

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Иркутский государственный университет путей сообщения»
ФГБОУ ВО ИрГУПС

На правах рукописи

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: Пыхалов Анатолий Александрович
доктор технических наук, профессор

Иркутск - 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ.....	11
1.1. Современное состояние контроля в промышленности.	11
1.2. Анализ методов неразрушающего контроля.....	13
1.3. Анализ методов оценки напряжённо-деформированного состояния элементов протяжённых стальных конструкций.....	17
1.4. Постановка задачи разработки новых способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций.....	25
1.5. Выводы по главе.	26
ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ СПОСОБОВ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТЯЖЁННЫХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	27
2.1. Теоретические аспекты электромагнитного поля и магнитных цепей при решении задач магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций.....	27
2.2. Зависимость намагниченности от упругих напряжений в изделиях из ферромагнитного материала.....	31
2.3. Напряжённо-деформированное состояние элементов протяжённых стальных конструкций.....	37
2.4. Моделирование внешних магнитных полей поперечных сечений элементов протяжённых стальных конструкций.....	39
2.5. Основные принципы разработки способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций с симметричным поперечным сечением.....	45
2.6. Выводы по главе	46

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТЯЖЁННЫХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	47
3.1. Способ магнитной дефектоскопии элементов протяжённых стальных конструкций по отклонению следа нулевой магнитной индукции.....	47
3.2. Способы магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций под нагрузкой.....	50
3.3. Способ магнитного контроля и оценки изгибных напряжений на примере плоского изгиба балки при приложении изгибающей силы по центру балки.....	54
3.4. Способ магнитного контроля и оценки изгибных напряжений на примере плоского изгиба балки при приложении изгибающей силы в двух местах балки.....	66
3.5. Магнитный контроль и оценка распределения напряжений внутри поперечных сечений балки.....	71
3.6. Способ оперативного обнаружения дефектов и внутренних напряжений в элементах протяжённых стальных конструкций.....	85
3.7. Структурная блок-схема и алгоритмы реализации способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций.....	89
3.8. Выводы по главе.....	91
ГЛАВА 4. РЕАЛИЗАЦИЯ СПОСОБОВ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТЯЖЁННЫХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	93
4.1. Исследование картин внешнего магнитного поля образцов рельсов.....	93
4.2. Экспериментальная оценка напряжения в образце стальной балки прямоугольного поперечного сечения при изгибе.....	105
4.3. Оценка изгибных напряжений в образце стальной балки	

прямоугольного поперечного сечения на цифровых моделях.....	121
4.4. Алгоритм оценки изгибных напряжений в элементах протяжённых стальных конструкций.....	129
4.5. Выводы по главе.....	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ.....	147

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы связана с возрастанием требований к качеству контроля, диагностики технологических процессов и технического состояния объектов промышленности. Большой класс действующих объектов промышленности, представляет собой протяжённые металлические конструкции, такие как, стальные рельсовые нити железнодорожных путей, трубопроводы, балки. Разработка новых способов контроля и диагностики указанных объектов, является одним из основных этапов работ, направленных на поддержание их в рабочем состоянии, объективной оценки работоспособности и прогноза дальнейшей без аварийной работы [1–81]. Анализ существующих видов неразрушающего контроля и оценки технического состояния конструкций показывает ряд существенных недостатков: ограниченное применение для контроля протяженных конструкций; затруднённая оценка глубинных слоев металла для большинства видов контроля; требуется подготовка контролируемой поверхности и объектов контроля; недостаточная автоматизация применяемых видов контроля и диагностики [11–57]. Поперечное сечение элементов протяжённых стальных конструкций, в большинстве случаев, представляет собой геометрическую фигуру симметричную относительно одной или более осей симметрии [11; 89]. Элементы протяжённых стальных конструкций постоянно находятся в намагниченном состоянии [79–81]. Опираясь на указанные конструктивные и физические свойства протяжённых стальных конструкций, в дополнение к существующим способам и методам неразрушающего контроля [11; 32; 33], в диссертации был разработан ряд новых способов магнитного контроля и оценки технического состояния протяжённых стальных конструкций, позволяющий проводить их автоматизацию с учётом особенностей объектов контроля [109–124].

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 пункте 2 зависимостей (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 зависимостей между дефектами, структурными изменениями и механическими напряжениями, искажающими 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 зависимости (закономерности), связанные с искаже-

нием картины внешнего магнитного поля поперечного сечения элемента, предварительно созданного симметричным относительно геометрической фигуры поперечного сечения элемента, которые позволили идентифицировать дефекты, структурные изменения и механические напряжения в однородном ферромагнитном материале поперечных сечений контролируемого объекта:

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 зависимостей между дефектами, структурными изменениями и механическими напряжениями 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. Практический результат реализации разработанных способов магнитного контроля заключается в возможности обеспечения оперативного выполнения процесса контроля и оценки технического состояния элементов стальных конструкций, находящихся в работе

[109–124]. Перспективы дальнейшего развития темы видятся в адаптации разработанных способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций для выбранных объектов контроля, включая их автоматизацию. Результаты диссертационной работы использованы в практической деятельности Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», Приложение А.

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 [43–49; 65–84; 86; 87; 89–104].

Основные положения, выносимые на защиту:

1. 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 ферромагнитном материале сечения.

2. 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 ферромагнитном материале сечения.

3. Закономерности, устанавливающие связь (при отсутствии дефектов и структурных изменений в 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 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.

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.).

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 45% до 85% результатов. Личный вклад автора заключается: в проведении натуральных экспериментов и математической обработке результатов экспериментов; в моделировании и анализе картин магнитных полей и напряжений в поперечных сечениях объекта контроля; в установление закономерностей, связанных с искажением картин внешнего магнитного поля поперечных сечений элементов протяжённых объектов контроля, вызванных дефектами, структурными изменениями и (или) механическими напряжениями в них, и магнитной индукцией внешнего магнитного поля поперечных сечений; в разработке шести запатентованных способах магнитного контроля и диагностики элементов конструкций, выполненных из ферромагнитного материала.

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

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. Разработка способов магнитного контроля и оценки технического состояния протяжённых стальных конструкций должна опираться на конструктивные, физические и эксплуатационные особенности объектов контроля и иметь возможность их автоматизации. 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 поперечное сечение, выводы по главе.

В третьей главе на основе полученных закономерностей приводится разработка шести способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций, имеющих поперечное сечение в виде симметричной геометрической фигуры. Приводится структурная блок-схема, позволяющая автоматизировать способы магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций [112–132].

В четвёртой главе приведена реализация способов с помощью цифрового моделирования на основе метода конечных элементов с помощью программных продуктов MSC Maxwell и Nastran, экспериментов на образцах без дефектов и с дефектами, эксперимента изгиба образца стальной балки прямоугольного сечения на универсальном учебном комплексе по сопротивлению материалов [106–108; 111; 118–124].

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

1.1. Современное состояние контроля в промышленности

Развитие и современное состояние контроля в промышленности можно проследить по нормативным документам и работам [1–81]. В справочнике по неразрушающему контролю и диагностике под редакцией В.В. Ключева [11] приведены основные этапы развития и увеличения производства металлов и их потребления в мире, так за прошедшие два десятка лет потребление металлов удвоилось и составило около 800 млн. тонн в год. Общий объём мирового металлофонда приближается к 8 млрд. тонн. В национальном валовом продукте от 72% до 74 % составляет продукция, в производстве которой использовались чёрные и цветные металлы, как основные конструкционные материалы. Отмечается, что в общем объёме выпускаемой на металлургических комбинатах продукции приходится на профильный металлопрокат, который широко используется в машиностроении, лёгкой и тяжёлой промышленности, строительстве, на транспорте и в быту. Чёрный профильный металлопрокат является лидером производства, его заготовки применяются для изготовления рельсов, балок, труб, колонн, свай, корпусов тракторов, автомобилей, подъёмных механизмов и т.д.

В профильном металлопрокате преобладают изделия, имеющие симметричное поперечное сечение: круг, овал, квадрат, прямоугольник и др. Контроль качества выпускаемой металлопродукции является эффективным способом сбережения ресурсов.

Высокое качество выпускаемой продукции, контроль и оценка технического состояния во время эксплуатации продлевает срок её службы, сводит к минимуму возможности техногенных аварий и экологических катастроф [11–13; 50; 79–81].

Так, на главных путях железных дорог России уложено около 10 млн. штук двадцатипятиметровых рельсов [79]. Больше половины из них сварены в плети бесстыкового пути [80], остальные использованы в звеньевом пути, где соедине-

ны накладками и болтами, кроме того около 5 млн. рельсов находятся на станционных и подъездных путях.

Мероприятия, увеличивающие долговечность рельсов, дают положительный экономический эффект, кроме того, большой экономический ущерб наносят железным дорогам длительные и временные предупреждения об ограничении скорости движения поездов, при обнаружении дефектов в рельсах, до их замены.

На железных дорогах России ежегодно снимают с пути более 100 тыс. дефектных и острodefектных рельсов. Рельс является не только наиболее важным, но и самым уязвимым звеном в железнодорожном пути. Рельсы не должны иметь внутренних и наружных дефектов определённого вида, превышающих нормируемые размеры [79; 81].

Развитие промышленности тесно связано с использованием методов неразрушающего контроля на всех технологических этапах производства металлоизделий.

Методы и средства неразрушающего контроля используются во всех отраслях промышленности. К десяти основным видам неразрушающего контроля в последние годы добавляются новые методы (способы), совмещающие в себе несколько физических принципов и позволяющие, сохраняя основные достоинства классических методов, значительно расширить область их применения [1;13–81; 104].

Из основных тенденций развития промышленности вытекает возрастание роли неразрушающего контроля и оценки технического состояния металлоконструкций, находящихся в эксплуатации.

Новые разрабатываемые методы и способы контроля и оценки технического состояния протяжённых стальных конструкций должны удовлетворять следующим основным требованиям: быть надёжными, простыми в эксплуатации, не дорогими, с низкой погрешностью измерения, достаточно информативными и быстродействующими, позволяющими проводить их максимальную автоматизацию.

1.2. Анализ методов неразрушающего контроля

Различают десять видов неразрушающего контроля: радиоволновой, тепловой, оптический, радиационный, акустический, виброакустический, проникающими веществами, вихретоковый, электрический, магнитный [1–11; 13–41; 44–49; 51–57; 70–78; 104].

При радиоволновом методе неразрушающего контроля происходит регистрация изменения параметров электромагнитных волн, взаимодействующих с контролируемым объектом. Используют обычно волны сверхвысокой частоты длиной 1–100 мм, применяют в изделиях из материалов, в которых радиоволны плохо затухают: диэлектрики (пластмассы, керамика, стекло), магнитодиэлектрики (ферриты), полупроводники, тонкостенные металлические объекты. Информативными параметрами являются амплитуда, фаза, вектор поляризации, частота, время распространения волн [11; 13; 33].

В тепловом методе неразрушающего контроля осуществляется регистрация изменения тепловых полей контролируемого объекта. Применяется к объектам из любых материалов и толщин [11].

В оптическом методе неразрушающего контроля проводится наблюдение и анализ параметров оптического излучения, взаимодействующего с контролируемым объектом. Измеряемой характеристикой является интенсивность света. Зрительно контролируют исходные материалы, полуфабрикаты, готовую продукцию, отклонение формы и размеров валиков сварных швов, изъяны материала и обработки, поверхностные дефекты [33].

Радиационный метод неразрушающего контроля заключается в регистрации и анализе проникающего через объект ионизирующего излучения. Измеряемой величиной является интенсивность ионизирующего излучения. Позволяет определить макродефекты и микроструктуру металлов [11; 13; 32].

Акустический метод неразрушающего контроля регистрирует параметры упругих волн возбуждаемых или возникающих в объектах. Обычно используют упругие волны ультразвукового диапазона с частотой колебаний более 20 Гц. Ин-

формативными параметрами являются амплитуда, фаза, время распространения, число импульсов, амплитудно-частотный спектр, плотность сигналов. Виброакустический метод неразрушающего контроля основан на регистрации параметров виброакустического сигнала, возникающего при работе контролируемого объекта [11; 13; 32].

В проникающими веществами методе (капиллярном) осуществляется проникновение в полость дефектов контролируемых объектов пробных веществ, индикаторной жидкости. Применяют для обнаружения слабо видимых невооруженным глазом поверхностных дефектов в изделиях из любых материалов. Метод течеиспускания используется для выявления сквозных дефектов в замкнутых (герметичных) емкостях. В полость дефекта пробное вещество проникает под действием либо разности давлений, либо капиллярных сил. Регистрация прошедшего пробного вещества фиксируется с наружной стороны изделия [32].

В вихретоковом методе неразрушающего контроля (электромагнитный метод) регистрация и анализ взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте. Контролируют изделия из электропроводящих материалов [11; 13; 33].

В электрическом методе неразрушающего контроля осуществляется регистрация параметров электрического поля, взаимодействующего с контролируемым объектом. Информативными параметрами являются емкость или потенциал. Емкостный вид метода применяют для контроля диэлектрических или полупроводниковых материалов. По изменению диэлектрической проницаемости контролируют химический состав пластмасс, полупроводников, наличие в них несплошностей, влажность сыпучих материалов. Потенциальный вид используют для контроля толщины проводящего слоя полупроводников, наличие в них несплошностей [11; 75; 76].

В магнитном методе неразрушающего контроля осуществляется регистрация магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении магнитных свойств контролируемых изделий. Применяют для контроля объ-

ектов изготовленных из ферромагнитных материалов. В зависимости от магнитных свойств материала (коэрцитивной силы, магнитной проницаемости, остаточной индукции), форм и размеров контролируемого изделия применяют два способа намагничивания: приложенного магнитного поля и остаточной намагниченности. Информацию о магнитной проницаемости и ее изменении в зависимости от напряженности магнитного поля получают с помощью катушки индуктивности (индуктивный метод). Для регистрации полей рассеяния на дефектах и измерения магнитных характеристик материалов используют датчики типа феррозондов (феррозондовый метод), преобразователи Холла, магниторезисторы. Для регистрации полей рассеяния над дефектами применяют магнитные порошки или магнитные суспензии (магнитопорошковый метод) [1–8; 10; 11; 13–41; 50; 58–64; 74–78; 104].

Рассмотрим более подробно магнитные методы контроля. Магнитный контроль начал применяться одним из первых для диагностики продукции и промышленных объектов, методы которого разрабатывались на основе работ Аркадьева В.К., Акулова Н.С., Вонсовского С.В., Дехтяр М.В., Кондорского Е.И., Шур Я.С., Янус Р.И. и других учёных [11; 33]. С помощью магнитных методов контроля выявляются закалочные, шлифовочные, усталостные трещины, закаты и другие поверхностные дефекты, определяется твердость, проводится структуроскопия, определяется марка стали, измеряются физические параметры материала (магнитная проницаемость, магнитная восприимчивость), измерение толщины покрытия, механических напряжений [1–11].

Магнитный контроль можно реализовать несколькими методами. Чаще других в настоящее время используется магнитопорошковый, индукционный, феррозондовый, магниторезистивный, магнитополупроводниковый, магнитографический, пондеромоторный метод, метод контроля с помощью датчиков Холла и др. [7–78]. Ранее магнитные методы применяли для неразрушающего контроля изделий из ферромагнитных материалов, находящихся в намагниченном состоянии, на сегодняшний день границы применимости этих методов расширены и на немагнитные материалы.

Магнитные плёнки нанесенные на немагнитный материал позволяют определять механические характеристики изделий из немагнитных материалов. Стандартные магнитные методы являются недорогими и не требуют значительного времени для измерений. К магнитным методам испытаний относятся: магнитная дефектоскопия; магнитный анализ; магнитные измерения; испытания готовых магнитов [11; 15; 19; 20–23; 33; 65–68]. Измерения могут проводиться как в приложенных, так и в остаточных магнитных полях. В зависимости от объектов контроля применяют различные способы намагничивания контролируемых объектов. Намагничивают детали постоянным, импульсным, переменным или комбинированным магнитным полем в продольном, поперечном или циркуляционном направлении [11; 15–21; 33; 74–77].

В магнитопорошковом методе на поверхность намагниченной детали наносят ферромагнитный порошок. Под действием магнитных полей частицы порошка скапливаются над дефектами. Возможно выявление тонких и мелких трещин с раскрытием больше 0,0025 мм и глубиной не менее 0,025 мм. В стыковых сварных соединениях с усилением, выполненных автоматической сваркой, выявляются трещины с раскрытием не менее 0,01 мм и глубиной не менее 0,1 мм, в соединениях выполненных ручной сваркой 0,025 мм и 0,25 мм, соответственно. Преимущества магнитопорошкового метода: высокая чувствительность к тонким и мелким трещинам, простота, оперативность и наглядность, возможность применения для деталей практически любых форм и размеров [24; 32; 33].

В магнитографическом методе магнитные поля рассеяния записываются на магнитную ленту, наложенную на участок контроля. Записи на ленте преобразуются в электрические сигналы и наблюдаются на экране дефектоскопа. Преимущества магнитографического метода: высокая разрешающая способность, позволяющая регистрировать неоднородные магнитные поля, соизмеримые с размером частиц магнитного слоя ленты (порядка 1 мкм) возможность регистрации дефектов на сложных поверхностях и узких зазорах. Недостатки: необходимость вторичного преобразования информации, регистрируются только составляющие маг-

нитных полей вдоль поверхности ленты, сложность размагничивания и хранения ленты [11; 32; 33].

В магнитоферрозондовом методе используют датчики (феррозонды). Феррозонды имеют катушки, генерирующие магнитное поле, взаимодействующее с остаточным или наведенным полем контролируемой детали. При попадании дефекта в зону взаимодействия этих полей в катушках датчика возникает электрический сигнал, по его величине судят о дефекте. Этот метод имеет высокую чувствительность, но для обеспечения достоверности результатов поверхность изделия должна иметь хорошую чистоту обработки [11; 19; 20; 21; 33; 35; 74; 75].

В индукционном методе регистрация магнитных полей объекта контроля осуществляется индукционными преобразователями. Для регистрации магнитных полей рассеяния образующихся около дефектов в намагниченной детали используют катушку, которую двигают вдоль контролируемого объекта с постоянной скоростью. Магнитным полем детали в катушке наводится электродвижущая сила, которая в местах рассеяния поля изменяется, что позволяет судить о дефекте.

К преимуществам метода относятся повышенная надежность, возможность работы в сильных магнитных полях. К недостаткам метода можно отнести требование к постоянной скорости перемещения магнитной головки вдоль направления магнитного поля, а также условия позиционирования головки относительно направления движения [11; 33].

1.3. Анализ методов оценки напряжённо-деформированного состояния элементов протяжённых стальных конструкций

Оценка напряжённого состояния при изготовлении, сборки и эксплуатации элементов металлоконструкций занимает важное место в диагностике технического состояния конструкций [43–46; 48; 49; 86; 89–100; 104].

Из методов физического контроля, применяемых для контроля механических характеристик, получил распространение магнитный метод.

Магнитный контроль использует зависимости между физико-механическими и магнитными параметрами исследуемых объектов. Из магнитных методов предпочтительными оказались методы, основанные на измерении магнитной индукции и коэрцитивной силы. Магнитная индукция и коэрцитивная сила имеют наилучшую корреляцию с механическими свойствами стали. Разработан государственный стандарт по неразрушающему контролю механических свойств и микроструктуре магнитным методом [8].

В магнитных методах полезную информацию можно получить с полного сечения изделия или с его поверхности. Суть магнитного метода заключается в снятии петли магнитного гистерезиса с разных марок стали, магнитные характеристики разных марок позволяют различать их по магнитной индукции и по коэрцитивной силе. Чтобы перейти от магнитного контроля стали к механическим испытаниям для каждой марки стали проводят серию параллельных испытаний магнитных и прямых, традиционных механических испытаний, а потом используют полученные взаимосвязи для аттестации готовой продукции [22; 23; 25–31; 33–35].

В большинстве методов магнитного контроля механических характеристик и структуры ферромагнитного материала в изделиях используют относительные измерения. При этом напрямую не измеряют какой-либо параметр, а только фиксируют, соответствуют параметры заданным или отклоняются от них, поэтому для оценки параметров проводят сравнение с характеристиками соответствующих образцов.

В методах магнитного контроля механических характеристик по информативным параметрам различают: коэрцитиметрию, контроль по остаточной намагниченности, контроль по магнитной проницаемости, контроль по магнитным шумам, ферритометрию, метод высших гармоник.

Структурный магнитный контроль предназначен для прогноза развития дефектов, вызванных различного рода нагрузками [33; 58; 102].

Подробный анализ остаточных напряжений проведён в работе [43]. Отмечается, что остаточные напряжения возникают в деталях в большинстве технологи-

ческих операций и по своей величине могут превосходить напряжения от внешних нагрузок. Для уменьшения остаточных напряжений применяется, как правило, специальная термическая обработка, однако её использование не всегда возможно.

Напряжения, изменяющиеся несущественно в пределах размера зерна материала, относятся к макронапряжениям, которые позволяют считать материал изотропным. Обычно эти напряжения от внешних нагрузок. Микронапряжения претерпевают резкие изменения в пределах зерна. Они связаны с анизотропией кристаллов, ориентацией кристаллографических плоскостей, наличием различных фаз и т.д. При оценке влияния остаточных напряжений на прочность и деформации деталей учитывается действие макроскопических напряжений [43].

Остаточные напряжения в поверхностном слое влияют на прочность всей детали, особенно при действии переменных напряжений, что сильно сказывается на надёжности и долговечности конструкций.

При эксплуатации на деталь действуют остаточные напряжения и напряжения от внешних нагрузок, при этом суммарные напряжения получаются сложением остаточных напряжений и напряжений от внешних нагрузок.

Основной принцип определения остаточных напряжений в механических методах состоит в том, что после разреза и обнажения поверхности среза тела, остаточные напряжения в теле будут эквивалентны приложению к поверхности сечения, оставшейся части тела, остаточных напряжений обратного знака. Затем по перемещениям определяется вызвавшие их напряжения на поверхности среза.

На первый план выходят методы технической диагностики, сочетающие механику разрушений, металловедения и неразрушающего контроля, позволяющие повысить надёжность и долговечность деталей. К таким методам относятся методы контроля напряженно-деформированного состояния [89–100].

Анализ применяемых методов и средств контроля напряжений показывает их недостаточное использование непосредственно на действующем оборудовании. К существенным недостаткам известных методов контроля напряжений и деформаций в основном металле, в сварных соединениях оборудования и кон-

струкций относят: непригодность для контроля протяженных трубопроводов и конструкций, крупногабаритных изделий; невозможность использования большинства методов в области пластической деформации; не учитывается изменение структуры металла; невозможность оценки глубинных слоев металла для большинства методов контроля; требуется построение градуировочных графиков на основе испытаний предварительно изготовленных образцов, которые, как правило, не отражают фактическое энергетическое состояние оборудования; требуется подготовка контролируемой поверхности и объектов контроля; сложность определения положения датчиков контроля по отношению к направлению действия максимальных напряжений и деформаций, определяющих надежность оборудования [58].

Эффективность современных численных методов определения напряженно-деформированного состояния не устраняет необходимости применения экспериментальных методов для прямого измерения напряжений (деформаций) в материале конструкции [44].

В работах [45–50] показано, что задача экспериментальной оценки реального напряженного состояния детали на различных этапах изготовления, монтажа в более крупную конструкцию и дальнейшей эксплуатации остаётся актуальной.

Проведём анализ основных методов неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния ферромагнитных конструкций и деталей машин.

Метод тензометрии получил широкое распространение в экспериментальных исследованиях НДС металлоконструкций [48; 51; 52]. В настоящее время метод реализуют с помощью струнных и электротензометров.

Метод тензометрии позволяет определять лишь относительные деформации на действующей конструкции, по отношению к тому значению деформации, которое соответствует моменту наклейки датчика или закрепления измерительной струны на поверхности материала конструкции. В этом случае исходные значения деформации материала конструкции остаются неизвестными [48].

Рентгенографический метод основан на определении деформации по изменению атомных межплоскостных расстояний в соответствии с действующим

упругим напряжением. Рентгенографический метод позволяет определить величину напряжений в заданном направлении в плоскости действия напряжений, а также раздельно. При измерении напряжений в конструкции с неизвестной начальной нагрузкой необходимо использовать эталонный образец, в котором отсутствуют напряжения [53].

На результаты измерения влияют размеры зерен, глубина проникновения луча, точность определения дифракционного луча, анизотропия и текстура материала. Рентгеновский метод широко используется в лабораторной практике для определения остаточных напряжений, обусловленных технологическими процессами термообработки, науглероживания, дробеструйной обработки, механической обработки резанием, условиями эксплуатации.

К достоинствам метода относится высокая точность измерения микродеформаций (микронапряжений), позволяющая проводить прямые измерения деформаций кристаллической решетки нагруженных деталей, то есть определять остаточные напряжения и напряжения от нагрузки.

К недостаткам метода относятся: высокие требования к чистоте поверхности; необходимость проводить измерения в приповерхностном слое до 0,1 мм; длительность процедуры измерений до нескольких десятков минут на одну точку; при измерении под разными углами необходимо выдерживать точное расстояние излучателя и приемника до объекта контроля; громоздкость применяемой аппаратуры; сложность обработки результатов измерений, которые являются существенными препятствиями для его натуральных применений на практике [50].

Акустические методы основаны на регистрации упругих колебаний, и применяются для изучения физико-механических характеристик твердых тел [13; 32].

Акустический метод измерения напряжений в твердых телах основан на использовании закономерностей распространения упругих волн в предварительно напряженных телах. Этот метод позволяет раздельно определить главные напряжения не только в моделях, но и непосредственно в конструкциях без дополнительных процедур разгрузки. Обладает достаточно высокой разрешающей

способностью, обеспечивает оперативность контроля, позволяет проводить измерения не только поверхностных напряжений, но и напряжений действующих внутри материала.

Наиболее распространены методы измерений напряжений, основанные на измерении скорости ультразвука. Эффект зависимости скорости упругих волн от напряжений - нелинейный, так как в линейной теории упругости они полностью определяются модулями упругости и плотностью среды. Однако эта зависимость весьма слабая ввиду малой нелинейности твердых тел по сравнению с жидкостями и газами. Чтобы определить напряжения, действующие в конструкционных материалах с погрешностью десять и менее процентов от предела текучести, требуется проводить прецизионные измерения скоростей ультразвуковых волн с относительной погрешностью 0,1–0,01 процента [76].

Следует отметить, что по сравнению с рентгеновским методом, измеряющим остаточные напряжения третьего рода, акустический метод измеряет совокупность напряжений первого и второго родов, что приводит к разным результатам в двух методах [58].

В магнитных методах измерения физической основой оценки параметров напряженно-деформированного состояния является магнитоупругий эффект: изменение намагниченности тела под действием механических напряжений. При этом изменяются такие магнитные характеристики, как магнитная проницаемость, остаточная намагниченность, коэрцитивная сила и др., которые используются при исследовании напряжённо-деформированного состояния ферромагнитных материалов.

С помощью магнитных методов возможно определить в детали одноосное напряженное состояние, разность главных напряжений, пластическую деформацию [9; 11; 22; 23; 33–42; 54–58; 104].

Метод измерения шумов Баркгаузена основан на регистрации скачков Баркгаузена при перемещении стенок магнитных доменов, представляющих собой области спонтанной намагниченности, каждая из которых намагничена практически до насыщения, при приложении механического усилия к материалу.

К достоинствам метода следует отнести оперативность и простоту процедур измерений, относительно невысокие требования к подготовке поверхности области контроля, к недостаткам – низкая чувствительность при измерениях на материалах с высокой твердостью, сильная нелинейность характеристики при деформациях сжатия, погрешность при низких уровнях напряжений [11; 36–42].

Метод измерений коэрцитивной силы основан на зависимости ее величины от механических напряжений в объектах, изготовленных из ферромагнитного материала. При этом приращение коэрцитивной силы при растяжении и сжатии в упругой области составляют десятки процентов от начального уровня, при этом отсутствует гистерезис характеристик. Это позволяет использовать экспериментально полученные зависимости для определения механических напряжений по коэрцитивной силе.

Непосредственное определение напряжений при двухосном нагружении во многих случаях затруднено, однако можно определить направления главных деформаций. Направление наибольшей деформации при растяжении совпадает с направлением, в котором коэрцитивная сила минимальна, а направление главной наименьшей деформации с направлением максимальной коэрцитивной силы. При двухосном сжатии наблюдается обратная зависимость [11; 25; 31].

Метод магнитной анизотропии основан на использовании магнитных свойств, возникающих в ферромагнетике при приложении внешней силы. Принцип действия преобразователя основан на эффекте поворота вектора магнитной индукции, создаваемой в зоне измерений первичной обмоткой.

При отсутствии напряжений металлы изотропны в отношении магнитных свойств. В металле нагруженных объектов создается анизотропия, по которой судят о напряжениях, с привлечением эталонных образцов. Информация о напряженном состоянии объекта может быть получена при наличии тарировочных зависимостей для каждой марки стали, типоразмера и технологии изготовления деталей.

К недостаткам метода следует отнести низкую достоверность для поверхностного слоя материала, а также наличие магнитомеханического гистерезиса.

Существование у материала начальной анизотропии магнитных свойств определяет основную погрешность метода, которую невозможно исключить известными приемами повышения точностных характеристик магнитных методов. Эта анизотропия появляется на стадии изготовления ферромагнитного материала и вносит трудно контролируруемую погрешность в результаты измерений [11].

Метод магнитной памяти металла основан на регистрации и анализе распределения собственных магнитных полей рассеяния, возникающих в изделиях и в оборудовании в зонах концентрации напряжений под действием магнитоупругого эффекта [58–64].

В методе магнитной памяти металла в качестве информативных параметров используют остаточную намагниченность, которая проявляется в виде магнитной памяти металла к деформационным и структурным изменениям в материале изделий и оборудования. Метод даёт возможность провести оценку изменения напряжений, позволяет отличить область упругой деформации от пластической, найти зоны концентрации напряжений, где возможно зарождение усталостных трещин [64].

Магнитные методы оценки механических напряжений имеют ряд особенностей.

Глубина проникновения переменного внешнего электромагнитного поля зависит от его частоты и заключена в диапазоне от нескольких миллиметров до долей миллиметра, поэтому свойства поверхностного слоя металла существенно сказываются на результатах определения напряжений. С возрастанием частоты начинает оказывать отрицательное влияние тонкий слой влаги на поверхности металла.

По этой причине применение постоянных магнитных полей имеет преимущество по сравнению с методами, использующими переменные магнитные поля [11; 50].

1.4. Постановка задачи разработки новых способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций

Из предыдущего обзора и анализа методов контроля и диагностики технического состояния элементов протяжённых конструкций, изготовленных из материала, относящегося к ферромагнетикам, следует, что в настоящее время поиск новых подходов, способов и методов решений в контроле, дефектоскопии и оценке напряжённо-деформированного состояния становится главным направлением развития неразрушающего контроля.

Анализ существующих видов и методов неразрушающего контроля и оценки технического состояния протяжённых металлоконструкций показывает ряд существенных недостатков, к которым относятся: ограниченное применение; затруднённая оценка глубинных слоев металла для большинства видов контроля; требуется подготовка контролируемой поверхности и объектов контроля; затруднённая автоматизация применяемых видов контроля и диагностики [11; 50; 58; 74–81].

Большинство элементов протяжных стальных конструкций имеют поперечное сечение в виде геометрической фигуры симметричной относительно одной или более осей симметрии, изготовлены из однородного по физическим свойствам ферромагнитного материала, постоянно находятся в намагниченном состоянии (естественном или приобретённом в результате их использования в технологическом процессе).

На основании проведённого анализа, вытекает задача разработки новых способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций, позволяющих ускорить процесс определения и оценки дефектов, структурных изменений, напряженного состояния, проведения анализа полученных данных для дальнейшего принятия решений по работе конструкций, их автоматизации с учётом особенностей объектов контроля [109–124].

1.5. Выводы по главе

1. Анализ неразрушающих методов контроля показал их ограниченное применение к протяжённым объектам контроля.

2. Сравнение методов контроля в целях использования для элементов протяжённых стальных конструкций указывает на выбор магнитных методов с использованием постоянного магнитного поля.

3. Разработка способов магнитного контроля и оценки технического состояния протяжённых стальных конструкций должна опираться на конструктивные, физические и эксплуатационные особенности объектов контроля и иметь возможность их автоматизации.

ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ СПОСОБОВ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТЯЖЁННЫХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

2.1. Теоретические аспекты электромагнитного поля и магнитных цепей при решении задач магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций

Рассмотрим свойства магнитного поля, которые позволят разработать для широкого круга протяжённых изделий машиностроения, имеющих симметричное поперечное сечение и изготовленных из однородного ферромагнитного материала, ряд способов магнитного контроля и оценки технического состояния в части обнаружения и оценки дефектов, структурных изменений и внутренних напряжений.

Основные зависимости теории электромагнитного поля и его применение в неразрушающем контроле изделий изготовленных из ферромагнитного материала сводятся к следующим [19; 65–68; 74–78; 82].

Стационарное магнитное поле, как вихревое, так и потенциальное, в каждой точке пространства, где оно существует, может быть описано с помощью векторного потенциала магнитного поля $A = A(x, y, z)$.

Векторный магнитный потенциал удовлетворяет уравнению Пуассона

$$\nabla^2 A = -\mu_a j \quad (2.1)$$

и дополнительному условию

$$\operatorname{div} A = 0. \quad (2.2)$$

где μ_a - абсолютная магнитная проницаемость среды,

j - вектор плотности тока.

Если известен векторный магнитный потенциала $A = A(x, y, z)$, то магнитную индукцию в произвольной точке пространства можно найти по формуле

$$B = \operatorname{rot} A, \quad (2.3)$$

при этом выполняется равенство

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad (2.4)$$

т.е. магнитное поле не имеет истоков, магнитные силовые линии замкнуты или уходят в бесконечность.

Векторный потенциал магнитного поля и соотношения (2.1)–(2.4) на практике используются лишь при описании вихревого магнитного поля в областях пространства, где протекают электрические токи. В областях пространства, где плотность тока равна нулю $\mathbf{j} = 0$ и нет вихревого магнитного поля $\operatorname{rot} \mathbf{H} = 0$, магнитное поле будет потенциальным, т.е. магнитное поле в каждой точке пространства может быть охарактеризовано скалярным магнитным потенциалом $\varphi = \varphi(x, y, z)$. При этом векторы напряжённости \mathbf{H} и индукции \mathbf{B} магнитного поля связаны со скалярным магнитным потенциалом φ и между собой следующими соотношениями:

$$\mathbf{H} = - \operatorname{grad} \varphi, \quad (2.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu_a \mathbf{H}. \quad (2.6)$$

Из соотношений (2.4) и (2.6) следует, что в средах с постоянной абсолютной магнитной проницаемостью μ_a выполняется соотношение

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = 0. \quad (2.7)$$

Скалярный магнитный потенциал удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\nabla^2 \varphi = 0. \quad (2.8)$$

Решение дифференциальных уравнений (2.1)–(2.8) осуществляют при использовании дополнительных граничных условий на границах раздела изотропных сред для проекций векторов \mathbf{H} и \mathbf{B} , Рисунок 2.1:

$$H_{1t} = H_{2t} \text{ и } B_{1n} = B_{2n}, \quad (2.9)$$

где индексы «1» и «2» соответствуют проекциям векторов на границах первой и второй сред, а индексы «t» и «n» указывают на тангенциальную и нормальную проекции векторов к границе сред, соответственно.

Из соотношений (2.9) следует, что при переходе из одной среды в другую вектор магнитной индукции \mathbf{B} меняет своё значение, но сохраняет неизменной свою нормальную проекцию к границе раздела сред, при этом вектор напряжённости

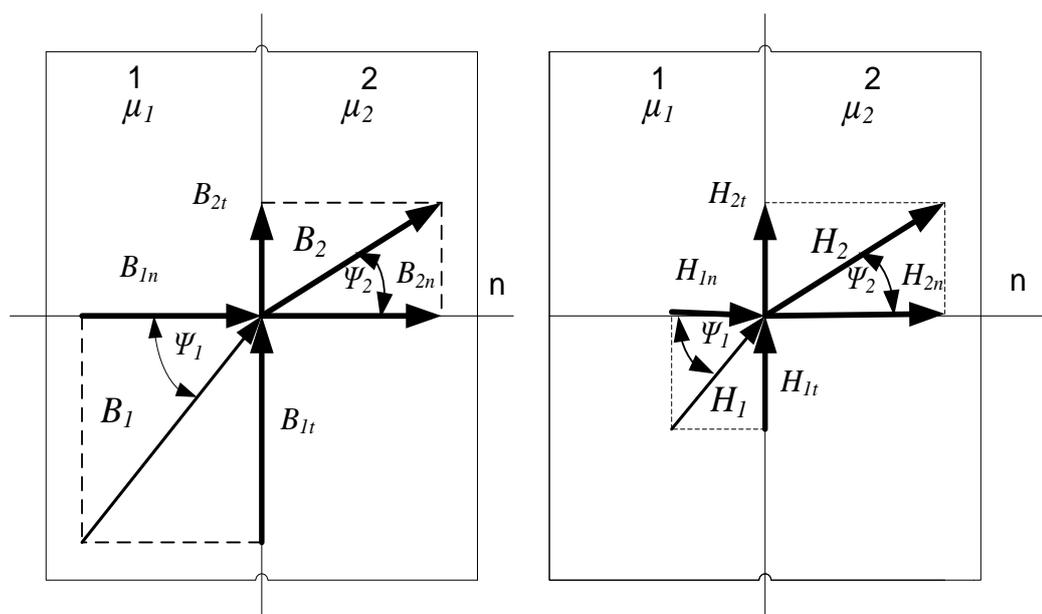
ности магнитного поля H при переходе сохраняет неизменной свою тангенциальную проекцию.

