

**Степанов Максим Александрович**

**РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ И  
ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ  
ПРОТЯЖЁННЫХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС)

Научный руководитель: Пыхалов Анатолий Александрович,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Филинов Владимир Викторович,  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технологический университет»,  
профессор кафедры «Электротехника и механика»

Платунов Андрей Васильевич,  
кандидат технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»,  
доцент кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», заведующий лабораториями «Экзаменационный центр неразрушающего контроля»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ОмГУПС)

Защита состоится « 23 » января 2018 г. в 17:00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ) по адресу: Россия, 634050, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 53а и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук

Е.А. Шевелёва

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы исследования и степень её разработанности.** Профильный металлопрокат является лидером производства. В профильном металлопрокате преобладают изделия, имеющие симметричное поперечное сечение: круг, овал, квадрат, прямоугольник и др. Большой класс объектов промышленности представляет собой протяжённые металлические конструкции, такие как стальные рельсовые нити железнодорожных путей, трубопроводы, балки, общая длина которых в нашей стране огромна. Так, на главных путях железных дорог России уложено около 10 млн. штук рельсов. Более 50% из них сварены в плети бесстыкового пути. На железных дорогах России ежегодно снимают с пути более 100 тыс. дефектных рельсов.

Из основных тенденций развития промышленности и неразрушающего контроля вытекает возрастание роли неразрушающего контроля и оценки технического состояния металлоконструкций, находящихся в эксплуатации. Актуальность работы связана с постоянно возрастающими требованиями к контролю, диагностике технического состояния объектов промышленности. Анализ существующих видов неразрушающего контроля и методов оценки технического состояния стальных конструкций показывает ряд существенных недостатков: ограниченное применение для протяженных конструкций; затруднённая оценка глубинных слоев металла для большинства видов контроля; требования к подготовке контролируемой поверхности объектов контроля; недостаточная автоматизация применяемых видов контроля и методов диагностики.

Актуальны новые способы контроля и оценки технического состояния протяжённых стальных конструкций, которые должны удовлетворять основным требованиям: быть надёжными, простыми в эксплуатации, недорогими, с низкой погрешностью измерения, достаточно информативными и быстродействующими, позволяющими проводить их максимальную автоматизацию. Для удовлетворения указанных требований в наиболее полной мере, необходимо исследовать возможности свойства симметрии поперечных сечений объекта контроля, как основное при разработке новых способов магнитного контроля и оценки технического со-

стояния элементов протяжённых стальных конструкций, позволяющих проводить их автоматизацию с учётом особенностей объектов контроля.

**Целью** диссертационной работы является разработка способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций, имеющих в поперечном сечении простую геометрическую фигуру симметричную относительно одной или более осей симметрии.

**Основными задачами** исследования являются:

1. Анализ современного состояния контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций; анализ видов неразрушающего контроля и методов оценки напряжённого состояния элементов протяжённых стальных конструкций.

2. Разработка теоретических посылок, принципов и методов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций с поперечным сечением в виде геометрической фигуры симметричной относительно одной или более осей симметрии.

3. На основе полученных в п. 2 закономерностей между дефектами, структурными изменениями и механическим напряжением в поперечном сечении контролируемого объекта, искажающими симметрию картины внешнего магнитного поля поперечного сечения, и магнитной индукцией внешнего магнитного поля сечения, разработать новые способы магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций.

4. Разработка блок-схемы автоматизации способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций на основе алгоритмов реализации способов.

**Объектом исследования** являются элементы протяжённых стальных конструкций, имеющие поперечное сечение в виде простой геометрической фигуры симметричной относительно одной или более осей симметрии, в процессе магнитного контроля с целью оценки их технического состояния.

**Предмет исследования** – анализ и установление закономерностей между дефектами, структурными изменениями и механическими напряжениями, иска-

жающими симметрию картины внешнего магнитного поля поперечного сечения объекта контроля, предварительно созданной симметричной относительно геометрической фигуры поперечного сечения, и магнитной индукцией внешнего магнитного поля сечения.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в том, что впервые установлены и исследованы закономерности, между дефектами, структурными изменениями и механическим напряжением в симметричном поперечном сечении контролируемого объекта из однородного ферромагнитного материала, искажающими симметрию картины внешнего магнитного поля поперечного сечения, и магнитной индукцией внешнего магнитного поля сечения, которые позволили их идентифицировать:

1 – по отклонению следа нулевой магнитной индукции на боковой поверхности элемента от своего расчётного следа определяются и оцениваются сечения с дефектами, структурными изменениями и локальными механическими напряжениями;

2 – по разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных попарно симметричных точках геометрической фигуры поперечного сечения на поверхности элемента определяются и оцениваются сечения с дефектами, структурными изменениями и механическими напряжениями в материале сечения;

3 – при отсутствии дефектов и структурных изменений в материале сечения элемента разность абсолютных значений магнитной индукции в характерных попарно симметричных точках сечения на поверхности элемента позволяет оценить остаточные, действующие и результирующие изгибные напряжения в сечениях на контролируемом участке элемента конструкции; следы плоскостей с равными напряжениями на боковой поверхности объекта.

**Теоретическая и практическая значимость** диссертационной работы заключается: в установлении и исследовании закономерностей между дефектами, структурными изменениями и механическим напряжением в поперечном сечении контролируемого объекта, искажающими симметрию картины внешнего магнитного поля поперечного сечения, и магнитной индукцией внешнего магнитного

поля сечения; в разработке новых способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций без их разборки и разрушения, позволяющих провести их автоматизацию (Пат. №2387983, №2441227, №2452943, №2455634, №2521753 и №2590224).

Практический результат реализации разработанных способов заключается в возможности обеспечения оперативного выполнения процесса магнитного контроля и оценки технического состояния элементов стальных конструкций, находящихся в эксплуатации:

1. «Способ магнитной дефектоскопии» позволяет по отклонению следа нулевой магнитной индукции от расчётного следа на контролируемом участке на боковых поверхностях элемента протяжённой стальной конструкции выявить сечения с дефектами.

2. «Способ магнитной дефектоскопии изделий в напряжённом состоянии» позволяет определить и оценить дефекты в сечениях элемента по разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных попарно симметричных точках поперечного сечения на поверхности элемента.

