

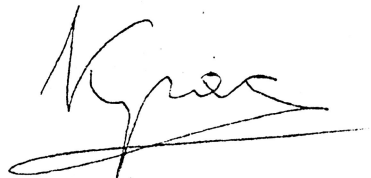
Краснобрыжий Станислав Андреевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ОБОРУДОВАНИЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
В ОБОДЬЯХ ЦЕЛЬНОКАТАНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС**

**05.02.11 – Методы контроля и диагностика
в машиностроении**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



Москва – 2013

Работа выполнена в Петербургском государственном университете
путей сообщения

Научный руководитель: **ДЫМКИН Григорий Яковлевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **САМОКРУТОВ Андрей Анатольевич**
доктор технических наук,
ООО «Акустические Контрольные Системы»,
генеральный директор

ПРИЛУЦКИЙ Максим Андреевич
кандидат технических наук,
МГТУ им. Н.Э.Баумана, доцент

Ведущая организация: **ОАО «Научно-исследовательский институт
железнодорожного транспорта»
(ОАО «ВНИИЖТ»), г. Москва**

Защита диссертации состоится **14** марта 2013г. в **11⁰⁰** часов на
заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском
государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ваш отзыв на автореферат диссертации в двух экз
заверенных печатью организации, просим направлять по указанию
на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан «_____» _____ 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.01,
доктор технических наук, доцент

А.В. Коновалов

А.В. Коновалов

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



2015692

Краснобрыжий С.А. Разработ

-693

Актуальность работы. Развитие отечественной промышленности и сопровождающая его интенсификация железнодорожных перевозок предъявляют повышенные требования к безопасности движения поездов, которая в значительной мере определяется эксплуатационной надёжностью элементов подвижного состава, к числу которых, прежде всего, следует отнести колесные пары вагонов.

Вагонное колесо в эксплуатации подвергается статическим, динамическим и тепловым нагрузкам. Взаимодействие напряжений от этих нагрузок с остаточными механическими напряжениями может привести к образованию, ускоренному развитию трещин или хрупкому излому колеса.

В последние годы в мировой практике все большее внимание уделяется остаточным напряжениям в железнодорожных колесах, их влиянию на прочность и работоспособность колес и методам их измерения. Показано, что значительная неоднородность напряжений в сечении обода колеса требует оценки напряжений внутри объема материала и обуславливает целесообразность применения ультразвукового метода измерений, основанного на эффекте акустоупругости.

Исследованиям эффекта акустоупругости и проблемам создания средств и технологий ультразвуковой тензометрии посвящены теоретические и прикладные работы Алешина Н.П., Бобренко В.М., Гузя А.Н., Депутата Ю., Кларка А., Томпсона Р. и др. Наиболее системные исследования ультразвукового метода контроля остаточных механических напряжений в колесах выполнены под руководством Шнайдера Э. во Фраунгоферовском институте неразрушающего контроля (Германия); разработанная методика измерения остаточных напряжений в ободах колес по разнице скоростей двух ортогонально поляризованных поперечных волн широко применяется в зарубежной практике как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации колес. В то же время возможность применения указанной методики, как и других, основанных на эффекте акустоупругости, обусловлена требованиями к однородности и изотропии физико-механических свойств контролируемого материала.

Различие состава сталей, используемых для производства колес, и технологий колесопрокатного производства в России и зарубежом, освоение отечественными предприятиями (Выксунский металлургический завод, Нижнетагильский металлургический комбинат) производства новых типов колес с повышенными эксплуатационными свойствами, а также необходимость обеспечения безопасности железнодорожных перевозок в условиях повышения осевых нагрузок, веса поездов и интенсивности движения обуславливают актуальность задачи разработки методики и средств неразрушающего ультразвукового контроля остаточных механических напряжений в колесах отечественного производства.

Целью работы являлось повышение безопасности движения на железнодорожном транспорте и эксплуатационной надежности вагонов за счет создания и внедрения технологии и оборудования неразрушающего

ультразвукового контроля остаточных механических напряжений при изготовлении и эксплуатации колес российского производства.

Задачи исследования:

1. Провести экспериментальные исследования акустоупругих свойств материалов цельнокатаных колес российских производителей.
2. Разработать методику измерения распределения остаточных механических напряжений в ободьях колес с учетом анизотропии материала.
3. Обосновать алгоритмические решения аппаратуры ультразвукового контроля остаточных механических напряжений в ободьях колес.
4. Разработать технологию ультразвукового контроля распределения остаточных напряжений в ободьях колес при их производстве.

Научная новизна

1. Обнаружено, что анизотропия упругих свойств материала ободьев цельнокатаных колес повышенной твердости (марка Т) российских заводов-производителей не оказывает влияния на коэффициент акустоупругости, но вносит значимую систематическую погрешность при измерении остаточных механических напряжений в ободьях колес ультразвуковым методом.

2. Установлена линейная зависимость измеряемых ультразвуковым методом средних по толщине остаточных механических напряжений в ободьях цельнокатаных колес от относительной разницы скоростей ортогонально поляризованных поперечных ультразвуковых волн и анизотропии свойств материала обода.

3. Показано, что при упругой анизотропии материала, обуславливающей относительную разницу скоростей ортогонально поляризованных поперечных волн от 0,02 до 0,2%, для неразрушающего ультразвукового контроля остаточных напряжений в ободьях цельнокатаных колес при их производстве может применяться методика, базирующаяся на полученных в работе закономерностях и включающая предварительные измерения времени распространения ультразвука в образце, вырезанном из одного колеса данной плавки.