Из соотношения (2.9), с учётом зависимости (2.6), для границы перехода из одной среды в другую вытекает пропорция для магнитных проницаемостей первой и второй сред:

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{\operatorname{tg} \Psi_1}{\operatorname{tg} \Psi_2}, \quad (2.10)$$

где μ_1 и μ_2 - магнитные проницаемости первой и второй сред, соответственно;

Ψ_1 и Ψ_2 - углы между направлениями векторов индукции и напряжённости магнитного поля и нормалью к поверхности раздела первой и второй сред, соответственно, Рисунок 2.1.



а) – векторы B_1 и B_2

б) – векторы H_1 и H_2

Рисунок 2.1 – Граница раздела двух сред 1-ой и 2-ой

На Рисунке 2.1 используются обозначения: нормальные составляющие векторов индукции B_{1n} , B_{2n} и напряжённости H_{1n} , H_{2n} магнитного поля; тангенциальные составляющие векторов индукции B_{1t} , B_{2t} и напряжённости H_{1t} , H_{2t} магнитного поля; нормаль n к поверхности раздела первой и второй сред.

Из соотношения (2.10) следует, что при большом различии магнитных проницаемостей сред магнитные силовые линии практически перпендикулярны к поверхности границы сред, например, для границы «ферромагнетик-воздух», где выполняется соотношение $\mu_1 \gg \mu_2$. Следует, что при нахождении ферромагнитного изделия с магнитной проницаемостью $\mu_1 = (10^4-10^6)\mu_0$ в воздухе с магнитной проницаемостью равной магнитной проницаемости вакуума $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м нормальная составляющая магнитной индукции B_{2n} в разных точках на поверхности изделия будет характеризовать магнитную проницаемость материала изделия μ_1 в этих точках.

Для ферромагнитных материалов зависимость (2.6) для индукции B , напряжённости H и намагниченности J магнитного поля можно записать в виде:

$$B = \mu_0 H + \mu_0 J = \mu_a H, \quad (2.11)$$

$$J = \chi H, \quad (2.12)$$

где χ – магнитная восприимчивость материала;

абсолютная магнитная проницаемость материала

$$\mu_a = \mu_0 (1 + \chi). \quad (2.13)$$

Из соотношений (2.11)–(2.13) следует, что индукция зависит от напряжённости магнитного поля и намагниченности материала.

В общем виде зависимость индукции от напряжённости магнитного поля для ферромагнитного материала $B(H)$ представлена в виде петли магнитного гистерезиса, полученной экспериментальным путём для каждого материала. Точного аналитического выражения зависимость $B(H)$ не имеет.

Для магнитомягких материалов зависимость $B(H)$ используется в расчётах в виде основной кривой намагничивания, полученной как геометрическое место вершин симметричных гистерезисных петель [66; 134–136].

Решение дифференциальных уравнений (2.1)–(2.8) с граничными условиями (2.9) в изотропных средах для простых задач можно получить в аналитическом виде, для более сложных задач решение получают с помощью методов моделирования [109–112].

2.2. Зависимость намагниченности от упругих напряжений в изделиях из ферромагнитного материала

Ферромагнитные материалы изменяют свою намагниченность при приложении внешних сил к образцу. Данный эффект был обнаружен Виллари в 1865 году при растяжении образца из железа, в котором при слабых магнитных полях происходило возрастание намагниченности материала по мере увеличения растягивающих усилий [65–71; 74–78; 86].

При увеличении напряжённости магнитного поля H кривая намагниченности J нагруженного образца приближается к кривой не нагруженного образца и пересекается в точке Виллари. До достижения точки Виллари кривые намагничивания идут выше кривой не нагруженного образца, после прохождения точки Виллари – идут ниже. При этом отклонение кривой намагничивания от исходной (без приложения внешней силы) тем больше, чем больше приложенное напряжение. При дальнейшем увеличении напряжённости магнитного поля до насыщения все кривые намагничивания сходятся.

На Рисунке 2.2 приведены зависимости намагниченности железа от растягивающего напряжения при различных магнитных полях [67].

Из кривых следует, что для семейства фиксированных напряжённостей магнитного поля существуют растягивающие напряжения, при которых наблюдается максимальная намагниченность.

С возрастанием напряжённости магнитного поля максимумы намагниченности смещаются в сторону меньших нагрузок. Данное свойство позволяет для магнитного контроля выбрать требуемый диапазон намагничивания образца для получения большей намагниченности.

Ферромагнетики в слабых магнитных полях могут обладать положительной магнитострикцией (железо), когда при растяжении их намагниченность увеличивается, а при сжатии – уменьшается, и отрицательной магнитострикцией (никель), когда при растяжении их намагниченность уменьшается, а при сжатии – увеличи-

вается. Эти свойства ферромагнитных материалов получили названия положительного и отрицательного эффекта Виллари, соответственно.

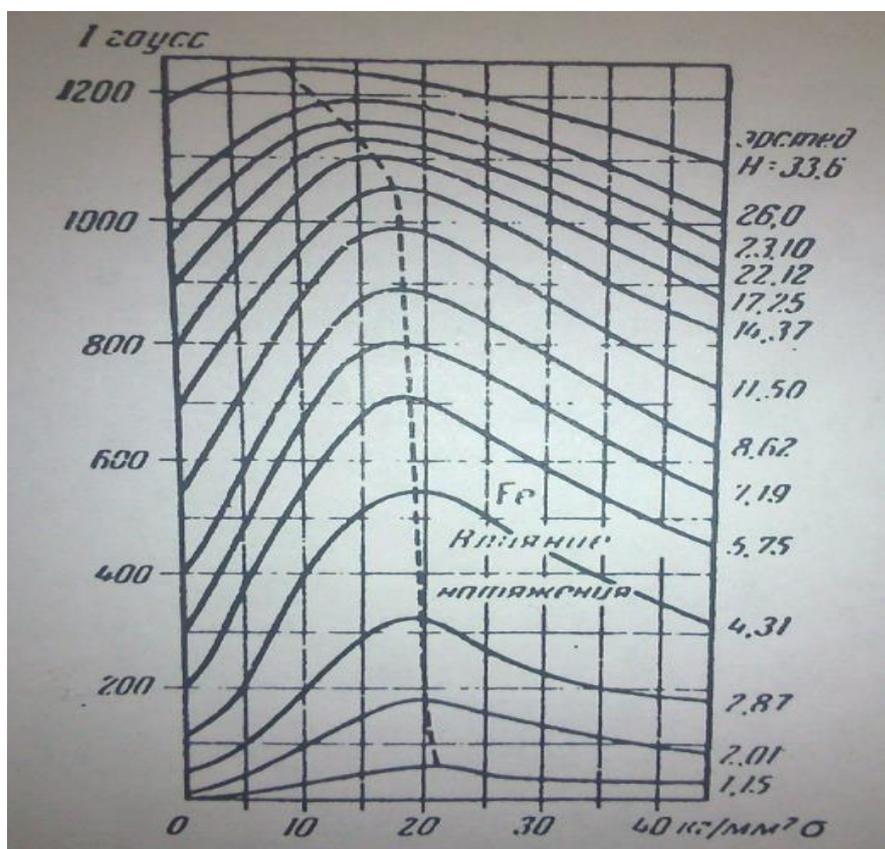


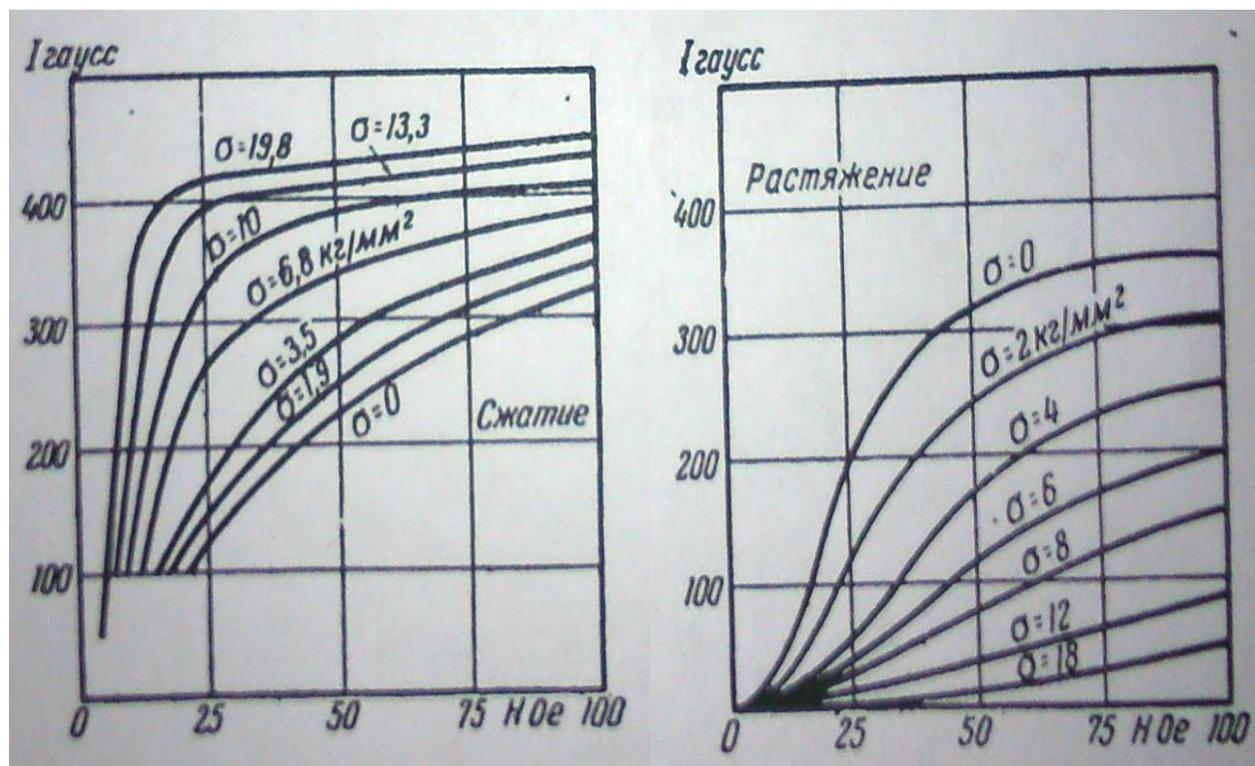
Рисунок 2.2 – Кривые зависимости намагниченности железа от растягивающего напряжения при различных магнитных полях

Источник: Вонсовский С.В. Ферромагнетизм / С.В. Вонсовский, Я.С. Шур. – М.; – Л. : ОГИЗ, Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. – 816 с.

На Рисунке 2.3 приведены кривые намагничивания от напряжённости магнитного поля $J(H)$ при сжимающих и растягивающих напряжениях σ для никеля [67].

Из зависимостей, приведённых на Рисунке 2.2 и Рисунке 2.3, следует, что намагниченность J довольно сильно зависит от растягивающих и сжимающих напряжений σ при слабых магнитных полях.

Рассмотрим гипотетическую балку с симметричным поперечным сечением при чистом изгибе, у которой верхние слои (от оси симметрии) ферромагнитного материала будут сжиматься, а нижние слои – растягиваться при одних и тех же по величине напряжениях в верхних и нижних слоях [103].



а) – сжимающие напряжения

б) – растягивающие напряжения

(Единицы измерения: Н – $\times 10^{-1}$ Эрстед; J – Гаусс; σ – кг/мм²)

Рисунок 2.3 – Зависимость намагниченности от напряжённости магнитного поля при разных значениях механических напряжений для образцов из никеля

Источник: Вонсовский С.В. Ферромагнетизм / С.В. Вонсовский, Я.С. Шур.

– М.; – Л. : ОГИЗ, Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. – 816 с.

В качестве примера воспользуемся зависимостями намагниченности от напряжения (сжатия и растяжения) и напряжённости магнитного поля для наружных поверхностных слоёв балки, образованных из двух одинаковых образцов (по сечению и по длине) из никеля сжимающегося и растягивающегося, соответственно, Рисунок 2.3.

Снятые с графиков Рисунка 2.3 данные сведены в Таблицу 2.1, в которой для четырёх значений напряжённости магнитного поля

$$H = 2,5; 5; 7,5; 10 \text{ Э}$$

и четырёх равных по величине значений напряжения растяжения и сжатия

$$\sigma = 2; 3,5; 6,8; 10 \text{ кг/мм}^2,$$

найлены значения разности намагниченности в любом сечении на участке чистого изгиба балки между нижним и верхним слоями материала балки по выражению

$$\Delta J = |J_c| - |J_p|, \quad (2.14)$$

где J_c – намагниченность образца при сжатии;

J_p – намагниченность образца при растяжении.

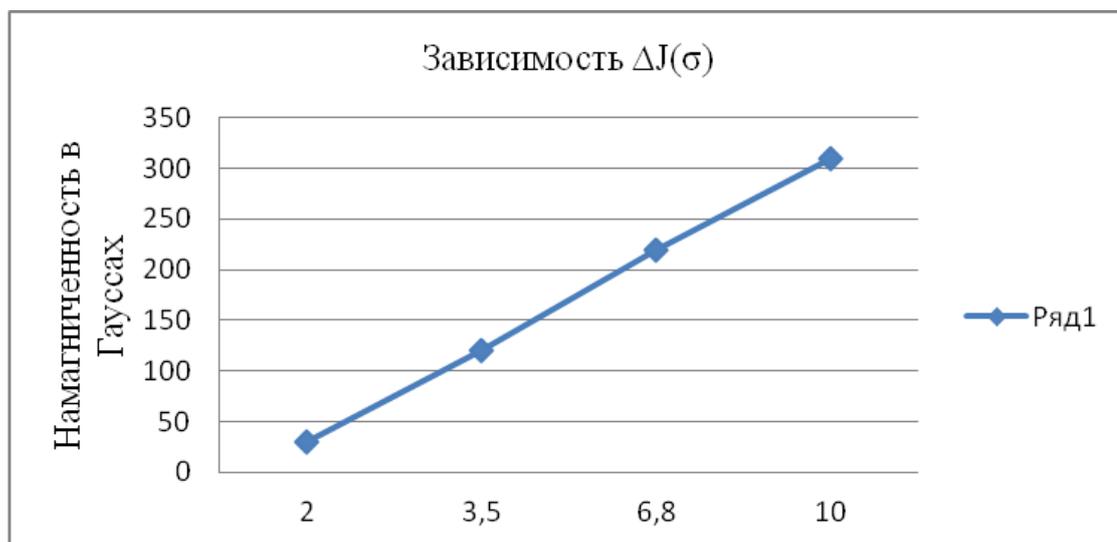
Таблица 2.1 – Данные снятые с графиков Рисунка 2.3

H	σ	J_c	J_p	$\Delta J = J_c - J_p $
Эрстед	кг/мм ²	Гаусс	Гаусс	Гаусс
2,5	2	150	120	30
5	2	270	240	30
7,5	2	310	280	30
10	2	340	310	30
2,5	3,5	180	60	120
5	3,5	280	160	120
7,5	3,5	340	220	120
10	3,5	370	250	120
2,5	6,8	260	40	220
5	6,8	330	110	220
7,5	6,8	360	140	220
10	6,8	390	170	220
2,5	10	330	20	310
5	10	380	70	310
7,5	10	400	90	310
10	10	410	100	310

Анализ данных Таблицы 2.1 показывает, что в широком диапазоне изменения напряжённости магнитного поля $H \in [2,5;10]$ Э разность намагниченности в поперечном сечении между нижним и верхним слоями материала балки ΔJ зависит только от величины напряжения $\sigma \in [2;10]$ кг/мм².

На Рисунке 2.4 показан график разности намагниченности материала балки между нижним и верхним слоями поперечного сечения балки от напряжения $\Delta J(\sigma)$, построенный согласно данных Таблицы 2.1.

Полученная зависимость $\Delta J(\sigma)$ на выбранных интервалах изменения напряжённости магнитного поля H и напряжения σ для данного ферромагнитного материала может быть аппроксимирована аналитической функцией, например, линейной при разработке способов магнитного контроля и оценки технического состояния ферромагнитных изделий, имеющих поперечное сечение в виде симметричной геометрической фигуры, Рисунок 2.4.



(Единицы измерения: ΔJ – Гаусс, σ – кг/мм²)

Рисунок 2.4 – Зависимость разности намагниченности между нижним и верхним слоями в поперечном сечении балки от равного по величине напряжения сжатия и растяжения $\Delta J(\sigma)$

После соответствующего намагничивания балки, и измерения магнитной индукции для любого сечения на поверхности балки, получаем значения магнит-

ной индукции пропорциональные соответствующим значениям намагниченности, согласно соотношениям (2.9)–(2.11), а напряжение в поверхностных слоях балки будет равным максимальному значению напряжения на участке чистого изгиба балки [103].

Тогда зависимость $\Delta J(\sigma)$ Рисунка 2.4 может быть заменена зависимостью разности значений магнитной индукции в поперечном сечении на поверхности балки ΔB от максимального напряжения в поверхностных слоях балки σ_m при её изгибе для любого сечения балки:

$$\Delta B(\sigma_m) = |B_c| - |B_p|, \quad (2.15)$$

где B_p – значение магнитной индукции на поверхности балки для растягивающегося слоя балки;

B_c – значение магнитной индукции на поверхности балки для сжимающегося слоя балки.

Действительно, для симметричного поперечного сечения балки, согласно (2.11), с учётом принятых выше условий и обозначений, можно записать:

$$B_p = \mu_0 H + \mu_0 J_p, \quad (2.16)$$

$$B_c = \mu_0 H + \mu_0 J_c. \quad (2.17)$$

После подстановки (2.16) и (2.17) в выражение (2.15) получим зависимость между разностью значений магнитной индукции в поперечном сечении на поверхности балки и разностью намагниченности в этом же сечении балки:

$$\Delta B(\sigma_m) = \mu_0 \Delta J(\sigma_m). \quad (2.18)$$

Из выражения (2.18) следует, что напряжённость магнитного поля H в рассматриваемом диапазоне изменения не влияет на разность значений магнитной индукции в поперечном сечении на поверхности балки $\Delta B(\sigma_m)$, если при намагничивании балки будет создано симметричное магнитное поле относительно геометрической фигуры поперечного сечения балки.

Как будет показано ниже, зависимость (2.15) может быть получена экспериментально, и служить в качестве эталонной для контроля и оценки изгибных напряжений в элементах протяжённых стальных конструкций, имеющих попе-

речное сечение в виде простой симметричной геометрической фигуры, что будет также подтверждено на цифровой модели изгиба стальной балки [111; 117; 124].

2.3. Напряжённо-деформированное состояние элементов протяжённых стальных конструкций

Анализ напряжённо-деформированного состояния в элементах конструкций вызванных внешними воздействиями всё больше осуществляют с помощью программных продуктов, реализующих метод конечных элементов [106; 107].

Приведём картины распределения механических напряжений для элементов протяжённых стальных конструкций. Картины распределения напряжений получены путём моделирования в среде программных продуктов [106; 107] при изгибе рельса Р65 с параметрами материала: модуль упругости $E = 205000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, горизонтальная ось центров тяжести плоскости фигуры сечения рельса находится на расстоянии 81,4 мм от основания подошвы рельса, вертикальная ось симметрии поперечного сечения рельса совпадает с осью симметрии геометрической фигуры поперечного сечения рельса.

На Рисунке 2.5 в поперечном сечении рельса Р65 показана расчётная сетка для вычисления картины нормальных напряжений в сечении при горизонтальном и вертикальном изгибе рельса.

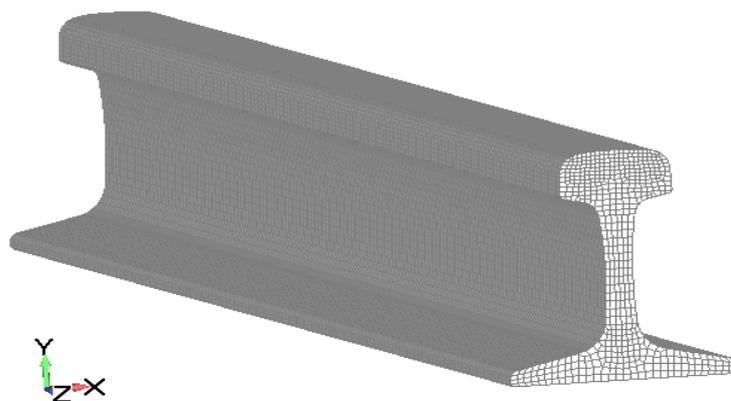


Рисунок 2.5 – Модель рельса Р65

На Рисунке 2.6 и Рисунке 2.7 показаны расчётные картины полей распределения нормального напряжения в сечениях рельса при горизонтальном и вертикальном изгибах рельса.

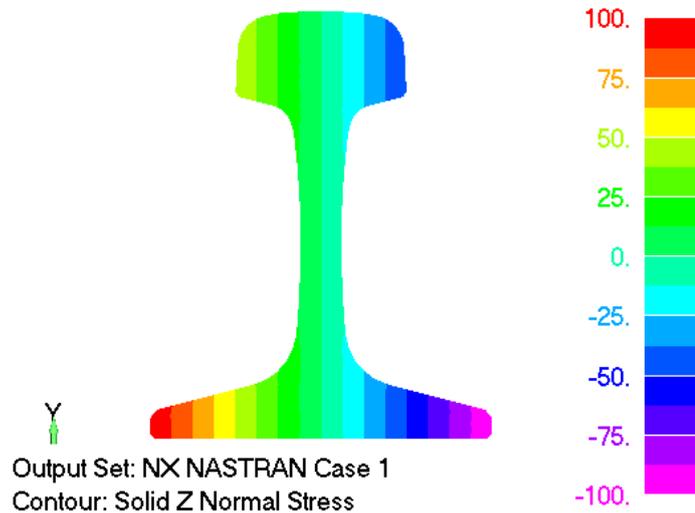


Рисунок 2.6 – Нормальное напряжение при горизонтальном изгибе рельса

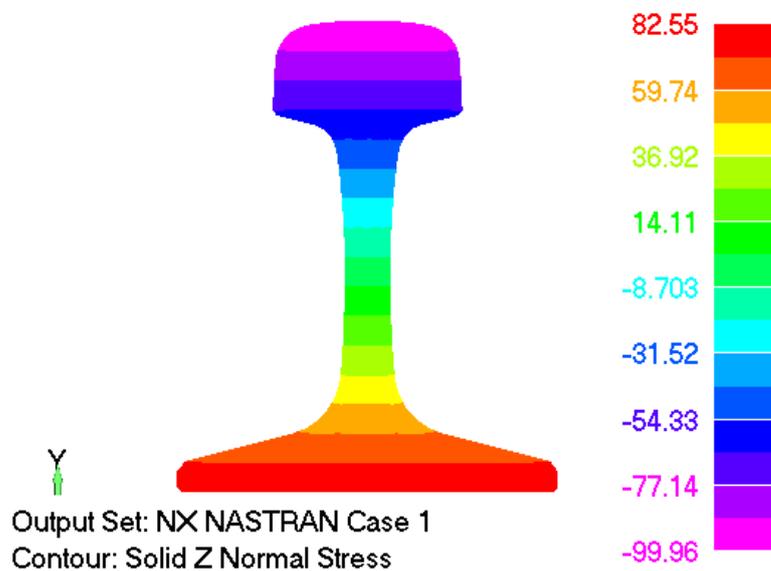


Рисунок 2.7 – Нормальное напряжение при вертикальном изгибе рельса

Анализ картин распределения нормальных напряжений в сечении рельса при изгибе показывает, что напряжения равны по величине при растяжении и сжатии относительно вертикальной оси симметрии (Рисунок 2.6) и относительно горизонтальной оси, проходящей через центры тяжести плоскости геометри-

ской фигуры поперечного сечения рельса (Рисунок 2.7), в попарно симметричных точках на равных расстояниях от вертикальной (Рисунок 2.6) и горизонтальной (Рисунок 2.7) осей геометрической фигуры поперечного сечения рельса.

При этом, чем больше расстояние от соответствующей оси, тем больше по величине напряжение. Напряжение равно нулю будет совпадать с вертикальной и горизонтальной осями фигуры сечения при соответствующем изгибе, что согласуется с теоретическими выкладками, приведёнными в работе [103].

Опираясь на результаты выкладок, рассмотренных выше можно утверждать, что картины полей механических напряжений поперечных сечений протяжённых объектов связаны с картинами полей намагниченности материала поперечных сечений, а также с картинами внешнего магнитного поля этих сечений.

2.4. Моделирование внешних магнитных полей поперечных сечений элементов протяжённых стальных конструкций

На основе цифрового моделирования, реализующего метод конечных элементов, проведём анализ картин магнитных и силовых полей поперечных сечений элементов протяжённых конструкций, выполненных из однородного ферромагнитного материала [106; 107].

Для получения информации о внутреннем состоянии протяжённого изделия воспользуемся постоянным магнитным полем, силовые линии которого, проходя через всё изделие, замыкаются по воздуху, тем самым вынося информацию о внутреннем состоянии изделия в окружающее его пространство, параграфы 2.1 и 2.2.

Постоянное магнитное поле будем создавать таким образом, чтобы картина внешнего магнитного поля была симметричной относительно какой-либо оси симметрии геометрической фигуры поперечного сечения элемента, например, с образованием двух явно выраженных магнитных полюсов на выбранной оси симметрии геометрической фигуры поперечного сечения.

Постоянное магнитное поле можно создавать двумя путями – это намагничивать изделие с помощью постоянных магнитов, перемещая полюса магнитов по выбранной оси симметрии поперечного сечения элемента по всей длине контролируемого участка, и с помощью пропускания постоянного тока вдоль элемента. После намагничивания элемента, источник внешнего магнитного поля удаляется [66; 74–77]. Тогда, для каждого поперечного сечения элемента протяжённого изделия, изготовленного из изотропного ферромагнитного материала и, не находящегося в состоянии напряжения, картина внешнего магнитного поля будет симметричной относительно оси (осей) симметрии геометрической фигуры поперечного сечения элемента [19; 20; 21; 68; 70; 75; 77; 82].

В качестве примера рассмотрим картины магнитного и силового полей сечения рельса, полученные путём моделирования с использованием программных продуктов Maxwell и Femap [106; 107; 120; 124].

Картина магнитного поля окружающего пространства поперечного сечения рельса представлена на Рисунке 2.8 при пропускании вдоль рельса постоянного тока плотностью $j = 10000 \text{ А/м}^2$.

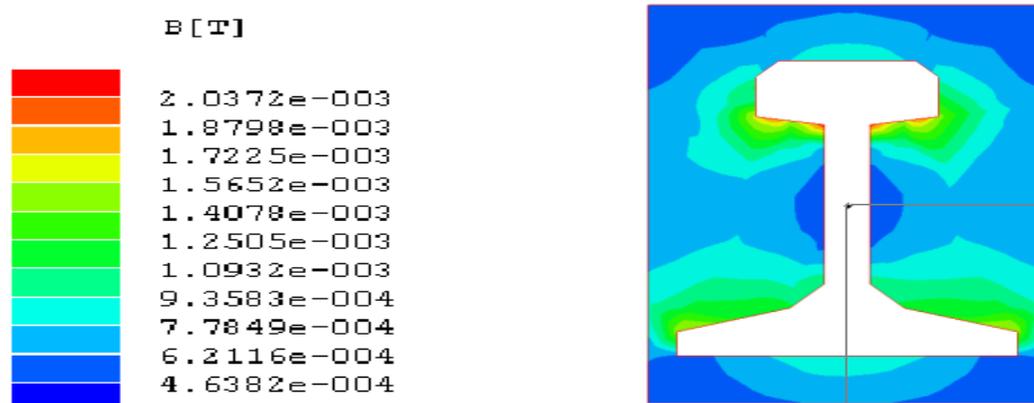


Рисунок 2.8 – Симметричная картина внешнего магнитного поля сечения рельса при пропускании постоянного тока плотностью $j = 10000 \text{ А/м}^2$

На Рисунке 2.8 видно, что картина внешнего магнитного поля симметрична относительно вертикальной оси симметрии поперечного сечения рельса, т.е. маг-

нитная индукция в симметричных точках на поверхности сечения рельса относительно вертикальной оси симметрии фигуры сечения будет равной по величине.

Вернёмся к рассмотрению картин распределения нормального напряжения по сечению рельса при горизонтальном и вертикальном изгибах, Рисунок 2.6 и Рисунок 2.7. Картина поля нормального напряжения на Рисунке 2.6 симметрична относительно вертикальной оси симметрии для абсолютных значений напряжений (знаки прямо противоположные).

Картина поля нормального напряжения на Рисунке 2.7 симметрична относительно горизонтальной оси, проходящей через центры тяжести геометрической фигуры поперечного сечения рельса. Анализ картин распределения нормального напряжения по сечению показывает, что наибольшее по величине напряжение возникает на боковых поверхностях головки и подошвы рельса (на границах сечения). Данное физическое свойство позволяет выбрать характерные точки на границе поперечного сечения элемента, в которых магнитная индукция в попарно симметричных точках будет равна по абсолютному значению (в частных случаях будет совпадать и по знакам) при отсутствии напряжения в нём.

На Рисунке 2.9, в качестве примера, показаны шесть характерных точек попарно симметричных относительно вертикальной оси симметрии на границе поперечного сечения элемента.

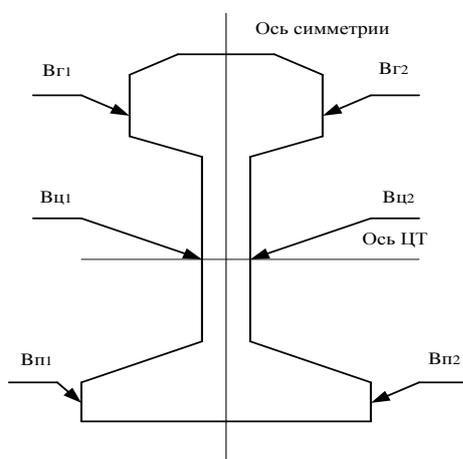


Рисунок 2.9 – Магнитная индукция в попарно симметричных характерных точках сечения на поверхности элемента: $V_{Г1}$ и $V_{Г2}$; $V_{Ц1}$ и $V_{Ц2}$; $V_{П1}$ $V_{П2}$

Создав внешнее симметричное магнитное поле на участке контроля элемента, как на Рисунке 2.8, и, измерив магнитную индукцию в характерных точках поперечных сечений элемента, можно выявить и идентифицировать места дефектов и внутренних напряжений в сечениях. Действительно, нарушение симметрии внешнего магнитного поля поперечного сечения элемента на контролируемом участке может быть вызвано изменением структуры металла, за счёт присутствия дефекта или механических напряжений в нём.

На Рисунке 2.8, Рисунке 2.10, Рисунке 2.11, Рисунке 2.12 и Рисунке 2.13 представлены картины внешних магнитных полей поперечных сечений рельса и швеллера при отсутствии и наличии в них дефектов, полученные с помощью моделирования в среде Maxwell.

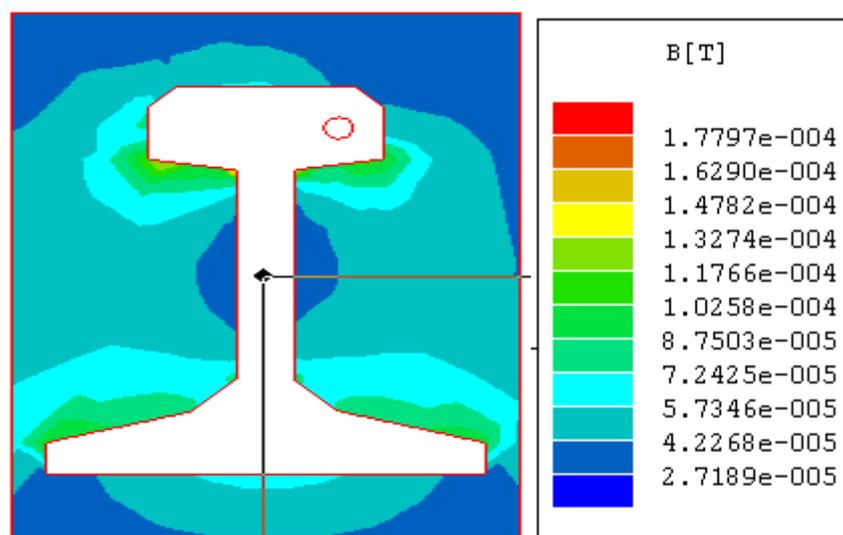


Рисунок 2.10 – Магнитная индукция в попарно симметричных характерных точках сечения на поверхности элемента: B_{r1} и B_{r2} ; $B_{ц1}$ и $B_{ц2}$; $B_{п1}$ $B_{п2}$

Из сравнения картин внешних магнитных полей Рисунка 2.8 и Рисунка 2.10 видно, что правая часть картины на Рисунке 2.10 отличается от левой части относительно вертикальной оси симметрии, в то время как, на Рисунке 2.8 эти картины магнитного поля зеркально симметричны относительно вертикальной оси симметрии.

По окрашенности картины магнитного поля на границах сечений можно судить о величинах индукции, в выбираемых для контроля характерных точках сечения.

Отметим, что след нулевой магнитной индукции (нормальной составляющей $B=0$) на поверхности сечения, практически совпадающий на картине магнитного поля Рисунка 2.8 с линией центров тяжести (на ней измеряется индукция в характерных точках $B_{ц1}$ и $B_{ц2}$, Рисунок 2.9), претерпевает такое изменение, что правый след смещается в сторону дефекта, Рисунок 2.10.

На картинах внешнего магнитного поля поперечного сечения элемента (Рисунок 2.11 и Рисунок 2.12) наблюдается искажение симметрии между верхней частью картины и нижней частью картины относительно горизонтальной оси симметрии, проходящей через центры тяжести геометрической фигуры сечения, а также отклонение следа нулевой магнитной индукции ($B=0$), проходящей через линию центров тяжести сечения в сторону дефекта (левая сторона картины), Рисунок 2.12.

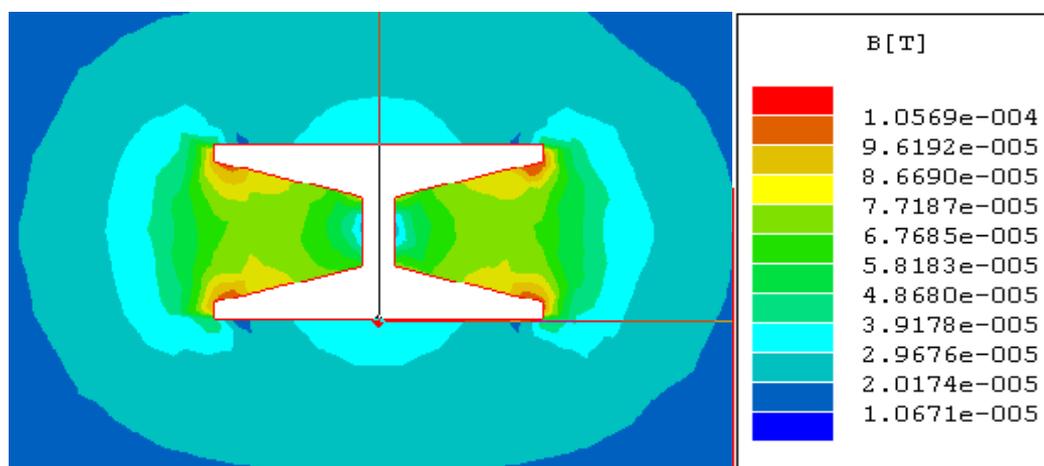


Рисунок 2.11 – Симметричная картина внешнего магнитного поля сечения стального профиля

На Рисунке 2.13 приведена картина внешнего магнитного поля поперечного сечения стального профиля, выполненного из однородного материала steel1010, а также справа от вертикальной оси симметрии две симметрич-

ных области, имитирующие внутренние напряжения (или структурные изменения) в материале профиля, представленные однородным материалом steel1008, имеющего отличную от steel1010 основную кривую намагничивания $B(H)$.