3. «Способ обнаружения изгибных напряжений», «Способ оценки запаса прочности изделий в процессе эксплуатации» и «Способ оценки изгибных напряжений в элементах конструкций» позволяют определить и оценить: поперечные сечения элементов, обладающих наибольшей разностью модулей магнитной индукции в характерных точках, что даёт возможность найти и оценить зоны повышенных напряжений на контролируемом участке элемента; средние значения отклонений разности магнитной индукции в характерных точках поперечных сечений на контролируемом участке элемента, тем самым оценить средние максимальные напряжения на участке контроля, при этом знак разности показывает направление изгиба в сечении при отсутствии дефектов и структурных изменений в материале сечения. Распределение значений магнитной индукции в характерных точках сечений на участке контроля позволяет выявить следы плоскостей с равными напряжениями.

4. «Способ оценки изгибных напряжений в элементах конструкций» также позволяет по измеренной магнитной индукции в характерных точках сечений на контролируемом участке определить и оценить: остаточное среднее максимальное напряжение и результирующее среднее максимальное напряжение; максимальное напряжение в любом сечении на контролируемом участке; распределение напряжения внутри каждого сечения.

5. «Способ оперативного обнаружения дефектов и механических напряжений в протяжённых металлоконструкциях» решает задачу оперативного обнаружения дефектов, структурных изменений и механических напряжений в сечениях на контролируемых участках элементов протяжённых стальных конструкций.

Перспективы дальнейшего развития темы видятся в адаптации разработанных способов для выбранных объектов контроля, включая их автоматизацию.

Результаты диссертационной работы использованы в практической деятельности Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» (акт о внедрении от 10.05.2017 г.).

**Методы исследования** в диссертации базируются на методах неразрушающего контроля; теории магнитного поля и магнитных цепей; теории напряжённо-деформированного состояния; математическом моделировании на основе метода конечных элементов; теории автоматического управления; теории планирования и реализации экспериментальных испытаний натуральных образцов изделий.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Зависимости (закономерности) магнитного поля симметричного поперечного сечения контролируемого элемента протяжённого объекта, между отклонением следа нулевой магнитной индукции на боковой поверхности элемента от своего расчётного следа, вызванного дефектами, структурными изменениями и (или) механическими напряжениями в однородном ферромагнитном материале сечения.

2. Зависимости (закономерности) магнитного поля симметричного поперечного сечения контролируемого элемента протяжённого объекта, между разностью

абсолютных значений магнитной индукции в характерных попарно симметричных точках геометрической фигуры поперечного сечения на поверхности элемента и дефектами, структурными изменениями и (или) механическими напряжениями в однородном ферромагнитном материале сечения.

3. Зависимости (закономерности), устанавливающие связь (при отсутствии дефектов и структурных изменений в однородном материале поперечных сечений элемента) между разностью абсолютных значений магнитной индукции в характерных попарно симметричных точках сечения на поверхности элемента и остаточными, действующими и результирующими изгибными напряжениями в сечениях на контролируемом участке элемента стальной конструкции.

**Достоверность и обоснованность научных результатов**, полученных в диссертации, базируются на математическом моделировании, на сравнении полученных результатов с результатами экспериментов натуральных испытаний, подтверждены шестью патентами на изобретение РФ.

**Апробация работы.** Основные результаты проведённых исследований докладывались и обсуждались на всероссийских с международным участием и региональных конференциях: «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» в 2012 г., 2013 г., 2014 г., 2015 г., 2016 г. и 2017г. (г. Иркутск); «Проблемы проектирования, строительства, диагностики и технического содержания объектов железнодорожного транспорта» (г. Чита, 2013 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, в том числе: 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ; 6 патентов на изобретение РФ. В работах с соавторами соискателю принадлежит от 75% до 85% результатов.

**Личный вклад автора заключается:** а) в проведении натуральных экспериментов и математической обработке результатов экспериментов; б) в моделировании и анализе картин магнитных полей и напряжений в поперечных сечениях объекта контроля; в) в установлении зависимости между дефектами, структурными изменениями и механическими напряжениями в поперечном сечении контролируемого элемента, искажающими симметричную картину магнитного поля по-



перечного сечения элемента, и магнитной индукцией внешнего магнитного поля поперечного сечения элемента конструкции; г) в разработке шести способов магнитного контроля и диагностики элементов конструкций, выполненных из однородного ферромагнитного материала.

**Структура диссертационной работы.** Диссертация включает в себя один том, состоящий из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (127 наименований), приложения. Общий объём диссертации 148 страницы машинописного текста, в тексте содержится 82 рисунка и 6 таблиц.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования и степень её разработанности. Сформулированы цели и задачи исследования; определены научная новизна и практическая значимость работы; представлены основные положения, выносимые на защиту; описана структура диссертационной работы.

**В первой главе** проведён анализ существующих видов контроля, диагностики технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций, методов дефектоскопии, методов оценки напряжённого состояния. Сравнение методов контроля элементов протяжённых стальных конструкций показал выбор в пользу магнитных методов с использованием постоянного магнитного поля. Сформулирована задача разработки простых и эффективных способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций, позволяющих проводить их автоматизацию с учётом специфики объектов контроля.

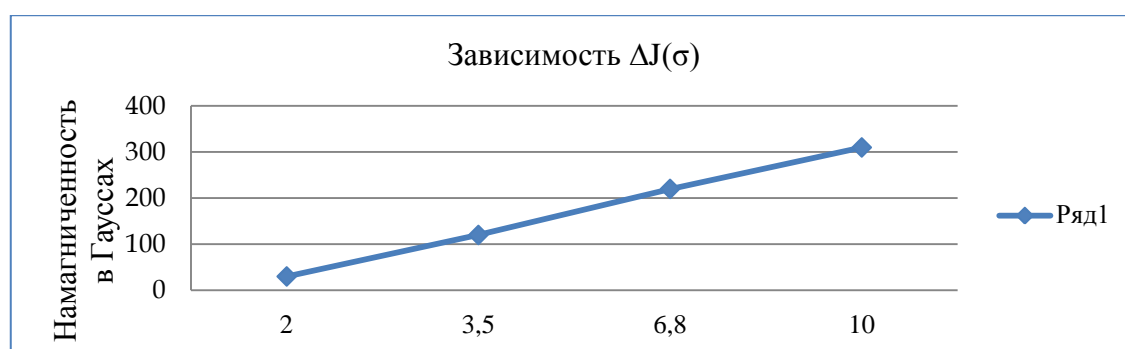
**Во второй главе** рассмотрены: теоретические аспекты электромагнитного поля и магнитных цепей, зависимость намагниченности ферромагнитного материала от упругих напряжений в изделиях, напряжённо-деформированное состояние элементов протяжённых стальных конструкций, моделирование картин внутренних напряжений при изгибе и внешних магнитных полей поперечных сечений элементов протяжённых стальных конструкций. Приведены основные принципы разработки способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций, имеющих симметричное попереч-