Практическая ценность

Установлены значения акустоупругих характеристик материала ободьев железнодорожных цельнокатаных колес из сталей марок 2, Т и ER7, произведенных на российских предприятиях. Разработана и стандартизована (ГОСТ Р 54093-2010) инженерная методика ультразвукового контроля остаточных механических напряжений в ободьях колес учитывающая упругую анизотропию материала. Результаты работы используются в учебном процессе Петербургского государственного университета путей сообщения. Разработана технология контроля и построен алгоритм обработки измерительной информации, реализованный в приборе УКОН-01 и аппаратно-программных модулях для определения остаточных напряжений в ободьях колес при их производстве на Выксунском металлургическом заводе и Нижнетагильском металлургическом комбинате, что подтверждено актами внедрения.

Методы исследования

Методы исследования, использованные в настоящей работе, включали разделы теории упругости, акустики твердых тел, математической статистики. Решение задач выполнено с применением ЭВМ. Экспериментальные исследования проведены на специально созданных образцах с использованием современного сертифицированного измерительного оборудования.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на III Российской научно-технической конференции «Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2007г.), XIX и XX Петербургских научно-технических конференциях «Ультразвуковая дефектоскопия металлоконструкций» (С.-Петербург, 2007г., 2009г.), XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика» (Нижний Новгород, 2008г.), научно-техническом совете НИИ мостов, научных семинарах кафедр «Методы и приборы неразрушающего контроля» ПГУПС и «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им Н.Э.Баумана в 2012г.

Публикации

Материалы диссертации отражены в 5 печатных работах, из них одна статья в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК.

Объем работы

Диссертационная работа изложена на 109 страницах машинописного текста, иллюстрируется 40 рисунками, содержит 14 таблиц, состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы (64 наименования).

Содержание работы

В первой главе содержатся обзорные сведения о конструкции, материалах и технологии изготовления цельнокатаных железнодорожных колес. Представлены результаты расчетов распределений остаточных механических напряжений в цельнокатаных колесах. Проведен анализ дефектности цельнокатаных железнодорожных колес и применяемых методов контроля остаточных механических напряжений, отражены достоинства и недостатки ультразвукового метода.

Основными причинами формирования остаточных технологических механических напряжений в ободьях производимых цельнокатаных железнодорожных колес являются термическая и механическая обработки. Режимы термической обработки закалка и отпуск, процесс прокатки нагретой заготовки, а также химический состав марок стали колес определяют уровень и характер распределения остаточных технологических напряжений в железнодорожных колесах. Различие величин остаточных механических напряжений по сечению обода у колес с нормальной и с повышенной твердостью обусловлено свойством применяемых марок сталей (2 и Т) и технологий изготовления. Неравномерности в процессе прокатки и

особенности режимов термообработки, которые особенно ярко проявляются при производстве колес повышенной твердости, вызывают не только остаточные напряжения в ободьях колес, но и анизотропию свойств колесной стали, которая определяется, в первую очередь, формированием определенного характера структуры материала.

Применяемая технология производства железнодорожных колес формирует отрицательные сжимающие остаточные напряжения в зонах, близких к поверхности катания, а в целом - значительную неоднородность распределения напряжений в сечении колеса. Указанная неоднородность является результатом неравномерной пластической деформации, вызванной неодновременностью и неоднородностью нагрева и охлаждения различных элементов колеса в процессе его изготовления и обработки на всех этапах. Преднамеренное формирование в приповерхностных слоях ободьев колес сжимающих напряжений обусловлено необходимостью противодействия развитию дефектов и обеспечению стойкости колес к температурным напряжениям. В то же время, нарушение технологии изготовления колес приводит к возникновению аномальных напряжений и хрупкому излому колеса даже при отсутствии явных металлургических дефектов.

С другой стороны, при длительной эксплуатации колеса влияние статических, динамических и температурных нагрузок может явиться причиной опасных растягивающих напряжений. По имеющимся данным, изломы колес, происходящие в эксплуатации, связаны с наличием в колесах высоких значений растягивающих напряжений, вызванных влиянием пути и подвижного состава, а также термическими нагрузками на колесо в результате торможения.

Согласно ГОСТ 10791-2011 к недопустимым дефектам при изготовлении относятся флокены, расслоения, трещины, корочки, остатки усадочных раковин и недопустимых ликваций. Анализ статистических данных показывает, что при производстве цельнокатаных колес на металлургическом предприятии наиболее часто встречающимися и потенциально опасными являются внутренние дефекты типа корочек, газовых пузырей и флокенов, возникающие, как правило, в зонах, прилегающих к поверхности катания и переходу обода в диск колеса. Взаимодействие эксплуатационных и остаточных технологических напряжения (прежде всего, растягивающих) может привести к ускоренному росту трещин и/или хрупкому излому.

Изложенное обусловило необходимость применения методов определения остаточных напряжений в железнодорожных колесах с целью обеспечения безопасности движения поездов.