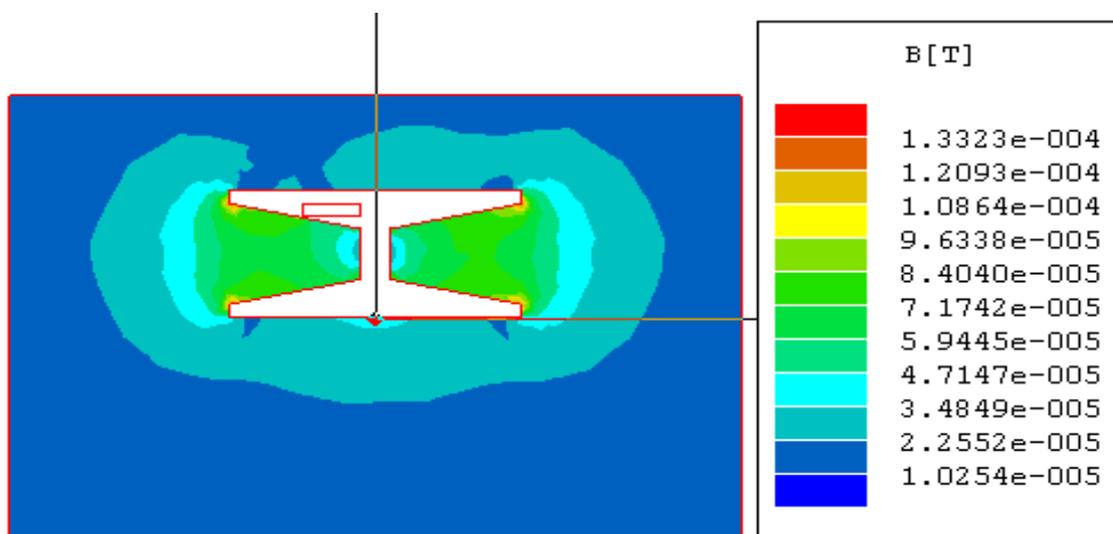


Рисунок 2.12 – Картина внешнего магнитного поля сечения стального профиля с дефектом в виде прямоугольной раковины

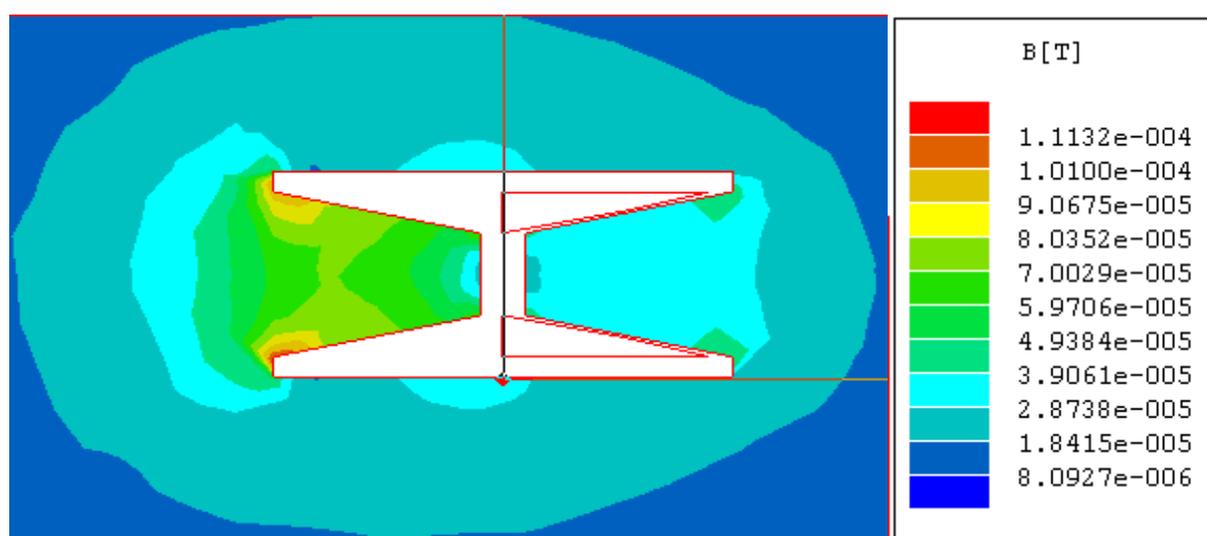


Рисунок 2.13 – Картина внешнего магнитного поля стального профиля с двумя областями, имитирующими внутренние напряжения (или структурные изменения) в материале профиля

На Рисунке 2.13 картина внешнего магнитного поля несимметрична относительно вертикальной оси симметрии фигуры. На картине магнитного поля видно, что след нулевой магнитной индукции $B = 0$ слева и справа от вертикальной оси симметрии не отклонился от горизонтальной оси (линии центров тяжести) фигуры сечения.

В попарно симметричных точках относительно вертикальной оси симметрии сечения профиля на его границах магнитная индукция будет различной по величине, что говорит о наличии магнитной аномалии (в виде имитации механического напряжения или структурного изменения материала).

Места дефектов и участки механических перенапряжений могут быть идентифицированы путём сравнения с показаниями приборов на соседних сечениях участка контроля, а также по величине разности магнитной индукции в характерных попарно симметричных точках.

2.5. Основные принципы разработки способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций с симметричным поперечным сечением

Разработка способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций, имеющих поперечное сечение в виде геометрической фигуры, симметричной относительно одной или более осей симметрии, сводится к реализации двух основных пунктов:

- 1 – создание симметричного магнитного поля относительно осей геометрической фигуры поперечных сечений элементов на контролируемом участке;
- 2 – анализ полученных картин внешнего магнитного поля поперечных сечений.

Для однородного материала поперечного сечения элемента при отсутствии дефектов, структурных изменений и внутренних напряжений картина внешнего магнитного поля поперечного сечения будет симметричной относительно осей (оси) симметрии геометрической фигуры поперечного сечения.

При появлении физических изменений в материале сечения происходит искажение созданного симметричного магнитного поля.

По измеренным отклонениям магнитной индукции в выбранных характерных точках поперечного сечения на поверхности элемента, а также по отклонению следа нулевой магнитной индукции от расчётного следа на боковой поверхности элемента, проводится оценка состояния контролируемого участка элемента.

2.6. Выводы по главе

Отмеченные выше свойства магнитных и силовых полей, позволяют установить закономерности, на основе которых разработать новые способы магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций с поперечными сечениями элементов симметричными относительно одной или более осей симметрии.

Создаётся симметричное магнитное поле относительно оси (осей) геометрической фигуры поперечного сечения, которое позволяет на участке контроля:

1. По отклонению следа нулевой магнитной индукции от расчётного следа плоскости, проходящей через линию центров тяжести геометрической фигуры поперечного сечения элемента, на боковой поверхности элемента вдоль его длины, выявить и оценить магнитные аномалии в сечениях, связанные с дефектами, структурными изменениями и напряжениями в материале сечений.

2. По измеренной магнитной индукции в выбранных характерных попарно симметричных точках сечений на поверхности элемента выявить сечения с магнитными аномалиями, нарушающими симметрию картины внешнего магнитного поля сечения элемента, оценить дефекты, структурные изменения и внутренние напряжения.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТЯЖЁННЫХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

3.1. Способ магнитной дефектоскопии элементов протяжённых стальных конструкций по отклонению следа нулевой магнитной индукции

В производственной практике существует широкий круг ферромагнитных изделий и конструкций со значительной проверяемой поверхностью, связанной с их протяжённостью или при большом потоке проверяемых экземпляров.

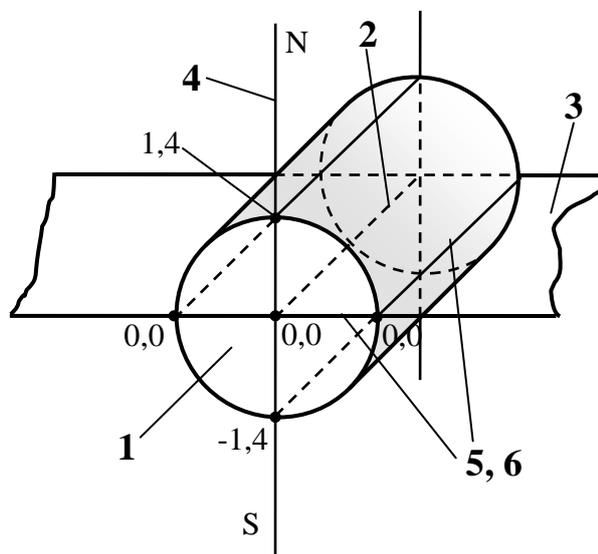
Для таких обстоятельств эффективность процедуры магнитной дефектоскопии определяется автоматизацией и мобильностью её технологического процесса, ускорение которого позволит удешевить, а главное, повысить уровень информативности контроля объектов.

На основе выводов, представленных в главе 2, был разработан способ магнитного контроля элементов протяжённых конструкций, изготовленных из однородного ферромагнитного материала, имеющих поперечные сечения элемента в виде простой геометрической фигуры симметричной относительно одной или более осей симметрии, центры тяжести которых лежат на продольной оси элемента, при этом в теле элемента может быть указана содержащая эту ось плоскость, след которой в каждом поперечном сечении перпендикулярен оси симметрии сечения элемента: «Способ магнитной дефектоскопии» [109; 112; 118; 119; 121].

Например, для элементов с простой геометрической фигурой поперечного сечения (круг, прямоугольник и др.) оси симметрии геометрической фигуры поперечного сечения элемента и следы плоскостей отсчёта в сечении – взаимозаменяемы, Рисунок 3.1.

Задача дефектоскопии решается путём намагничивания элемента с последовательным образованием двух явно выраженных магнитных полюсов на оси симметрии геометрической фигуры поперечных сечений по всей длине контролируемого участка элемента. При этом, магнитное поле должно быть симметричным

относительно оси (или осей) симметрии геометрической фигуры поперечного сечения элемента. В этом случае след нулевой магнитной индукции (нормальной составляющей) на поверхности элемента при контроле перемещается по расчётному следу плоскости отсчёта (или ему параллелен), Рисунок 3.1.



- 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 $B = 0$ на поверхности протяжённого объекта контроля
- Рисунок 3.1 – Фрагмент контролируемого элемента без дефекта

На Рисунке 3.1 показано совпадение следа нулевой магнитной индукции $B = 0$ со следом плоскости отсчёта на образце, проходящей через линию центров тяжести геометрической фигуры поперечного сечения объекта контроля, изготовленного из однородного ферромагнитного материала.

Наличие дефектов на контролируемом участке элемента, вызванных неоднородностью материала (например, раковина) или нарушением формы профиля, возникшей при изготовлении элемента, либо в процессе эксплуатации, обуславливает появление местной магнитной аномалии, величина которой выражается величиной отклонения следа нулевой магнитной индукции от расчётного следа в контролируемом сечении элемента.

Оценка степени значимости дефекта осуществляется путем сравнения зарегистрированного отклонения с нормируемым значением для элемента или с характеристикой эталонного образца.

Для элементов, у которых геометрическая фигура поперечных сечений симметрична относительно только одной оси симметрии, след нулевой линии напряжённости магнитного поля вдоль длины элемента не будет совпадать с расчётным следом плоскости отсчёта. Он будет проходить её параллельно при отсутствии дефектов и механических напряжений, что не является препятствием для обнаружения соответствующих отклонений от расчётного следа.

Длина участка намагничивания объекта дефектоскопии выбирается таким образом, чтобы в зоне работы датчика магнитометра было получено достаточно сильное симметричное магнитное поле, отвечающее чувствительности средств измерения. Разрешающей способностью магнитометра, привлекаемого к дефектоскопии, определяется необходимая степень намагничивания для измерения остаточной напряжённости магнитного поля для данного объекта контроля.

Датчики магнитометров перемещают вдоль боковой поверхности объекта дефектоскопии по расчётным следам отсчёта на образце. Шкала показаний магнитометров может предварительно тарироваться по наличию характерных дефектов в опытных образцах объектов дефектоскопии, в соответствии с отвечающими этим дефектам значениями отклонений следа нулевой магнитной индукции от расчётного следа отсчёта. Относительное перемещение датчика магнитометра и объекта дефектоскопии может быть обеспечено при фиксированном положении того или другого, что определяется условиями осуществления технологического процесса: прежде всего, соотношением габаритных размеров объектов и средств дефектоскопии и условиями обеспечения относительного перемещения. Способ был проверен на стальных образцах, не подвергнутых обработке, изменяющей однородность доменных структур по объёму образца, в том числе, и с искусственным дефектом.

Стальной пруток марки 40ХН с диаметром сечения 70 мм и длиной 1500 мм был намагничён поперечным магнитным полем вдоль вертикальной оси сечения

Под понятием «неоднородность» подразумевается наличие разрывов (пустот, раковин) в сплошности структуры однородного по химическому составу и физическим свойствам изделия. К «неоднородностям» такого рода могут быть отнесены зоны сечений в изделии, в которых в процессе эксплуатации возникают напряжения сжатия, растяжения, сдвига, являющиеся предпосылкой разрушения изделия при превышении допустимых значений этих напряжений или вследствие усталости материала [11].

Рассмотренный выше способ [112] в основном регистрирует факт состоявшегося разрушения, не регистрирует процесс роста местных напряжений в сечениях изделия и накоплении местной усталости материала, поэтому для комплексного решения задачи были разработаны три новых способа, позволяющие устранить этот недостаток [110; 113; 114; 115; 119–122]: «Способ магнитной дефектоскопии изделий в напряжённом состоянии», «Способ обнаружения изгибных напряжений» и «Способ оценки запаса прочности изделий в процессе эксплуатации».

Способы [113–115] разработаны с учетом результатов, полученных в главе 2 на основе взаимозависимости напряженного состояния и сопутствующих его появлению изменениях магнитных свойств объекта контроля.

Способы, кроме задачи обнаружения дефектов, решают задачу определения зон возникновения и роста местных напряжений (растяжения, сжатия, сдвига), опасных разрушением, в том числе от накопления усталости материала, в сечениях ферромагнитных изделий, находящихся под действием постоянной или переменной нагрузки.

Рассмотрим элементы, у которых отсутствуют дефекты и структурные изменения в материале на контролируемом участке.

Предварительно намагничивается контролируемый участок элемента с образованием симметричной картины магнитного поля относительно осей геометрической фигуры поперечного сечения элемента. Затем, измеряется магнитная индукция (нормальная составляющая) в характерных попарно симметричных точках поперечного сечения на поверхности элемента, и по полученным значениям

магнитной индукции оцениваются местные напряжения в зонах поперечного сечения.

При отсутствии местных напряжений в материале контролируемого сечения внешнее магнитное поле будет симметричным относительно осей геометрической фигуры поперечного сечения элемента, поэтому значения магнитной индукции в характерных попарно симметричных точках сечения на поверхности элемента будут равными по величине.

Например, для сечения рельса Рисунка 2.9 разность магнитной индукции в характерных точках сечения определится по выражениям:

$$\Delta B_{\Gamma} = B_{\Gamma 1} - B_{\Gamma 2}, \quad (3.1)$$

$$\Delta B_{\Pi} = B_{\Pi 1} - B_{\Pi 2}, \quad (3.2)$$

$$\Delta B_{\Pi} = B_{\Pi 1} - B_{\Pi 2}. \quad (3.3)$$

При отсутствии дефектов, структурных изменений и механических напряжений в сечении разность магнитной индукции в соответствующих характерных точках будет равна нулю. В случае положительного эффекта Виллари для картины магнитного поля Рисунка 2.6 при горизонтальном изгибе рельса (правая часть от оси симметрии сжимается, левая – растягивается) получим соотношения для величин магнитной индукции и их разностей согласно (3.1)–(3.3):

$$B_{\Gamma 1} > B_{\Gamma 2}; B_{\Pi 1} > B_{\Pi 2}; B_{\Pi 1} > B_{\Pi 2}; \quad (3.4)$$

$$\Delta B_{\Gamma} > 0; \Delta B_{\Pi} > 0; \Delta B_{\Pi} > 0. \quad (3.5)$$

При изменении направления изгиба рельса по отношению к предыдущему направлению изгиба, знаки неравенства в соотношениях (3.4) и (3.5) изменятся на прямо противоположные.

Таким образом, из соотношений (3.1)–(3.2) вытекает, что значение разности магнитной индукции в характерных попарно симметричных точках и её знак будут характеризовать локальные напряжения по величине и направлению в материале сечения в районах головки, шейки и подошвы рельса.

По разности значений магнитной индукции в характерных точках можно определить наличие и оценить характер напряженного состояния в зонах контролируемых сечений.

Сравнение этих значений с данными по эталонным образцам дает возможность судить об опасности превышения допустимых напряжений и о нарастании усталостных процессов в материале объекта контроля.

В этом случае, прочностная характеристика (коэффициент запаса прочности) становится взаимозаменяемой с характеристикой, рассчитанной как отношение между нормируемой (эталонной для данного объекта) величиной разности магнитной индукции в характерных точках, попарно симметричных относительно оси симметрии поперечного сечения контролируемого объекта, и измеренным значением этой величины для напряженного состояния объекта.

Информация о проявлениях напряженного состояния изделий может накапливаться для создания базы данных, служащей для прогнозирования развития усталостных процессов в материале изделия в ходе эксплуатации.

Выбор характерных точек зависит от геометрии сечения элемента, от опыта эксплуатации объекта контроля и от доступности установки датчиков на элементах.

Способы реализуются по тому же алгоритму, что был рассмотрен в параграфе 3.1.

Датчики магнитометров устанавливаются в характерных точках сечения элемента на контролируемом участке, измеряются значения магнитной индукции в выбранных для контроля попарно симметричных точках поперечного сечения на границах объекта контроля и передаются на дальнейшую обработку данных.

Технический результат реализации способов заключается в возможности обеспечения оперативного выявления и оценки дефектов, структурных изменений и механических напряжений в материале конструкций, с помощью стационарных и мобильных технических средств.

При этом опасные значения напряжений, возникающих в процессе эксплуатации, могут быть определены непосредственно в момент их проявления.

3.3. Способ магнитного контроля и оценки изгибных напряжений на примере плоского изгиба балки при приложении изгибающей силы по центру балки

Рассмотрим вывод теоретических обоснований и разработку способа оценки изгибных напряжений в элементах конструкций на примере двух схем испытания балки с прямоугольным поперечным сечением на изгиб [103; 111; 117].

Рассмотрим испытание балки с прямоугольным сечением, к которой приложена изгибающая сила F по центру балки, Рисунок 3.3.

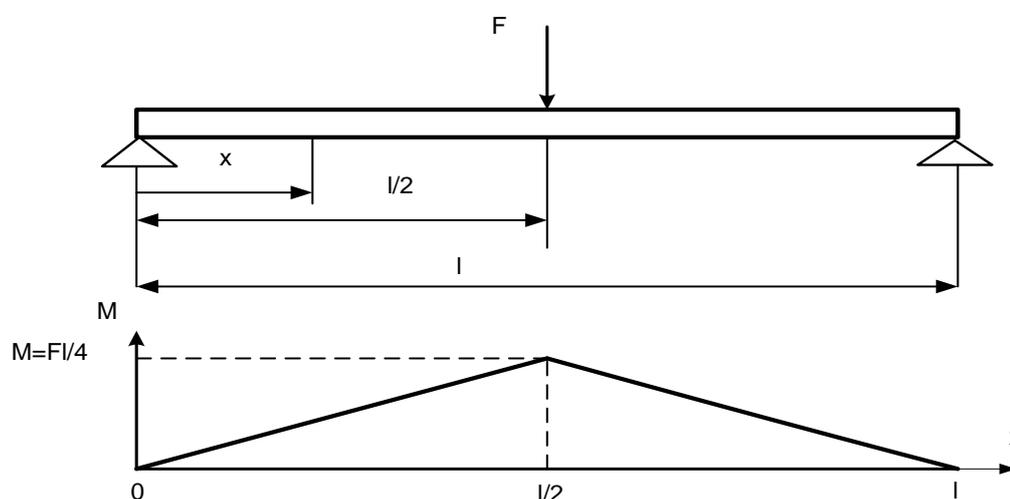


Рисунок 3.3 – Схема испытания балки с эпюрой изгибающего момента

На Рисунке 3.3 под схемой балки показана эпюра изгибающего момента M . На Рисунке 3.4 показано сечение балки с осями координат и обозначениями размеров. Запишем формулу определения нормального напряжения при чистом изгибе балки в любой точке её сечения [103]:

$$\sigma = \frac{My}{J_z}, \quad (3.6)$$

где σ – нормальное напряжение;

M – изгибающий момент;

y – расстояние от центра балки по оси Y ;

момент инерции сечения по оси Z

$$J_z = \frac{bh^3}{12}, \quad (3.7)$$

где b и h – размеры поперечного сечения балки, Рисунок 3.4.

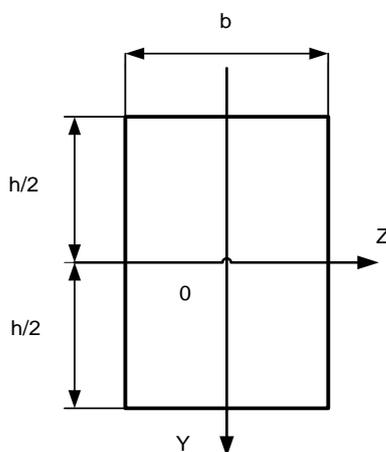


Рисунок 3.4 – Размеры поперечного сечения балки

Максимальное напряжение σ_m будет в верхних слоях сечения балки при значении координаты $y = \frac{h}{2}$.

С учётом подстановки $y = \frac{h}{2}$ формула (3.6) переписывается:

$$\sigma_m = \frac{Mh}{2J_z}. \quad (3.8)$$

Подстановка выражения (3.7) в формулу (3.8) позволяет получить формулу удобную для дальнейших выкладок:

$$\sigma_m = \frac{6}{bh^2} M. \quad (3.9)$$

Формула (3.9) отражает зависимость максимального напряжения σ_m на поверхности сечения балки от изгибающего момента M при заданных геометрических размерах сечения. На Рисунке 3.5 показана эпюра распределения напряжения в сечении балки Рисунка 3.3, а также указаны максимальные по абсолютной величине напряжения σ_m . Верхние слои от центрального нейтрального слоя сечения сжимаются $\sigma < 0$, а нижние – растягиваются $\sigma > 0$. Найдём аналитическую зависимость максимального напряжения σ_m от внешней изгибающей силы F , приложенной на половине длины балки, Рисунок 3.3.

В соответствии со схемой приложения силы (Рисунок 3.3) для изгибающего момента $M(x)$ можно записать выражение его изменения по продольной оси балки X , начиная от левого конца балки до её центра:

$$M(x) = \frac{2M_m}{l} x = \frac{F}{2} x, \quad (3.10)$$

где $M_m = \frac{F}{2} * \frac{l}{2} = \frac{Fl}{4}$ – максимальный момент на половине длины балки при $x = \frac{l}{2}$;

F – изгибающая сила;

l – длина балки.

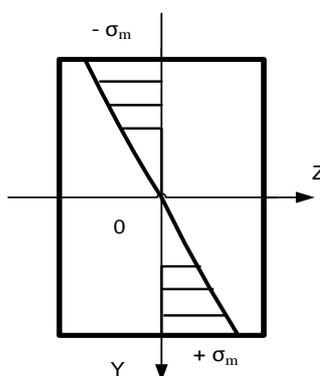


Рисунок 3.5 – Эпюра напряжения в сечении балки при изгибе

При $x > \frac{l}{2}$ эпюра момента будет симметричной относительно центральной оси приложения силы, поэтому для второй половины балки уравнение не записано. Подставим выражение (3.10) в (3.9). Тогда, зависимость максимального напряжения в сечении на первой половине длины балки от внешней изгибающей силы может быть представлена в виде формулы:

$$\sigma_m(x) = \frac{3F}{bh^2} x = \frac{2\sigma_m^*}{l} x, \quad (3.11)$$

где наибольшее максимальное напряжение в поверхностных слоях балки будет на середине её длины и определяется по формуле:

$$\sigma_m^* = \frac{3l}{2bh^2} F. \quad (3.12)$$

Определив значение σ_m^* по формуле (3.12), можно по зависимости (3.11) найти максимальное напряжение для первой и второй половинам балки.

При этом, для второй половины балки эта зависимость будет симметричной зависимости первой половине балки относительно вертикальной оси приложения силы.

Найдём зависимость максимального напряжения σ_m в сечениях балки от разности магнитной индукции в характерных точках в этих же сечениях балки.

Определим зависимость изгибающей силы F от разности абсолютных значений магнитной индукции ΔB_{BH} в характерных точках сечений балки по всей её длине, Рисунок 3.3 и Рисунок 3.6:

$$\Delta B_{BH} = |B_V| - |B_H|, \quad (3.13)$$

где B_V – магнитная индукция в характерных точках сечений в верхнем слое балки;

B_H – магнитная индукция в характерных точках сечений в нижнем слое балки.

Проведём виртуальный эксперимент при ряде фиксированных значений изгибающей силы, начиная с нулевого значения, в диапазоне упругих свойств балки при условии, что ферромагнитный материал балки однородный по своему составу (без дефектов). Разобьём балку по длине на N сечений, равноотстоящих друг от друга. Каждый раз при изменении величины изгибающей силы, будем создавать симметричное магнитное поле с образованием двух магнитных полюсов на вертикальной оси Y сечения по всей длине балки, и последовательно измерять значения остаточной магнитной индукции в характерных точках на поверхности балки в $n = 1, 2, \dots, N$ сечениях, Рисунок 3.6.

Рассмотрим несколько начальных состояний, в которых может находиться балка до изгиба:

- 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.

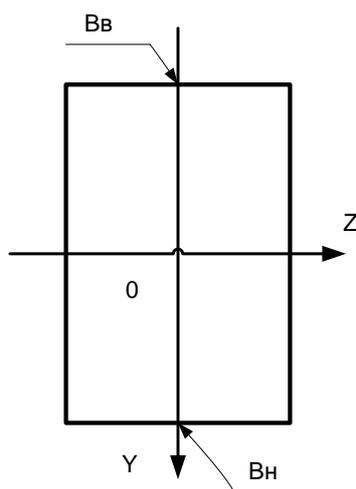


Рисунок 3.6 – Характерные точки для измерения магнитной индукции

Для всех вариантов будем считать, что в начальном состоянии балка практически не намагничена, т.е. остаточная магнитная индукция в какой либо точке балки пренебрежимо мала по сравнению с прилагаемым внешним намагничивающим полем, создающим симметричное внешнее магнитное поле относительно геометрической фигуры поперечного сечения балки.

Разберём первый вариант. При отсутствии внешней изгибающей силы и внутреннего напряжения в материале балки магнитные свойства материала будут одинаковыми по всему телу балки, т.е. магнитная проницаемость материала остаётся неизменной во всех N сечениях балки.

В силу симметрии картины магнитного поля для выбранных характерных точек рис. 3.6 магнитная индукция по абсолютной величине на поверхности верхних и нижних слоёв для каждого сечения будет одинаковой $|B_{\text{в}}| = |B_{\text{н}}|$.

Тогда, в соответствии с выражением (3.13), для нулевой внешней изгибающей силы $F = 0$ можно записать:

$$\Delta B_{\text{вн}}(0) = 0, \quad (3.14)$$

где $\Delta B_{\text{вн}}(0)$ – разность абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках при отсутствии внешней изгибающей силы.

Проделаем описанную выше процедуру для ряда возрастающих значений внешней изгибающей силы $F_1 < F_2 < F_3$.

При плоском изгибе балки во всех N сечениях по длине балки максимальное напряжение по абсолютной величине σ_m будет возрастающим по мере увеличения приложенной силы $\sigma_{m1} < \sigma_{m2} < \sigma_{m3}$.

Так как верхние слои балки сжимаются, а нижние - растягиваются, то магнитная проницаемость верхних слоёв будет отличной от магнитной проницаемости нижних слоёв для каждого сечения по всей длине балки. В то время как, магнитная проницаемость нейтрального слоя балки остаётся прежней в соответствии с напряжением равном нулю $\sigma = 0$.

Отсюда следует, что для верхних и нижних слоёв балки при положительном эффекте Виллари для каждого её сечения можно записать, глава 2:

$$\mu_B = \mu_{НС} - \Delta\mu_m, \quad (3.15)$$

$$\mu_H = \mu_{НС} + \Delta\mu_m, \quad (3.16)$$

где μ_B и μ_H – магнитные проницаемости верхнего и нижнего слоёв балки, соответственно;

$\mu_{НС}$ – магнитная проницаемость материала балки при отсутствии внешней изгибающей силы $F = 0$ (равна магнитной проницаемости нейтрального слоя балки не подверженного напряжению при изгибе);

$\Delta\mu_m$ – максимальное приращение магнитной проницаемости в поверхностных слоях балки при приложении внешней изгибающей силы, Рисунок 3.7.

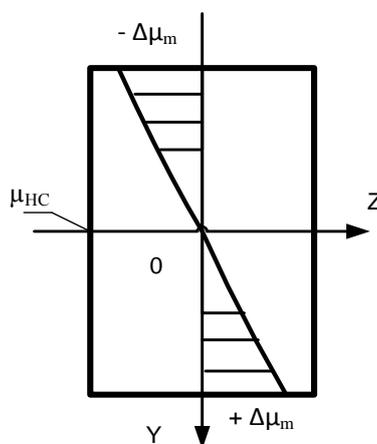


Рисунок 3.7 – Эпюра приращения магнитной проницаемости $\Delta\mu$ в поперечном сечении при плоском изгибе балки

Из соотношений (3.15) и (3.16) следует, что согласно эффекту Виллари приращение магнитной проницаемости соответствует приращению внутреннего напряжения, Рисунок 3.5 и Рисунок 3.7, глава 2.

В общем случае, максимальное приращение магнитной проницаемости для каждого сечения балки $\Delta\mu_m$ будет разным по величине, в соответствии с эпюрой изгибающего момента, Рисунок 3.3. Соответственно, будет изменяться эпюра приращений магнитной проницаемости внутри поперечных сечений, Рисунок 3.7.

Тогда, разность магнитных проницаемостей в характерных точках каждого сечения на поверхности балки будет равна:

$$\Delta\mu_{BH} = \mu_B - \mu_H = -2\Delta\mu_m, \quad (3.17)$$

где знак « \leftrightarrow » показывает направление изгиба;

$\Delta\mu_m$ – пропорционально σ_m .

При одном и том же симметричном внешнем намагничивающем поле балки получим пропорциональную зависимость между магнитной индукцией (нормальной составляющей) и магнитной проницаемостью на поверхности балки, см. соотношение (2.10).

Запишем выражение для магнитной индукции в характерных попарно симметричных точках поперечного сечения балки Рисунка 3.6, после приложения внешней изгибающей силы при положительном эффекте Виллари.

Для каждого сечения балки справедливы выражения:

$$B_B = B_0 - \Delta B, \quad (3.18)$$

$$B_H = B_0 + \Delta B, \quad (3.19)$$

где B_0 – магнитная индукция в попарно симметричных характерных точках при симметричной картине магнитного поля при отсутствии внутреннего напряжения ($F = 0$);

ΔB – приращение магнитной индукции, вызванное внутренним напряжением в верхних и нижних слоях балки при $F \neq 0$ (нарушающей симметрию картины внешнего магнитного поля сечений балки).

Запишем выражение (3.13) с учётом (3.18) и (3.19):

$$\Delta B_{BH} = -2\Delta B. \quad (3.20)$$

Из выражения (3.20) следует, что измеряя в каждом сечении балки магнитную индукцию (нормальную составляющую) в характерных точках и вычисляя ΔB_{BH} , можно оценить для каждого сечения балки максимальное приращение магнитной проницаемости $\Delta \mu_m$ и максимальное напряжение σ_m .

Для центрального сечения балки ($x = \frac{l}{2}$) построим экспериментальную зависимость внешней изгибающей силы от модуля разности абсолютных значений магнитной индукции ΔB_{BH}^* в характерных точках центрального сечения балки $F(\Delta B_{BH}^*)$. В силу магнитных свойств ферромагнитного материала балки, точного аналитического выражения зависимость $F(\Delta B_{BH}^*)$ не имеет.

С учётом предполагаемого рабочего диапазона изменения изгибающей силы выберем аппроксимирующую функцию, например, в виде линейной (параграф 2.2), и определим значение её коэффициента:

$$F = K \Delta B_{BH}^*, \quad (3.21)$$

где K – коэффициент пропорциональности, учитывающий магнитоупругие свойства балки при изгибе.

Найдём зависимость максимального напряжения от разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках центрального сечения балки. Подставим выражение (3.21) в (3.12), тогда получим зависимость, позволяющую находить по модулю разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках центрального сечения балки, максимальное напряжение для центрального сечения:

$$\sigma_m^* = \frac{3l}{2bh^2} K \Delta B_{BH}^* = k \Delta B_{BH}^*, \quad (3.22)$$

где $k = \frac{3l}{2bh^2} K$ – коэффициент пропорциональности, характеризующий геометрические ($\frac{3l}{2bh^2}$) и магнитоупругие (K) свойства балки при изгибе.

После определения наибольшего максимального напряжения, по выражению (3.22) для центрального сечения балки, найдём, согласно (3.11), распределение максимального напряжения по длине балки:

$$\sigma_m(x) = \frac{2\sigma_m^*}{l} x. \quad (3.23)$$

Определим зависимость распределения максимального напряжения от разности абсолютных значений магнитной индукции по длине балки, используя соотношения (3.10)–(3.13), (3.21), а также (3.22) и (3.23).

Подставим выражение (3.22) в зависимость (3.23) и проведём простые выкладки:

$$\sigma_m(x) = \frac{2k}{1} \Delta B_{BH}^* x = k \Delta B_{BH}(x), \quad (3.24)$$

$$\Delta B_{BH}(x) = \frac{2}{1} \Delta B_{BH}^* x, \quad (3.25)$$

где $\Delta B_{BH}(x)$ – линейная зависимость распределения разности абсолютных значений магнитной индукции по длине балки от координаты x .

Из выражений (3.24) и (3.25) следует, что между распределениями напряжения $\sigma_m(x)$ и разностью абсолютных значений магнитной индукции в выбранных характерных точках $\Delta B_{BH}(x)$ существует пропорциональная зависимость. Коэффициент пропорциональности, согласно (3.22) и (3.24), имеет место для любого сечения балки по всей её длине:

$$k = \frac{3l}{2bh^2} K. \quad (3.26)$$

Это обстоятельство даёт возможность на практике получить картину распределения максимального напряжения по длине балки $\sigma_m(x)$ по измеренным значениям магнитной индукции для выбранных характерных точек сечений (3.24).

Рассмотрим второй вариант, когда балка в начальном состоянии нагружена внешней изгибающей силой не равной нулю $F_0 \neq 0$. Оставим место приложения силы прежним, как и в первом варианте, значение величины F_0 априори неизвестно. Определим распределение начального максимального напряжения по длине балки по измеренным разностям магнитной индукции в характерных точках центрального сечения балки, а также распределение максимального напряжения по длине балки после её дальнейшего изгиба.

Как и в предыдущем варианте, построим экспериментальную зависимость $F(\Delta B_{BH}^*)$ для центрального сечения балки ($x = \frac{l}{2}$), где ΔB_{BH}^* – разность абсолютных значений индукции в характерных точках центрального сечения балки, при при-

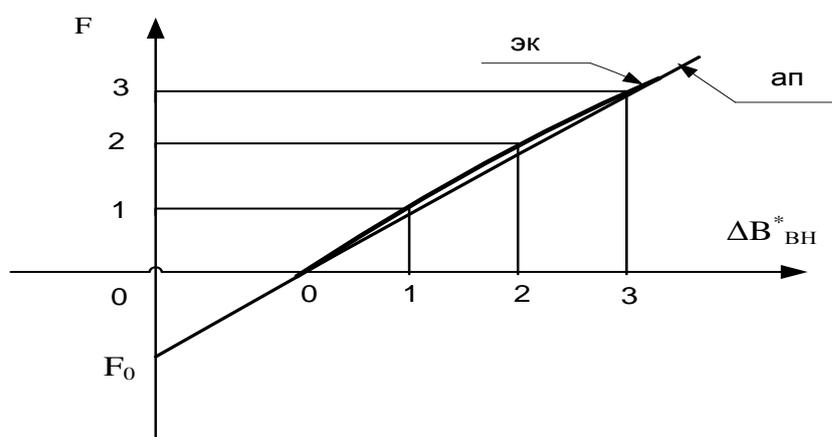
ложении в том же направлении, что и F_0 , ряд пробных внешних сил $F = 0, F_1, F_2, F_3$. Построим график полученной экспериментальной зависимости $F(\Delta B_{ВН}^*)$, начиная с начальной точки $F = 0$ и $\Delta B_{ВН}^*(0) \neq 0$, Рисунок 3.8.

Аппроксимируем экспериментальную кривую линейной функцией вида (на Рисунке 3.8 экспериментальная кривая обозначена как «эк», аппроксимирующая прямая обозначена как «ап»):

$$F = F_0 + K\Delta B_{ВН}^*, \quad (3.27)$$

где F_0 – точка пересечения графика аппроксимирующей функции с осью ординат;

значение коэффициента K имеет тот же смысл что и в выражении (3.21).



«эк» – экспериментальная кривая; «ап» – аппроксимирующая прямая; F_0 – точка пересечения продолжения графика аппроксимирующей функции с осью ординат

Рисунок 3.8 - График зависимости $F(\Delta B_{ВН}^*)$

Изгибающую силу F_0 , отвечающую за начальное напряжённое состояние балки, определим из выражения (3.27) при отсутствии внешней изгибающей силы $F = 0$:

$$F_0 = -K\Delta B_{ВН}^*, \quad (3.28)$$

где знак «-» указывает направление приложения внешней силы F_0 , которая при приложении сделает разность абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках центрального сечения балки равной нулю $\Delta B_{ВН}^*(0) = 0$.