ное сечение, выводы по главе. При нахождении ферромагнитного изделия с магнитной проницаемостью  $\mu_1$  в воздухе (с магнитной проницаемостью  $\mu_0$ ) нормальная составляющая магнитной индукции в разных точках на поверхности изделия будет характеризовать магнитную проницаемость материала изделия  $\mu_1$  в этих точках. По данным приведённым в источнике: «Вонсовский С.В. Ферромагнетизм / С.В. Вонсовский, Я.С. Шур. – М.; – Л. : ОГИЗ, Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. – 816 с.», была построена зависимость разности намагниченности  $\Delta J = |J_c| - |J_p|$  от напряжения  $\sigma$  для гипотетической балки из никеля (имеющего отрицательный эффект Виллари) при чистом изгибе балки, у которой верхние слои сжимаются ( $J_c$ ), а нижние – растягиваются ( $J_p$ ), при одних и тех же приложенных механических напряжениях  $\sigma$  и напряжённостях  $H$  внешнего магнитного поля в верхних и нижних слоях балки, Рисунок 1. Зависимость  $\Delta J(\sigma)$ , Рисунок 1, может быть заменена зависимостью разности абсолютных значений магнитной индукции в поперечном сечении на поверхности балки  $\Delta B$  от максимального напряжения в поверхностных слоях балки  $\sigma_m$  при её изгибе:

$$\Delta B(\sigma_m) = |B_c| - |B_p|, \quad (1)$$

$$\Delta B(\sigma_m) = \mu_0 \Delta J(\sigma_m), \quad (2)$$

где  $B_c$  и  $B_p$  – значения магнитной индукции на поверхности балки для сжимающего и растягивающего слоёв для любого сечения балки, соответственно.



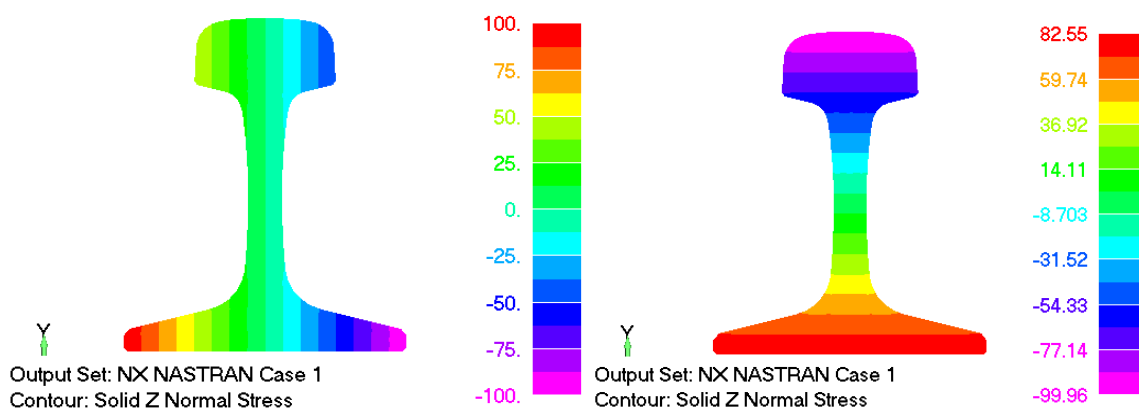
(Единицы измерения:  $\Delta J$  – Гаусс,  $\sigma$  – кг/мм<sup>2</sup>)

Рисунок 1 – Зависимость  $\Delta J(\sigma)$  разности модулей намагниченности между нижним и верхним слоями в поперечном сечении балки  $\Delta J$  от равного напряжения сжатия и растяжения  $\sigma$

Из выражения (2) следует, что напряжённость магнитного поля  $H$  (в рассматриваемом диапазоне изменения), не влияет на разность абсолютных значений магнитной индукции в поперечном сечении на поверхности балки  $\Delta B(\sigma_m)$ . Анало-

гичные зависимости были получены для стальной балки при эксперименте. Анализ картин моделирования нормальных напряжений в поперечном сечении рельса (Рисунок 2) при изгибе показывает, что напряжения практически равны по величине при растяжении и сжатии слоёв материала поперечного сечения рельса относительно вертикальной оси симметрии (Рисунок 2 «а»), равны – относительно горизонтальной оси, проходящей через центры тяжести плоскости геометрической фигуры поперечного сечения рельса (Рисунок 2 «б»), равны – в попарно симметричных точках в слоях на равных расстояниях от вертикальной (Рисунок 2 «а») и горизонтальной (Рисунок 2 «б») осей геометрической фигуры поперечного сечения рельса.

Картинки полей механических напряжений с симметричными поперечными сечениями при изгибе связаны с картинками полей намагниченности материала поперечных сечений, а также с картинками внешнего магнитного поля этих сечений. На Рисунке 3 приведены расчётные картинки внешнего магнитного поля поперечного сечения рельса при пропускании вдоль рельса постоянного тока плотностью  $j=10000 \text{ A/m}^2$ . На Рисунке 3 «а» видно, что картина магнитного поля симметрична относительно вертикальной оси симметрии сечения рельса, т.е. магнитная индукция в характерных попарно симметричных точках относительно вертикальной оси симметрии геометрической фигуры сечения будет равной по величине.



а) – горизонтальный изгиб

б) – вертикальный изгиб

а) – левая часть сечения растягивается, правая часть сечения – сжимается;

б) – верхняя часть сечения сжимается, нижняя часть сечения – растягивается.