Известен целый ряд методов, которые обеспечивают определение остаточных напряжений. Применение ряда методов регламентировано российскими и европейскими нормами. Согласно ГОСТ 10791-2011, сжимающие напряжения в ободе цельнокатаного колеса определяют по сходимости краев обода после его радиальной разрезки. Этот метод

используется на металлургических предприятиях в качестве обязательного выборочного контроля и дает качественную оценку напряженного состояния. ГОСТ Р 54093-2010 предлагает применение разрушающего тензометрического и неразрушающих ультразвукового и рентгеновского методов.

Анализ существующих методов определения остаточных напряжений показал, что наиболее перспективным является ультразвуковой (акустический) метод. Главным и уникальным его достоинством является то, что он единственный позволяет получить средние по прозвучиваемому участку значения напряжений внутри объема обода колеса. Необходимо отметить, однако, что акустические характеристики материала должны быть известны с высокой точностью. Метод основан на эффекте акустоупругости, описывающем влияние механического напряжения на скорость распространения ультразвуковых волн в материале.

На основании теории конечных деформаций Мурнагана в 1953 г. Д. Хьюз и Дж. Келли разработали теорию акустоупругости и получили фундаментальные выражения, связывающие деформации и скорости продольной и поперечных ультразвуковых волн в изотропном материале:

$$\begin{aligned}\rho c_{ii}^2 &= \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)(\varepsilon_i + \varepsilon_j + \varepsilon_k) + (4m + 4\lambda + 10\mu)\varepsilon_i, \\ \rho c_{ij}^2 &= \mu + (\lambda + m)(\varepsilon_i + \varepsilon_j + \varepsilon_k) + 4\mu\varepsilon_i + 2\mu\varepsilon_j - 0,5n\varepsilon_k, \\ \rho c_{ik}^2 &= \mu + (\lambda + m)(\varepsilon_i + \varepsilon_j + \varepsilon_k) + 4\mu\varepsilon_i - 0,5n\varepsilon_j + 2\mu\varepsilon_k,\end{aligned}\quad (1.1)$$

где ρ – плотность материала; c_{ii} – скорость продольной волны в направлении распространения i ; c_{ij} и c_{ik} – скорости ортогонально поляризованных поперечных волн в направлении распространения i ; λ , μ и l , m , n – упругие постоянные материала второго и третьего порядка соответственно; ε_i , ε_j , ε_k – основные компоненты деформаций.

Выражения Хьюза и Келли могут быть записаны также в виде, связывающем напряжения и скорости:

$$\begin{aligned}\frac{c_{ii} - c_L}{c_L} &= \frac{A}{C}\sigma_i + \frac{B}{C}(\sigma_j + \sigma_k), \\ \frac{c_{ij} - c_T}{c_T} &= \frac{D}{G}\sigma_i + \frac{E}{G}\sigma_j + \frac{F}{G}\sigma_k, \\ \frac{c_{ik} - c_T}{c_T} &= \frac{D}{G}\sigma_i + \frac{F}{G}\sigma_j + \frac{E}{G}\sigma_k,\end{aligned}\quad (1.2)$$

где c_L и c_T – скорости продольной и поперечной волн в изотропном материале; σ_i , σ_j , σ_k – основные компоненты напряжений; A , B , C , D , E , F , G – комбинации упругих постоянных материала.

В последующие десятилетия развитию теории и практики акустоупругости посвящены теоретические и прикладные работы Н.П. Алешина, В.М. Бобренко, А.Н. Гузя, Н.Е. Никитиной, а также

североамериканских (Р. Томпсон, А. Кларк) и европейских (Ю. Депутат, В. Хаук, Э. Шнайдер) ученых. Наиболее системные исследования ультразвукового метода контроля остаточных механических напряжений в колесах выполнены в Фраунгоферовском институте неразрушающего контроля (Германия), где под руководством Э. Шнайдера разработана методика и аппаратура, основанная на измерении времен распространения ультразвуковых волн, расчете разности усредненных по ширине обода колеса окружных и радиальных напряжений и получении эпюры распределения напряжений для ряда точек по высоте обода относительно расстояния h от поверхности катания. Однако принципиальный вопрос применения указанной методики заключается в наличии и возможности учета неоднородности и анизотропии физико-механических и акустических свойств контролируемого материала.

С учетом особенностей новых технологий производства колес с улучшенными эксплуатационными характеристиками для решения поставленной задачи необходимо создать методику определения остаточных механических напряжений в ободьях цельнокатаных железнодорожных колес, позволяющую учитывать акустические и структурные свойства материала и повысить точность ультразвукового метода.

Во второй главе исследована методика ультразвукового контроля остаточных механических напряжений. Проведена оценка влияния твердости и анизотропии на акустоупругие свойства материала колес, получены значения коэффициентов акустоупругости.

Для экспериментального исследования акустоупругих свойств материалов колес разработана методика измерения скоростей ультразвуковых волн и собран стенд, реализованный с помощью обычных средств, состоящий из генератора ультразвуковых колебаний, осциллографа и пьезоэлектрических преобразователей. Образцы представляли собой параллелепипеды, изготовленные из обода колеса. Всего в исследованиях было использовано более 40 образцов, изготовленных из ободьев колес различных марок сталей. В зависимости от марки стали и предприятия-производителя образцы обозначали 2*1.1, Т*1.1, 2**1.1, Т**1.1 и т.д.

Рассчитывались скорости распространения продольной и двух поперечных плоско-поляризованных волн. Их распространение в трех ортогональных направлениях (1 – радиальное, 2 – осевое, 3 – окружное) и на разном расстоянии от поверхности катания h колеса обусловлено возможным изменением акустоупругих свойств материала (рисунок 1).