Найдём начальное максимальное напряжение в центральном сечении балки по выражению (3.22) с учётом (3.28) (без учёта знака):

$$\sigma_m^*(0) = \frac{3l}{2bh^2} K \Delta B_{ВН}^*(0) = k \Delta B_{ВН}^*(0). \quad (3.29)$$

Тогда, распределение начального максимального напряжения по длине балки найдём из выражения (3.23) с учётом (3.29):

$$\sigma_m(x) = \frac{2\sigma_m^*(0)}{l} x. \quad (3.30)$$

При этом распределению максимального напряжения $\sigma_m(x)$ по длине балки будет соответствовать распределение разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках, согласно (3.25):

$$\Delta B_{ВН}(x) = \frac{2}{l} \Delta B_{ВН}^*(0)x. \quad (3.31)$$

Дальнейшее приложение внешней изгибающей силы изменит распределение напряжения в балке. Результирующую изгибающую силу, согласно (3.27), можно представить:

$$F^* = F - F_0 = K \Delta B_{ВН}^*, \quad (3.32)$$

где F^* – результирующая изгибающая сила;

$\Delta B_{ВН}^*$ – разность абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках центрального сечения, изменяется от начального значения не равного нулю $\Delta B_{ВН}^*(0) \neq 0$ до нового значения, по которому определяется результирующая сила.

Найдём выражение распределения максимального напряжения по длине балки с учётом начального напряжения. Подставим (3.32) в (3.12), тогда получим аналогичное (3.22) и (3.23) выражение:

$$\sigma_m(x) = \frac{2\sigma_m^*}{l} x, \quad (3.33)$$

где максимальное напряжение в центральном сечении определится по выражению

$$\sigma_m^* = \frac{3l}{2bh^2} K \Delta B_{ВН}^* = k \Delta B_{ВН}^*.$$

Зависимость (3.33) позволяет по измеренной разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках центрального сечения балки $\Delta B_{ВН}^*$

определить распределение максимального напряжения по длине балки при любой внешней изгибающей силе в пределах упругих свойств балки.

Рассмотрим третий вариант, когда в исходном состоянии в балке присутствует остаточное напряжение $\sigma \neq 0$, при этом его распределение по длине балки может быть неравномерным. Найдём и оценим остаточное напряжение в балке, которое могло возникнуть в результате каких-либо предшествующих испытанию технологических операций. При отсутствии внешней изгибающей силы $F = 0$ создадим, как и в предыдущем случае, симметричное относительно осей Y и Z магнитное поле по всей длине балки. Измерим в N сечениях балки магнитную индукцию в характерных точках, по выражению (3.13) найдём разность абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках сечений балки и построим график распределения $\Delta B_{BH}[n]$ по длине балки, где $n=1, \dots, N$. Отклонение графика $\Delta B_{BH}[n]$ от нуля в положительную или отрицательную сторону даёт информацию о наличии остаточного напряжения в сечениях балки, а также о сжатии или растяжении в соответствующих сечениях. Для принятых ранее условий при выполнении неравенства $\Delta B_{BH}[n] < 0$ направление изгиба балки вниз, а при $\Delta B_{BH}[n] > 0$ – вверх, для любого n -го сечения.

Оценим среднее остаточное максимальное напряжение в балке $\sigma_m(0)$ по её длине при отсутствии нагрузки. Найдём среднее значение разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках по длине балки по формуле [109]:

$$\Delta B_{BH}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Delta B_{BH}[n], \quad (3.34)$$

где N – число сечений.

Рассмотрим вариант, когда аппроксимирующая функция (3.27) для рассматриваемой балки получена априори, например, для самой балки или её аналога (эталона). Тогда, используя выражение (3.29), найдём среднее максимальное значение напряжения $\sigma_m(0)$ соответствующее начальной эквивалентной изгибающей силе $F_0 \neq 0$ с учётом (3.34) по выражению:

$$\sigma_m(0) = \frac{3l}{2bh^2} K \Delta B_{BH}(0) = k \Delta B_{BH}(0). \quad (3.35)$$

В общем случае, для оценки максимального напряжения по длине балки необходимо построить экспериментальную зависимость $F(\Delta B_{ВН}^*)$ внешней изгибающей силы F от разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках для центрального сечения балки $\Delta B_{ВН}^*$, найти магнитоупругий коэффициент K выражения (3.27), Рисунок 3.7. Тогда, принимая постоянным значение коэффициента k для всей балки и измеряя магнитную индукцию в характерных точках сечений, можно найти распределение максимального напряжения по сечениям балки

$$\sigma_m[n] = \frac{3l}{2bh^2} K \Delta B_{ВН}[n] = k \Delta B_{ВН}[n], \quad (3.36)$$

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

$\Delta B_{ВН}[n]$ – модуль разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках n -ого сечения;

$k = \frac{3l}{2bh^2} K$ – коэффициент пропорциональности;

K – магнитоупругий коэффициент.

3.4. Способ магнитного контроля и оценки изгибных напряжений на примере плоского изгиба балки при приложении изгибающей силы в двух местах балки

Рассмотрим общий случай экспериментального испытания балки с прямоугольным сечением (Рисунок 3.4) при приложении к балке внешней изгибающей силы в двух местах $F = F/2 + F/2$, Рисунок 3.9. На Рисунке 3.9 под схемой балки показана эпюра изгибающего момента M . В зоне чистого изгиба между местами приложения силы на отрезке $d = l - 2a$, Рисунок 3.9, изгибающий момент будет максимальным:

$$M_m = \frac{aF}{2} \text{ при } a \leq x \leq (l - a), \quad (3.37)$$

где a – расстояние от опоры до места приложения силы;

l – длина балки.

Максимальное напряжение на участке чистого изгиба d , согласно (3.9) и

(3.37), можно определить из выражения [107]:

$$\sigma_m^* = \frac{6}{bh^2} M_m = \frac{3a}{bh^2} F \quad \text{при } a \leq x \leq (a+d). \quad (3.38)$$

Слева и справа от участка чистого изгиба изгибающий момент будет изменяться по линейному закону:

$$M(x) = \frac{M_m}{a} x = \frac{F}{2} x \quad \text{при } 0 \leq x \leq a, \quad (3.39)$$

$$M(x) = \frac{M_m}{a} (1 - x) = \frac{F}{2} (1 - x) \quad \text{при } (1 - a) \leq x \leq 1. \quad (3.40)$$

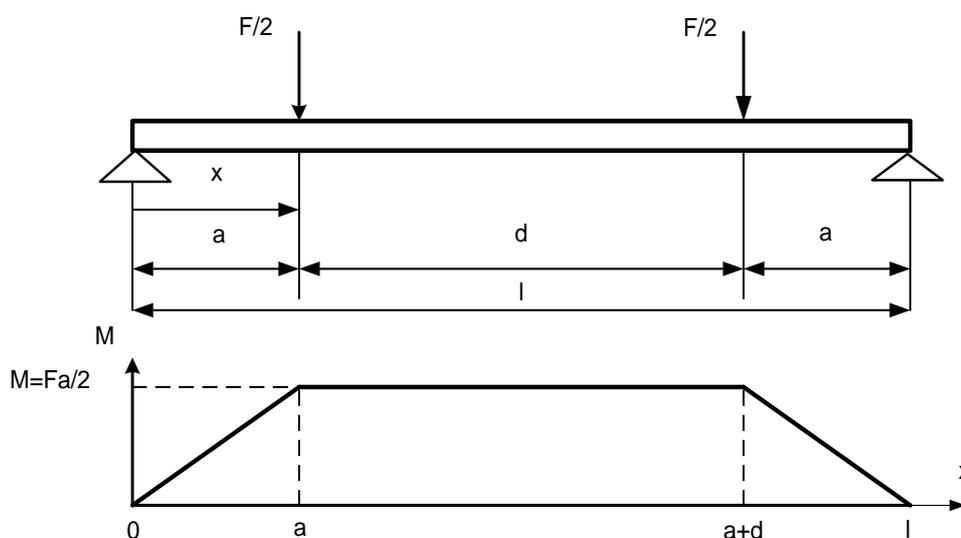


Рисунок 3.9 – Схема испытания балки с эпюрой изгибающего момента

Максимальное напряжение $\sigma_m(x)$ слева и справа от участка чистого изгиба, с учётом (3.9) будет изменяться по линейному закону с учётом выражений для изгибающего момента (3.39) и (3.40):

$$\sigma_m(x) = \frac{3F}{bh^2} x = \frac{\sigma_m^*}{a} x \quad \text{при } 0 \leq x \leq a, \quad (3.41)$$

$$\sigma_m(x) = \frac{3F}{bh^2} (1 - x) = \frac{\sigma_m^*}{a} (1 - x) \quad \text{при } (1 - a) \leq x \leq 1, \quad (3.42)$$

где σ_m^* - максимальное напряжение на участке чистого изгиба определяется по выражению (3.38).

Рассмотрим три варианта начальных условий, как в предыдущем испытании балки:

1 – в балке отсутствует внутреннее остаточное напряжение $\sigma = 0$;

2 – балка в начальном состоянии нагружена внешней изгибающей силой не равной нулю $F_0 \neq 0$, в тех же точках приложения силы;

3 – общий случай, присутствует остаточное напряжение $\sigma \neq 0$, распределение которого по длине балки может быть неравномерным.

При получении зависимостей максимального напряжения в поверхностных слоях балки от разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках сечений балки будем опираться на полученные в предыдущем разделе 3.3 выкладки. Проведём виртуальный эксперимент по тому же алгоритму.

Первый вариант. В балке отсутствует внутреннее остаточное напряжение.

Так как, максимальный изгибающий момент остаётся постоянным на участке чистого изгиба, то экспериментальную зависимость изгибающей силы от разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках $F(\Delta B_{BH}^*)$ можно построить для любого сечения чистого изгиба балки.

Например, измерить магнитную индукцию в характерных точках центрального сечения, затем воспользоваться аппроксимирующей функцией (3.21) для всего участка чистого изгиба и всей балки, или построить зависимость $F(\Delta B_{BH}^*)$ по средним значениям разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках, полученной для всех сечений участка чистого изгиба балки.

Вариант получения усреднённого значения магнитоупругого коэффициента K будет более предпочтителен. В дальнейшем будем использовать аппроксимирующую функцию (3.21) для всей длины балки.

Тогда, для участка чистого изгиба максимальное напряжение будет постоянным по величине, и определяться по выражению (3.22) при $a \leq x \leq (1 - a)$, а для участков слева и справа от участка чистого изгиба будет изменяться с учётом выражений (3.23)–(3.25) и (3.41), (3.42):

$$\sigma_m^* = \frac{6}{bh^2} M_m = \frac{3a}{bh^2} F = \frac{3a}{bh^2} K \Delta B_{BH}^* = k \Delta B_{BH}^* \text{ при } a \leq x \leq (a + d), \quad (3.43)$$

$$\sigma_m(x) = \frac{\sigma_m^*}{a} x = \frac{k}{a} \Delta B_{BH}^* x = k \Delta B_{BH}^*(x) \text{ при } 0 \leq x \leq a, \quad (3.44)$$

где распределение разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках сечений по длине балки на указанном отрезке

$$\Delta B_{BH}(x) = \frac{1}{a} \Delta B_{BH}^* x; \quad (3.45)$$

$$\sigma_m(x) = \frac{\sigma_m^*}{a} (1 - x) = \frac{k}{a} \Delta B_{BH}^* (1 - x) = k \Delta B_{BH}(x) \text{ при } (1 - a) \leq x \leq 1, \quad (3.46)$$

где распределение разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках сечений по длине балки на указанном отрезке

$$\Delta B_{BH}(x) = \frac{1}{a} \Delta B_{BH}^* (1 - x). \quad (3.47)$$

В выражениях (3.43), (3.44) и (3.46) коэффициент пропорциональности между максимальным напряжением и разностью абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках на поверхности сечений балки $k = \frac{3a}{bh^2} K$.

Рассмотрим второй вариант, когда балка в начальном состоянии нагружена неизвестной по величине (не равной нулю $F_0 \neq 0$) внешней изгибающей силой, в тех же точках приложения силы, Рисунок 3.9.

Постановка задачи и её решение будут аналогичными рассмотренными выше, поэтому при рассмотрении второго варианта разберём только особенности при использовании полученных выражений (3.38)–(3.47) для определения максимальных напряжений по измеренной магнитной индукции в характерных точках сечений балки.

Построим экспериментальную зависимость $F(\Delta B_{BH}^*)$ по центральному сечению балки или по средним значениям разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках, полученных для всех сечений участка чистого изгиба при $F = 0, F_1, F_2, F_3$, Рисунок 3.7.

Аппроксимируем экспериментальную зависимость $F(\Delta B_{BH}^*)$ линейной функцией (3.27). В дальнейшем будем использовать аппроксимирующую функцию (3.27) для всей длины балки.

Тогда, остаточное максимальное напряжение определится по участкам балки из выражений (3.43)–(3.47) при равенстве $\Delta B_{BH}^* = \Delta B_{BH}^*(0)$.

Рассмотрим третий вариант, когда в балке присутствует остаточное напряжение $\sigma \neq 0$, распределение которого по длине балки может быть неравномерным.

Найдём среднее значение разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках сечения на участке чистого изгиба при отсутствии внешней изгибающей силы $F = 0$ по выражению [109]:

$$\Delta V_{ВН}^*(0) = \frac{1}{N_d} \sum_{n=1}^{N_d} \Delta V_{ВН}[n], \quad (3.48)$$

где N_d – число сечений разбиения отрезка d , Рисунок 3.8.

Если аппроксимирующая функция (3.27) не найдена априори, то она определяется по тому же алгоритму, что и во втором варианте. Строится экспериментальная зависимость $F(\Delta V_{ВН}^*)$ при фиксированных значениях внешней изгибающей силы $F = 0, F_1, F_2, F_3$ и определяется средняя разность $\Delta V_{ВН}^*$ для каждого значения силы F по выражению (3.48), Рисунок 3.8.

Среднее максимальное значение напряжения $\sigma_m(0)$, соответствующее начальной эквивалентной изгибающей силе $F_0 \neq 0$ на участке чистого изгиба, находится по выражению (3.43), а на участках слева и справа от участка чистого изгиба при $\Delta V_{ВН}^* = \Delta V_{ВН}^*(0)$ по зависимостям (3.44) и (3.46).

В рассматриваемом варианте магнитоупругий коэффициент K аппроксимирующей функции (3.27) получен для участка чистого изгиба балки, но т.к. балка изготовлена из однородного материала и имеет неизменное сечение по всей длине, то можно принять значение коэффициента K постоянным для всех сечений балки.

Тогда, максимальное напряжение для любого n -го сечения балки можно оценить, согласно (3.43)–(3.47), по следующей зависимости:

$$\sigma_m[n] = \frac{3a}{bh^2} K \Delta V_{ВН}[n] = k \Delta V_{ВН}[n], \quad (3.49)$$

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

$\Delta V_{ВН}[n]$ – модуль разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках n -ого сечения балки;

K – магнитоупругий коэффициент аппроксимирующей функции (3.27), полученный по усреднённым значениям разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках сечений на участке чистого изгиба балки $\Delta V_{ВН}$;

$k = \frac{3a}{bh^2}K$ – коэффициент пропорциональности между максимальным напряжением и разностью значений модулей магнитной индукции в характерных точках на поверхности сечений участка чистого изгиба балки.

Сравнение методов получения параметров выбранной аппроксимирующей функции для двух способов испытания балки говорит в пользу последнего способа, т.к. в этом методе указанные параметры получаются усреднёнными на участке чистого изгиба балки, а не для одного центрального сечения, как в первом способе испытания балки.

3.5. Магнитный контроль и оценка распределения напряжений внутри поперечных сечений балки

При плоском изгибе балки продольные волокна не давят друг на друга, поэтому одни растягиваются, а другие сжимаются [103]. Нейтральная линия (НЛ) сечения перпендикулярна всем плоскостям сечений балки и проходит через центр тяжести поперечного сечения, Рисунок 3.9. Напряжение в любой точке нейтральной линии будет равно нулю $\sigma = 0$, согласно (3.6) при $y = 0$, Рисунок 3.5.

Введём в рассмотрение нейтральную плоскость (НП), проходящую через центр тяжести фигуры сечения (через нейтральную линию сечения) и координатную ось Z по всей длине балки, Рисунок 3.10.

Тогда, для нейтральной плоскости внутри балки при её плоском изгибе напряжение будет равно нулю $\sigma = 0$, включая следы нейтральной плоскости на боковой поверхности балки (слева и справа от вертикальной оси симметрии Y для каждого сечения по всей её длине), т.е. при координатах $Y = 0$ и $Z = \pm b/2$, Рисунок 3.4.

Условно разобьём балку на продольные плоскости параллельные нейтральной плоскости, тогда в каждой плоскости, включая следы плоскостей на боковых поверхностях балки, будет напряжение сжатия или растяжения определяемое значением координаты по оси Y [103].

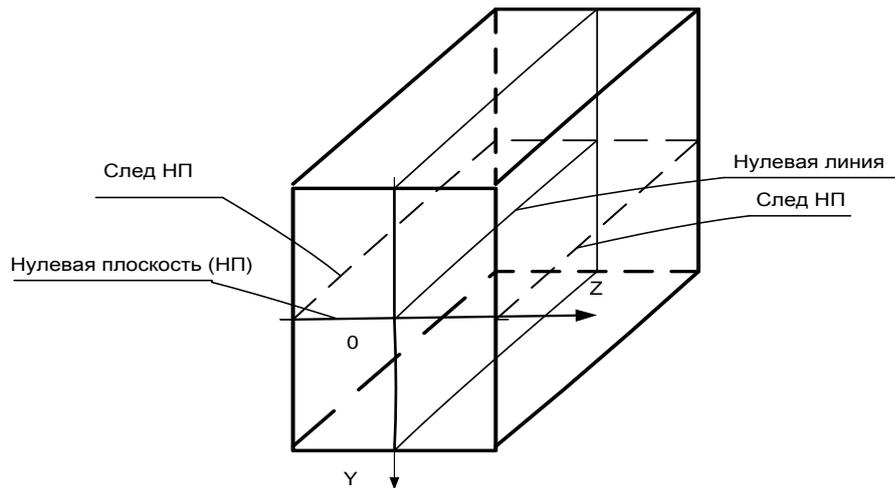


Рисунок 3.10 – Фрагмент балки

При этом напряжение в плоскостях, указанных на Рисунок 3.10, n -ого сечения $\sigma_n(y)$ будет изменяться от нуля до максимального значения $\pm \sigma_m$ при изменении координаты y от 0 до $\pm h/2$, Рисунок 3.5:

$$\sigma_n(y) = \frac{2\sigma_m[n]}{h} y, \quad (3.50)$$

где $\sigma_m[n]$ – максимальное напряжение в n -ом сечении балки определяется через разность абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках сечения $\Delta B_{ВН}[n]$ в рассмотренных вариантах по выражениям: (3.24), (3.33), (3.35), (3.36), (3.43), (3.44), (3.46) и (3.49).

Рассмотрим распределение индукции магнитного поля созданного симметричным относительно осей Y и Z .

Балка намагничена таким образом, чтобы на участке контроля по оси Y находились два магнитных полюса в каждом поперечном сечении балки (на верхнем и нижнем слое).

Выберем попарно симметричные характерные точки, совпадающие с введёнными ранее плоскостями Рисунка 3.11, и лежащими на соответствующих следах этих плоскостей на поверхности балки, Рисунок 3.12. После поперечного намагничивания балки, её верхняя половина сечений будет иметь, например, отрицательное значение магнитной индукции в характерных точках, а нижняя половина сечений – положительное.

Будем считать, что остаточное напряжение по длине балки отсутствует, тогда магнитная проницаемость материала балки будет постоянной.

Для однородного материала балки магнитная индукция следа нулевой плоскости Рисунок 3.10 и Рисунок 3.11 сечений балки будет равна нулю $B_7 = B_8 = 0$ при отсутствии внешней изгибающей силы.

Тогда, для каждого следа плоскости (слоя) справедливы соотношения для значений магнитной индукции в характерных точках попарно симметричных относительно оси Y , Рисунок 3.11 и Рисунок 3.12:

$$B_1 = B_2, B_3 = B_4, B_5 = B_6, B_7 = B_8, B_9 = B_{10}, B_{11} = B_{12}, B_{14} = B_{15}. \quad (3.51)$$

Отметим, что для симметричного магнитного поля соотношения (3.51) могут быть дополнены соотношениями устанавливающими равенство модулей магнитной индукции в характерных точках симметричных относительно оси Z .

Отклонение измеренных и построенных следов магнитных плоскостей на поверхности балки от геометрических следов виртуальных плоскостей будет говорить о наличии дефектов или о наличии внутренних напряжений в сечениях на контролируемом участке балки.

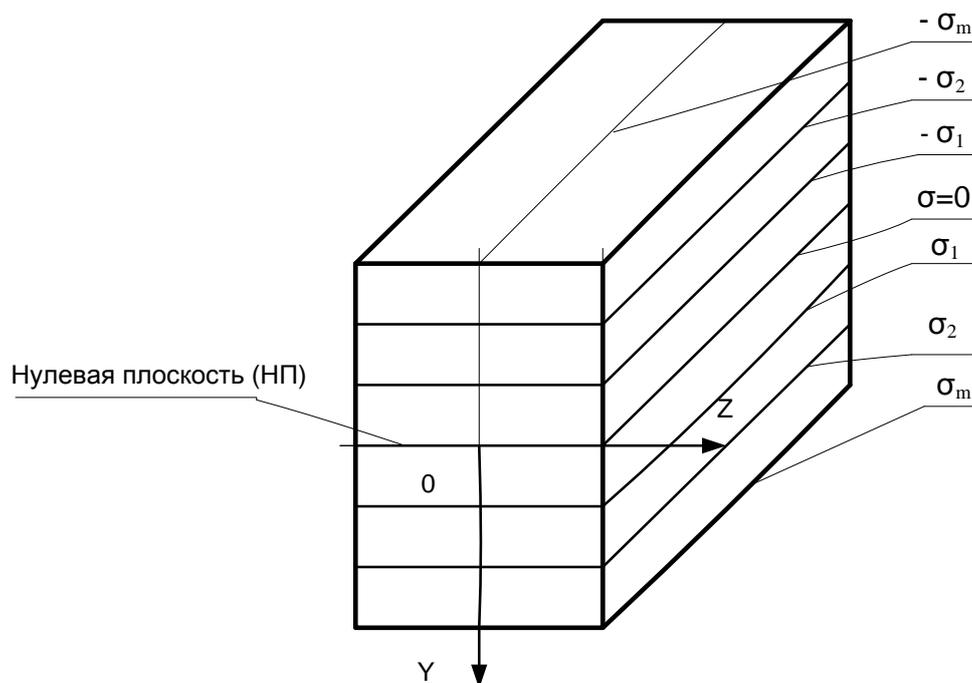
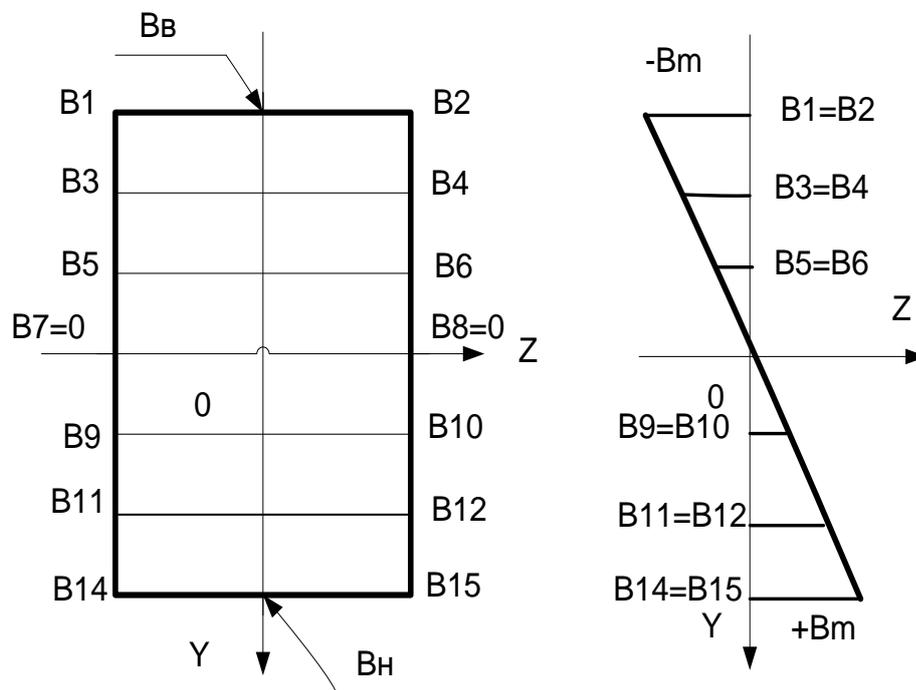


Рисунок 3.11 – Распределение напряжения при плоском изгибе балки

Например, по отклонению следа нулевого значения магнитной индукции от следа нулевой плоскости можно определить место дефекта или локальных внутренних напряжений в поперечных сечениях балки.

Приложение внешней изгибающей силы приведёт к тому, что внутренние слои балки деформируются, и напряжения плоскостей (слоёв), включая их следы на поверхности балки, примут значения отличные от нулевых (первоначальных) значений, Рисунок 3.11. При этом значение напряжения в каждой плоскости (слое) будет определяться по выражению (3.50).

После повторного намагничивания балки в целях создания поперечного магнитного поля симметричного относительно геометрической фигуры сечения (два магнитных полюса на оси Y), путём измерения магнитной индукции в соответствующих характерных точках можно определить следы выбранных плоскостей, Рисунок 3.12.



а) – характерные точки б) – распределение магнитной индукции

Рисунок 3.12 – Распределение магнитной индукции в характерных точках на поверхности сечения балки при симметричной картине магнитного поля

При этом следы магнитной индукции в характерных точках по длине балки с обеих сторон, имеющей какое-либо одно постоянное значение, будут определять след слоя материала балки, обладающего соответствующим постоянным напряжением.

При однородном материале балки следы плоскостей (слоёв) в каждом сечении при плоском изгибе будут параллельны друг другу на каждой боковой поверхности балки, в силу закона распределения напряжения в каждом сечении, см. выражения (3.6) и (3.50).

Для профилей, фигура сечения которых симметрична относительно вертикальной и горизонтальной осей симметрии, нейтральная линия и нейтральная плоскость проходят через центры тяжести сечений, поэтому при плоском изгибе эпюра распределения напряжения по сечению имеет такой же вид, как для балки Рисунка 3.5. На Рисунке 3.13 показаны примеры сечения профиля с видом симметрии относительно вертикальной и горизонтальной осей, а также эпюра распределения напряжения по сечению [103].

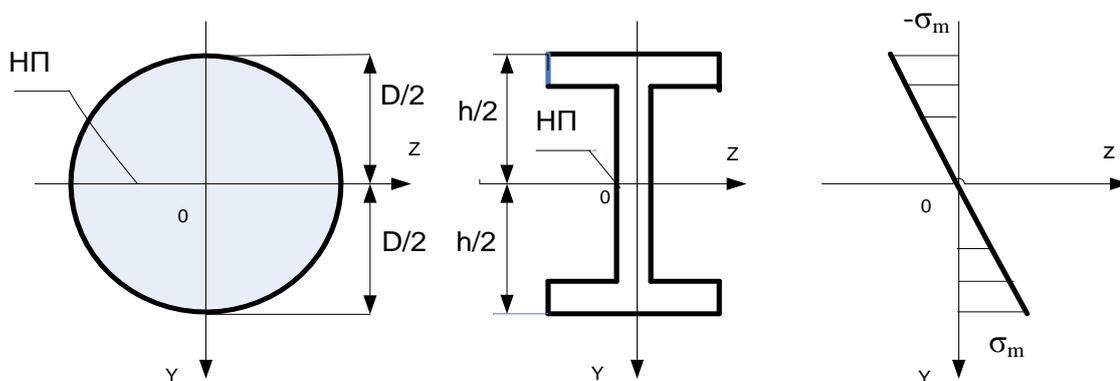


Рисунок 3.13 – Поперечные сечения симметричные относительно Y и Z осей имеют симметричную эпюру напряжения в поперечном сечении

Для виртуальных плоскостей в теле профиля, параллельных нулевой плоскости, соотношения для значений магнитной индукции в характерных точках будут аналогичными, как для балки с прямоугольным сечением (3.50) и (3.51). При этом напряжение в каждой плоскости n -ого сечения будет изменяться по линей-

ной зависимости (3.50) от нуля до максимального значения $\pm \sigma_m$ при изменении координаты плоскости y от 0 до $\pm h/2$ или $\pm D/2$, Рисунок 3.10 и Рисунок 3.12 [103].

Отметим, что все полученные выше зависимости и выражения для балки можно получить для профилей Рисунок 3.13 при изгибе, обладающих своим значением коэффициента k , характеризующим механические и магнитоупругие свойства каждого профиля.

Оценим распределение напряжения внутри сечений балки с симметричным поперечным сечением относительно одной оси Y при её плоском изгибе, Рисунок 3.14. Для профилей Рисунок 3.14 «а» и Рисунок 3.14 «б», геометрическая фигура сечения которых симметрична относительно одной оси Y , распределение напряжения по сечению показано на Рисунке 3.14 «в» [103].

Для эпюры Рисунок 3.14 «в» максимальное напряжение для верхнего слоя (волокон) профилей σ_{m1} определяется по формуле (3.6) при $y = h_1$, а для нижнего слоя профилей σ_{m2} по той же формуле при $y = h_2$, для соответствующих моментов инерции J_z [103].

В плоскостях попарно симметричных относительно нулевой плоскости (расположенных на одном расстоянии по оси Y сечения) напряжение по абсолютной величине будет одинаковым.

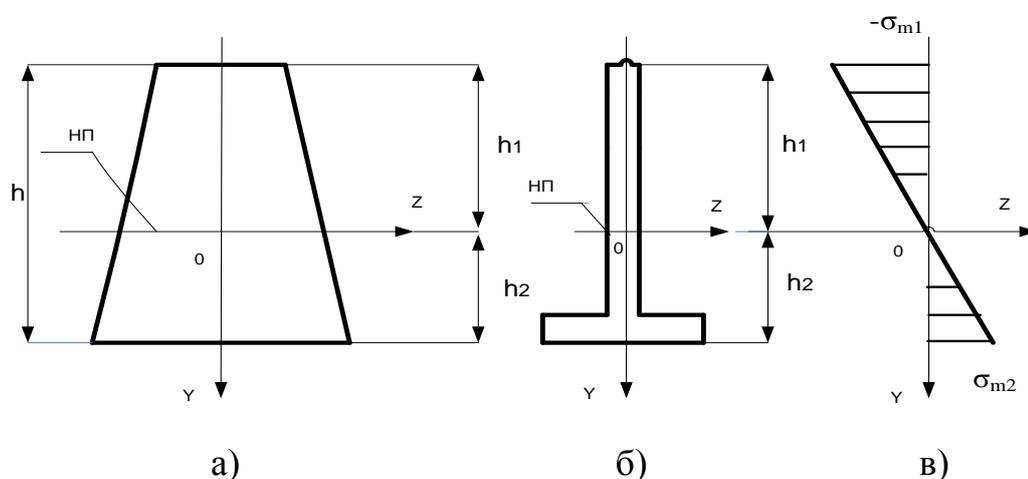


Рисунок 3.14 – Примеры поперечных сечений «а» и «б» профилей, симметричных относительно одной оси Y , и эпюра «в» напряжения в сечениях

После намагничивания, путём создания двух явно выраженных магнитных полюсов на оси Y , при нулевой изгибающей силе магнитное поле будет симметричным только относительно оси Y . При этом след нулевой магнитной индукции не будет совпадать со следом нулевой плоскости напряжения, проходящей через центры тяжести фигуры сечения профиля, Рисунок 3.14. След нулевой магнитной индукции будет проходить параллельно следу нулевой плоскости напряжения выше или ниже её за счёт различных площадей и расстояний прохождения магнитного потока по телу поперечного сечения профиля и по воздуху [82–84].

Рассмотрим положение следа нулевой магнитной индукции ($B = 0$) относительно следа нулевой плоскости напряжения ($\sigma = 0$) для балки с несимметричным относительно оси Z сечением.

Сравним магнитные поля двух сечений на примере прямоугольного (симметричного относительно двух осей Y и Z магнитного поля), Рисунок 3.12 и Т-образного (симметричного относительно одной оси Y магнитного поля) сечений, Рисунок 3.14 «б».

На Рисунке 3.15 «а» и Рисунке 3.15 «б» представлены магнитные силовые линии указанных сечений, при их намагничивании постоянным внешним магнитным полем одной и той же напряжённости H_e , созданного с помощью намагничивающей системы.

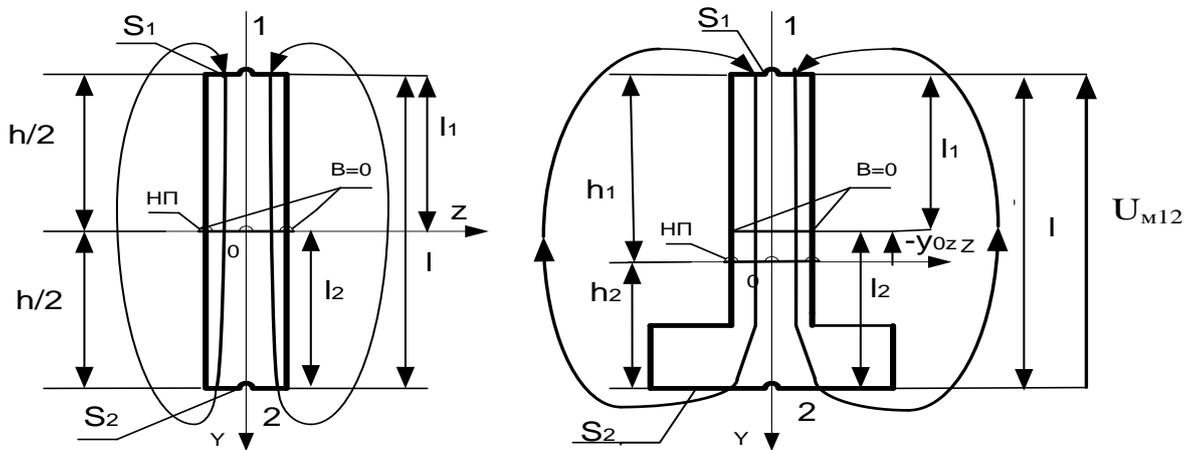
Будем считать, что магнитный поток остаётся постоянным по величине для каждой магнитной цепи сечений, Рисунка 3.15. Для магнитной цепи Рисунка 3.15 «а» при равенстве площадей верхней и нижней площадок сечения $S_1 = S_2$, пронизываемых одним магнитным потоком Φ , вытекает равенство модулей магнитной индукции для верхней $B_1 = \Phi/S_1$ и нижней $B_2 = \Phi/S_2$ площадок сечения [66; 74–76; 134–136]:

$$B_1 = B_2. \quad (3.52)$$

При равенстве магнитных проницаемостей материала верхней и нижней половинок сечения $\mu_1 = \mu_2$ получаем равенство модулей напряжённости истинного магнитного поля, полученного как разность напряжённостей внешнего магнитно-

го поля и размагничивающего поля полюсов сечения, на первом l_1 и втором l_2 участках магнитопровода:

$$H_{и1} = H_{и2}. \quad (3.53)$$



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

Рисунок 3.15 – Магнитные цепи

Результирующая напряжённость магнитного поля между верхней и нижней площадками сечения будет постоянной по величине и равной сумме напряжённостей магнитного поля на двух участках магнитопровода:

$$H_{и} = H_{и1} + H_{и2}, \quad (3.54)$$

Падение магнитного напряжения U_{M12} между верхней и нижней площадками двух сечений будет постоянным и равным падению магнитного напряжения намагничивающей системы.

Тогда, можно записать соотношение:

$$U_{M12} = H_{и}l = H_{и1}l_1 + H_{и2}l_2 = H_e L = \text{const}, \quad (3.55)$$

где $l = l_1 + l_2$ – длина магнитопровода сечения остаётся постоянной;

H_e – напряжённость магнитного поля намагничивающей системы;

L – средняя длина магнитопровода намагничивающей системы остаётся постоянной.

С учётом выражений (3.53) – (3.55) падение магнитного напряжения на участке магнитной цепи l_1 должно равняться падению магнитного напряжения на

участке магнитной цепи l_2 в силу образования двух разноимённых магнитных полюсов, Рисунок 3.15 «а» [108]:

$$H_{и1}l_1 = H_{и2}l_2. \quad (3.56)$$

Из соотношений (3.56) следует, что для магнитопровода (Рисунок 3.15 «а») след нулевой магнитной индукции $B = 0$ совпадает со следом нулевой плоскости, т.к. выполняется равенство:

$$l_1 = l_2 = h/2. \quad (3.57)$$

Сравним характеристики магнитной цепи Рисунка 3.15 «а» и магнитной цепи Рисунка 3.15 «б», у которой площадь S_1 верхней площадки сечения меньше площади S_2 нижней площадки сечения $S_1 < S_2$.