Рисунок 2 – Нормальное напряжение при горизонтальном и вертикальном изгибах рельса

На Рисунке 3 «б» показана картина внешнего магнитного поля того же сечения при наличии дефекта в головке рельса в виде раковины. Приведены расчётные картины внешних магнитных полей швеллера без дефекта и с дефектом, картины с имитацией внутреннего напряжения в теле сечения.

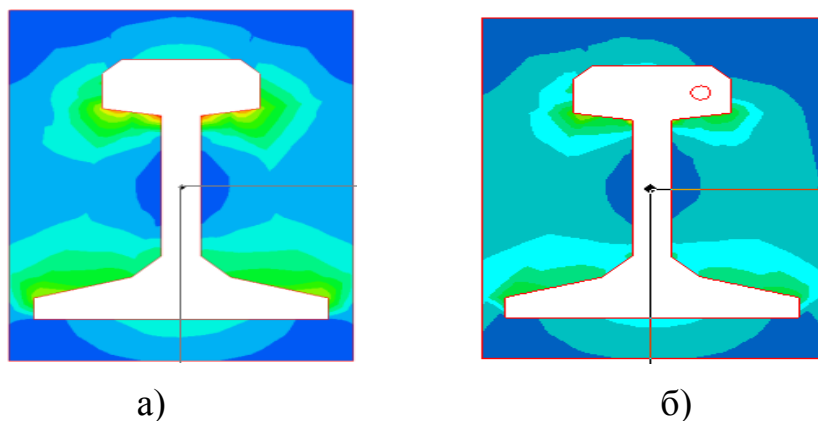


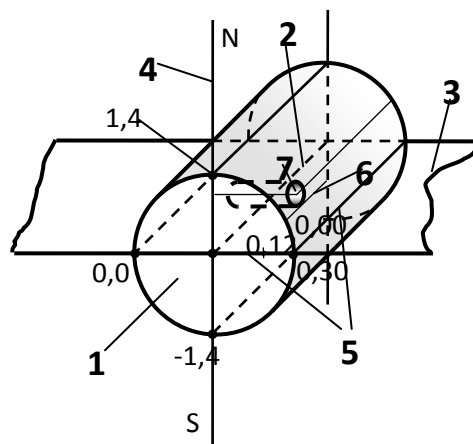
Рисунок 3 – Картины симметричного («а») и несимметричного («б») внешнего магнитного поля поперечного сечения рельса относительно вертикальной оси симметрии сечения

На основе теории и моделирования картин магнитных и силовых полей поперечных сечений объектов контроля получены следующие основные выводы и посылки для разработки способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций, имеющих поперечное сечение в виде простой симметричной геометрической фигуры: на контролируемом участке предварительно создаётся симметричное магнитное поле относительно геометрической фигуры поперечного сечения элемента протяжённой стальной конструкции; при однородном по физическим свойствам материале сечения элемента картина внешнего магнитного поля поперечного сечения будет симметричной относительно оси (осей) симметрии геометрической фигуры поперечного сечения элемента на контролируемом участке; при изменении физических свойств материала поперечного сечения происходит искажение симметричной картины магнитного поля поперечного сечения на контролируемом участке элемента; отклонение следа нулевой магнитной индукции (нормальной составляющей) от расчётного (теоретического) следа на боковой поверхности элемента на контролируемом участке определяет поперечные сечения с нарушениями физических свойств материала; при отсутствии дефектов и других структурных из-

менениях в сечении по разности магнитной индукции в выбранных характерных попарно симметричных точках на поверхности сечения элемента можно выявлять и проводить оценку внутренних напряжений в сечениях контролируемого участка элемента.

**В третьей главе** приводится разработка шести способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций, имеющих поперечное сечение в виде симметричной геометрической фигуры. «Способ магнитной дефектоскопии» решает задачу дефектоскопии элементов конструкций, изготовленных из однородного ферромагнитного материала. Задача контроля решается так, что намагничивание элемента осуществляется искусственным путём (или в результате технологического процесса) с последовательным образованием двух явно выраженных магнитных полюсов на оси симметрии поперечного сечения по всей длине контролируемого участка элемента для образования симметричной картины магнитного поля относительно геометрической фигуры поперечного сечения элемента. При отсутствии дефектов в сечении, след нулевой остаточной магнитной индукции проходит по расчётному следу плоскости отсчета, проходящей через центр тяжести плоскости фигуры сечения, на поверхности элемента с обеих сторон вдоль его длины или параллелен ему. Наличие дефектов в объекте контроля, вызванных неоднородностью материала, обуславливает появление местной магнитной аномалии, значение которой выражается величиной отклонения следа нулевой магнитной индукции от расчётного следа на боковой поверхности элемента протяжённой стальной конструкции, Рисунок 4. Оценка степени значимости дефекта осуществляется путем сравнения зарегистрированного отклонения с нормируемым для данного элемента значением или с характеристикой эталонного образца. Результат реализации способа заключается в возможности обеспечения им оперативного выполнения процесса контроля и оценки технического состояния, с помощью мобильных технических средств и средств автоматизации. Были разработаны пять способов, позволяющие в комплексе проводить магнитный контроль и оценку дефектов, структурных измене-

ний и механических напряжений в материале элементов протяжённых стальных конструкций.



1 – опытный образец; 2 – продольная ось образца; 3 – плоскость отсчёта; 4 – ось симметрии геометрической фигуры поперечного сечения образца; 5 – след плоскости отсчёта на образце; 6 – след нулевой магнитной индукции; 7 – дефект (раковина);  
остаточная индукция указана в мТл

Рисунок 4 – Образец с искусственным дефектом

Решение этой задачи было получено на основе взаимозависимости напряженного состояния и сопутствующих его появлению изменениям магнитных свойств объекта контроля: возникновении в нем магнитных аномалий в зонах присутствия местных механических напряжений.