Точность расчета скоростей упругих волн обеспечивалась возможностью многократного измерения наносекундных значений времен прихода волн, соответствующих одинаковым точкам на осциллограмме серии донных экосигналов. По усредненной разнице значений времен и размеру образца рассчитывали скорость ультразвука. Используемая аппаратура и методика измерений обеспечила относительную погрешность результата расчета скоростей менее 0,05%.

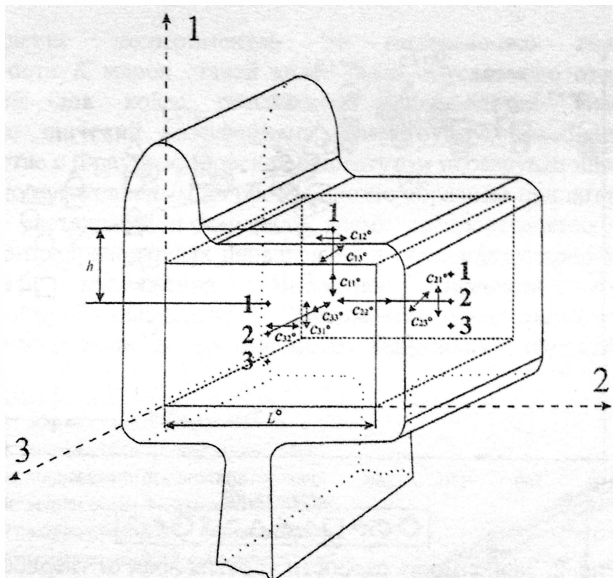


Рис. 1. Образец – параллелепипед, изготовленный из сектора обода колеса

Полученные данные были сгруппированы в виде матриц скоростей упругих волн в образце из обода колеса, пример которых представлен в таблице.

Таблица.

Матрица скоростей упругих волн в образце

Точка	Скорости упругих волн, м/с		
1	$c_{11}^0=5929,0$	$c_{12}^0=3237,7$	$c_{13}^0=3239,6$
1	$c_{21}^0=3233,5$	$c_{22}^0=5923,6$	$c_{23}^0=3234,1$
2	$c_{21}^0=3233,2$	$c_{22}^0=5923,6$	$c_{23}^0=3233,7$
3	$c_{21}^0=3233,4$	$c_{22}^0=5923,5$	$c_{23}^0=3233,5$
1	$c_{31}^0=3237,7$	$c_{32}^0=3235,1$	$c_{33}^0=5926,9$
2	$c_{31}^0=3237,1$	$c_{32}^0=3235,1$	$c_{33}^0=5924,3$
3	$c_{31}^0=3236,2$	$c_{32}^0=3236,0$	$c_{33}^0=5924,7$

Выявленная рядом исследователей связь механических и акустоупругих свойств материала, а также обнаруженное непостоянство твердости при измерениях на разном расстоянии h от поверхности катания колес, обусловили необходимость оценки ее влияния на скорость упругих волн. Из полученных данных скоростей для случайным образом отобранных образцов, вырезанных из объема обода колеса, построена зависимость скоростей поперечных волн от твердости материала обода колеса, представленная на рисунке 2.

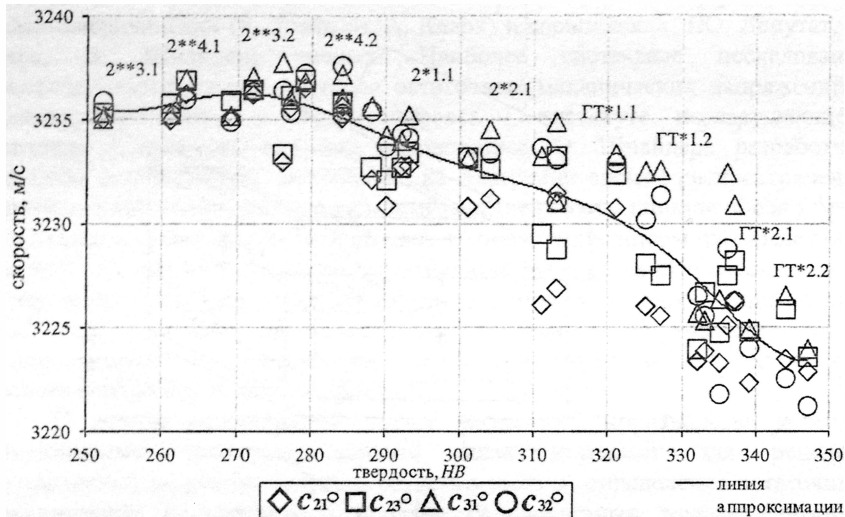


Рис. 2. Зависимость скорости упругих волн от твердости (по данным измерений на колесах нормальной и повышенной твердости Выксунского металлургического завода и Нижнетагильского металлургического комбината)

Видная на рисунке 2 тенденция снижения скоростей распространения ультразвуковых волн с увеличением твердости материала соответствует ранее полученным результатам ряда авторов, однако в пределах изменения твердости материала по высоте образца, составляющих 20-30 НВ, изменение скорости поперечных волн в каждом образце незначительно (рисунок 3) и не оказывает влияния на результат измерения напряжений.

