второй главе** приводится описание математического аппарата для расчёта напряжений в рельсе согласно теории упругости, приведены основные положения акустоупругости. Дано описание оборудования, используемого для экспериментальных исследований напряжённого состояния методом акустической тензометрии.

**Третья глава** посвящена моделированию и экспериментальному исследованию продольных остаточных напряжений в рельсе и элементах рельса (головка, шейка, подошва). Установлена связь между значениями напряжений в элементах рельса и расхождением головки и подошвы при прорезании паза в шейке рельса, и связь между значением напряжений в элементах рельса по отношению к напряжениям в середине подошвы рельса. Установлен коэффициент корреляции расхождения паза по отношению к продольным остаточным напряжениям в элементах рельса. Вводится понятие «фактор плавки», определяемый по результатам разрушающих испытаний одного из рельсов данной плавки.

**В четвёртой главе** приведён вывод расчётных выражений и представлена методика расчёта остаточных продольных напряжений в элементах рельса по данным акустического тензометрирования участка рельса и фактора плавки.

В заключении работы приведены основные выводы диссертационного исследования.

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

Автором разработана и научно обоснована методика оценки продольных остаточных напряжений в дифференцированно термоупрочнённых рельсах на стадии изготовления по данным акустического тензометрирования и результатов разрушающих испытаний. Данная методика полностью охватывает оценку параметров напряжённого состояния рельсов, используемых согласно ГОСТ 51685-2013 «Рельсы

железнодорожные. Общие технические условия». Также эта методика позволяет проводить оценку продольных остаточных напряжений в элементах рельса, таких как головка, шейка, подошва. Представленные автором результаты обладают научной новизной и получены впервые:

1) разработан комплексный аналитико-экспериментальный подход к конечно-элементному моделированию механических напряжений в рельсе, учитывающий результаты экспериментальных исследований остаточных напряжений в отдельных элементах дифференцированно термоупрочнённого рельса.

2) впервые научно обоснована методика оценки продольных остаточных напряжений по высоте рельса методом акустической тензометрии, учитывающая фактор плавки, определяемый разрушающим методом по расхождению паза при разрезке шейки рельса.

3) впервые на основании полного факторного эксперимента при конечно-элементном моделировании научно обоснована методика оценки остаточных напряжений в отдельных элементах рельса (головка, шейка, подошва) по результатам акустической тензометрии и фактора плавки.

#### **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;
3. Использование элементов теории упругости при обосновании расчёта остаточных напряжений в рельсе, теоретических положений акустической тензометрии.

## **Практическая значимость работы**

Автором предложен критерий, позволяющий определить наличие недопустимого значения продольных остаточных напряжений на участке рельса без его разрушения. В качестве входных параметров выступают данные акустического тензометрирования участка рельса без его разрушения и фактор плавки, определяемый разрушающими методами для одного из рельсов данной плавки. Разработанная методика позволяет повысить надёжность эксплуатации рельсов за счёт возможности увеличения выборки контролируемых рельсов, либо возможности перехода к сплошному контролю остаточных напряжений в рельсах.

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» и Западно-Сибирского металлургического комбината (ЕВРАЗ ЗСМК) при выполнении договора ПМИКД-4-17/ДГЗС7 «Исследования остаточных напряжений в дифференцированно закаленных рельсах методом акустоупругости», а также использованы при разработке программы для ЭВМ «Acousticstressrailcontrol».

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 16 работах, в том числе в 6 статьях в журналах, рекомендуемых ВАК РФ для публикации основных результатов диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата наук, 4 статьи опубликованы в изданиях, включенных в базы Scopus, Web of Science, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2021616903. Результаты исследования докладывались на конференциях всероссийского и международного уровня.

### **Анализ автореферата диссертации**

Содержание автореферата диссертации отражает основные положения и результаты диссертационной работы и отвечает содержанию диссертации. Текст и содержание автореферата соответствуют требованиям ВАК РФ.

### **Вопросы и замечания по диссертационной работе**

1. В первой главе слишком много общих рассуждений в ущерб конкретным данным о свойствах сталей, применяемых для изготовления рельсов. Нет сравнения свойств упругости, усталости, ползучести, магнитных свойств и пр. важных физических характеристик, необходимых для проведения акустического неразрушающего контроля. Нет анализа причин возникновения остаточных напряжений при производстве рельсов различного типа, из различных типов сталей при различных методах закалки. Различные методы закалки описываются поверхностно, без анализа физических процессов, протекающих при закалке. Отсутствует микроструктурный и рентгеноструктурный анализ сталей различных типов, и не выявлены преимущества и недостатки сталей различных типов с точки зрения их физико-механических свойств.

2. Из формулы 1.2 первой главы следует, что скорость звука меняется линейно в зависимости от напряжения, так как модуль упругости  $C_1$  предполагается постоянным. Однако, это не так, модуль упругости  $C_1$  меняется нелинейно в зависимости от  $\sigma$ . Следовательно, зависимость скорости звука от напряжения более сложная, чем указана в формулах 1.3 и 1.4, и требования к точности измерений повышаются. На стр. 37 указано: «Также среди преимуществ необходимо выделить возможность использования одного коэффициента акустоупругой связи в случае изотропной среды»— при наличии остаточных напряжений среда как раз и становится нелинейной.

3. Во второй главе, стр. 44, указано: «В таком случае вектора напряжений по осям  $S_x$ ,  $S_y$ ,  $S_z$  раскладываются на составляющие по координатным осям следующим образом...». Но напряжение – это не вектор, а тензор, и почему-то компоненты тензора напряжений обозначаются различными буквами в формуле 2.1., и почему-то компоненты тензора напряжений обозначаются различными буквами. В формулах 2.3 – 2.15 второй главы содержится значительное количество опечаток, используются различные обозначения для одних и тех же параметров, и в то же время одни и те же обозначения для различных параметров, часть обозначений не раскрыта.

4. Осциллограмму на стр. 52 следует пояснить – невооруженным глазом видно, что временные интервалы между зондирующими импульсом и донными, а также между донными – заметно различаются.

5. Сравнительный анализ результатов, полученных путем предварительного моделирования методом конечных элементов и экспериментальных результатов, выполнен недостаточно детально.

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

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.**

Считаем, что диссертационная работа К.А. Тапкова, 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 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» (технические науки) по следующим пунктам: п. 1 «Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды» и п. 3 - «Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды».

**Заключение**

Диссертационная работа «Разработка методики оценки остаточных напряжений в дифференцированно термоупрочнённых рельсах по данным акустического тензометрирования» соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор – Тапков Кирилл Александрович – заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8«Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» (технические науки).

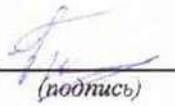
Диссертационная работа представлена и рассмотрена на расширенном заседании кафедры «Электроакустики и ультразвуковой техники» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина), протокол №1 от 12сентября 2022 г. В заседании принимали участие: д.т.н., 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 Вьюгинова А.А., к.т.н., доцент Перегудов А.Н., к.т.н., доцент Паврос К.С., к.т.н., ассистент Дурукан Я.

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой  
«Электроакустики и ультразвуковой техники»

  
(подпись)

К.Е. Аббакумов

к.т.н., доцент, ученый секретарь кафедры  
«Электроакустики и ультразвуковой техники»

  
(подпись)

А.Н. Перегудов

Подписи К.Е.Аббакумова и А.Н.Перегудова удостоверяю

«12» сентября 2022 г.