Способы решают задачу обнаружения в процессе эксплуатации конструкций дефектов, зон возникновения и роста местных напряжений, опасных разрушением, в том числе от накопления усталости материала, в сечениях изделий, находящихся под действием постоянной или переменной нагрузки следующим образом. На контролируемом участке элемента стальной конструкции создается намагничивающее магнитное поле, картина которого симметрична относительно геометрической фигуры поперечного сечения элемента. Все структурные изменения или механические напряжения в материале контролируемого сечения искажают симметрию созданной картины магнитного поля. Тогда об изменениях значений местных напряжений или дефектов в зонах сечений можно судить по изменению величины разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных попарно симметричных точках поперечных сечений на поверхности эле-

мента. При этом выбор характерных точек для измерения магнитной индукции проводится в зависимости от геометрической фигуры поперечных сечений элементов, доступности, опытом эксплуатации конструкций. Сделан анализ расчётных картин магнитного поля поперечных сечений без дефекта, с дефектом и с зонами, имитирующими внутреннее напряжение, полученных с помощью цифрового моделирования в среде программного продукта Maxwell. Приведена разработка способа магнитного контроля и оценки напряжения на примерах общепринятых испытаний плоского изгиба балки с прямоугольным поперечным сечением при двух схемах приложения внешней изгибающей силы по центру балки и в двух местах равноудалённых от опор, Рисунок 5. Получены математические выкладки для трёх вариантов испытания балки: 1– отсутствует внутренне остаточное напряжение  $\sigma = 0$ ; 2 – балка в начальном состоянии нагружена внешней изгибающей силой не равной нулю  $F_0 \neq 0$ ; 3 – общий случай, присутствует остаточное напряжение  $\sigma \neq 0$ , при этом распределение его по длине балки может быть неравномерным.

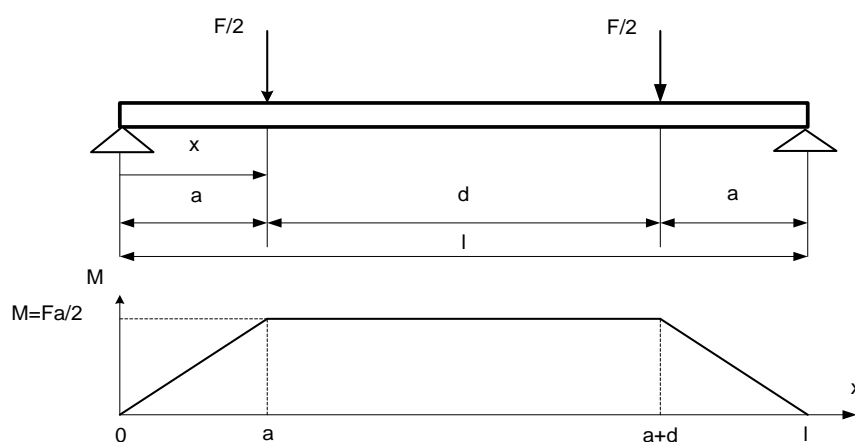


Рисунок 5 – Схема испытания балки с эпюрой изгибающего момента

Магнитный контроль и оценка изгибного напряжения сводится к реализации следующих операций: путём намагничивания создаются два магнитных полюса на вертикальной оси симметрии поперечного сечения балки; измеряется магнитная индукция в характерных попарно симметричных точках в сечениях на верхней (сжимаемой) и нижней (растягиваемой) поверхностях балки, которые характеризуют соответствующие максимальные нормальные напряжения в верхних и нижних слоях балки; находится аналитическая зависимость максимального

нормального напряжения  $\sigma_m^*$  в материале балки от внешней изгибающей силы  $F$  на участке чистого изгиба балки:

$$\sigma_m^* = \frac{3a}{bh^2} F, \quad (3)$$

где  $a$  – расстояние от опоры до места приложения внешней силы,  
 $b$  и  $h$  – размеры прямоугольного сечения балки.

Экспериментальным путём находится зависимость изгибающей силы  $F$  от средней разности абсолютных значений остаточной магнитной индукции в характерных точках поперечных сечений на поверхности элемента (верхней и нижней) на контролируемом участке чистого изгиба балки  $\Delta B_{ВН}^*$ , при этом после каждого изменения внешней изгибающей силы проводится аналогичное (как в начале) намагничивание балки.

Полученная зависимость  $F(\Delta B_{ВН}^*)$  аппроксимируется аналитической функцией, например, линейной, Рисунок 6:

$$F = F_0 + K\Delta B_{ВН}^*, \quad (4)$$

где  $K$  – магнитоупругий коэффициент;

$F_0$  – является эквивалентом внешней изгибающей силы, определяющей среднее остаточное напряжение в балке на участке чистого изгиба.

Результирующую изгибающую силу  $F^*$  с учётом остаточного напряжения, согласно (4), можно представить:

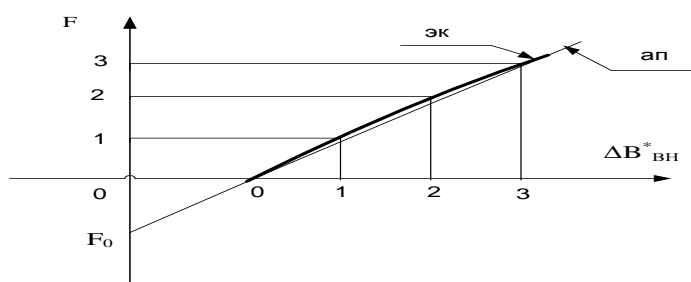
$$F^* = F - F_0 = K\Delta B_{ВН}^*. \quad (5)$$

Средняя разность абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках сечения на контролируемом участке  $\Delta B_{ВН}^*(F)$  изменяется от своего начального значения  $\Delta B_{ВН}^*(0) \neq 0$  (при  $F=0$ ) до нового значения, которому соответствует действующая сила  $F$ , Рисунок 6. Подстановка выражения (5) в (3) даёт зависимость, позволяющую находить по средней разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках сечения балки, среднее максимальное напряжение для сечений контролируемого участка:

$$\sigma_m^* = \frac{3a}{bh^2} K\Delta B_{ВН}^* = k\Delta B_{ВН}^*, \quad (6)$$



где  $k$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий геометрические и магнитоупругие свойства балки при изгибе. Магнитоупругий коэффициент  $K$  аппроксимирующей функции (4) получен для участка чистого изгиба балки и имеет среднее значение, но т.к. балка изготовлена из однородного материала и имеет постоянное сечение по всей длине, то значение коэффициента  $K$  принимается для всех сечений балки на контролируемом участке.