Допустим, что при аналогичном намагничивании внешним магнитным полем напряжённостью H_e указанные площадки пронизываются одним и тем же магнитным потоком Φ , Рисунок 3.15 «б». Отсюда следует, что магнитная индукция $B_1 = \Phi/S_1$ будет больше по величине магнитной индукции $B_2 = \Phi/S_2$:

$$B_1 > B_2. \quad (3.58)$$

При одной и той же магнитной проницаемости $\mu_1 = \mu_2$ материала сечения балки получаем, что напряжённость $H_{и1} = B_1/\mu_1$ на участке длиной l_1 , будет больше по величине напряжённости $H_{и2} = B_2/\mu_2$ на участке длиной l_2 магнитопровода, Рисунок 3.15 «б»:

$$H_{и1} > H_{и2}. \quad (3.59)$$

Тогда, согласно (3.55) и (3.56), при равенстве падений магнитных напряжений на первом и втором участках магнитопровода следует, что длина первого участка l_1 будет меньше длины второго участка l_2 магнитопровода:

$$l_1 < l_2. \quad (3.60)$$

Для нулевой плоскости сечения Рисунок 3.15 «б», проходящей через линию центров тяжести геометрической фигуры сечения, выполняется соотношение

$$h_1 > h_2. \quad (3.61)$$

С учётом соотношений (3.60) и (3.61) получаем, что следы нулевой магнитной индукции $B = 0$ будут проходить выше следов нулевой плоскости вдоль всей длины балки на величину координаты y_{0z} , Рисунок 3.15 «б».

Полученные выше соотношения подтверждаются моделированием картин магнитных полей при пропускании постоянного тока, а также экспериментом при намагничивании по оси Y поперечного сечения образца рельса постоянным магнитным полем. При этом, чем больше не симметрия фигуры сечения профиля относительно оси Z , тем больше расстояние y_{0z} между указанными следами. Так, для образца рельса с удалённой головкой рельса, после его намагничивания намагничивающей системой с образованием симметричного магнитного поля относительно оси Y , расстояние между указанными следами равно $y_{0z} = 17$ мм, а с головкой рельса – эти следы практически совпадают.

Продолжим рассмотрение плоского изгиба стальной балки с прямоугольным сечением, Рисунок 3.9 и Рисунок 3.15 «а». При отсутствии внешней изгибающей силы и создания симметричного магнитного поля относительно оси Y фигуры поперечного сечения балки имеют место соотношения (3.52)–(3.57).

Для балки нагруженной внешней изгибающей силой $F \neq 0$, после создания симметричного магнитного поля относительно геометрической фигуры поперечного сечения балки, произойдёт (в соответствии с эффектом Виллари) уменьшение магнитной индукции B_1 на верхней площадке сечения, и соответствующее увеличение магнитной индукции B_2 на нижней площадке сечения, по сравнению с начальным значением модулей магнитной индукции, согласно (3.52), Рисунок 3.15 «а».

Такое изменение магнитной индукции вызвано уменьшением намагниченности материала на первом l_1 и увеличения на втором l_2 участках магнитопровода сечения, Рисунок 3.15 «а», в связи с возникновением механического напряжения в них при плоском изгибе балки. В этом случае, будут справедливы соотношения (3.15) и (3.16) между магнитными проницаемостями первого l_1 и второго l_2 участков магнитопровода, Рисунок 3.7 и Рисунок 3.15 «а».

Рассмотрим соотношение между длинами первого l_1 и второго l_2 участков магнитопровода при нарушении симметрии внешнего магнитного поля относительно оси Z поперечного сечения балки при её изгибе, т.е. найдём положение следов нулевой магнитной индукции вдоль длины балки относительно следов

плоскости отсчёта. При намагничивании внешним магнитным полем симметричным относительно геометрической фигуры поперечного сечения балки, произойдёт перераспределение магнитной индукции B_1 и B_2 на первом l_1 и втором l_2 участках магнитопровода, за счёт симметричных изменений магнитных свойств материала поперечного сечения балки (магнитной проницаемости $\mu_1 < \mu_2$ и, соответствующей намагниченности $J_1 < J_2$), выше и ниже центрального слоя балки при её плоском изгибе, Рисунок 3.7 и Рисунок 2.4. Поскольку геометрические размеры поперечного сечения балки остаются неизменными и симметричными относительно двух осей Y и Z , то напряжённость приложенного к площадкам 1 и 2 внешнего магнитного поля H_e можно разбить на две равных части величиной $H_e/2$, каждая из которых будет приложена к верхней и нижней части сечения симметричных относительно оси Z , Рисунок 3.16.

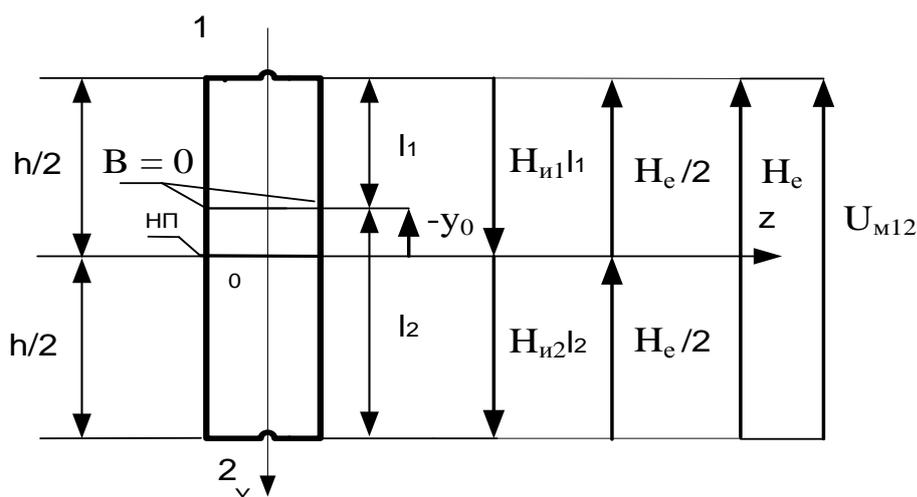


Рисунок 3.16 - Магнитная цепь прямоугольного поперечного сечения балки при изгибе

Тогда, истинная (результатирующая) напряжённость магнитного поля на участках l_1 и l_2 магнитопровода определится из выражений [66; 74; 76]:

$$H_{и1} = H_e/2 - NJ_1, \quad (3.62)$$

$$H_{и2} = H_e/2 - NJ_2, \quad (3.63)$$

где J_1 – намагниченность материала выше центрального слоя балки при её плоском изгибе;

При аналогичном (как было проделано выше) намагничивании по оси Y за счёт уменьшения эффективной площади S_1 сечения, пронизываемого магнитным потоком Φ , магнитная индукция B_1 увеличится по модулю по сравнению с модулем магнитной индукцией B_2 , Рисунок 3.17.

При одной и той же магнитной проницаемости по всему n -ому сечению балки получим, что напряжённость магнитного поля на первом участке магнитопровода $H_{и1}$ будет больше напряжённости $H_{и2}$ на втором участке магнитопровода:

$$H_{и1} > H_{и2}.$$

Тогда, из соотношения (3.56) следует, что длина участка магнитопровода l_1 будет меньше длины участка l_2 на величину Δl_n .

Для n -го сечения с дефектом отклонение следа нулевой магнитной индукции произойдёт в сторону дефекта и определится координатой по оси Y , Рисунок 3.17:

$$y[n] = -y_d[n] = l_1[n] - l_2[n] = -\Delta l_n[n]. \quad (3.67)$$

Таким образом, след нулевой линии магнитной индукции $B = 0$ в n -ом сечении при наличии дефекта будет отклоняться от начального значения на величину Δl_n в сторону дефекта.

На картине не симметричного магнитного поля Рисунка 2.10 видно, что отклонение следов нулевой магнитной индукции слева и справа от оси Y будет различным. Так слева от оси Y практически нет отклонения следа, а справа от оси Y след отклонился в сторону дефекта, т. к. раковина расположена на правой стороне от оси Y . Чем больше по размерам раковина, тем больше отклонение следа Δl_n в сторону дефекта от расчётного следа.

Если балка нагружена внешней изгибающей силой и в материале n -ого сечения балки образовался дефект (произошли структурные изменения, остаточные напряжения), то суммарное отклонение следа нулевой магнитной индукции от расчётного следа, определяемого центральной плоскостью, будет состоять из алгебраической суммы отклонений. Результирующее отклонение следа нулевой магнитной индукции будет складываться из отклонения следа полученного за

счёт изгиба балки, плюс отклонение следа образованного за счёт дефекта, Рисунок 3.16 и Рисунок 3.17:

$$y[n] = l_1[n] - l_2[n] = -y_0[n] - y_d[n]. \quad (3.67)$$

О наличии в n-ом сечении на контролируемом участке элемента дефекте, структурном изменении или о локальном (остаточном) напряжении можно судить путём сравнения результирующего отклонения в рассматриваемом сечении с отклонениями в соседних сечениях.

При таком анализе в совокупности с анализом следов магнитной индукции в выбранных попарно симметричных характерных точках на поверхности сечений можно идентифицировать дефекты, структурные изменения, локальные механические напряжения, а также результирующие средние изгибающие напряжения на всём участке контроля.

Если датчики установлены на расчётных следах объекта контроля (на следах нулевой плоскости отсчёта), то согласно (3.67), они будут показывать не нулевые положительное значение магнитной индукции, определяемой изгибом балки и (или) дефектом, т.к. след нулевой магнитной индукции проходит выше расчётного следа, Рисунок 3.16 и Рисунок 3.17.

В случае нарушения однородности материала на контролируемом участке балки, имеющей геометрическую фигуру поперечного сечения симметричную относительно только одной оси симметрии Y, следы нулевой магнитной индукции $B=0$ в n-ом сечении при неоднородностях в сечениях будут отклоняться от расчётных следов, определяемых координатой $-y_{0z}$, Рисунок 3.14 и Рисунок 3.15 «б»:

$$y[n] = l_1[n] - l_2[n] = -y_{0z}[n] - y_0[n] - y_d[n]. \quad (3.68)$$

Для следов плоскостей, параллельных нулевой плоскости (выше и ниже её), будут справедливы соотношения (3.51), которые вытекают из симметрии картины магнитного поля относительно оси Y.

По следам указанных плоскостей можно построить картину распределения равных магнитных индукций (напряжений) по длине балки, что позволяет выявить и уточнить положение локальных напряжений и дефектов в сечениях.

Полученные соотношения нашли подтверждение, после намагничивания, на промежутке времени необходимым для измерений остаточной магнитной индукции в характерных точках на контролируемом участке элемента, глава 4.

3.6. Способ оперативного обнаружения дефектов и внутренних напряжений в элементах протяжённых стальных конструкций

Способ оперативного обнаружения дефектов и механических напряжений в протяжённых конструкциях решает задачу ускоренного обнаружения дефектов, избыточных изгибных напряжений, изготовленных из однородного ферромагнитного материала и имеющих симметричную форму поперечных сечений [116].

Для протяжённых элементов изделий о наличии дефекта или об изменениях значений местных механических напряжений в зонах сечений судят по непрерывному изменению величин электрических напряжений, полученных от движущихся датчиков (катушек индуктивности) вдоль изделия, установленных в характерных попарно симметричных точках сечения на границах элемента.

При этом предварительно намагничивается контролируемый участок элемента (или был намагничен в результате технологических операций) с образованием симметричного магнитного поля относительно оси (осей) симметрии геометрической фигуры поперечного сечения элемента.

В качестве примера для рассмотрения, на Рисунке 3.18 показано сечение рельса. При однородности материала и отсутствии в нём механических напряжений магнитное поле в сечении будет симметрично относительно вертикальной оси симметрии сечения [82], поэтому индукция магнитного поля в характерных попарно симметричных точках будет одинаковой по величине и картины внешнего магнитного поля в окружении этих точек будут зеркально симметричны, Рисунок 2.8. При наличии дефектов или механических напряжений в сечениях контролируемого участка элемента, симметрия магнитного поля относительно оси симметрии сечения нарушается, и значения магнитной индукции в характерных попарно симметричных точках сечения будут отличаться друг от друга, также как и харак-

тер магнитного поля в окружении этих точек. Возникают отклонения значений магнитной индукции и производной от магнитной индукции по времени относительно сечений, где указанная симметрия не нарушается, Рисунок 2.10.

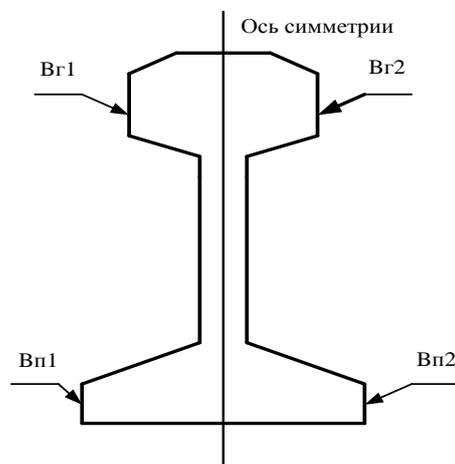


Рисунок 3.18 – Характерные точки симметричные относительно вертикальной оси симметрии сечения

При движении датчиков, установленных в характерных точках плоскости поперечного сечения элемента протяжённой стальной конструкции, в катушках индуктивности датчиков, по закону электромагнитной индукции, наводится электродвижущая сила (равная напряжению на зажимах датчика $u(t)$), значение которой пропорционально производной по времени от магнитной индукции в точке установки датчика [83; 84]:

$$u(t) = \frac{dB(t)}{dt}. \quad (3.69)$$

При равномерном движении блока датчиков вдоль участка контроля проводится непрерывное сканирование каждого сечения протяжённого изделия в целях обнаружения сечений с дефектом или предельных механических напряжений.

Например, при изгибе рельса имеем следующие соотношения по абсолютным значениям индукции магнитного поля в характерных точках n -го сечения, и соотношения для электрических напряжений в катушках индуктивности датчиков, установленных в этих же точках сечения, Рисунок 3.18, [83; 84; 116]:

1) изгиб рельса в горизонтальной плоскости, слева от оси симметрии сечения рельса материал растянут, справа – сжат, Рисунок 2.6:

$$B_{r1}[n] > B_{r2}[n], B_{п1}[n] > B_{п2}[n];$$

$$\Delta B_r[n] = B_{r1}[n] - B_{r2}[n] > 0, \Delta B_n[n] = B_{п1}[n] - B_{п2}[n] > 0;$$

тогда для электрических напряжений

$$\Delta U_r[n] = U_{r1}[n] - U_{r2}[n] > 0, \Delta U_n[n] = U_{п1}[n] - U_{п2}[n] > 0;$$

2) изгиб рельса в горизонтальной плоскости, слева от оси симметрии сечения рельса материал сжат, справа – растянут:

$$B_{r1}[n] < B_{r2}[n], B_{п1}[n] < B_{п2}[n];$$

$$\Delta B_r[n] = B_{r1}[n] - B_{r2}[n] < 0, \Delta B_n[n] = B_{п1}[n] - B_{п2}[n] < 0;$$

тогда для электрических напряжений

$$\Delta U_r[n] = U_{r1}[n] - U_{r2}[n] < 0, \Delta U_n[n] = U_{п1}[n] - U_{п2}[n] < 0;$$

3) изгиб в вертикальной плоскости, материал головки рельса сжат, материал подошвы рельса растянут, Рисунок 2.7:

$$B_{r1}[n] = B_{r2}[n], B_{п1}[n] = B_{п2}[n];$$

$$B_{r1}[n] < B_{п1}[n], B_{r2}[n] < B_{п2}[n]$$

(или наоборот, в зависимости от расстояния установки датчиков от следа нулевой плоскости);

$$\Delta B_{rn1}[n] = \Delta B_{rn2}[n];$$

$$\Delta B_{rn1}[n] = B_{r1}[n] - B_{п1}[n] < 0, \Delta B_{rn2}[n] = B_{r2}[n] - B_{п2}[n] < 0$$

(или наоборот, в зависимости от расстояния установки датчиков от следа нулевой плоскости);

тогда для электрических напряжений

$$\Delta U_{rn1}[n] = \Delta U_{rn2};$$

$$\Delta U_{rn1}[n] = U_{r1}[n] - U_{п1}[n] < 0, \Delta U_{rn2}[n] = U_{r2}[n] - U_{п2}[n] < 0$$

(или наоборот, в зависимости от расстояния установки датчиков от следа нулевой плоскости);

4) изгиб рельса в вертикальной плоскости, материал головки рельса растянут, материал подошвы рельса сжат:

$$B_{r1}[n] = B_{r2}[n], B_{п1}[n] = B_{п2}[n];$$

$$B_{r1}[n] > B_{n1}[n], B_{r2}[n] > B_{n2}[n]$$

(или наоборот, в зависимости от расстояния установки датчиков от следа нулевой плоскости);

$$\Delta B_{rn1}[n] = \Delta B_{rn2}[n];$$

$$\Delta B_{rn1}[n] = B_{r1}[n] - B_{n1}[n] > 0, \Delta B_{rn2}[n] = B_{r2}[n] - B_{n2}[n] > 0$$

(или наоборот, в зависимости от расстояния установки датчиков от следа нулевой плоскости);

тогда для электрических напряжений

$$\Delta U_{rn1}[n] = \Delta U_{rn2};$$

$$\Delta U_{rn1}[n] = U_{r1}[n] - U_{n1}[n] > 0, \Delta U_{rn2}[n] = U_{r2}[n] - U_{n2}[n] > 0$$

(или наоборот, в зависимости от расстояния установки датчиков от следа нулевой плоскости);

где $B_{r1}[n]$ и $B_{r2}[n]$ – значение магнитной индукции для n -го сечения симметричной пары точек головки рельса;

$B_{n1}[n]$ и $B_{n2}[n]$ – значение магнитной индукции для n -го сечения симметричной пары точек подошвы рельса, (здесь и далее индекс «1» относится к левой части от оси симметрии, индекс «2» – к правой части от оси симметрии);

$\Delta B_r[n]$, $\Delta B_n[n]$, $\Delta B_{rn1}[n]$ и $\Delta B_{rn2}[n]$ – разность значений магнитной индукции между соответствующими характерными точками n -го сечения;

$U_{r1}[n]$, $U_{r2}[n]$, $U_{n1}[n]$ и $U_{n2}[n]$ – падения напряжения в этих же точках n -го сечения;

$\Delta U_r[n]$, $\Delta U_n[n]$, $\Delta U_{rn1}[n]$ и $\Delta U_{rn2}[n]$ – разность падений напряжения между соответствующими характерными точками n -го сечения.

Приведённые соотношения справедливы при условии работы однотипных датчиков, установленных в одной плоскости сечения контролируемого элемента на его границе. При этом скорость движения датчиков вдоль протяжённого изделия выбирается из условия удовлетворения необходимой чувствительности приборов снимаемых непрерывное электрическое напряжение с датчиков. По данным датчиков делают оценку о месте дефекта и (или) о механических напряжениях в материале контролируемого изделия.

Способ реализуется следующим образом. Проводят намагничивание исследуемого протяжённого элемента с помощью постоянных магнитов или путём пропускания по нему постоянного тока, с целью получения симметричного внешнего магнитного поля относительно геометрической фигуры поперечного сечения элемента, Рисунок 2.8.

В зависимости от вида симметрии картины магнитного поля выбираются характерные точки на границе сечения элемента так, чтобы при однородности материала и отсутствии механических напряжений в нём картина магнитного поля была симметричной и соответствовала симметрии геометрической фигуры сечения, а также была возможность установки соответствующих датчиков.

Количество пар характерных точек и количество датчиков выбираются исходя из вида поперечного сечения элементов, опыта эксплуатации конструкции и других технических условий. Датчики устанавливаются в одной плоскости, которая совпадает с плоскостью контролируемого сечения элемента. Процесс снятия и обработки информации может быть автоматизирован.

Технический результат реализации способа заключается в возможности оперативного выявления дефектов и оценки местных напряжений в материале протяжённых конструкций, с помощью автоматизированных мобильных технических средств.

3.7. Структурная блок-схема и алгоритмы реализации способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций

Разработанные способы представляют собой комплекс способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций, которые позволяют автоматизировать процессы контроля, диагностики и оперативного принятия решений [11,112–117]:

- 1) «Способ магнитной дефектоскопии»;
- 2) «Способ магнитной дефектоскопии изделий в напряжённом состоянии»;

- 3) «Способ обнаружения изгибных напряжений»;
- 4) «Способ оценки запаса прочности изделий в процессе эксплуатации»;
- 5) «Способ оценки изгибных напряжений в элементах конструкций»;
- 6) «Способ оперативного обнаружения дефектов и механических напряжений в протяжённых металлоконструкциях».

На Рисунке 3.19 приведена обобщённая блок-схема автоматизации шести способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций [85].

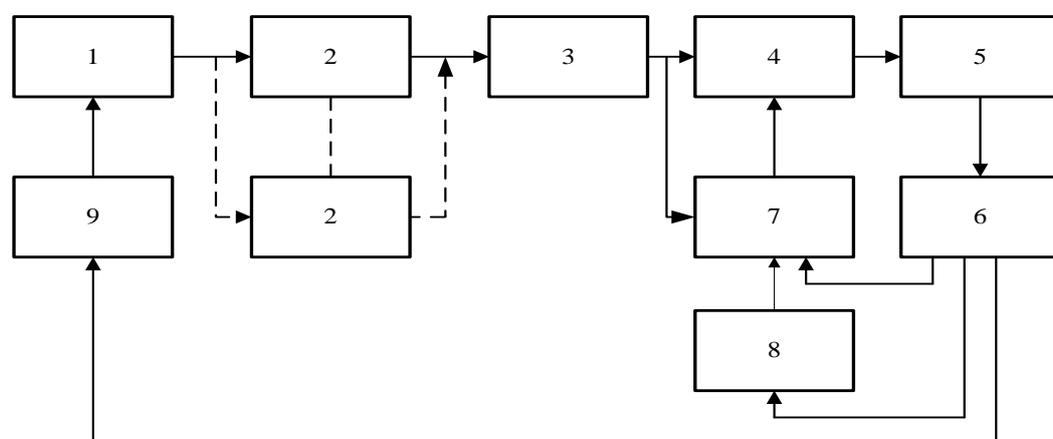


Рисунок 3.19 – Блок-схема автоматизации способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций

На блок-схеме Рисунка 3.19 введены следующие обозначения:

№ 1 - объект контроля представляет собой элемент протяженной стальной конструкции;

№ 2 – датчики магнитной индукции (или напряжения) в характерных точках, установленные в плоскости поперечного сечения элемента конструкции;

№ 3 – устройство контроля параметров осуществляет предварительную обработку сигналов с датчиков;

№ 4 – устройство представления информации осуществляет визуализацию информации для оператора;

№ 5 – оператор;

№ 6 – управляющее устройство проводит обработку полученной информации от оператора и осуществляет управляющее воздействие на устройство обработки и оценки информации (№7), на пополнение и использование информационной базы оценочных значений параметров и показателей (№8);

№ 7 – устройство обработки и оценки полученной информации по алгоритмам, реализующим оценку технического состояния объекта контроля;

№ 8 – информационная база нормируемых оценочных значений параметров и показателей, пополняется и используется для оценки технического состояния объекта контроля;

№ 9 – устройство намагничивания объекта контроля для создания симметричного внешнего магнитного поля относительно геометрической фигуры поперечного сечения элемента конструкции.

Для некоторых объектов контроля устройство намагничивания может отсутствовать, т. к. в результате технологических операций, связанных, например, с протеканием постоянного тока по элементам протяжённой стальной конструкции, требуемое для контроля магнитное поле будет присутствовать.

Алгоритмы оценки технического состояния в блоке №7 реализуют процедуры нахождения мест дефектов, местных напряжений и напряжений при изгибах объекта контроля, по полученным в параграфах 3.1–3.6 зависимостям и выражениям, Рисунок 3.19.

3.8. Выводы по главе

1. Установлены зависимости (закономерности) между отклонением следа нулевой 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 или от механического напряжения в сечении.

2. Установлены зависимости (закономерности) между разностью магнитной индукции в характерных попарно симметричных точках относительно оси (осей) симметрии геометрической фигуры поперечного сечения элемента конструкции, и дефектами, структурными изменениями и механическими напряжениями в сечении.

3. Установлены зависимости (закономерности) между разностью абсолютных значений магнитной индукции в выбранных характерных попарно симметричных точках поперечных сечений балки и нормальным напряжением в поперечном сечении балки при изгибе, которые позволяют реализовать следующий алгоритм магнитного контроля: экспериментальным путём на контролируемом участке элемента или его образца, находить зависимость между средней изгибающей силой и средней разностью абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках сечений; полученную зависимость в дальнейшем использовать для оценки остаточного среднего максимального напряжения, действующего среднего максимального напряжения, максимального напряжения в любом сечении; позволяют создать базу 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; по распределению следов плоскостей на контролируемом участке выявить локальные напряжения и дефекты.

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.

5. Получена зависимость между распределением внутренних напряжений и распределением магнитной индукцией в сечениях объекта контроля.

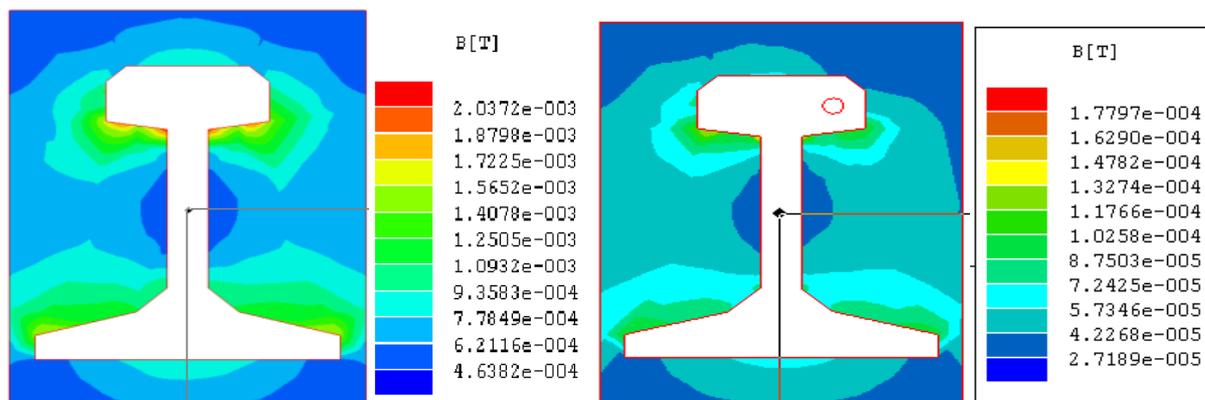
6. На основе полученных зависимостей (закономерностей) разработаны шесть запатентованных способов магнитного контроля.

7. Разработана блок-схема автоматизации шести способов контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций.

ГЛАВА 4. РЕАЛИЗАЦИЯ СПОСОБОВ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТЯЖЁННЫХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

4.1. Исследование картин внешнего магнитного поля образцов рельсов

Продолжим рассмотрение картин внешнего магнитного поля рельсов, полученные путём моделирования с использованием программного продукта Maxwell, реализующего метод конечных элементов [106; 107; 118; 120], и натурных экспериментов с образцами рельсов. На Рисунке 4.1 для наглядности совмещены две картины внешнего магнитного поля Рисунка 2.8 и Рисунка 2.10 поперечного сечения рельса при пропускании вдоль рельса постоянного тока плотностью $j=10000 \text{ A/m}^2$.



а) – без дефекта

б) – с дефектом («б»)

Рисунок 4.1 – Картины внешнего магнитного поля сечения рельса при пропускании по рельсу постоянного тока плотностью $j=10000 \text{ A/m}^2$

На Рисунке 4.1 видно отличие картины магнитного поля сечения с дефектом в виде раковины (Рисунок 4.1«б»)) от картины симметричного магнитного поля относительно вертикальной оси симметрии сечения рельса (Рисунок 4.1«а»):

1) с правой стороны картины отклонение нулевой линии магнитной индукции $B = 0$ от горизонтальной оси в сторону дефекта;

2) не равенство магнитной индукции в характерных попарно симметричных точках (Рисунок 2.9) для головки $B_{г1} \neq B_{г2}$ и шейки $B_{ш1} \neq B_{ш2}$ рельса.

Рассмотрим изменение картин магнитного поля по длине рельса. Проведём натурные эксперименты с образцами рельсов [125].

В качестве одного из образцов использовалась рубка нового рельса Р65 длиной 12,5 м. Для создания симметричного магнитного поля относительно вертикальной оси симметрии фигуры поперечного сечения рельса применялась намагничивающая система [126], при измерении магнитной индукции в характерных точках сечений рельса использовался магнитометр дефектоскопический [127]. Центральная часть рельса была разбита на 23 поперечных сечения через 20 см каждый (12-ое сечение центральное).

Для каждого поперечного сечения рельса измерялась индукция внешнего магнитного поля в шести характерных точках, Рисунок 4.2.

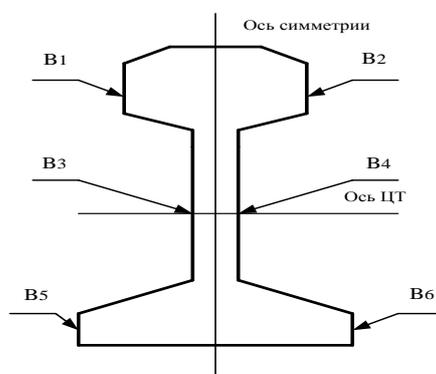


Рисунок 4.2 – Характерные точки сечения рельса для измерения нормальной составляющей магнитной индукции на поверхности рельсов

В результате эксперимента было получено распределение магнитной индукции в характерных точках сечений на контролируемом участке рельса без его предварительного намагничивания, т. е. при остаточном намагничивании рельса, полученном в результате технологических операций с ним.

Кривые распределения магнитной индукции $B_1[n]$, $B_2[n]$, $B_3[n]$, $B_4[n]$, $B_5[n]$, $B_6[n]$ и разностей абсолютных значений магнитной индукции $\Delta B_{12}[n]$, $\Delta B_{34}[n]$, $\Delta B_{56}[n]$ в характерных точках сечений по длине контролируемого участка приведены на Рисунках 4.3–4.6 для начального магнитного состояния рельса:

$$\Delta B_{12}[n] = |B_1[n]| - |B_2[n]|, \quad (4.1)$$

$$\Delta B_{34}[n] = |B_3[n]| - |B_4[n]|, \quad (4.2)$$

$$\Delta B_{56}[n] = |B_5[n]| - |B_6[n]|, \quad (4.3)$$

где n – номер сечения, $n = 1, 2, \dots, N$; $N = 23$.

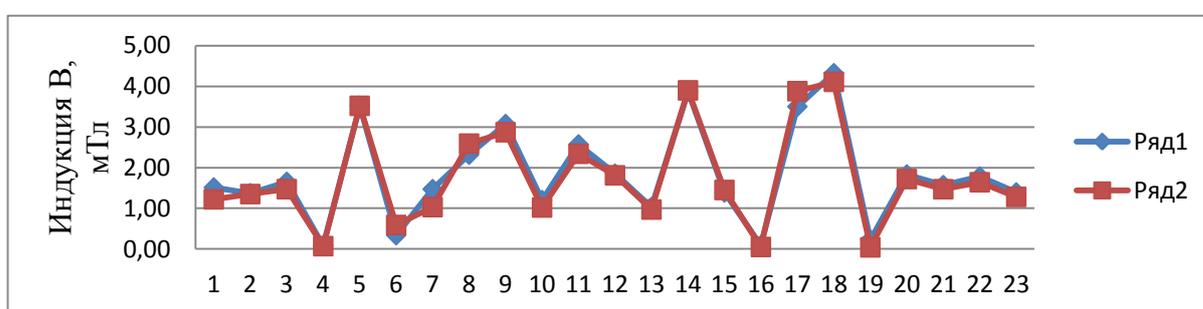


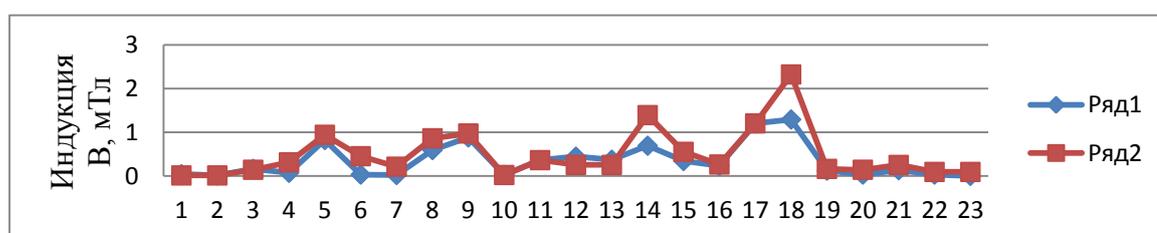
Рисунок 4.3 – Распределение остаточной магнитной индукции в характерных точках 1 и 2 по абсолютной величине $|B_1|$ и $|B_2|$

Для симметричного внешнего магнитного поля в каждом сечении рельса выполняются соотношения, Рисунок 4.1 «а»:

$$B_1[n] = B_2[n]; B_3[n] = B_4[n]; B_5[n] = B_6[n], \quad (4.4)$$

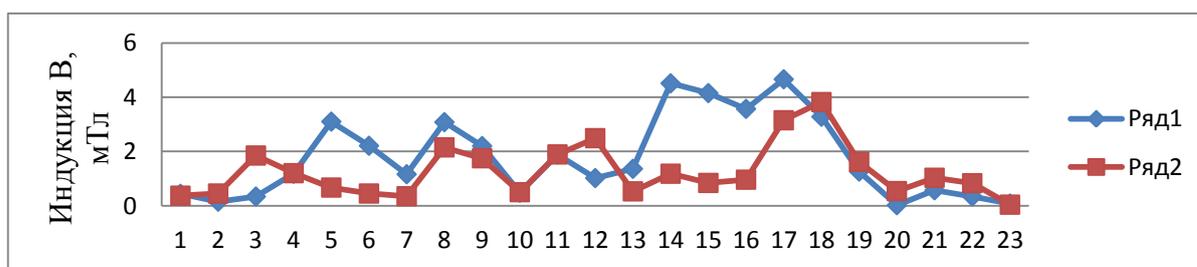
или с учётом (4.1)–(4.3)

$$\Delta B_{12}[n] = \Delta B_{34}[n] = \Delta B_{56}[n] = 0. \quad (4.5)$$



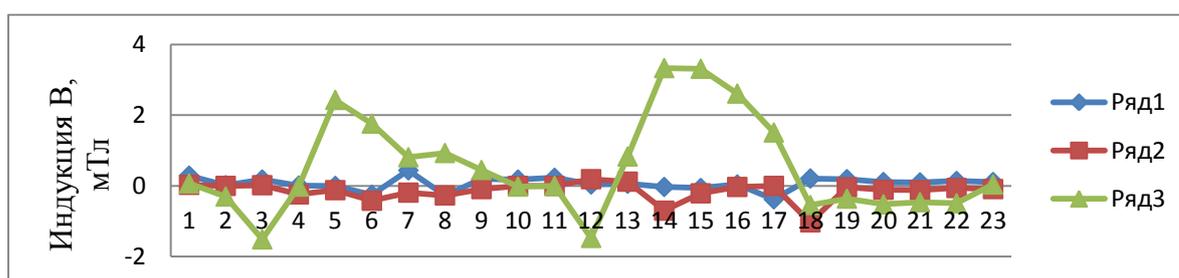
($|B_3|$ и $|B_4|$, соответствуют кривым 1 и 2)

Рисунок 4.4 – Распределение остаточной магнитной индукции в характерных точках 3 и 4 по абсолютной величине



($|B_5|$ и $|B_6|$, соответствуют кривым 1 и 2)

Рисунок 4.5 – Распределение остаточной магнитной индукции в характерных точках 5 и 6 по абсолютной величине



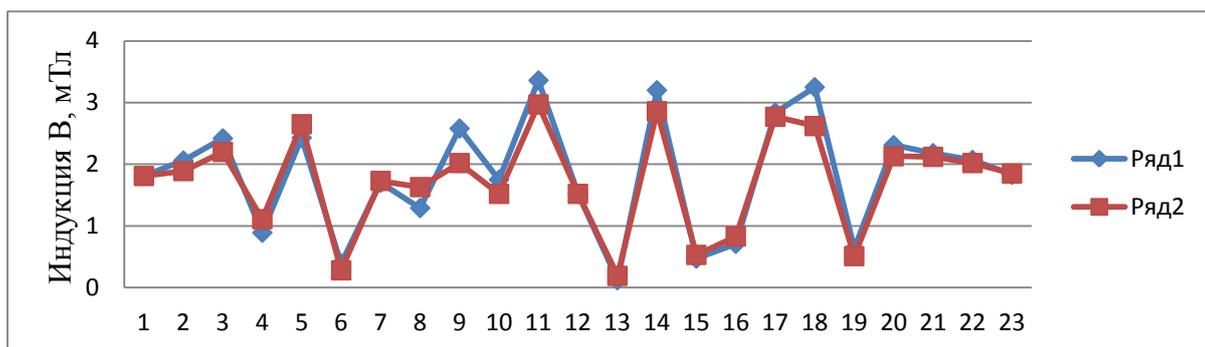
(ΔB_{12} , ΔB_{34} , ΔB_{56} , соответствуют кривым 1, 2 и 3)

Рисунок 4.6 – Распределение разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6

Из кривых распределения магнитной индукции и разности абсолютных значений магнитной индукции в попарно симметричных характерных точках Рисунков 4.3–4.6 видно, что начальное (исходное) магнитное поле симметрично в характерных точках головки сечения рельса, практически симметрично в шейке рельса и не симметрично в некоторых сечениях относительно характерных точек подошвы рельса. В подошве рельса магнитное поле близко к симметрии в сечениях: $n = 1, 2$; $n = 9-11$; $n = 18-23$. Из анализа кривых $|B_5[n]|$, $|B_6[n]|$ (Рисунок 4.5.) и $\Delta B_{56}[n]$ (Рисунок 4.6) следует, что в сечениях $n = 5, 6$ и $n = 14-17$ наблюдаются магнитные аномалии, нарушающие симметрию магнитного поля для характерных точек сечений подошвы рельса. При этом модуль магнитной индукции в пятой характерной точке $|B_5[n]|$ больше модуля магнитной индукции в симметричной шестой точке $|B_6[n]|$ на 1,5–3 мТл. В то время как, магнитных аномалий в головке и шейки рельса нет на всём контролируемом участке, Рисунок 4.6.