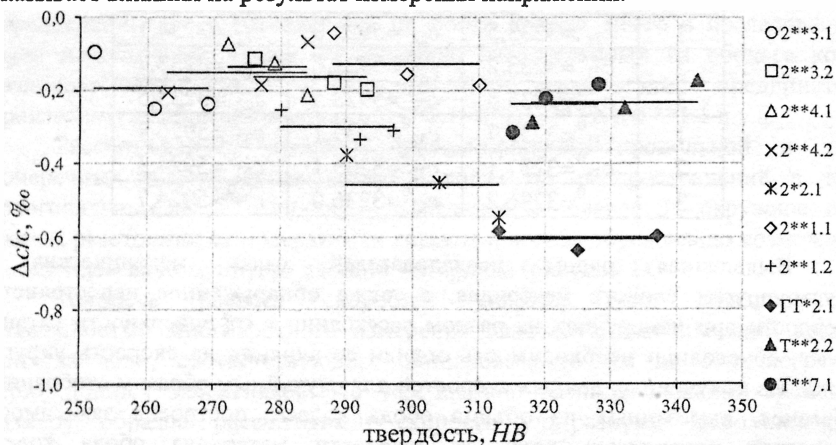


Рис. 3. Относительное изменение скорости в диапазоне изменения твердости по высоте обода

Проведение экспериментов по определению коэффициентов акустоупругости K марок сталей колес было обусловлено отсутствием их исследований для колес российского производства. Измерения по определению значений коэффициентов акустоупругости K проведены в сотрудничестве с Фраунгоферовским институтом неразрушающего контроля. К специально изготовленным из ободьев колес образцам прилагали известное напряжение растяжения и измеряли время распространения поперечных волн, плоско-поляризованных параллельно и перпендикулярно направлению приложенного напряжения. Численное значение коэффициента акустоупругости K определяли по зависимостям относительного изменения времени прихода волн от приложенного напряжения, представленным на рисунке 4.

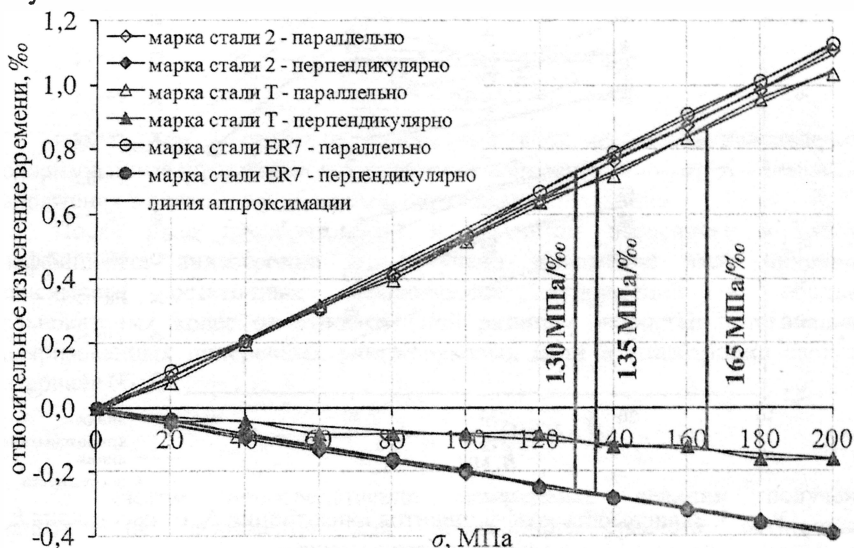


Рис. 4. Относительное изменение времени распространения плоско-поляризованной поперечной волны, вызванное приложенными напряжениями в образцах из марок стали 2, Т и ER7

Значения коэффициентов акустоупругости K для марок сталей 2, Т и ER7 составили соответственно 135, 165 и 130 МПа/‰. По результатам экспериментов установлена стабильность значений коэффициентов акустоупругости для образцов, вырезанных как вдоль, так и поперек направления проката, а также расположенных на разной глубине от поверхности катания.

Выявление анизотропии материала проводилось сравнением недиагональных компонент матриц скоростей для образцов ободьев колес. Анизотропию материала предложено численно характеризовать коэффициентом анизотропии Δ_a , равным относительной разности скоростей

распространения c_{21}^0 и c_{23}^0 (времен распространения t_{21}^0 и t_{23}^0) двух ортогонально плоско-поляризованных поперечных волн между боковыми гранями образца из обода колеса без напряжений:

$$\Delta_a = \frac{c_{21}^0 - c_{23}^0}{c_{23}^0} = \frac{t_{23}^0 - t_{21}^0}{t_{21}^0}. \quad (1.3)$$

Коэффициенты анизотропии Δ_a представлены на рисунке 5 и проанализированы для образцов из всех существующих марок колесных сталей; подтверждена повторяемость и воспроизводимость результатов измерений.