«эк» – экспериментальная кривая; «ап» – график аппроксимирующей функции;

$F_0$  – точка пересечения графика аппроксимирующей функции с осью ординат

Рисунок 6 – График зависимости  $F(\Delta B_{BH}^*)$

Тогда максимальное напряжение для любого контролируемого  $n$ -го сечения балки определяется по зависимости:

$$\sigma_m[n] = \frac{3a}{bh^2} K \Delta B_{BH}[n] = k \Delta B_{BH}[n], \quad (7)$$

где  $\sigma_m[n]$  – максимальное напряжение в  $n$ -ом сечении балки;

$\Delta B_{BH}[n]$  - разность абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках  $n$ -ого сечения балки.

Получены соотношения для оценки распределения напряжения внутри сечений балки в зависимости от вида симметрии геометрической фигуры поперечного сечения балки, Рисунок 7, от дефектов и внутренних напряжений. А также картина распределения равных напряжений по длине балки.

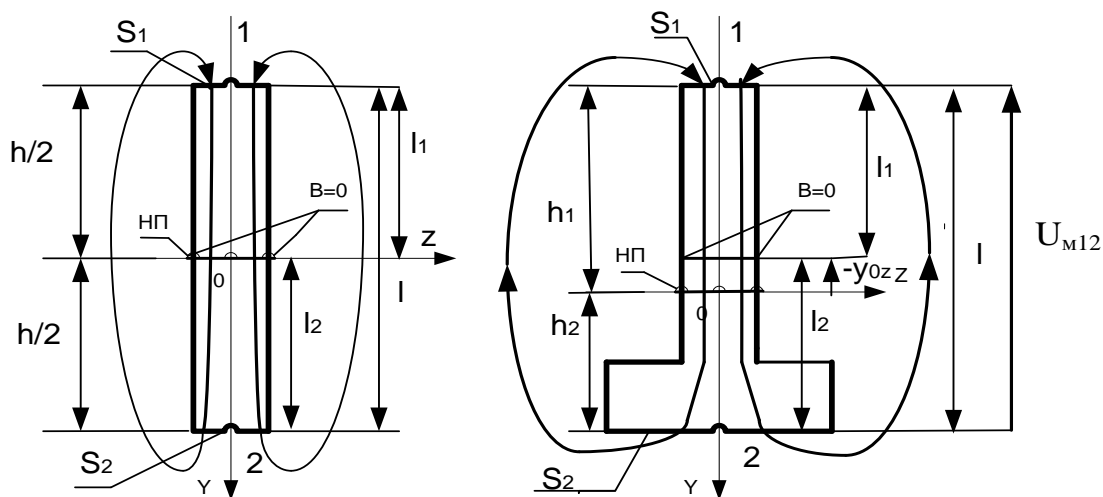
В общем виде для рассмотренных условий отклонение следа нулевой магнитной индукции от расчётного следа в  $n$ -ом поперечном сечении выражено соотношением:

$$y[n] = l_1[n] - l_2[n] = -y_{0z}[n] - y_0[n] - y_d[n], \quad (8)$$

где  $y_{0z}[n]$  – отклонение за счёт не симметрии относительно оси  $Z$ , Рисунок 7;

$y_0[n]$  – отклонение за счёт изгибного напряжения;

$y_d[n]$  – отклонение за счёт дефекта.



а) – прямоугольного сечения      б) – Т-образного сечения

Рисунок 7 – Магнитные цепи сечений

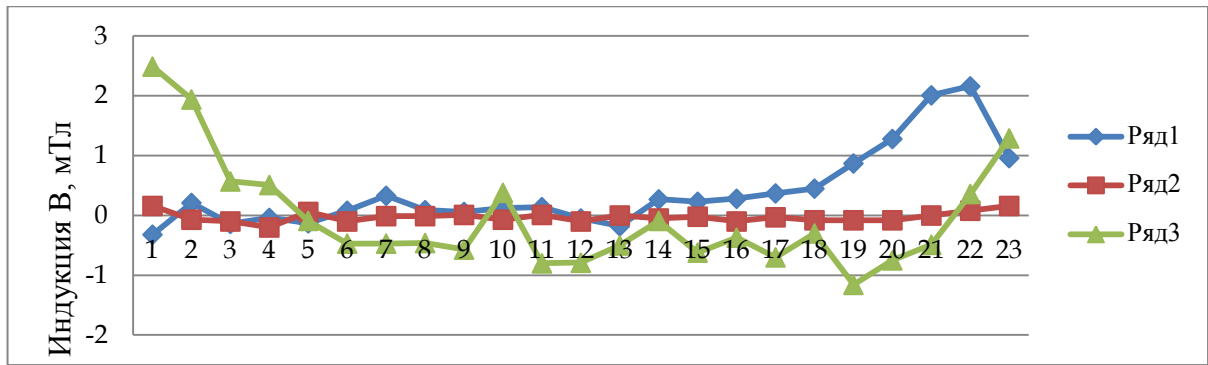
Суть способа оперативного обнаружения дефектов и механических напряжений в протяжённых конструкциях заключается в том, что в отличие от предыдущих способов, информация с объекта снимается не в виде значений магнитной индукции в характерных точках, а в виде мгновенных значений напряжений, пропорциональных производным от магнитной индукции в характерных точках.

Приводится блок-схема автоматизации шести способов на основе алгоритмов реализующих способы.

**В четвёртой главе** рассмотрена реализация способов с помощью программных продуктов MSC Maxwell и Nastran, Рисунок 3, экспериментов на образцах без дефектов и с дефектами, Рисунок 4 и Рисунок 8, которые показали работоспособность способов.

Проведён эксперимент изгиба образца стальной балки прямоугольного сечения на универсальном учебном комплексе по сопротивлению материалов, Рисунок 5. Результаты эксперимента, теоретических выкладок и цифрового моделирования совпали при контроле и оценке нормального напряжения в балке при её изгибе. Экспериментально была получена аппроксимирующая функция, Рисунок 6:

$$F = -4,34 - 3,45\Delta B_{78}. \quad (9)$$



1 –  $\Delta B_{12}[n]$  головки рельса; 2 –  $\Delta B_{34}[n]$  шейки рельса; 3 –  $\Delta B_{56}[n]$  подошвы рельса

Рисунок 8 – Кривые распределения разностей абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках по длине контролируемого участка с магнитными аномалиями в головке и в подошве рельса

Из выражения (9) следует, что среднее остаточное максимальное напряжение  $\sigma_m^*(0)$  в образце будет пропорционально эквивалентной изгибающей силе  $F_0 = 4,34$  кН приложенной в том же направлении, что и внешняя изгибающая сила.