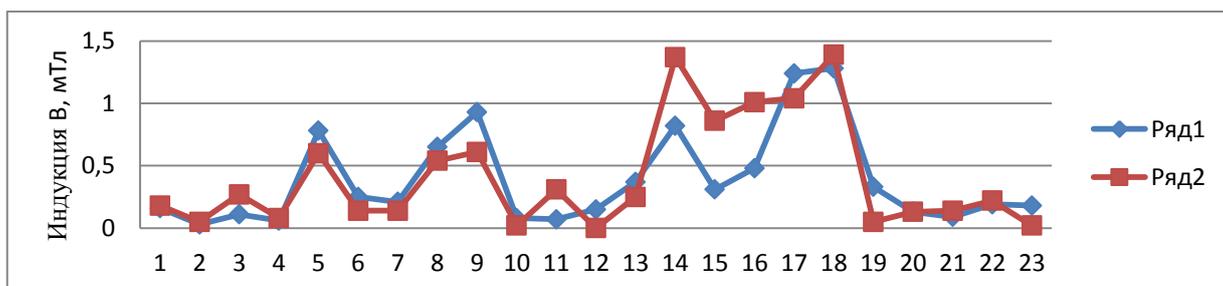
В целом на контролируемом участке рельса можно считать исходное магнитное поле симметричным для области головки и шейки рельса, т.к. средние значения разностей абсолютных значений индукции в характерных точках сечения ΔB_{12} и ΔB_{34} равны соответственно: 0,07 и - 0,15, т. е. практически равны нулю. Для области подошвы рельса среднее значение разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках сечения ΔB_{56} равно 0,54 мТл, т.е. магнитное поле практически симметрично.

После проведения этой части эксперимента, на контролируемом участке рельса с помощью намагничивающей системы МСН14 было создано симметричное магнитное поле относительно вертикальной оси симметрии геометрической фигуры поперечного сечения рельса, которая после намагничивания участка контроля была удалена. Результаты измерения магнитной индукции в характерных точках на контролируемом участке в N сечениях приведены на Рисунках 4.7–4.10.



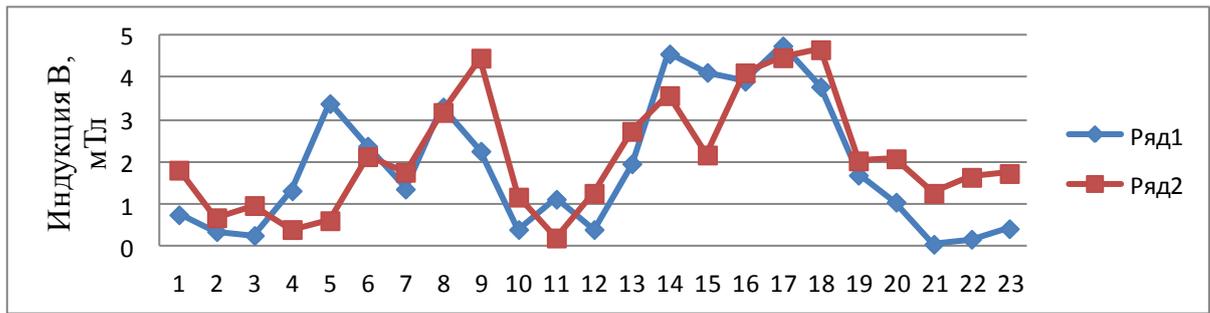
($|B_1|$ и $|B_2|$ соответствуют кривым 1 и 2)

Рисунок 4.7 – Распределение абсолютных значений магнитной индукции $|B_1|$ и $|B_2|$



($|B_3|$ и $|B_4|$ соответствуют кривым 1 и 2)

Рисунок 4.8 – Распределение абсолютных значений магнитной индукции $|B_3|$ и $|B_4|$

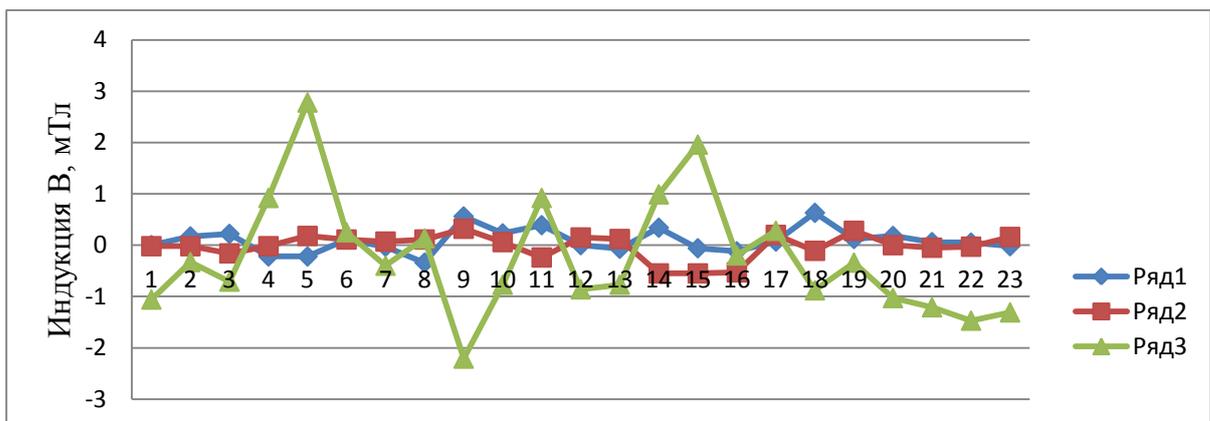


($|B_5|$ и $|B_6|$ соответствуют кривым 1 и 2)

Рисунок 4.9 – Распределение абсолютных значений магнитной индукции $|B_5|$ и $|B_6|$

Из кривых Рисунка 4.7, Рисунка 4.8 и Рисунка 4.10 видно, что для головки и шейки рельса внешнее магнитное поле остаётся практически симметричным, т.е. выполняются соотношения (4.4) и (4.5) для характерных точек 1 и 2, 3 и 4, соответственно.

Анализ кривых Рисунка 4.9 и Рисунка 4.10 показывает, что после создания симметричного магнитного поля относительно геометрической фигуры поперечного сечения рельса, наблюдается не симметрия внешнего магнитного поля в сечениях подошвы рельса $n = 5, 9, 15, 20, 21, 22, 23$. При этом разность абсолютных значений магнитной индукции в попарно симметричных характерных точках $\Delta B_{56}[n]$ превышает 1 мТл.



(ΔB_{12} , ΔB_{34} и ΔB_{56} , соответствуют кривым 1, 2, и 3)

Рисунок 4.10 – Распределение разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках сечения 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6

В целом, на контролируемом участке рельса можно считать картины магнитных полей сечений практически симметричными, средние значения разностей абсолютных значений индукции в характерных точках сечения ΔB_{12} , ΔB_{34} и ΔB_{56} равны соответственно: 0,09; - 0,02 и - 0,23 мТл, т. е. практически равны нулю.

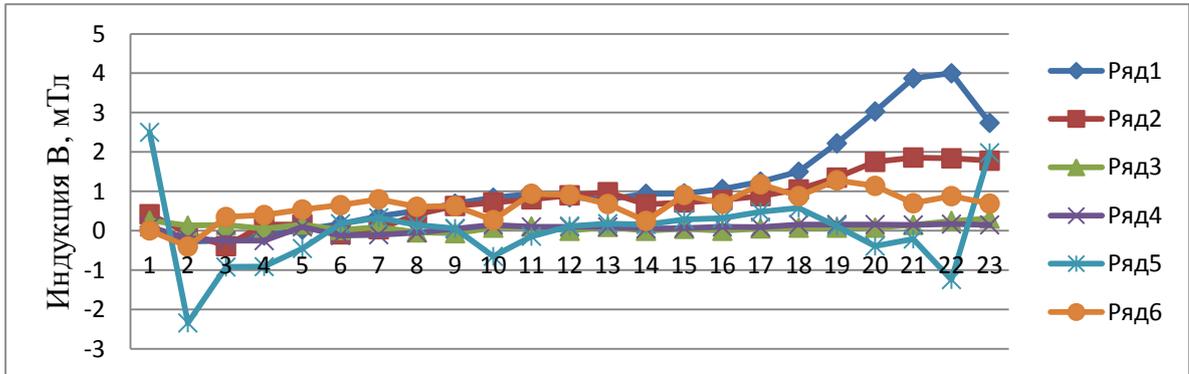
Можно сделать вывод о повышенных локальных напряжениях в отмеченных выше сечениях подошвы рельса, связанных с технологическими операциями.

Были проведены эксперименты по магнитному контролю образцов рельсов с дефектами, в частности, был исследован экспериментальный участок железнодорожного полотна для ультразвукового контроля со старым отработавшим рельсом Р65 с внутренним дефектом в головке рельса, а также три образца рельсов вырезанных в месте дефектов, в которых произошёл излом рельса при их эксплуатации.

На экспериментальном железнодорожном полотне был выбран контролируемый участок с внутренним дефектом в головке рельса, который был разбит на 23 сечения через 20 мм каждое. Как и в предыдущем эксперименте, было создано намагничивающее магнитное поле на контролируемом участке симметричное относительно вертикальной оси симметрии геометрической фигуры поперечного сечения рельса. Были измерены значения магнитной индукции в шести характерных точках поперечных сечений $B_1[n]$, $B_2[n]$, $B_3[n]$, $B_4[n]$, $B_5[n]$, $B_6[n]$, и найдены разности абсолютных значений магнитной индукции $\Delta B_{12}[n]$, $\Delta B_{34}[n]$ и $\Delta B_{56}[n]$ в характерных попарно симметричных точках сечений по выражениям (4.1)–(4.3). Затем, построены соответствующие кривые распределения на контролируемом участке рельса, Рисунок 4.11 и Рисунок 4.12.

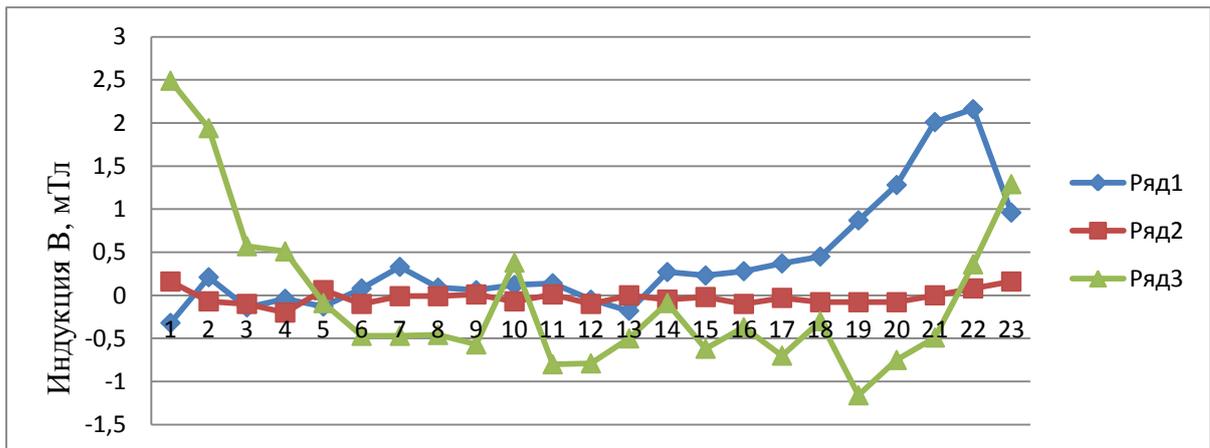
На Рисунке 4.11 и Рисунке 4.12 нечётные индексы u магнитной индукции в характерных точках относятся к внутренней стороне рельса, по которой катится колесо. Из анализа кривых Рисунка 4.11 и Рисунка 4.12 следует, что на контролируемом участке в сечениях $n = 19$ – 23 имеется дефект в головке рельса, что подтверждается ультразвуковым контролем. На двух участках в подошве рельса в сечениях $n = 1, 2$ и $n = 19$ – 23 обнаружены магнитные аномалии, связанные с дефек-

тами, вызванными структурными изменениями в металле или с локальными напряжениями.



($V_1[n] - V_6[n]$, индекс соответствует номеру кривой)

Рисунок 4.11 – Кривые распределения магнитной индукции в характерных точках сечений с 1 по 6



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

Рисунок 4.12 – Кривые распределения разностей абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6

В шейке рельса дефектов не обнаружено, магнитное поле в этом районе симметрично. Кривые магнитной индукции $V_3[n]$ и $V_4[n]$ практически совпадают с осью абсцисс, т.е. следы нулевой линии магнитной индукции с обеих сторон шейки рельса на контролируемом участке совпадают со следами плоскости ЦТ, Рису-

нок 4.2. Приведённые кривые показывают, что магнитные свойства материала рельса в сечениях выше и ниже горизонтальной оси сечений одинаковы, т.е. физических свойства материала не претерпели значительных изменений в результате эксплуатации рельса.

Для дальнейшего экспериментального исследования разработанных способов были выбраны три образца, в которых произошёл излом, Рисунок 4.13.



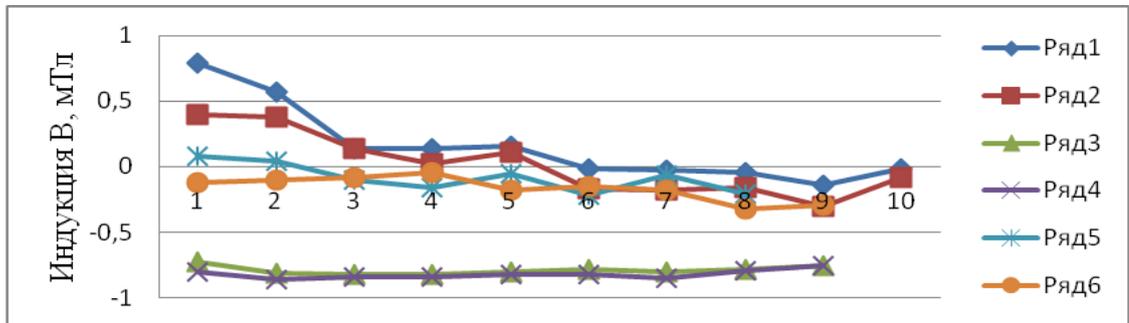
Рисунок 4.13 – Образцы рельсов с изломами по месту дефектов

На Рисунке 4.13 показаны образцы рельсов с дефектами (видимыми) на торцах, по которым произошёл излом рельса при его эксплуатации, слева на право: рельс марки Р50 с дефектом в шейке рельса (дефекты в зоне болтовых стыков), на левом конце рельса произошёл излом по месту дефекта; рельс марки Р65 с дефектом в головке рельса в виде поперечной трещины (недостаточная прочность) на левом конце рельса произошёл излом по месту дефекта; рельс марки Р65 с дефектом в головке в виде поперечной трещины (не нормативные условия эксплуатации рельсов) на правом конце рельса произошёл излом.

При проведении эксперимента первый образец был разбит по длине на сечения через 10 мм, второй и третий – разбиты на сечения через 20 мм.

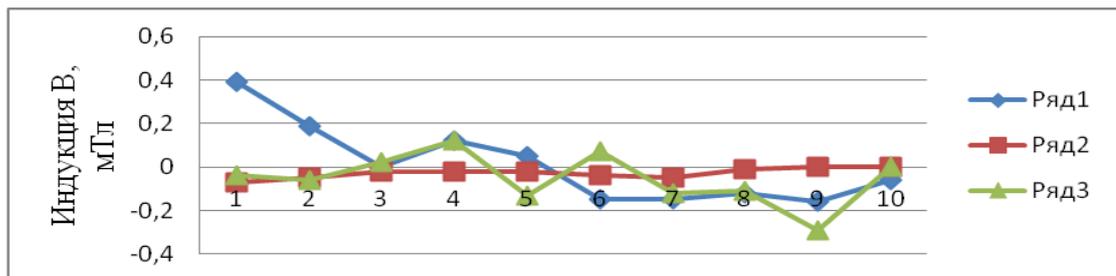
На Рисунках 4.14–4.19 по оси абсцисс указаны номера сечений по длине образца. Из анализа полученных кривых Рисунков 4.14–4.19 распределения магнитной индукции и разностей абсолютных значений магнитной индукции в попарно

симметричных характерных точках образцов можно выявить структурные изменения в материале сечений (старение) рельсов при их эксплуатации.



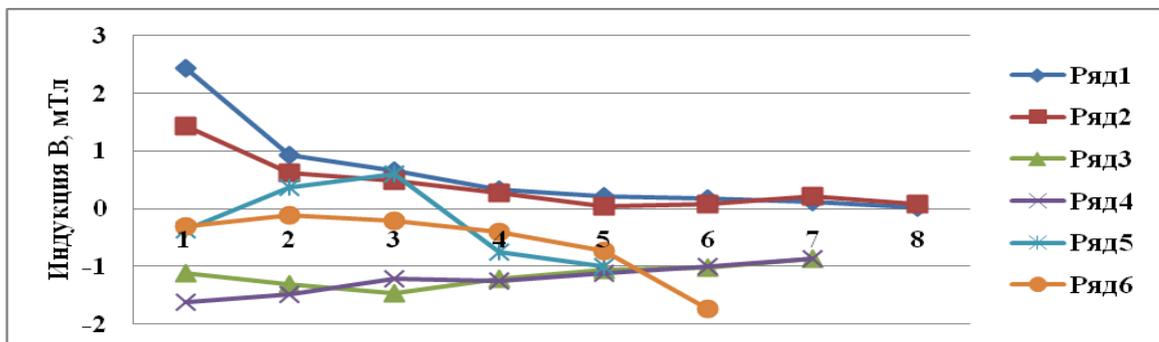
(Рельс марки Р50; $B_1[n] - B_6[n]$, индекс соответствует номеру кривой)

Рисунок 4.14 – Кривые распределения магнитной индукции в характерных точках с 1 по 6



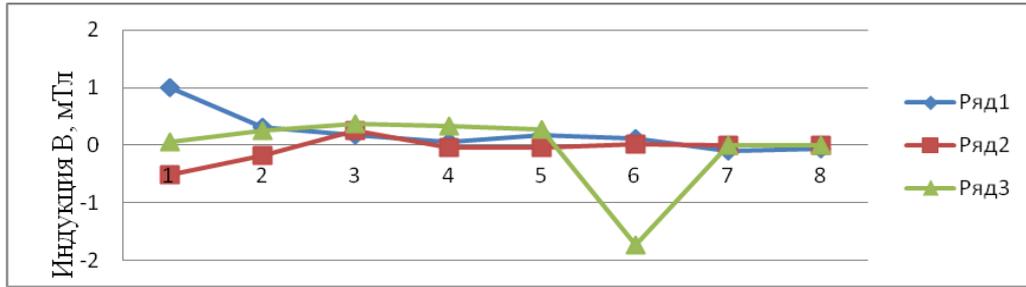
(Рельс марки Р50; 1 – $\Delta B_{12}[n]$ головки рельса; 2 – $\Delta B_{34}[n]$ шейки рельса; 3 – $\Delta B_{56}[n]$ подошвы рельса)

Рисунок 4.15 – Кривые распределения разностей абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6



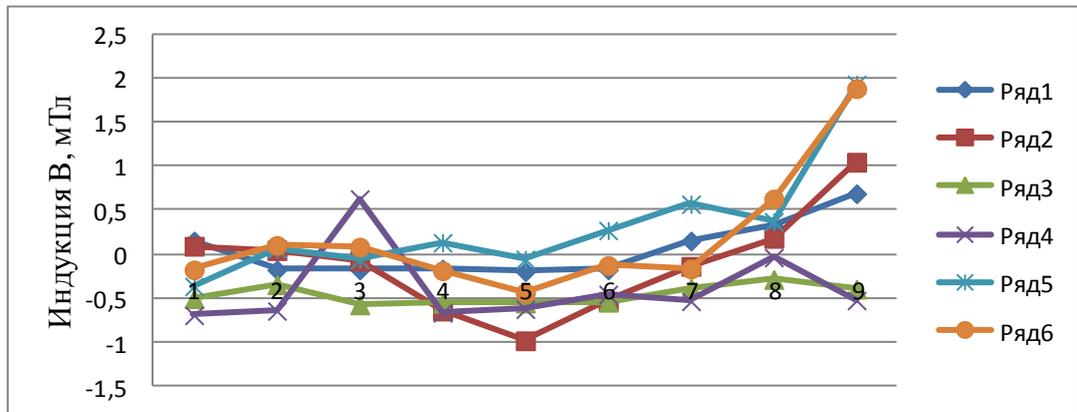
(Рельс марки Р65; $B_1[n] - B_6[n]$, индекс соответствует номеру кривой)

Рисунок 4.16 – Кривые распределения магнитной индукции в характерных точках с 1 по 6



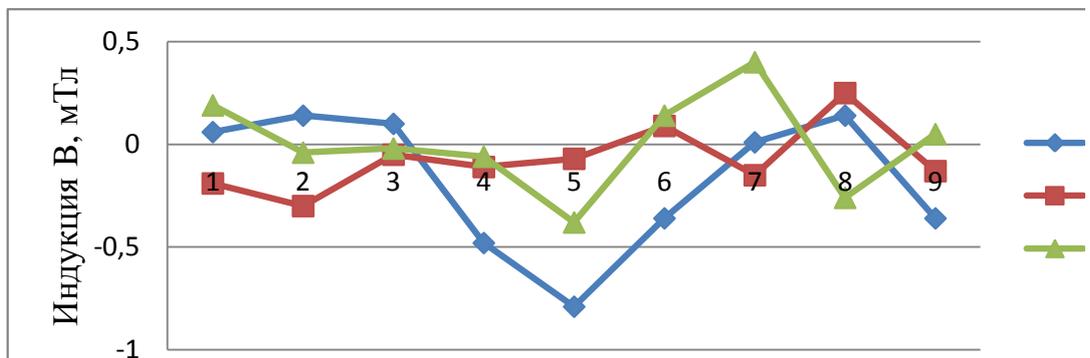
(Рельс марки Р65; 1 – $\Delta V_{12}[n]$ головки рельса; 2 – $\Delta V_{34}[n]$ шейки рельса; 3 – $\Delta V_{56}[n]$ подошвы рельса)

Рисунок 4.17 – Кривые распределения разностей абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6



(Рельс марки Р65; $V_1[n] - V_6[n]$, индекс соответствует номеру кривой)

Рисунок 4.18 – Кривые распределения магнитной индукции в характерных точках с 1 по 6



(Рельс марки Р65; 1 – $\Delta V_{12}[n]$ головки рельса; 2 – $\Delta V_{34}[n]$ шейки рельса; 3 – $\Delta V_{56}[n]$ подошвы рельса)

Рисунок 4.19 – Кривые распределения разностей абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6

Во всех экспериментах магнитная индукция измерялась в характерных точках, Рисунок 4.2. Характерные точки 3 и 4 лежат на следах плоскости ЦТ, проходящей через центры тяжести фигуры поперечного сечения рельса и боковой поверхности шейки рельса.

Как отмечалось в главе 3, следы нулевой линии магнитной индукции НЛ и следы плоскости ЦТ для сечений рельса с однородными свойствами материала и отсутствии механических напряжений практически совпадают, так кривые магнитной индукции $B_3[n]$ и $B_4[n]$ для сравнительно нового рельса (Рисунок 4.11) практически совпали с следом плоскости ЦТ (осью абсцисс), т.е. их значения равны нулю.

Для образцов рельсов, Рисунок 4.13, кривые магнитной индукции $B_3[n]$ и $B_4[n]$ идут ниже оси абсцисс, Рисунок 4.14, Рисунок 4.16 и Рисунок 4.18, следовательно, следы нулевой магнитной индукции на участке контроля сместились на y_0 за счёт остаточного напряжения на участке контроля, параграф 3.5.

Наличие остаточного напряжения на всём участке контроля свидетельствует об усталостных структурных изменениях в материале рельса, вызванных переменной внешней нагрузкой, когда верхние слои металла от следа ЦТ периодически сжимаются, а нижние растягиваются, что привело к структурным изменениям в материале рельса и к последующему излому в районе этих изменений.

Отметим некоторые особенности для образцов рельсов. Кроме изменения структуры материала в образцах относительно горизонтальной оси сечений, наблюдается не симметрия магнитного поля относительно вертикальной оси сечений. Для первого образца рельса Р50, согласно кривых распределения магнитной индукции $B_1[n]$, $B_2[n]$ и кривой распределения разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках сечений головки рельса $\Delta B_{12}[n]$, наблюдается изменение магнитных свойств в первом и втором сечениях по сравнению с остальными сечениями образца, Рисунок 4.14 и Рисунок 4.15.

Для второго образца рельса Р65 (с дефектом в головке рельса), согласно кривых распределения магнитной индукции $B_1[n]$, $B_2[n]$ и кривой распределения разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках голов-

ки рельса $\Delta B_{12}[n]$, наблюдается изменение магнитных свойств материала в первом и втором сечениях. В шестом сечении подошвы рельса, в соответствии с кривыми распределения магнитной индукции в характерных точках 5 и 6 сечений $B_5[n]$, $B_6[n]$ и $\Delta B_{56}[n]$, по сравнению с остальными сечениями образца наблюдаются изменения магнитных свойств, Рисунок 4.16 и Рисунок 4.17.

У третьего образца рельса Р65 (с дефектом в головке рельса) наблюдается изменение магнитных свойств материала в четвёртом и пятом сечениях по сравнению с остальными сечениями образца, которое хорошо прослеживается по кривыми распределения магнитной индукции $B_1[n]$ и $B_2[n]$, а также по кривой распределения разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных точках головки рельса $\Delta B_{12}[n]$, Рисунок 4.18 и Рисунок 4.19.

Из проведённого анализа магнитного контроля трёх образцов следует, что материал образцов рельса значительно изменил свои магнитные свойства.

Следовательно, произошли коренные изменения механических свойств материала образцов, что в итоге привело к изломам рельсов под действием внешней нагрузки.

4.2. Экспериментальная оценка напряжения в образце стальной балки прямоугольного поперечного сечения при изгибе

Реализация и анализ разработанных в главе 3 способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций были проведены на примере изгиба, Рисунок 3.8, стального прямоугольного профиля без дефекта, длительное время используемого в качестве лабораторного образца в универсальном измерительном комплексе по сопротивлению материалов, Рисунок 4.20, [88; 111; 117]. Стальной профиль (накладка) с размерами 92x35x788 мм состоит из центральной части (прямоугольный профиль) с размерами 92x4x250 мм и двух периферийных частей, сталь марки СТ45, Рисунки 4.21– 4.23. При проведении экспериментов использовались универсальный измерительный

комплекс по сопротивлению материалов СМ1, намагничивающая система МСН14 и магнитометр дефектоскопический МФ-23ИМ [88; 126; 127].



Рисунок 4.20 – Универсальный измерительный комплекс по сопротивлению материалов СМ1

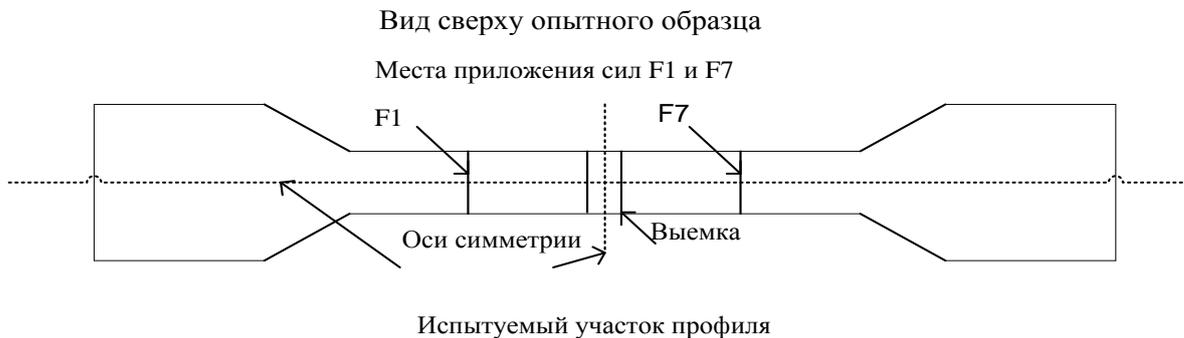
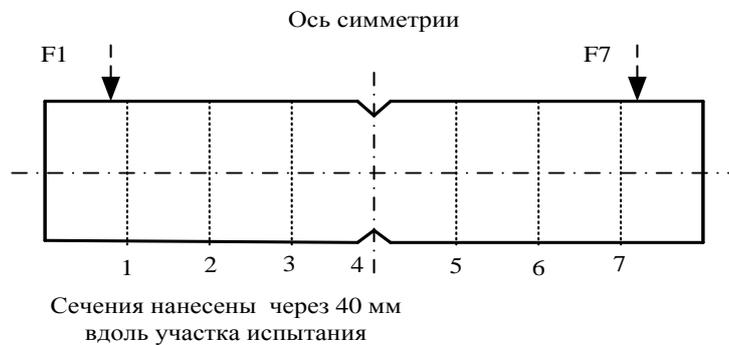


Рисунок 4.21 – Образец с концентратором напряжений (выемкой)



(центральное сечение 4 проходит по концентратору напряжения)

Рисунок 4.22 – Участок контроля образца с wybranными сечениями

С помощью комплекса СМ1 образец закреплялся по концам, сверху образца прикладывалась изгибающая сила $F = F_1 + F_7$, которая делится на две равные части: $F_1 = F_7 = F/2$, сосредоточенные в районе первого и седьмого сечений на расстоянии 125 мм от центра профиля каждая, силы прилагаются по всей ширине профиля, Рисунок 4.21.

Внешняя изгибающая сила F при испытаниях образца может варьироваться. Испытуемый центральный участок образца разбит на семь сечений $n = 1-7$: центральное сечение указано под номером 4, по три сечения слева и справа от центра размечены через 40 мм друг от друга, Рисунок 4.22. По периметру сечений на образце отмечены характерные точки с 1 по 8 для измерения магнитной индукции ($B_1 - B_8$), Рисунок 4.23.

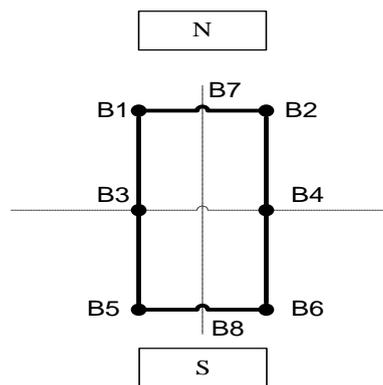
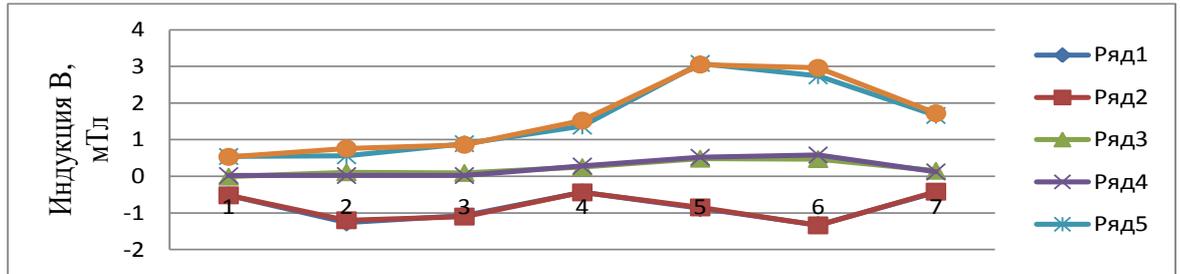


Рисунок 4.23 – Характерные точки сечения на поверхности образца для измерения магнитной индукции

Все эксперименты проведены в пределах упругой деформации образца.

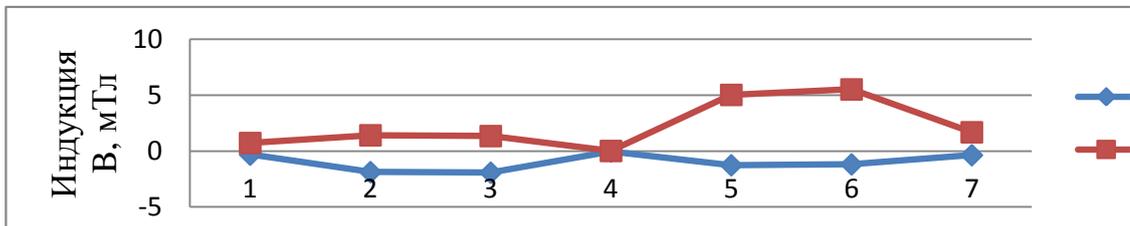
Перед проведением испытаний остаточная намагниченность образца отсутствовала. Образец был намагничен с помощью системы МСН14 по большей оси симметрии геометрической фигуры поперечного сечения образца (вертикальной оси) путём синхронного проведения полюсов магнита (сверху и снизу) вдоль испытуемого участка образца в целях создания симметричной картины магнитного поля относительно осей симметрии прямоугольного сечения, Рисунок 4.23.

В результате экспериментов была измерена магнитная индукция в характерных точках сечений и построены графики её распределения по длине контролируемого участка при отсутствии внешней изгибающей силы $F = 0$ (Рисунки 4.24–4.27), при приложении изгибающей силы $F = 1,5$ кН (Рисунки 4.28–4.31) и при приложении изгибающей силы $F = 3$ кН (Рисунки 4.32–4.35).



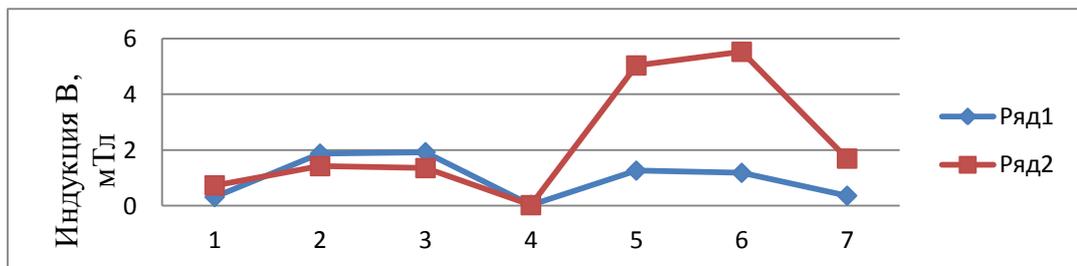
($F = 0$; $V_1[n] - V_6[n]$, индекс соответствует кривой)

Рисунок 4.24 – Распределение магнитной индукции в шести характеристических точках сечения $V_1[n] - V_6[n]$



($F = 0$; $V_7[n]$ и $V_8[n]$, соответствуют кривым 1 и 2)

Рисунок 4.25 – Распределение магнитной индукции в двух характеристических точках сечения образца $V_7[n]$ и $V_8[n]$



($F = 0$; $|V_7[n]|$ и $|V_8[n]|$, соответствуют кривым 1 и 2;)

Рисунок 4.26 – Распределение модулей магнитной индукции в двух характеристических точках сечения профиля по длине образца $|V_7[n]|$ и $|V_8[n]|$

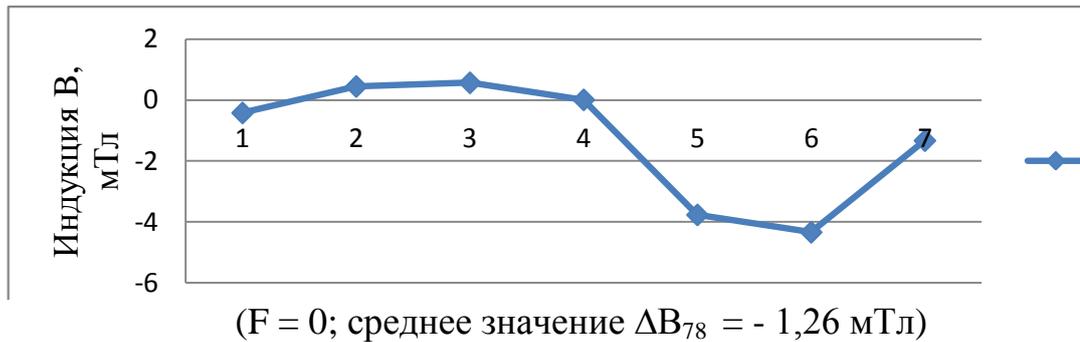


Рисунок 4.27 – Распределение разности модулей магнитной индукции в двух характерных точках сечения $\Delta B_{78}[n]$

Проведём анализ распределения магнитной индукции в шести характерных точках сечений образца, Рисунок 4.23.