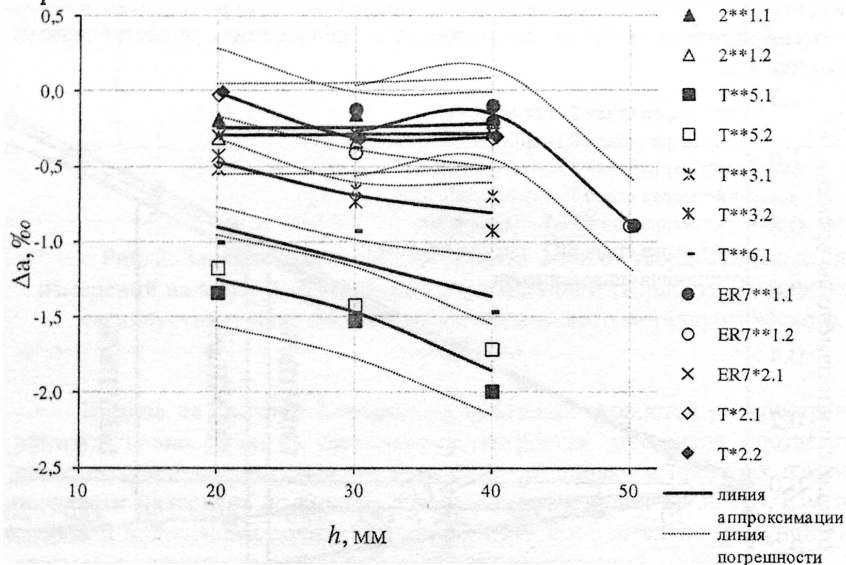


Рис. 5. Зависимость коэффициентов анизотропии Δ_a от расстояния h от поверхности катания

Для материала колес из марок стали **ER7**** и **T**** на глубине 20-50 мм от поверхности катания коэффициенты анизотропии принимают значение до 1‰ и 2‰ соответственно. Столь слабая анизотропия, тем не менее, вносит систематическую погрешность в результат расчета остаточных напряжений, достигающую 150-300 МПа, что может исказить результаты измерений и оценки качества колес по требованиям действующих норм.

Обнаруженная анизотропия материала обуславливает необходимость корректировки неразрушающего ультразвукового метода измерения остаточных механических напряжений в ободах колес.

В третьей главе представлены результаты разработки методики учета анизотропии материала ободьев цельнокатаных колес и анализа погрешности методики.

Выражения (1.2), связывающие напряжения и скорости поперечных ультразвуковых волн, не учитывают анизотропию материала. При условии слабой анизотропии материала обода можно считать, что в каждой точке измерений (на каждом расстоянии h от поверхности катания колеса) материал квазиизотропен, однако значения скоростей и, соответственно, времен распространения волн, поляризованных в радиальном и окружном направлении, изменяются в зависимости от h .

В таком случае выражения (1.2) с обозначениями используемой в экспериментах Декартовой системы координат корректно записать в виде со скоростями поперечных волн c_{21}^0 и c_{23}^0 в слабо анизотропном материале:

$$\frac{c_{21} - c_{21}^0}{c_{21}^0} = \frac{D}{G} \sigma_2 + \frac{E}{G} \sigma_1 + \frac{F}{G} \sigma_3, \quad (1.4)$$

$$\frac{c_{23} - c_{23}^0}{c_{23}^0} = \frac{D}{G} \sigma_2 + \frac{F}{G} \sigma_1 + \frac{E}{G} \sigma_3,$$

где c_{21} , c_{23} – скорости поперечных волн в осевом направлении, поляризованные в радиальном и окружном направлении; σ_2 , σ_1 , σ_3 – основные напряжения в осевом, радиальном и окружном направлении.

После ряда преобразований и с учетом введенного в работе коэффициента анизотропии Δ_a получено выражение вида линейной зависимости остаточных механических напряжений в ободьях цельнокатаных колес от относительной разницы скоростей ортогонально поляризованных поперечных ультразвуковых волн и анизотропии свойств материала обода:

$$\sigma_3 - \sigma_1 = \frac{K}{c_{21}^0} (c_{21} - c_{23} (1 + \Delta_a)). \quad (1.5)$$

С учетом непосредственно измеряемых величин получено аналитическое выражение для инженерного расчета остаточных механических напряжений в ободьях колес с учетом анизотропии материала:

$$\sigma_3 - \sigma_1 = \frac{KLt_{23}^0}{L^0} \left(\frac{1}{t_{21}(1 + \Delta_a)} - \frac{1}{t_{23}} \right), \quad (1.6)$$

где L , L^0 – путь, пройденный ультразвуком в контролируемом колесе и в образце соответственно; t_{21} , t_{23} – время распространения поперечных волн, поляризованных в радиальном и окружном направлениях.

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработана методика учета анизотропии материала ободьев цельнокатаных колес, которая отличается от известной:

1. Предварительным измерением опорных значений времен распространения поперечных волн t_{21}^0 и t_{23}^0 на каждом расстоянии h от поверхности катания колеса;

2. Расчетом и оценкой коэффициентов анизотропии на каждом расстоянии h от поверхности катания колеса;

3. Учетом коэффициентов анизотропии при расчете остаточных напряжений по значениям времен распространения волн t_{21} и t_{23} , измеренным в контролируемом колесе.

Анализ погрешности методики проводился при расчете погрешностей измеряемых величин. Применялись классические формулы обработки результатов измерений. Оценивались относительные погрешности изменяющихся измеряемых величин, используемых при расчете остаточных механических напряжений по известной методике и методике, учитывающей влияние анизотропии материала. Установлено, что несмотря на увеличение количества дополнительно измеряемых величин суммарная относительная погрешность новой методики остается ниже погрешности известной методики на которую влияют ошибки, вызванные анизотропией.

Практическое опробование разработанной методики проведено при испытаниях партии колес на металлургическом предприятии. На рисунке 6 показаны типичные распределения остаточных механических напряжений в ободе одного из колес, рассчитанные с применением известной методики и методики, учитывающей анизотропию материала.