Оценка среднего максимального напряжения  $\sigma_m^*$  при изменении внешней изгибающей силы на участке контроля найдена по выражению (6):

$$\sigma_m^*(0) = 96,28 \text{ МПа} \quad \text{при } F = 0 \text{ и } \Delta B_{78} = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}; \quad (10)$$

$$\sigma_m^* = 124,56 \text{ МПа} \quad \text{при } F = 1,5 \text{ кН и } \Delta B_{78} = 1,63 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}; \quad (11)$$

$$\sigma_m^* = 162,77 \text{ МПа} \quad \text{при } F = 3 \text{ кН и } \Delta B_{78} = 2,13 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}. \quad (12)$$

Среднее максимальное напряжение от внешней изгибающей силы без учёта значения остаточного напряжения (10) и с учётом значений (11) и (12) определяется, как разность напряжений:

$$\text{при } F = 1,5 \text{ кН: } \sigma_m^* - \sigma_m^*(0) = 124,56 - 96,28 = 28,28 \text{ МПа}; \quad (13)$$

$$\text{при } F = 3 \text{ кН: } \sigma_m^* - \sigma_m^*(0) = 162,77 - 96,28 = 66,49 \text{ МПа}. \quad (14)$$

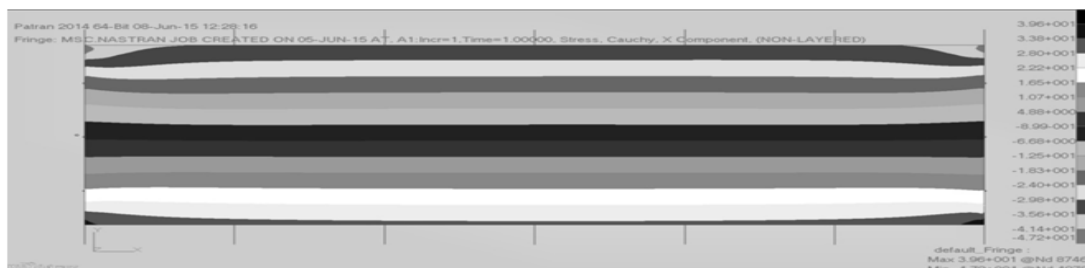
Теоретический расчёт образца при отсутствии остаточного напряжения дал значения максимального напряжения на рассматриваемом участке чистого изгиба:

$$\text{при } F = 1,5 \text{ кН: } \sigma_m = 33,22 \text{ МПа}; \quad (15)$$

$$\text{при } F = 3,0 \text{ кН: } \sigma_m = 66,44 \text{ МПа}. \quad (16)$$

Моделирование и анализ распределения напряжений по сечениям проведён с помощью MSC Nastran, Patran для двух вариантов балок без концентратора

напряжений и с концентратором напряжений при разной по величине внешней изгибающей силы при  $F = 1,5$  кН и 3кН, Рисунок 9. Получены средние значения максимального напряжения для центрального четвёртого сечения:  $\sigma_m^* = 32,6$  МПа и  $\sigma_m^* = 65,96$  МПа при  $F = 1, 5$  кН и  $F = 3$  кН, соответственно, которые практически совпали с результатами (13)–(16).



В верхней точке четвёртого сечения  $\sigma_m [4] = - 34,86$  МПа; в нижней точке –  $\sigma_m [4] = + 29,7$  МПа

Рисунок 9 – Картина распределения нормального напряжения на участке чистого изгиба (без концентратора напряжений) при внешней изгибающей силе  $F = 1,5$  кН

## Основные результаты работы

Впервые установлены и исследованы зависимости (закономерности), связанные с искажением картины внешнего магнитного поля поперечного сечения элемента, предварительно созданного симметричным относительно геометрической фигуры поперечного сечения элемента, и магнитной индукцией на поверхности элемента в сечении, которые позволили идентифицировать дефекты, структурные изменения и механические напряжения в однородном ферромагнитном материале поперечных сечений контролируемого объекта:

1. Установлены зависимости между отклонением следа нулевой линии магнитной индукции от расчётного следа, совпадающего со следом плоскости проходящей через центры тяжести геометрической фигуры поперечного сечения элемента на поверхности элемента (или ему параллельного, в зависимости от вида симметрии геометрической фигуры поперечного сечения) от дефекта, структурного изменения или механического напряжения в сечении.

2. Установлены зависимости между дефектами, структурными изменениями и механическими напряжениями в поперечном сечении контролируемого элемен-

та, искажающих симметричную картину магнитного поля поперечного сечения элемента, и разностью магнитной индукции в характерных попарно симметричных точках относительно оси (осей) симметрии геометрической фигуры поперечного сечения элемента конструкции.

3. Для плоского изгиба элемента (балки) получена зависимость между максимальным нормальным напряжением и разностью абсолютных значений магнитной индукции в характерных попарно симметричных точках поперечного сечения элемента, которая позволяет: оценить остаточное среднее максимальное напряжение, действующее среднее максимальное напряжение; максимальное напряжение в любом сечении на контролируемом участке; по распределению следов плоскостей, соответствующих равным напряжениям в сечениях на контролируемом участке, выявить локальные напряжения и дефекты; создание базы эталонных значений разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках поперечных сечений элементов протяжённых стальных конструкций для автоматизации системы контроля и оценки технического состояния элементов конструкции.

4. Получены зависимости между разностью напряжений в индукционных катушках датчиков, установленных в характерных точках поперечных сечений, и разностью магнитной индукции в этих же характерных точках, что позволяет их использовать для идентификации дефектов, структурных изменений и локальных напряжений в сечениях на контролируемом участке объекта.

5. На основе алгоритмов реализации способов разработана блок-схема автоматизации шести способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций, обладающих симметричным поперечным сечением.

### **Список публикаций по теме диссертационной работы**

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Степанов, М.А. Способ магнитной дефектоскопии протяжённых ферромагнитных конструкций / А.П. Степанов, М.А. Степанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – №1(33). – С. 69.