Из кривых Рисунка 4.24, Рисунка 4.28 и Рисунка 4.32 следует, что для каждого сечения профиля магнитная индукция в попарно симметричных характерных точках будет практически одинаковой. Так кривые распределения магнитной индукции по длине испытываемого участка в попарно симметричных точках n -го сечения $B_1[n]$ и $B_2[n]$, $B_3[n]$ и $B_4[n]$, $B_5[n]$ и $B_6[n]$ практически совпадают друг с другом.

На Рисунке 4.25, Рисунке 4.29 и Рисунке 4.33 показаны кривые распределения магнитной индукции в характерных точках 7 и 8, которые значительно отличаются по модулю в каждом сечении друг от друга. При этом кривые изменения магнитной индукции в характерных точках любого n -го сечения $B_1[n]$, $B_2[n]$ и $B_7[n]$, практически совпадают друг с другом, также как и кривые распределения магнитной индукции в характерных точках n -го сечения $B_5[n]$, $B_6[n]$ и $B_8[n]$ практически совпадают между собой.

Характерные точки сечений 1, 2, 7 и 5, 6, 8 (Рисунок 4.23) принадлежат верхней и нижней плоскостям испытываемого участка образца балки, соответственно. Прямо противоположные знаки у магнитной индукции в характерных точках указанных плоскостей соответствуют двум магнитным полюсам плоскостей. На Рисунке 4.26, Рисунке 4.30 и Рисунке 4.34 представлены кривые распределения их модулей.

В дальнейшем будем рассматривать разность модулей (разность абсолютных значений) магнитной индукции в 7 и 8 характерных точках сечений, как средних представителей верхней и нижней плоскостей профиля, соответственно.

Кривые распределения разности модулей этих значений

$$\Delta B_{78}[n] = |B_7[n]| - |B_8[n]| \quad (4.6)$$

по длине контролируемого участка образца приведены на Рисунке 4.27, Рисунке 4.31 и Рисунке 4.35.

Средние значения разности модулей магнитной индукции в характерных точках на контролируемом участке образца (4.6) вычислялись по формуле [105]:

$$\Delta B_{78} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Delta B_{78}[n], \quad (4.7)$$

где $N = 7$ – число сечений на исследуемом участке.

Анализ кривых распределения магнитной индукции при нулевой изгибающей силе $F = 0$ представленных на Рисунках 4.24–4.27 показывает, что на исследуемом участке образца в стали присутствует остаточное напряжение, при этом распределение его неравномерное.

Так на участках в районе второго, третьего, пятого и шестого сечений ($n = 2, 3, 5, 6$) наблюдается повышенное напряжение в металле по сравнению с напряжениями в остальных сечениях участка. При этом зоны повышенного напряжения не симметричны и смещены в сторону нижней грани образца ($|B_8[n]| > |B_7[n]|$), что хорошо отражено на Рисунке 4.25 и Рисунке 4.26, а также зависимостью (4.6) $\Delta B_{78}[n]$, Рисунок 4.27.

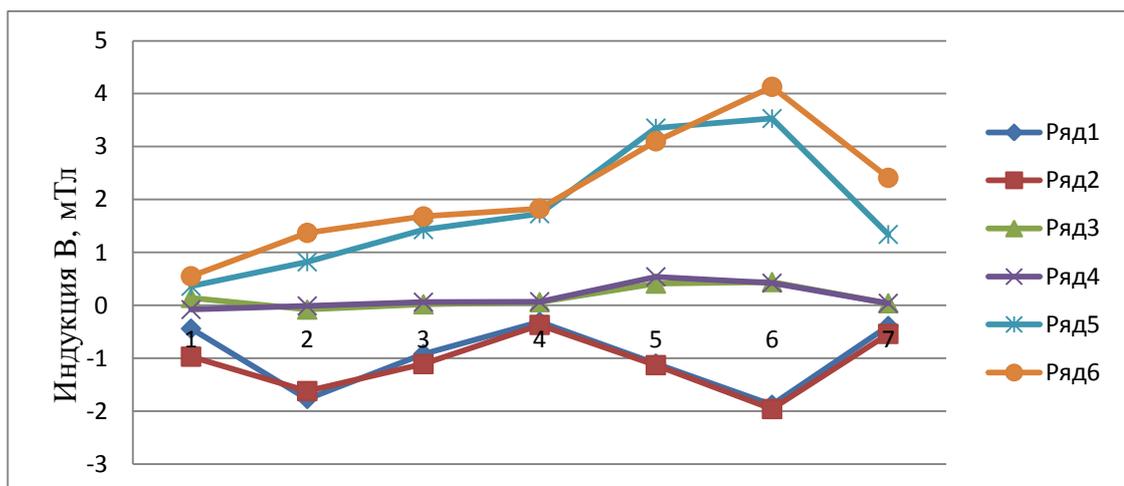
Опытный образец профиля крепится в установке единообразно (не может быть перевернутым), поэтому нижняя часть профиля при проведении экспериментов на лабораторном стенде СМ1 постоянно растягивается, а верхняя часть – сжимается, граница этих разно направленных напряжений в образце проходит по средней линии вдоль образца и должна совпадать в сечениях с горизонтальной линией симметрии. Кроме того, нарушена симметрия магнитного поля по длине контролируемого участка относительно его середины (четвёртого сечения), на которое приходится концентратор напряжения (выемка), Рисунок 4.26, Рисунок 4.27 и Рисунок 4.22. В силу длительного использования образца по назначению,

внутренние остаточные напряжения накопились в нём, что и нашло отражение во внешнем магнитном поле.

Среднее значение разностей модулей магнитной индукции в характерных точках сечений 7 и 8 на контролируемом участке образца, согласно (4.7), равно $\Delta B_{78} = -1,26$ мТл. Связь между средним значением ΔB_{78} и эквивалентной изгибающей силой F_0 , приведшей к начальному напряжению в образце, будет установлена ниже.

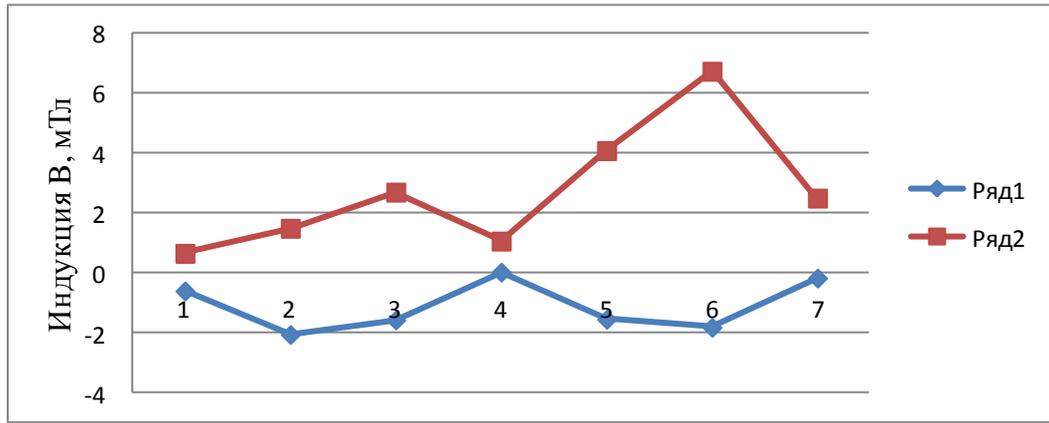
Отметим, что на Рисунке 4.24 кривые под номерами 3 и 4 распределения магнитной индукции $B_3[n]$ и $B_4[n]$ в характерных точках 3 и 4, лежащих на горизонтальной оси симметрии сечения профиля, отклоняются от следа плоскости НП в зону повышенного остаточного напряжения к нижней части образца. Следовательно, следы нулевой магнитной индукции поднялись на величину y_0 от следов плоскости НП на участке контроля, параграф 3.5.

После каждого приложения внешней изгибающей силы $F=1,5$ кН (Рисунки 4.28–4.31) и $F = 3$ кН (Рисунки 4.32–4.35) и создания симметричного магнитного поля после приложения силы, распределение магнитной индукции по длине контролируемого участка образца в характерных точках сечений становится отличным от соответствующего распределения при её отсутствии.



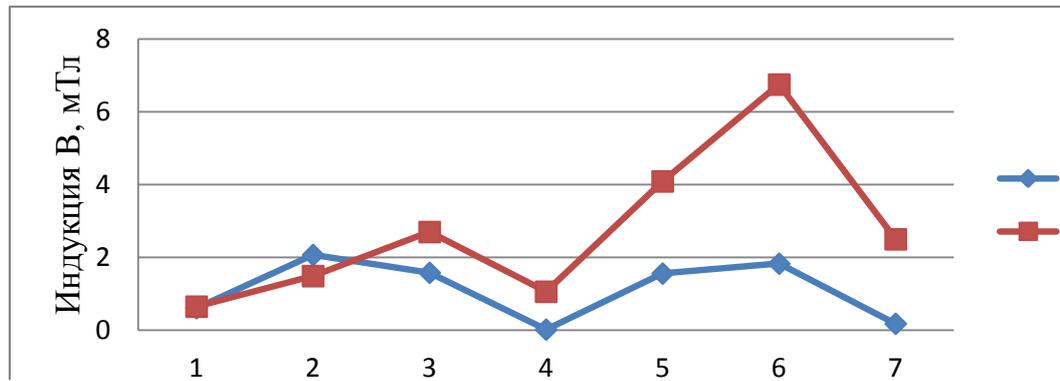
($F = 1,5$ кН; $B_1[n] - B_6[n]$, индекс соответствует номеру кривой)

Рисунок 4.28 – Распределение магнитной индукции в шести характерных точках сечения $B_1[n] - B_6[n]$



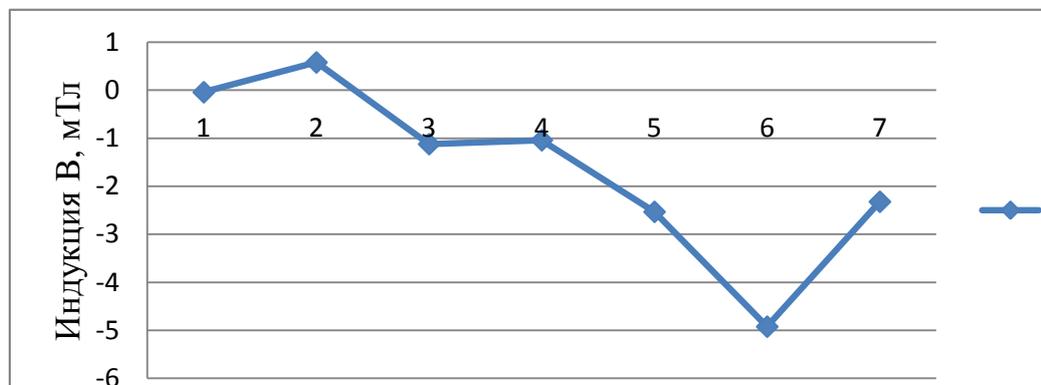
($F = 1,5$ кН; $B_7[n]$ и $B_8[n]$, соответствуют кривым 1 и 2)

Рисунок 4.29 – Распределение магнитной индукции в двух характерных точках сечения $B_7[n]$ и $B_8[n]$



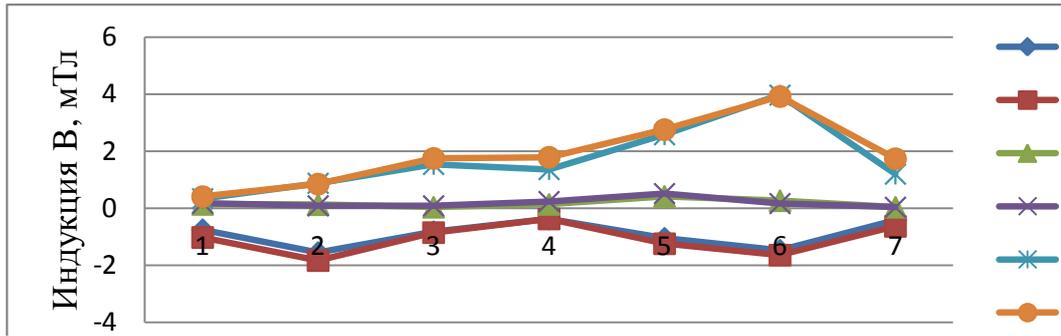
($F = 1,5$ кН; $|B_7[n]|$ и $|B_8[n]|$, соответствуют кривым 1 и 2)

Рисунок 4.30 – Распределение модулей магнитной индукции в двух характерных точках сечения $|B_7[n]|$ и $|B_8[n]|$



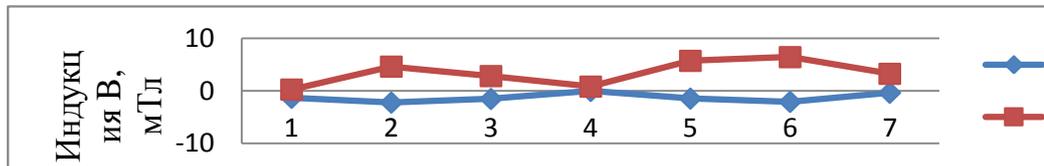
($F = 1,5$ кН; среднее значение равно $\Delta B_{78} = -1,63$ мТл)

Рисунок 4.31 – Распределение разности модулей магнитной индукции в двух характерных точках сечения $\Delta B_{78}[n]$



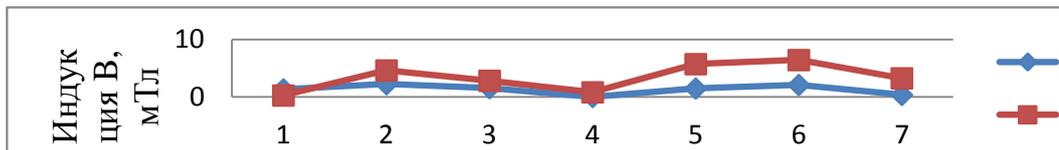
($F = 3$ кН; $V_1[n] - V_6[n]$, индекс соответствует номеру кривой)

Рисунок 4.32 – Распределение магнитной индукции в шести характерных точках сечения $V_1[n] - V_6[n]$



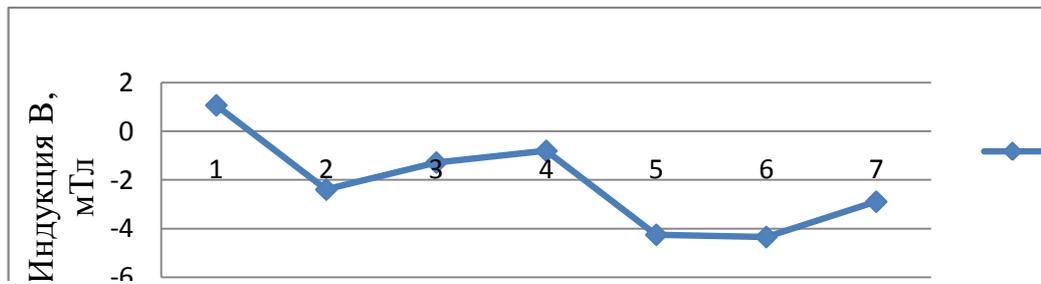
($F = 3$ кН; $V_7[n]$ и $V_8[n]$, соответствуют кривым 1 и 2)

Рисунок 4.33 – Распределение магнитной индукции в двух характерных точках сечения $V_7[n]$ и $V_8[n]$



($F = 3$ кН; $|V_7[n]|$ и $|V_8[n]|$, соответствуют кривым 1 и 2)

Рисунок 4.34 – Распределение модулей магнитной индукции в двух характерных точках сечения $|V_7[n]|$ и $|V_8[n]|$



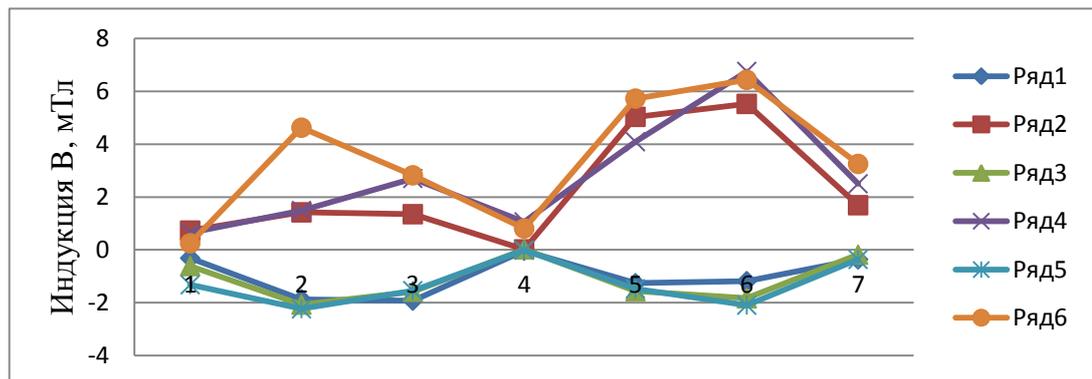
($F = 3$ кН; среднее значение равно $\Delta V_{78} = -2,13$ мТл)

Рисунок 4.35 – Распределение разности модулей магнитной индукции в двух характерных точках сечения $\Delta V_{78}[n]$

По кривым Рисунка 4.36 и Рисунка 4.37 видно распределение внутреннего напряжения по длине профиля в зависимости от приложенной изгибающей силы F , с учётом начального (остаточного) напряжения на контролируемом участке профиля. Из кривых распределения разности модулей магнитной индукции в двух характерных точках сечения профиля 7 и 8 по длине контролируемого участка образца полученных по выражению (4.6) $\Delta B_{78}[n]$: 1 – при $F = 0$ кН; 2 – при $F = 1,5$ кН; 3 – при $F = 3$ кН следует, что средние значения разности на контролируемом участке профиля согласно (4.7) равны, соответственно:

$$\Delta B_{78} = -1,26; -1,63 \text{ и } -2,13 \text{ мТл.} \quad (4.8)$$

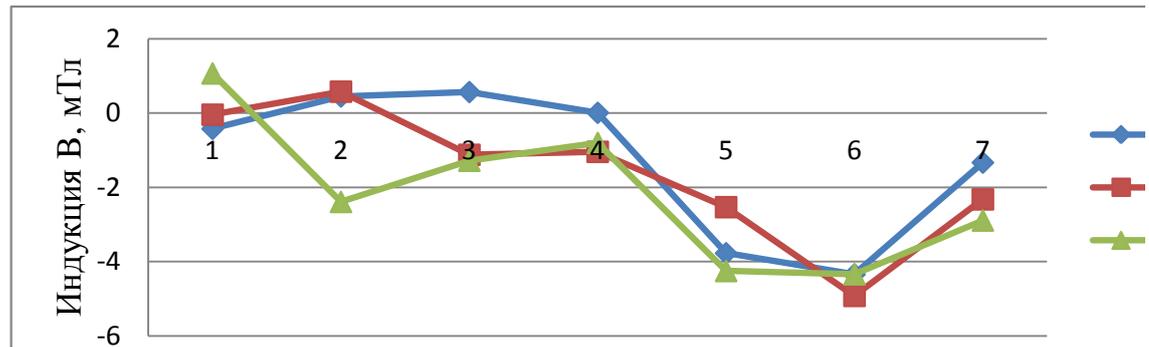
Наблюдается возрастание по абсолютной величине разности модулей магнитной индукции в двух характерных точках сечения профиля ΔB_{78} по мере приложения всё большей по величине изгибающей силы.



(1 – $B_7[n]$ и 2 – $B_8[n]$ при $F = 0$; 3 – $B_7[n]$ и 4 – $B_8[n]$ при $F = 1,5$ кН;
5 – $B_7[n]$ и 6 – $B_8[n]$ при $F = 3$ кН)

Рисунок 4.36 – Кривые распределения магнитной индукции $B_7[n]$ и $B_8[n]$ в зависимости от величины приложенной изгибающей силы

Найдём аналитическую зависимость между изгибающей силой F и средним приращением разности модулей магнитной индукции в выбранных характерных точках сечения 7 и 8, а также сделаем оценку эквивалентной изгибающей силы F_0 , которая привела к среднему остаточному максимальному напряжению на рассматриваемом участке образца, параграф 3.4.



(1 – $\Delta B_{78}[n]$ при $F = 0$; 2 – $\Delta B_{78}[n]$ при $F = 1,5$ кН; 3 – $\Delta B_{78}[n]$ при $F = 3$ кН)

Рисунок 4.37 – Кривые распределения разности модулей магнитной индукции в двух характерных точках сечения профиля по длине образца $\Delta B_{78}[n]$ при разной по величине изгибающей силы $F = 0; 1,5; 3$ кН

Проведём анализ экспериментальных данных с целью определения зависимости между средним максимальным напряжением в наружных слоях образца и изменением средней разности магнитной индукций ΔB_{78} в характерных точках 7 и 8, определяемой по выражению (4.7), и следующим соотношением:

$$\delta B_{78} = |\Delta B_{78}| - |\Delta B_{78}(0)|, \quad (4.9)$$

где δB_{78} – приращение средней разности модуля магнитной индукции $|\Delta B_{78}|$ по отношению к начальной средней разности модуля магнитной индукции $|\Delta B_{78}(0)|$;

$\Delta B_{78}(0)$ – средняя разность модулей магнитной индукции в характерных точках 7 и 8 при отсутствии внешней изгибающей силы $F=0$, т.е. средняя начальная разность модулей магнитной индукции в характерных точках, характеризующее среднее остаточное максимальное напряжение на контролируемом участке образца, параграфы 3.3 и 3.4.

Введём относительное приращение средней разности магнитной индукции в характерных точках ΔB^*_{78} для оценки величины средних приращений $|\Delta B_{78}|$ по отношению к начальному приращению $|\Delta B_{78}(0)|$ при изменении внешней изгибающей силы:

$$\Delta B^*_{78} = |\Delta B_{78}| / |\Delta B_{78}(0)|. \quad (4.10)$$

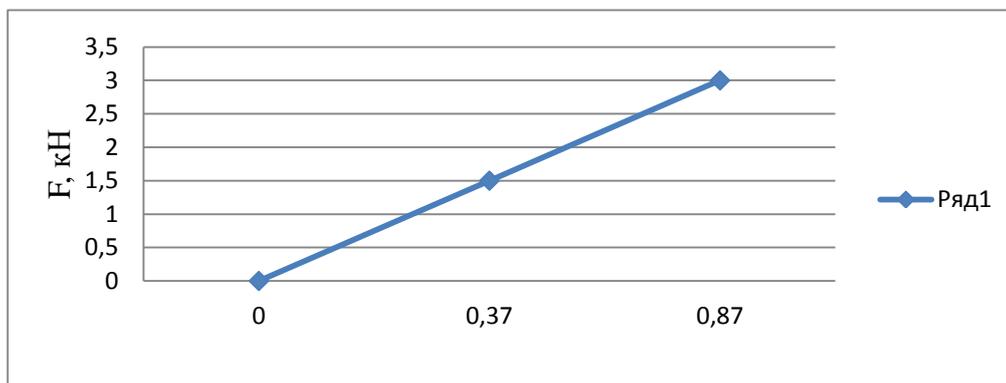
Экспериментальные данные (4.8) и вычисленные показатели (4.9) и (4.10) приведены в Таблице 4.1.

Из четвёртого столбца Таблицы 4.1 следует, что относительное приращение средней разности магнитной индукции в характерных точках ΔB^*_{78} в процентном отношении довольно значительно, и составляет 29% и 69% при $F = 1,5$ кН и $F = 3$ кН, соответственно, что говорит о хорошей информативности значений магнитной индукции в выбранных характерных точках.

Таблица 4.1 - Экспериментальные данные и вычисленные показатели

F	$\Delta B_{78} = B_7 - B_8 $	$\delta B_{78} = \Delta B_{78} - \Delta B_{78}(0) $	$\Delta B^*_{78} = \Delta B_{78} / \Delta B_{78}(0)$
кН	мТл	мТл	-
0	-1,26	0	1
1,5	-1,63	0,37	1,29
3	-2,13	0,87	1,69

На Рисунке 4.38 приведён график зависимости внешней изгибающей силы F от δB_{78} , построенный по данным Таблицы 4.1.



(Масштаб оси ординат указан в кН, абсцисс – в мТл)

Рисунок 4.38 – Экспериментальная зависимость $F(\delta B_{78})$

Экспериментальная зависимость $F(\delta B_{78})$ Рисунка 4.38 близка к линейной зависимости, см. раздел 2.2. Установим аналитическую зависимость $F(\delta B_{78})$ внешней изгибающей силы F от приращения δB_{78} .

Выберем аппроксимирующую функцию в виде степенного полинома

$$F = K_1 \delta B_{78} + K_2 \delta B_{78}^3, \quad (4.11)$$

где коэффициент K_1 выступает в роли основного, а коэффициент K_2 – корректирующего.

По двум точкам экспериментальной кривой Рисунка 4.38 с координатами точек $(\delta B_{78}; F)$: т.1 – (0,37;1,5) и т.2 – (0,87;3) составим систему из двух уравнений, согласно (4.11):

$$1,5 = 0,37K_1 + 0,37^3 K_2, \quad (4.12)$$

$$3 = 0,87K_1 + 0,87^3 K_2, \quad (4.13)$$

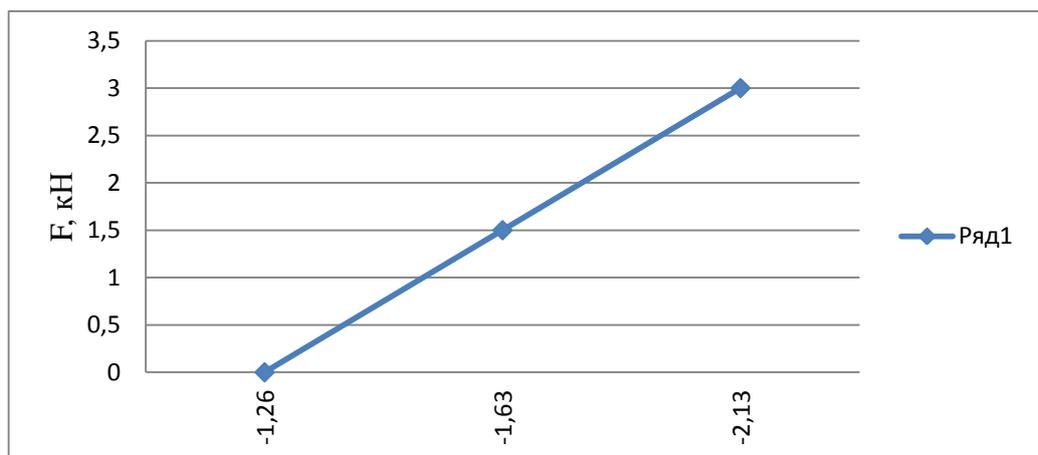
из решения системы уравнений найдём коэффициенты $K_1 = 4,19$ кН/мТл и $K_2 = - 0,98$ кН/мТл³.

С учётом найденных коэффициентов степенная функция (4.11) примет вид:

$$F = 4,19 \delta B_{78} - 0,98 \delta B_{78}^3. \quad (4.14)$$

Используя аппроксимирующую функцию (4.14) можно определить внешнюю изгибающую силу F без учёта остаточного напряжения в образце по приращению разности магнитной индукции в диапазоне от 0 до 0,87 мТл.

На Рисунке 4.39 приведён график зависимости изгибающей силы F от средней разности магнитной индукции ΔB_{78} , построенный по данным Таблицы 4.1.



(Масштаб оси ординат указан в кН, абсцисс – в мТл)

Рисунок 4.39 – Экспериментальная зависимость внешней изгибающей силы от средней разности магнитной индукции в характерных точках $F(\Delta B_{78})$

Аппроксимируем экспериментальную зависимость внешней изгибающей силы от средней разности индукции $F(\Delta B_{78})$, приведённой на Рисунке 4.39, линейной функцией, Рисунок 3.7:

$$F = F_0 + K\Delta B_{78}, \quad (4.15)$$

где F_0 – изгибающая сила, отвечающая за начальное напряжённое состояние балки;

K – магнитоупругий коэффициент.

Силу F_0 можно трактовать, как эквивалент средней изгибающей силы, которая привела симметричное магнитное поле не нагруженного образца (без внутренних напряжений на контролируемом участке) к не симметрии магнитного поля, сделав среднюю разность магнитной индукции в характерных точках $\Delta B_{78}(0)$ не равной нулю, параграф 3.3. По двум точкам экспериментальной кривой Рисунка 4.39 с координатами точек $(\Delta B_{78}; F)$: т.1 – (– 1,26; 0) и т.2 – (– 2,13; 3) определим числовые значения F_0 и K . Составим систему из двух уравнений для выбранных точек:

$$0 = F_0 - 1,26 K; \quad (4.16)$$

$$3 = F_0 - 2,13 K. \quad (4.17)$$

Решим систему уравнений (4.16)–(4.17) относительно неизвестных $F_0 = -4,34$ кН и $K = -3,45$ кН/мТл, и подставим в выражение (4.15):

$$F = -4,34 - 3,45\Delta B_{78}. \quad (4.18)$$

Из зависимости (4.18) следует, что среднее остаточное максимальное напряжение в образце будет пропорционально эквивалентной изгибающей силе $|F_0| = 4,34$ кН.

В горизонтальной плоскости сечений образца, согласно экспериментальным кривым магнитной индукции в характерных точках при нулевой внешней изгибающей силе $F = 0$ такого эффекта не наблюдается, Рисунок 4.24. Действительно, как указывалось выше, разность магнитной индукции в соответствующих характерных попарно симметричных точках сечений образца по его длине ΔB_{12} , ΔB_{34} и ΔB_{56} практически будут равны нулю, Рисунок 4.24. В этом случае экспериментальные кривые Рисунка 4.24 можно рассматривать как следы трёх плоскостей

распределения остаточного напряжения в материале образца по его длине, параграф 3.5.

Полученная аппроксимирующая функция (4.18) описывает зависимость $F(\Delta B_{78})$ для участка от начальной точки $(-1,26; 0)$ и до точки $(-2,13; 3)$, Рисунок 4.39. Оценим точность аппроксимирующей функции (4.18) для средней экспериментальной точки $(-1,63; 1,5)$, Рисунок 4.39:

$$F = -4,34 - 3,45\Delta B_{78} = -4,34 - 3,45(-1,63) = 1,28 \text{ кН.} \quad (4.19)$$

В этом случае, относительная ошибка не будет превышать 15%-ти для всего участка контроля образца при использовании аппроксимирующей функции (4.18) при определении изгибающей силы F по среднему отклонению магнитной индукции ΔB_{78} на контролируемом участке образца.

Найдём среднее максимальное напряжение на контролируемом участке образца. Согласно (4.15) определим среднюю суммарную (результатирующую) изгибающую силу F^* , создающую напряжение в материале образца

$$F^* = F - F_0 = K\Delta B_{78}. \quad (4.20)$$

Среднее максимальное напряжение на участке контроля образца можно определить из выражений, приведённых в параграфах 3.3 и 3.4:

$$\sigma_m^* = \frac{3a}{bh^2}F^*, \quad (4.21)$$

где b и h размеры сечения балки, Рисунок 3.4;

a – расстояние от опоры до места приложения силы, Рисунок 3.8.

Среднее максимальное напряжение σ_m^* на участке контроля образца балки можно найти, подставив (4.20) в (4.21), или по выражению (3.43):

$$\sigma_m^* = \frac{3a}{bh^2}K\Delta B_{78} = k\Delta B_{78}. \quad (4.22)$$

Для данных $b = 4 \cdot 10^{-3}$ м; $h = 92 \cdot 10^{-3}$ м; $a = 250 \cdot 10^{-3}$ м и $K = 3,45 \cdot 10^6$ Н/Тл коэффициент k примет значение:

$$k = \frac{3a}{bh^2}K = 76413 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{Тл м}^2}. \quad (4.23)$$

Тогда, среднее максимальное напряжение σ_m^* , с учётом остаточного напряжения можно найти из выражения (4.22):

$$\sigma_m^* = 76413 \cdot 10^6 \Delta B_{78}. \quad (4.24)$$

Оценим значения среднего максимального напряжения σ_m^* , по выражению (4.24) при изменении внешней изгибающей силы:

$$\sigma_m^*(0) = 96,28 \text{ МПа, при } F = 0 \text{ и } \Delta B_{78} = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}; \quad (4.25)$$

$$\sigma_m^* = 124,56 \text{ МПа, при } F = 1,5 \text{ кН и } \Delta B_{78} = 1,63 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}; \quad (4.26)$$

$$\sigma_m^* = 162,77 \text{ МПа, при } F = 3 \text{ кН и } \Delta B_{78} = 2,13 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}. \quad (4.27)$$

Среднее максимальное напряжение от внешней силы без учёта значения остаточного напряжения (4.25) и с учётом значений (4.26) и (4.27) определится, как разность напряжений:

$$\sigma_m^* - \sigma_m^*(0) = 124,56 - 96,28 = 28,28 \text{ МПа, при } F = 1,5 \text{ кН}; \quad (4.28)$$

$$\sigma_m^* - \sigma_m^*(0) = 162,77 - 96,28 = 66,49 \text{ МПа, при } F = 3 \text{ кН}. \quad (4.29)$$

Аналитический расчёт образца при отсутствии остаточного напряжения дал следующие значения максимального напряжения на рассматриваемом участке чистого изгиба [103]:

$$\sigma_m = 33,22 \text{ МПа при } F = 1,5 \text{ кН}; \quad (4.30)$$

$$\sigma_m = 66,44 \text{ МПа при } F = 3,0 \text{ кН}. \quad (4.31)$$

Таким образом, выражения (3.47) или (4.22) позволяют находить результирующее среднее максимальное напряжение в пределах упругих свойств балки при её изгибе, что подтверждается данными определёнными экспериментально (4.25) (4.27) и найденными теоретически (4.30), (4.31).

Аналитическая зависимость (4.22) получена для средних значений максимального напряжения и средней разности модулей магнитной индукции в характерных точках 7 и 8 сечений на контролируемом участке образца.

Для любого сечения на контролируемом участке можно оценить действующее максимальное напряжение в требуемом сечении, используя разность модулей магнитной индукции в характерных точках 7 и 8 для контролируемого сечения по зависимости (3.49):

$$\sigma_m[n] = \frac{3a}{bh^2} K \Delta B_{78}[n] = k \Delta B_{78}[n].$$

4.3. Оценка изгибных напряжений в образце стальной балки прямоугольного поперечного сечения на цифровых моделях

Для исследования была разработана цифровая модель распределения напряжения в образце балки прямоугольного сечения при её плоском изгибе по общепринятой схеме испытаний балки на изгиб [103; 106; 107; 111; 123; 124]. При моделировании использовались параметры образца и схемы эксперимента рассмотренного в предыдущем параграфе, Рисунок 3.8, Рисунок 4.21 и Рисунок 4.22, а также дополнительные рисунки, Рисунки 4.40–4.42.

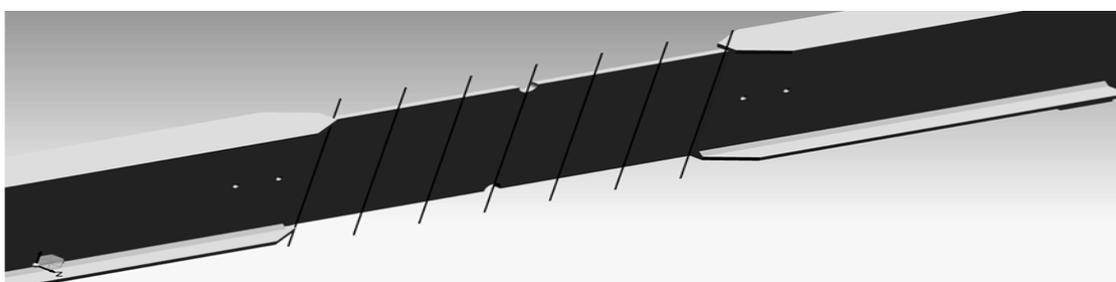
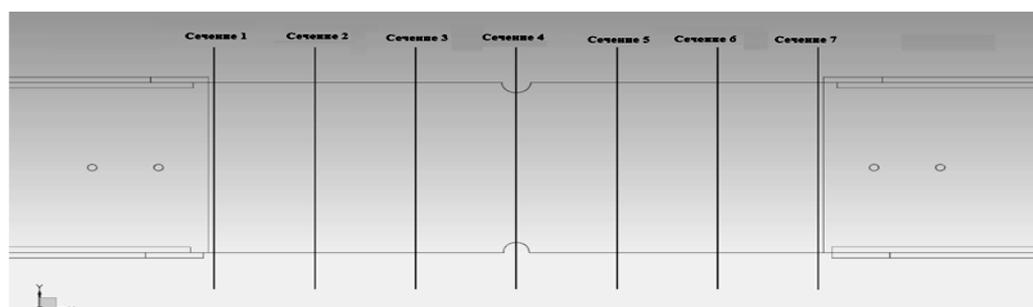


Рисунок 4.40 – Выбор сечений на исследуемом участке образца балки



(Четвёртое сечение проходит по концентратору напряжения)

Рисунок 4.41 – Распределение и нумерация сечений на исследуемом участке образца балки

Выбор сечений на исследуемом участке d образца балки с концентратором напряжений (с выемкой на середине участка) при её изгибе показан на Рисунке 4.40. На Рисунке 4.41 показано равномерное распределение и нумерация сечений на исследуемом участке балки. На Рисунке 4.42 показаны 12 точек замера

напряжения в характерных точках в сечениях на поверхности балки, число которых увеличено на 4 по сравнению с характерными точками Рисунка 4.23. Введение дополнительных промежуточных точек позволяет проследить распределение напряжения в сечениях образца.