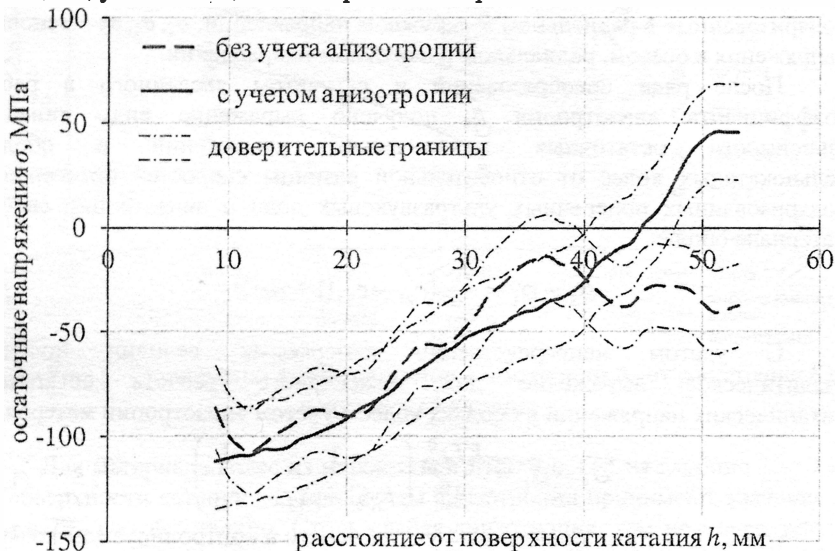


Рис. 6. Распределения остаточных напряжений в ободе колеса, полученные известной (без учета анизотропии материала) и разработанной методиками

Полученные результаты позволили устранить систематическую погрешность измерений и подтвердить соответствие требованиям действующих норм для 91% проконтролированных колес. Результаты расчетов по методике показали хорошее совпадение с аналитическими расчетами и результатами тензометрии.

По результатам испытаний и в соответствии с требованиями норм методика измерений согласована производителем колес.

В четвертой главе выполнено обоснование алгоритмических решений аппаратуры ультразвукового контроля остаточных механических напряжений в ободьях цельнокатаных колес и представлены результаты внедрения работы.

Успешная реализация методик ультразвукового контроля остаточных механических напряжений в ободьях цельнокатаных колес во многом зависит от уровня развития аппаратно-программных средств. В алгоритмические решения аппаратуры, представленные на рисунке 7, заложены технологические и методические соображения, подходящие для практической осуществимости проводимых измерений.

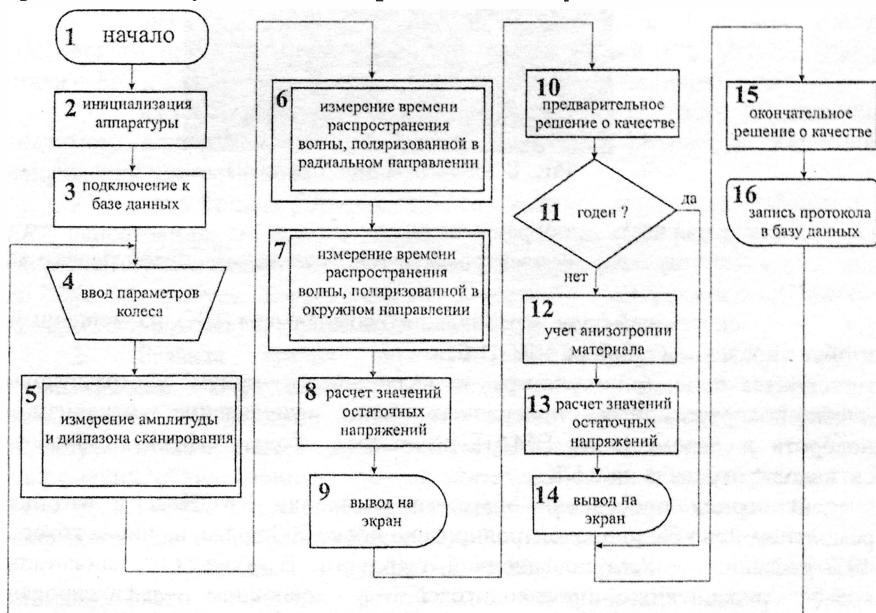


Рис. 7. Алгоритмические решения аппаратуры ультразвукового контроля остаточных механических напряжений в ободьях цельнокатаных колес

Алгоритмические решения аппаратуры использованы в автоматизированном приборе ультразвукового контроля распределения остаточных механических напряжений УКОН-01, разработанном с участием автора и представленном на рисунке 8. Прибор внесен в Государственный реестр средств измерений (№ 40898-09) и допущен к применению в Российской Федерации.

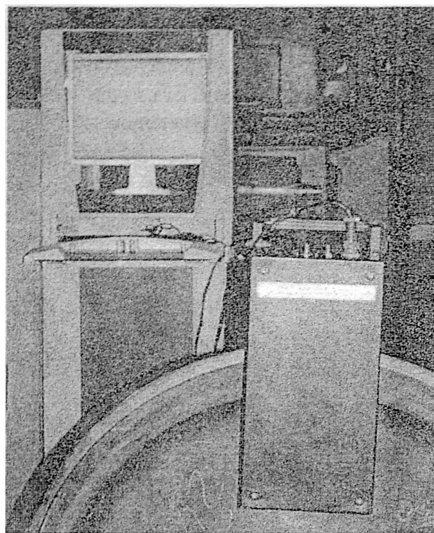


Рис. 8. Внешний вид УКОН-01

Аппаратная часть прибора содержит:

- манипулятор с электромагнитоакустическим преобразователем (ЭМАП);
- системный блок персонального компьютера (ПК), размещенный в стойке управления прибора УКОН-01.