2. Степанов, М.А. Способ магнитной дефектоскопии ферромагнитных конструкций, находящихся в напряженном состоянии / М.А. Степанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – №4(36). – С. 154.

3. Степанов, М.А. Метод магнитного контроля и диагностики напряжённого состояния элементов стальных конструкций, имеющих осесимметричное сечение / А.П. Степанов, М.А. Степанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 1 (49). – С. 60.

#### Патенты на изобретение РФ

4. Пат. № 2387983 Российская Федерация, RU 2 387 983 С1, МПК G01N 27/82 (2006.01). Способ магнитной дефектоскопии / Степанов А.П., Степанов М.А., Милованов А.И., Саломатов В.Н., Лопатин М.В.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. – № 2008143039/28, заявл. 29.10.2008, опубл. 27.04.2010, Бюл. №12. – 5 с.

5. Пат. № 2441227 Российская Федерация, RU 2 441 227 С1, МПК G01N 27/72 (2006.1). Способ магнитной дефектоскопии изделий в напряжённом состоянии / Степанов А.П., Милованов А.И., Степанов М.А.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. – № 2010121417/28, заявл. 26.05.2010, опубл. 27.01.2012, Бюл. №3. – 3 с.

6. Пат. № 2452943 Российская Федерация, RU 2 452 943 С1, МПК G01N 27/82 (2006.1). Способ обнаружения изгибных напряжений / Степанов А.П., Степанов М.А., Милованов А.И., Саломатов В.Н.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. – № 2010142042/28, заявл. 13.10.2010, опубл. 10.06.2012, Бюл. №16. – 5 с.

7. Пат. № 2455634 Российская Федерация, RU 2 455 634 С1, МПК G01N 27/80 (2006.1). Способ оценки запаса прочности изделий в процессе эксплуатации / Степанов А.П., Степанов М.А., Милованов А.И., Милованова Е.А., Саломатов В.Н.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. – № 2010145975/28, заявл. 10.11.2010, опубл. 10.07.2012, Бюл. №19. – 5 с.

8. Пат. № 2521753 Российская Федерация, RU 2 521 753 С1, МПК G01N 27/82 (2006.1). Способ оперативного обнаружения дефектов и механических напряже-

ний в протяжённых конструкциях / Степанов М.А., Степанов А.П., Пыхалов А.А.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. – № 2013100328/28, заявл. 09.01.2013, опубл. 10.07.2014, Бюл. №19. – 5 с.

9. Пат. № 2590224 Российская Федерация, RU 2 590 224 С1, МПК G01N 27/72 (2006.1). Способ оценки изгибных напряжений в элементах конструкций / Степанов А. П., Степанов М.А.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. – 2015112783/28, заявл. 07.04.2015, опубл. 10.07.2016, Бюл. №19.

#### Статьи в прочих изданиях

10. Степанов, М.А. Исследование картин магнитных полей сечений ферромагнитных конструкций при наличии дефектов / М.А. Степанов, А.П. Степанов, В.Н. Саломатов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : Материалы третьей всероссийской научно-практической конференции с международным участием 15–19 мая 2012 г. Иркутск : В 2 т. – Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2012. – 577 с., Т.1, – С. 248.

11. Степанов, М.А. Способы обнаружения дефектов и изгибных напряжений в конструкциях из ферромагнитного материала / М.А. Степанов, А.П. Степанов, А.А. Пыхалов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : Материалы третьей всероссийской научно-практической конференции с международным участием 15–19 мая 2012 г. Иркутск : В 2 т. – Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2012. – 641с., Т.2, – С. 504.

12. Степанов, М.А. Анализ картин магнитных и силовых полей сечений элементов протяжённых ферромагнитных конструкций / М.А. Степанов, А.П. Степанов, А.А. Пыхалов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : Материалы четвёртой всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 13–17 мая 2013 г. Иркутск : В 2 т. – Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2013. – 586 с., Т.1, – С. 267.

13. Степанов, М.А. Реализация и исследование способов магнитной дефектоскопии и обнаружения внутреннего напряжённого состояния стального прямоугольного профиля / М.А. Степанов, А.П. Степанов, А.А. Пыхалов // Проблемы проектирования, строительства, диагностики и технического содержания объек-

тов железнодорожного транспорта : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Чита, 24 октября – 15 ноября 2013 г. – Чита : Заб ИЖТ, 2013. – 133с., – С. 69.

14. Степанов, М.А. Оценка изгибных напряжений стальных конструкций, имеющих сечение простой симметричной формы / М.А. Степанов, А.П. Степанов, А.А. Пыхалов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : Материалы пятой международной научно-практической конференции, посвящённой 40-летию начала строительства Байкало-Амурской магистрали, 31 марта – 04 апреля 2014 г. Иркутск: В 2 т. – Иркутск : ИрГУПС, 2014. – 664 с., Т.1, – С. 365.

15. Степанов, М.А. Оценка нормального напряжения при плоском изгибе балки с помощью метода магнитного контроля и моделирования на основе метода конечных элементов / А.П. Степанов, М.А. Степанов, А.А. Пыхалов, Зыонг Ван Лам // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : Материалы шестой международной научно-практической конференции, посвящённой 40-летию со дня образования Иркутского государственного университета путей сообщения, 30 сентября – 03 октября 2015 г. Иркутск : В 2 т. – Иркутск : ИрГУПС, 2015. – 656 с., Т.1, – С. 455.

16. Степанов, М.А. Моделирование полей напряжения в сечениях балки при её плоском изгибе / М.А. Степанов, А.П. Степанов, Зыонг Ван Лам // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : Материалы Седьмой международной научно-практической конференции, посвящённой 355-летию со дня основания города Иркутска, 29 марта – 01 апреля 2016 г. Иркутск : в 2 т. Т.2, – Иркутск : ИрГУПС, 2016. – 878 с., – С. 857.

17. Степанов, М.А. Способы магнитного контроля элементов стальных конструкций / М.А. Степанов, А.П. Степанов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : Материалы Восьмой международной научно-практической конференции 28 марта – 01 апреля 2017 г. Иркутск : в 2 т. Т.2, – Иркутск : ИрГУПС, 2017. – 863 с., – С. 577.