Назначение манипулятора – излучение и прием ультразвуковых плоско-поляризованных поперечных волн, управление механизмами поворота и перемещения ЭМАП по высоте обода, цифровая обработка сигналов и передача их в ПК.

В период проведения опытного внедрения УКОН-01 в вагонном ремонтном депо было проконтролировано более 500 колес, из числа которых 49% составили колеса повышенной твердости. В ободах цельнокатаных колес российских производителей в основном зафиксированы незначительные сжимающие или весьма слабые растягивающие напряжения, равномерно распределенные по высоте обода. Результатом опытного внедрения стала оценка качества колес для выборки колес нормальной и повышенной твердости.

В пятой главе представлено практическое применение результатов работы.

При разработке технологии ультразвукового контроля распределения остаточных механических напряжений проводилась серия измерений в одном и в ряде сечений по окружности обода колеса. Обоснованность однократного измерения в одном сечении, заложенная в технологию, подтверждена незначимым разбросом полученных результатов.

Наиболее полно в практическом применении результаты работы представлены в виде инженерной методики, заложенной в ГОСТ Р 54093-2010 «Колеса железнодорожного подвижного состава. Методы определения остаточных напряжений».

Разработанная технология ультразвукового контроля распределения остаточных механических напряжений в ободьях цельнокатаных колес применяется на Выксунском металлургическом заводе и Нижнетагильском металлургическом комбинате при прямо-сдаточных испытаниях колес.

Основные выводы и результаты

1. Исследованы акустоупругие свойства материалов колес российских производителей, установлено:

- значения коэффициентов акустоупругости колесных сталей российского производства составляют соответственно 130 МПа/% (марка стали – ER7), 135 МПа/% (марка стали – 2), 165 МПа/% (марка стали – Т);
- изменение твердости материала по высоте обода не оказывает значимого влияния на скорости упругих волн и результаты измерения напряжений ультразвуковым методом;
- анизотропия упругих свойств материала колес марок сталей Т и ER7, непостоянная по высоте обода, обуславливает относительную разницу скоростей ортогонально поляризованных поперечных ультразвуковых волн до 2% и требует корректировки известного ультразвукового метода измерения напряжений в ободьях железнодорожных колес.

2. Развита теория акустоупругости; полученное в работе аналитическое выражение для инженерного расчета остаточных механических напряжений в ободьях колес, включающее коэффициент анизотропии материала, снижает систематическую погрешность измерений напряжений, обусловленную упругой анизотропией свойств материала, с 2,5-3,0% до 0,3-0,4% и позволяет применять ультразвуковой метод измерения напряжений для российских колес с повышенной твердостью обода.

3. Обоснованы алгоритмические решения аппаратуры ультразвукового контроля остаточных механических напряжений в цельнокатаных колесах, реализованные в автоматизированном приборе ультразвукового контроля распределения остаточных механических напряжений УКОН-01.

4. Разработанная технология ультразвукового контроля распределения остаточных напряжений в цельнокатаных колесах применяется при производстве колес в ОАО «Выксунский металлургический завод» и ОАО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат».

Перерасчет значений остаточных механических напряжений в ободьях колес с обнаруженной значимой анизотропией упругих свойств позволил устранить ошибку измерений и подтвердить соответствие колес требованиям действующих норм.

5. Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе подготовки специалистов по направлению «Приборостроение» специальности 200102 «Приборы и методы контроля качества и диагностики» в ФГБОУ ВПО ПГУПС.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Дымкин Г.Я., Краснобрыжий С.А., Шевелев А.В. Исследование анизотропии акустических характеристик металла колес повышенной твердости // Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций: Сб. тр. III Росс. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 2007. С. 99.

2. Краснобрыжий С.А., Шевелев А.В. К оценке погрешности измерения остаточных механических напряжений ультразвуковым методом // Ультразвуковая дефектоскопия металлоконструкций: Сб. тр. XIX Петерб. конф. УЗДМ-2007. Санкт-Петербург, 2007. С. 71.

3. Дымкин Г.Я., Краснобрыжий С.А., Шевелев А.В. Ультразвуковой контроль остаточных механических напряжений в ободьях цельнокатаных колес вагонов // Неразрушающий контроль и техническая диагностика: Сб. тр. XVIII Всеросс. науч.-техн. конф. с межд. участ. Нижний Новгород, 2008. С. 74.

4. Краснобрыжий С.А., Шевелев А.В. Оценка влияния технологических и эксплуатационных факторов на остаточные напряжения в ободьях цельнокатаных колес вагонов ультразвуковым методом // Ультразвуковая дефектоскопия металлоконструкций: Сб. тр. XX Юбил. Петерб. конф. УЗДМ-2009. Санкт-Петербург, 2009. С. 54.

5. Дымкин Г.Я., Краснобрыжий С.А., Шевелев А.В. Определение остаточных механических напряжений в ободьях цельнокатаных железнодорожных колес при изготовлении // Сварка и диагностика. 2012. № 6. С. 24-26.