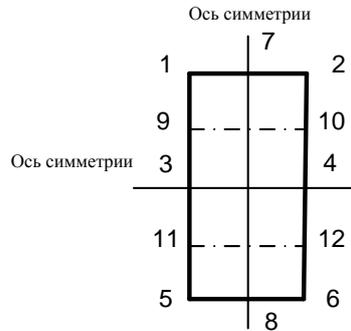
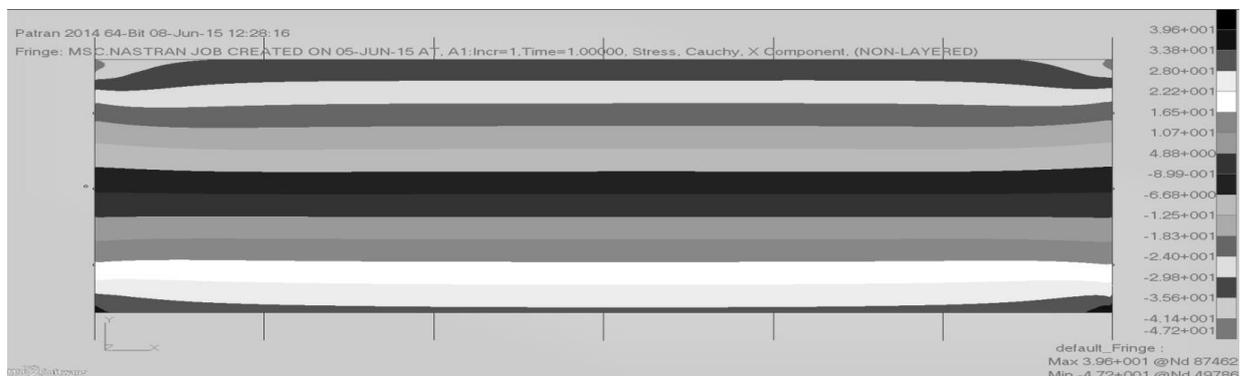


Рисунок 4.42 – Расположение точек замера напряжения в сечениях

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 $F = 3$ кН [107; 111; 123; 124].

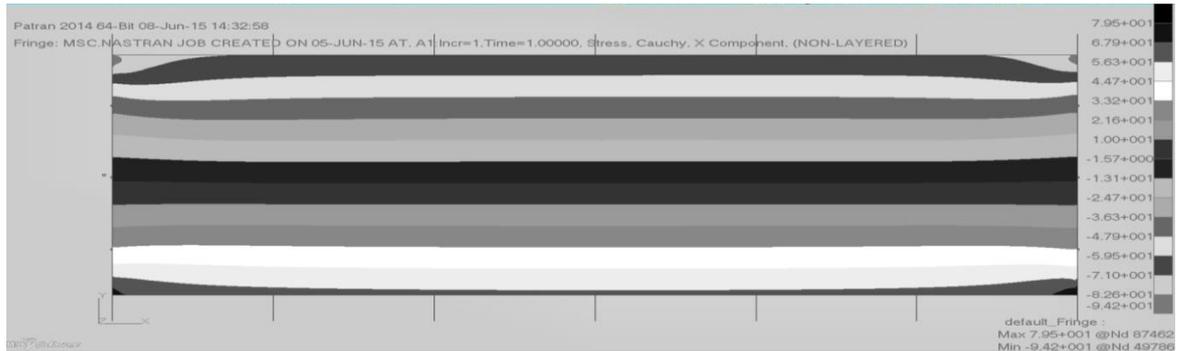
На Рисунке 4.43 и Рисунке 4.44 показаны картины полей распределения нормального напряжения на исследуемом участке образца (без концентратора напряжений).



(Без концентратора напряжений; $F = 1,5$ кН;

в верхней точке $\sigma_m [4] = -34,86$ МПа, в нижней точке $\sigma_m [4] = +29,7$ МПа)

Рисунок 4.43 – Картина распределения нормального напряжения при $F = 1,5$ кН



(Без концентратора напряжений; $F = 3$ кН;

в верхней точке $\sigma_m [4] = -69,74$ МПа, в нижней точке $\sigma_m [4] = +59,4$ МПа)

Рисунок 4.44 – Картина распределения нормального напряжения при $F = 3$ кН

В Таблице 4.2 и Таблице 4.3 приведены значения нормального напряжения в 8-ми характерных точках, Рисунок 4.42, при $F = 1,5$ кН и $F = 3$ кН, соответственно.

Таблица 4.2 – Напряжение в 8-ми характерных точках сечений при $F = 1,5$ кН

Нормальное напряжение σ в характерных точках сечения	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	σ_8
Изгибающая сила $F=3$ кН	МПа							
Сечение 1	-39,3	-44,8	-1,18	-1,71	30,8	35,6	-39,5	32,3
Сечение 2	-33,6	-35,3	-1,69	-2,20	29,7	30,2	-34,4	29,9
Сечение 3	-34,4	-35,2	-1,73	-2,26	29,9	29,6	-34,8	29,7
Сечение 4	-34,5	-35,2	-1,81	-2,15	29,9	29,5	-34,9	29,7
Сечение 5	-34,3	-35,1	-1,76	-2,23	29,8	29,5	-34,7	29,6
Сечение 6	-33,6	-35,0	-1,88	-2,27	29,5	30,1	-34,3	29,8
Сечение 7	-39,7	-43,2	-1,35	-1,73	34,6	38,1	-40,0	35,4

На Рисунке 4.45 приведено распределение нормального напряжения в сечениях балки (без концентратора напряжений) при нагрузке $F = 1,5$ кН.



Рисунок 4.45 – Распределение нормального напряжения в 4-ом сечении балки при $F = 1,5$ кН

Таблица 4.3 – Напряжения в 8-ми характерных точках сечений при $F = 3$ кН

Нормальное напряжение σ в характерных точках сечения	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	σ_8
Изгибающая сила $F=1,5$ кН	МПа							
Сечение 1	- 78,8	- 89,4	- 2,34	- 3,45	61,8	71,5	- 69	64,9
Сечение 2	- 67,1	- 70,7	- 3,28	- 4,42	59,6	60,5	- 68,9	59,6
Сечение 3	- 68,6	- 70,5	- 3,32	- 4,57	60,0	59,2	- 69,6	59,6
Сечение 4	- 68,9	- 70,5	- 3,28	- 4,23	60,0	59,0	- 69,7	59,4
Сечение 5	- 68,6	- 70,3	- 3,39	- 4,49	59,8	59,1	- 69,4	59,4
Сечение 6	- 67,1	- 70,2	- 3,49	- 4,32	59,3	60,3	- 68,7	59,8
Сечение 7	- 79,7	- 86	- 2,71	- 3,4	69,3	76,6	- 80	71,1

На Рисунке 4.46 показаны зоны нормального напряжения по сечениям образца в соответствии с данными Таблицы 4.3. Из картин распределения нормального напряжения Рисунка 4.43 и Рисунка 4.44 следует, что поле напряжений практически неизменно между вторым и шестым сечениями. Поданным Таблицы 4.2 и Таблицы 4.3, а также согласно Рисунка 3.11, Рисунков 4.42–4.45 хорошо прослеживаются плоскости равных напряжений.

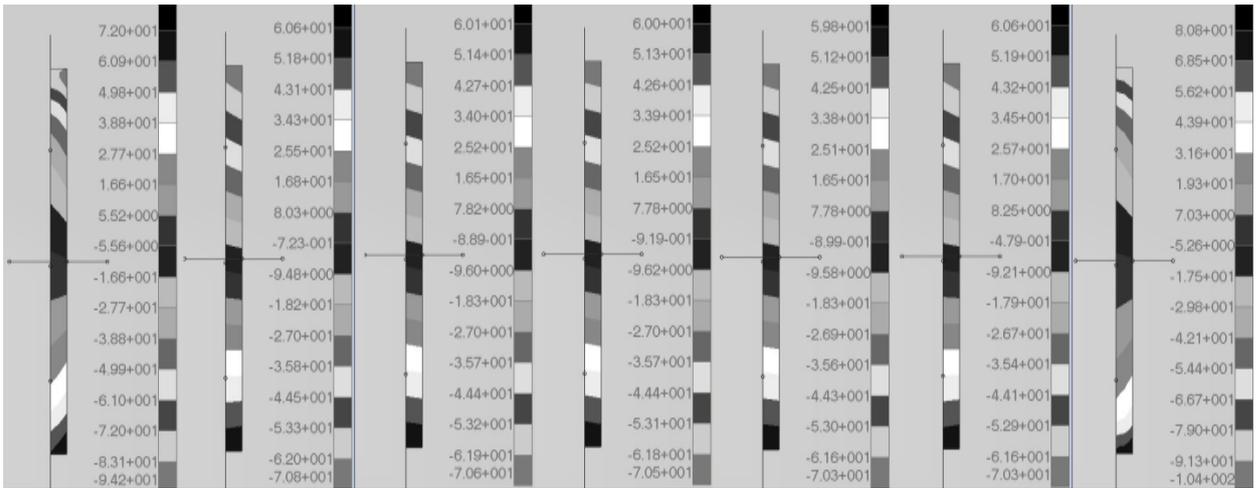


Рисунок 4.46 – Зоны нормального напряжения по сечениям образца при $F = 3$ кН

При отсутствии остаточного напряжения в образце, были сняты значения максимального напряжения на рассматриваемом участке чистого изгиба для четвёртого (среднего) сечения. При внешней изгибающей силе $F = 1,5$ кН и $F = 3$ кН значения максимального напряжения на поверхности образца равны, Таблица 4.2 и Таблица 4.3:

при $F = 1,5$ кН в точке «А» (верхняя точка) $\sigma_m [4] = - 34,86$ МПа и в точке «В» (нижняя точка) $\sigma_m [4] = + 29,7$ МПа, среднее абсолютное значение равно

$$\sigma_m^* = 32,6 \text{ МПа}; \quad (4.32)$$

при $F = 3$ кН в точке «А» (верхняя точка) $\sigma_m [4] = - 69,74$ МПа и в точке «В» (нижняя точка) $\sigma_m [4] = + 59,4$ МПа, среднее абсолютное значение равно

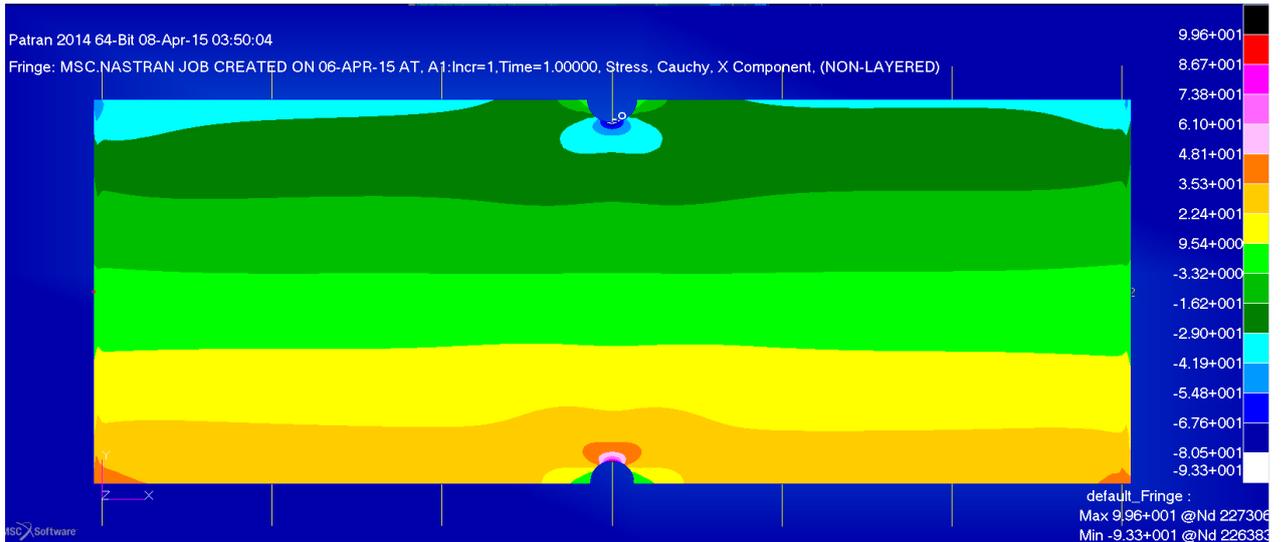


Рисунок 4.47 – Картина распределения нормального напряжения на участке образца с концентратором напряжений при изгибающей силе $F = 1,5 \text{ кН}$

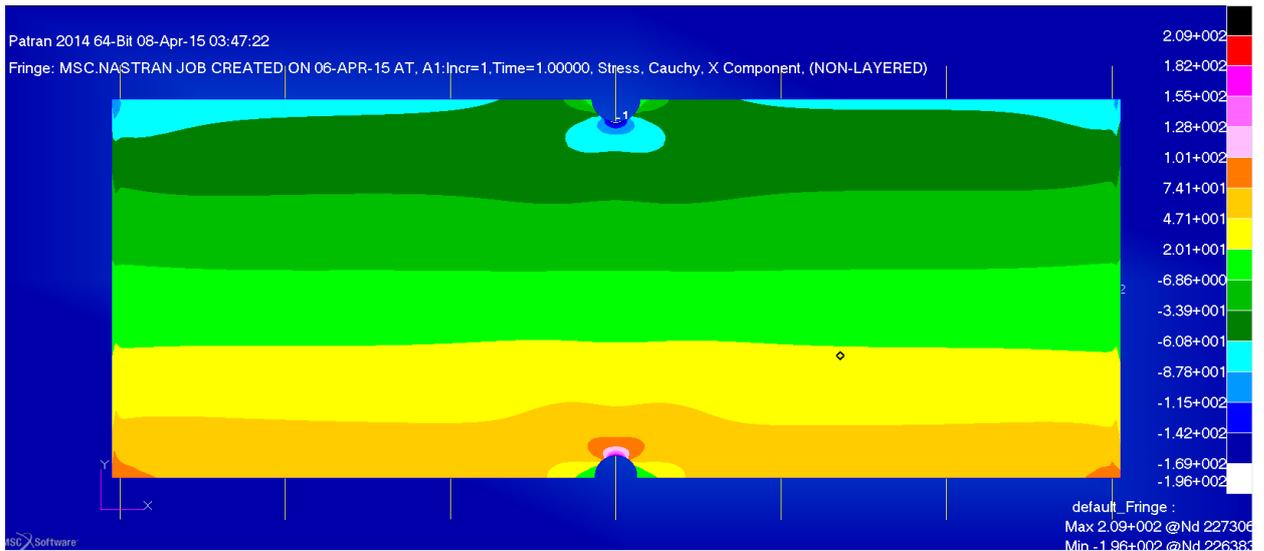


Рисунок 4.48 – Картина распределения нормального напряжения на участке образца с концентратором напряжений при изгибающей силе $F = 3,0 \text{ кН}$

В Таблицах 4.4 и 4.5 помещены значений нормального напряжения в восьми характерных точках сечения образца (с 1 по 8) при тех же значениях изгибающей силы. Картины распределения нормального напряжения на Рисунке 4.47 и Рисунке 4.48 показывают резкое увеличение напряжения в районе четвертого сечения, приходящееся на центр концентратора напряжений.

Таблица 4.4 – Напряжения в характерных точках сечения при $F = 1,5$ кН

Нормальное напряжение σ в характерных точках сечения	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	σ_8
Изгибающая сила $F=1,5$ кН	МПа							
Сечение 1	- 35,8	- 41,4	0,604	0,304	35	39,3	- 35,9	36,2
Сечение 2	- 31	- 32,3	0,25	0,014	32	32,9	-31,6	32,5
Сечение 3	- 30,7	- 31,1	-0,48	-0,624	31,1	31,2	- 30,9	31,2
Сечение 4	- 89,7	- 89,9	-0,243	-0,287	95	95	- 93,3	99,6
Сечение 5	- 30	- 30,1	-0,601	-0,538	30,2	30,4	- 30	30,3
Сечение 6	- 29,5	- 30,3	0,4	0,31	30,2	31,3	- 29,9	30,7
Сечение 7	- 33,3	- 36,5	0,066	0,044	35,7	39,4	- 33,6	36,6

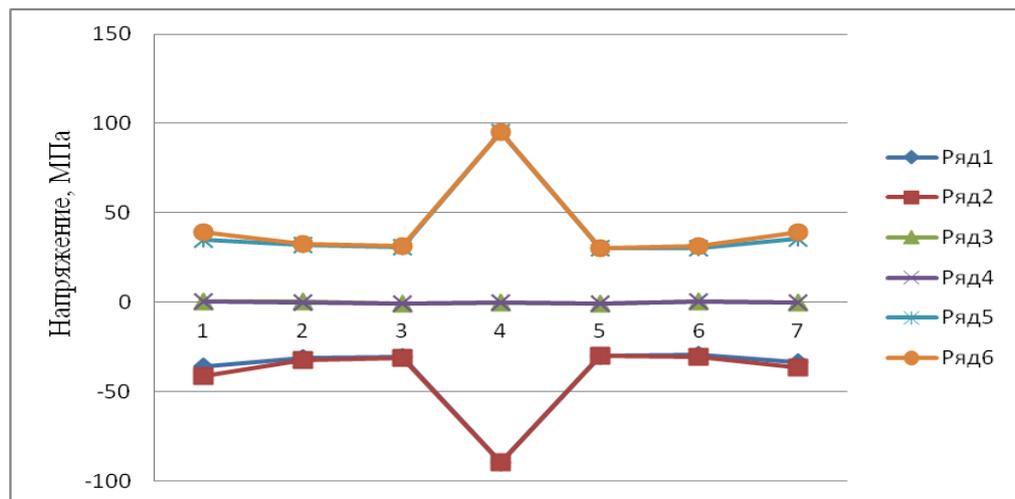
Таблица 4.5 – Напряжения в характерных точках сечения при $F = 3$ кН

Нормальное напряжение σ в характерных точках сечения	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	σ_8
Изгибающая сила $F=3$ кН	МПа							
Сечение 1	-74,2	-85,4	1,35	1,35	71,6	81,9	-74,4	74,7
Сечение 2	-64,4	-67	-0,611	-0,419	66,4	68,4	-65,7	67,4
Сечение 3	-61,1	-64,8	1,57	1,35	65	65,2	-64,5	65,1
Сечение 4	-188	-189	2,09	1,91	199	199	-196	209
Сечение 5	-63,1	-63,6	1,41	1,33	63,8	64	-63,4	63,9
Сечение 6	-62,4	-64,4	0,368	0,469	64,2	66,1	-63,4	65,1
Сечение 7	-71,2	-78,1	1,04	1,8	76,7	83,9	-72	78,3

На Рисунках 4.49 и 4.50 показано распределение напряжения по сечениям в 8-ми характерных точках на исследуемом участке образца.

Из данных Таблиц 4.4 и 4.5 следует, что в четвёртом сечении нормальное напряжение превышает в 2–3 раза соответствующие напряжения в характерных точках верхней (1,2 и 7) и нижней (5,6 и 8) плоскостей образца.

В натурном эксперименте в параграфе 4.2 четвёртое сечение также приходилось на концентратор напряжения, при этом значение магнитной индукции внутри концентраторов напряжений на поверхности образца было минимальным, в силу нарушения сплошности поверхностей контроля, вызвавшее нарушение симметрии магнитного поля по сравнению с остальными сечениями, Рисунки 4.24– 4.30. После исключения значений магнитной индукции четвёртого сечения, получим средние значения нормального напряжения на контролируемом участке образца близкие с результатами моделирования без концентратора напряжений и с результатами эксперимента.



($\sigma_1[n] - \sigma_6[n]$, индекс соответствует номеру кривой)

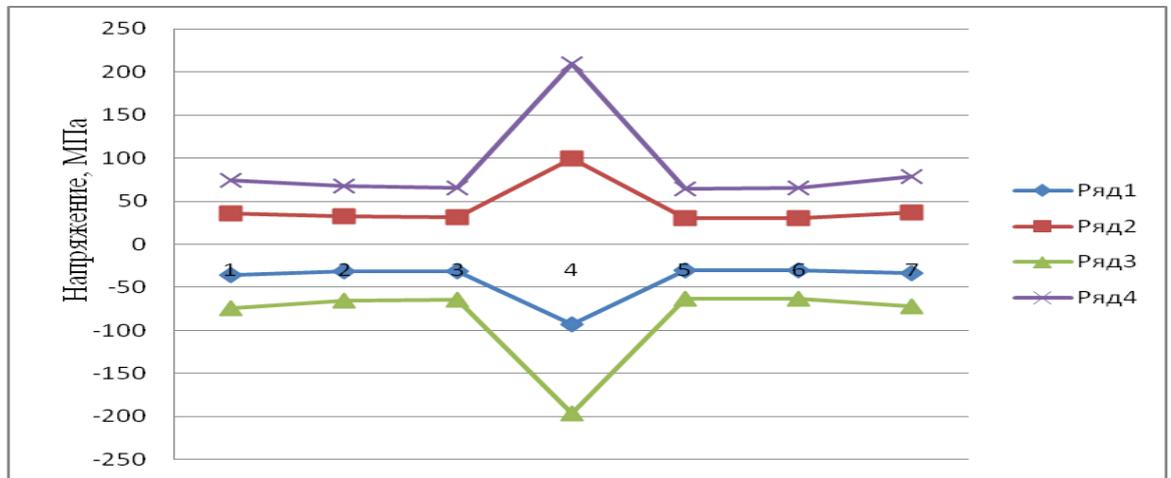
Рисунок 4.49 – Графики распределения нормальных напряжений по сечениям в характерных точках $\sigma_1[n] - \sigma_6[n]$ при $F = 1,5$ кН

Действительно, средние значения напряжений σ_m^* в характерных точках 7 и 8 без учёта данных четвёртого сечения на участке контроля будут равны:

$$\sigma_{7cp} = -32 \text{ МПа}, \sigma_{8cp} = 33 \text{ МПа} \text{ и } \sigma_m^* = 32,5 \text{ МПа} \text{ при } F = 1,5 \text{ кН}; \quad (4.34)$$

$$\sigma_{7cp} = -67,2 \text{ МПа}, \sigma_{8cp} = 69,1 \text{ МПа} \text{ и } \sigma_m^* = 68,15 \text{ МПа} \text{ при } F = 3 \text{ кН}. \quad (4.35)$$

Значения средних максимальных напряжений σ_m^* , согласно (4.34) и (4.35), близки к значениям средних максимальных напряжений полученных без концентратора напряжений (4.32) и (4.33), соответственно.



($\sigma_7[n]$ и $\sigma_8[n]$ при $F = 1,5$ кН кривые 1 и 2 и при $F = 3$ кН кривые 3 и 4)

Рисунок 4.50 – Графики распределения нормальных напряжений по сечениям в характерных точках $\sigma_7[n]$ и $\sigma_8[n]$

Отсюда следует, что при магнитном контроле и оценке напряжённого состояния элементов протяжённых стальных конструкций с симметричным поперечным сечением необходимо учитывать соблюдение постоянства геометрической фигуры всех сечений контролируемого участка, а также сплошности его поверхности.

4.4. Алгоритм оценки изгибных напряжений в элементах протяжённых стальных конструкций

На основании разработанных способов и проведённых экспериментов, в качестве примера, приведём вариант алгоритма, реализующего «Способ оценки изгибных напряжений в элементах конструкций» [117], который наполнит содержа-

нием блоки № 7 и № 8 блок-схемы автоматизации Рисунка 3.18 при использовании полученных аналитических выражений:

- экспериментальным путём получаем зависимость, которую затем аппроксимируем аналитической функцией, между средней изгибающей силой и средней разностью модулей магнитной индукции в выбранных характерных точках на контролируемом участке образца, являющимся аналогом участка какого-либо реального элемента протяжённой стальной конструкции (или на самом объекте контроля);

- полученную аппроксимирующую функцию используем на контролируемом участке элемента протяжённой стальной конструкции для оценки: величины средней остаточной изгибающей силы, приложенную среднюю изгибающую силу, результирующую среднюю изгибающую силу, остаточное среднее максимальное напряжение и результирующее среднее максимальное напряжение; напряжение в любом сечении на контролируемом участке.

4.5. Выводы по главе

Исследование разработанных способов на основе теоретических выкладок, моделирования и экспериментов показало: способы позволяют определять сечения элементов протяжённых стальных конструкций с дефектами, структурными изменениями и внутренними напряжениями, проводить их оценку [109–124]:

1. «Способ магнитной дефектоскопии» позволяет выявить места дефектов в поперечных сечениях по отклонению следа нулевой магнитной индукции от расчётного следа на участке контроля элемента протяжённой стальной конструкции.

2. «Способ магнитной дефектоскопии изделий в напряжённом состоянии» позволяет по разности абсолютных значений магнитной индукции в характерных попарно симметричных точках поперечного сечения на поверхности элемента определять и оценивать дефекты, структурные изменения и внутренние напряжения в сечениях элемента.

3. Три способа «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 обладающих наибольшей разностью модулей магнитной индукции в характерных точках, тем самым оценить аномальные зоны повышенных механических напряжений на контролируемых участках элементов; средние значения отклонений разности магнитной индукции в характерных точках поперечных сечений на контролируемом участке элемента, оценить средние максимальные напряжения на этом участке, 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» позволяет по измеренной магнитной индукции в характерных точках сечений на контролируемом участке определить и оценить:

- среднюю разность абсолютных значений магнитной индукции в характерных попарно симметричных точках сечений;
- величину средней остаточной изгибающей силы;
- приложенную среднюю изгибающую силу;
- суммарную среднюю изгибающую силу;
- остаточное среднее максимальное напряжение и результирующее (суммарное) среднее максимальное напряжение;
- оценить максимальное напряжение в любом сечении на контролируемом участке;
- оценить распределение напряжения внутри каждого сечения.

5. Технический результат реализации способов магнитного контроля заключается в возможности обеспечения оперативного выполнения процесса контроля и оценки технического состояния элементов стальных конструкций, находящихся в работе, с помощью простых мобильных технических средств, Приложение А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что впервые установлены и исследованы зависимости (закономерности), связанные с искажением картины внешнего магнитного поля поперечного сечения элемента, предварительно созданного симметричным относительно геометрической фигуры симметричного поперечного сечения элемента, которые позволили идентифицировать дефекты, структурные изменения и механические напряжения в однородном ферромагнитном материале поперечных сечений контролируемого объекта:

1. Установлены зависимости (закономерности) 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 (закономерности) между дефектами, структурными изменениями и механическими напряжениями в поперечном сечении контролируемого элемента, искажающих симметричную картину магнитного поля поперечного сечения элемента, созданную симметричной относительно геометрической фигуры сечения, 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 напряжения 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 эта-

лонных 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 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.

6. Реализация способов показала:

- «Способ магнитной дефектоскопии» выявляет сечения с дефектами по отклонению линии нуля магнитной индукции от расчётного следа на контролируемом участке на боковых поверхностях элемента протяжённой стальной конструкции;

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

- «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 этом участке, при этом знак разности показывает направ-

ление 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;

- «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, оценить максимальное напряжение в любом сечении на контролируемом участке, оценить распределение напряжения внутри каждого сечения;

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

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

Перспективы дальнейшей разработки темы видятся в адаптации способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций для выбранных объектов контроля, включая их автоматизацию, Приложение А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 56542-2015 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М. : Стандартиформ, 2015. – 11 с.
2. ГОСТ 52330-2005 Контроль неразрушающий. Контроль напряжённо-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Общие требования. – М. : Стандартиформ, 2005. – 4 с.
3. ГОСТ Р 52005-2003 Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Общие требования. – М. : Госстандарт России, 2003. – 4 с.
4. ГОСТ Р ИСО 24497-1-2009 (ISO 24497-1-2007) Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. – М. : Стандартиформ, 2010. – Ч. 1 : Термины и определения. – 4 с.
5. ГОСТ Р ИСО 24497-2-2009 (ISO 24497-2-2007) Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. – М. : Стандартиформ, 2010. – Ч. 2 : Общие требования. – 5 с.
6. ГОСТ Р ИСО 24497-3-2009 (ISO 24497-3-2007) Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. – М. : Стандартиформ, 2010. – Ч. 3: Контроль сварных соединений. – 9 с.
7. ГОСТ 25225-82 Контроль неразрушающий. Швы сварных соединений трубопроводов. Магнитографический метод. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1982. – 15 с.
8. ГОСТ 30415-96 Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2005. – 15 с.
9. ГОСТ 26697-85 Контроль неразрушающий. Дефектоскопы магнитные и вихретоковые. Общие технические требования. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. – 6 с.
10. ГОСТ Р 53006-2008 Оценка ресурса потенциально опасных объектов на основе экспресс - методов. Общие требования. – М. : Стандартиформ, 2009. – 15 с.
11. Клюев, В.В. Неразрушающий контроль диагностика : справочник [Текст] / В.В. Клюев. – М. : Машиностроение, 2003. – 656 с.
12. Евразия вести. Безопасность движения: Почему разбиваются поезда [Электронный ресурс] // URL: <http://www.eav.ru/publ1.php?publid=2003-09a09>.

13. Алешин, Н.П. Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий [Текст] / Н.П. Алешин, В.Г. Щербинский. – М. : Высш. шк., 1991. – 271 с.
14. Алешин, Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений : учебное пособие [Текст] / Н.П. Алешин. – М. : Машиностроение, 2006. – 368 с.
15. Зацепин, Н.Н. Магнитная дефектоскопия [Текст] / Н.Н. Зацепин, Л.В. Коржова. – Мн. : Наука и техника, 1981. – 208 с.
16. Зацепин, Н.Н. Неразрушающий контроль «избранные вопросы теории поля» [Текст] / Н.Н. Зацепин. – Мн. : Наука и техника, 1979. – 192 с.
17. Зацепин, Н.Н. Феррозондовые преобразователи с поперечным возбуждением [Текст] / Н.Н. Зацепин, В.Г. Горбаш. – Мн. : Наука и техника, 1988. – 110 с.
18. Контроль качества сварки [Текст] / Под. общ. ред. В.Н. Волченко. – М. : Машиностроение, – 1975. – 328 с.
19. Янус, Р.И. Магнитная дефектоскопия [Текст] / Р.И. Янус. – М.; – Л. : ОГИЗ, 1946. – 171с.
20. Сапожников, А.Б. Теоретические основы электромагнитной дефектоскопии металлических тел [Текст] / А.Б. Сапожников. – Томск : Томский государственный университет, 1980. – 308 с.
21. Дорофеев, А.Л. Электромагнитная дефектоскопия [Текст] / А.Л. Дорофеев, Ю.Г. Казаманов. – М. : Машиностроение, 1980. – 232 с.
22. Мельгуй, М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей [Текст] / М.А. Мельгуй. – Мн. : Наука и техника, 1980. – 184 с.
23. Михеев, М.Н. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля [Текст] / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов. – М. : Наука, 1993. – 252 с.
24. Шелихов, Г.С. Магнитопорошковый контроль с применением переносных дефектоскопов [Текст] / Г.С. Шелихов, Ю.А. Глазкова, М.В. Сапунов. – М. : ИД «Спектр», 2010. – 192 с.
25. Бида, Г.В. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле [Текст] / Г.В Бида, А.П. Ничипурук // Дефектоскопия. – 2000. – №10. – С. 3.
26. Бида, Г.В. Магнитный контроль механических свойств проката [Текст] / Г.В. Бида, Э.С. Горкунов, В.М. Шевнин. – Екатеринбург : УрО РАН, 2002. – 252 с.

27. Матюк, В.Ф. Современное состояние неразрушающего контроля механических свойств и штампуемости листового проката сталей в технологическом потоке производства [Текст] / В.Ф. Матюк, С.А. Гончаренко, Х. Хартман, Х. Райхельт // Дефектоскопия. – 2003. – №5. – С. 19.
28. Сандомирский, С.Г. Современные возможности магнитного контроля структуры изделий [Текст] / С.Г. Сандомирский // В мире неразрушающего контроля. – 2009. – №1. – С. 40.
29. Матюк, В.Ф. Определение толщины упроченного слоя по изменениям формы петли гистерезиса [Текст] / В.Ф. Матюк, А.А. Осипов, В.Б. Кратиров // Дефектоскопия. – 1997. – № 9. – С. 32.
30. Щербинин, В.Е. Магнитный контроль качества металлов [Текст] / В.Е. Щербинин, Э.С. Горкунов. – Екатеринбург : УрОРАН, 1996. – 264 с.
31. Матюк, В.Ф. Новый прибор для измерения коэрцитивной силы [Текст] / В.Ф. Матюк [и др.] // Материалы международной научно-технической конференции: «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов». – Могилев : 2004. – С. 122.
32. Неразрушающий контроль : справочник : В 8 т. [Текст] / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 4 : В 3 кн. Кн. 1. В.А. Анисимов, Б.И. Каторгин, А.Н. Куценко и др. Акустическая тензометрия. Кн. 2. Г.С. Шелихов. Магнитопорошковый метод контроля. Кн. 3. М.В. Филинов. Капиллярный контроль. – 2-е изд., испр. – М. : Машиностроение, 2006. – 736 с.
33. Неразрушающий контроль : Справочник : В 8 т. [Текст] / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6 : В 3 кн. Кн. 1. В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. Кн. 2. В.Н. Филинов, А.А. Кеткович, М.В. Филинов. Оптический контроль. Кн. 3. В.И. Матвеев. Радиоволновой контроль. – 2-е изд. испр. - М. : Машиностроение, 2006. – 848 с.
34. Костин, В.П. Многопараметровые методы структуроскопии стальных изделий с использованием магнитных свойств вещества [Текст] / В.П. Костин [и др.] // Дефектоскопия. – 2004. – № 3. – С. 69.
35. Герасимов, В.Г. Методы и приборы электромагнитного контроля [Текст] / В.Г. Герасимов, В.В. Клюев, В.Е. Шатерников. – М. : ИД «Спектр», 2010. – 256 с.
36. Максимов, И.Л. О возможности контроля механических напряжений в металле трубопроводов методом магнитных шумов [Текст] / И.Л. Максимов //

- Нефтяная промышленность, транспорт и хранение нефти. – 1981. – № 5. – С. 2.
37. Ломаев, Г.В. Обзор применения эффекта Баркгаузена в неразрушающем контроле [Текст] / Г.В. Ломаев, В.С. Малышев, А.П. Дегтярев // Дефектоскопия. – 1984. – №3. – С. 54.
38. Лопатин, М.В. Об использовании акустического проявления эффекта Баркгаузена в неразрушающем контроле [Текст] / М.В. Лопатин, В.Е. Шатерников, В.В. Филинов // Тезисы докладов республиканской конференции «Неразрушающие методы контроля в народном хозяйстве». – Рига : 1986. – С. 17.
39. Ломаев, Г.В. Эффект Баркгаузена [Текст] / Г.В. Ломаев, Ю.Ф. Мерзляков. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2004. – 164 с.
40. Ломаев, Г.В. Датчики Баркгаузена [Текст] / Г.В. Ломаев, Г.В. Каримова. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, – 2008. – 368 с.
41. Бусько, В.Н. К вопросу о контроле лазерно-упрочненных слоев методом эффекта Баркгаузена [Текст] / В.Н. Бусько, В.Л. Венгринович, А.В. Макаров // Материалы II Международной научно-практической конференции «Инженерия поверхностного слоя деталей машин». – Мн. : БНТУ, 2010. – С. 243.
42. Филинов, В.В. Методы и приборы контроля механических напряжений на основе использования магнитоакустических шумов [Текст] / В.В. Филинов. – М. : Машиностроение, 2000. – 154 с.
43. Биргер, И.А. Остаточные напряжения [Текст] / И.А. Биргер. – М. : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. – 232 с.
44. Махутов, Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность [Текст] / Н.А. Махутов. – М. : Машиностроение, 1981. – 272 с.
45. Касаткин, Б.С. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений [Текст] / Б.С. Касаткин [и др.]. – Киев : Наукова думка, 1981. – 584 с.
46. Новиков, В.Ф. К изучению усталостных изменений в металле при изгибных колебаниях магнитными и магнитоупругими методами [Текст] / В.Ф. Новиков, В.Ф. Тихонов // Проблемы прочности. – 1981. – № 5. – С. 109.

47. Пустынников, В.Г. Контроль остаточных напряжений по двум электромагнитным параметрам [Текст] / В.Г. Пустынников, Ю.В. Лихачев // Известия ВУЗов МВ и ССО СССР. Электромеханика. – 1967. – № 3. – С. 339.
48. Пригоровский, Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений : справочник [Текст] / Н.И. Пригоровский. – М. : Машиностроение, 1983. – 248 с.
49. Экспериментальная механика [Текст] / Под. ред. А. Кобаяси. В 2-х томах: Т.1. – М. : Мир, 1990. – 616 с.
50. Хренов, Н.Н. Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Наземные исследования [Текст] / Н.Н. Хренов. – М. : Газойл пресс, 2005. – 608 с.
51. Макаров, Р.А. Тензометрия в машиностроении : справочное пособие [Текст] / Р.А. Макаров [и др.]. – М. : Машиностроение, 1975. – 288 с.
52. Дайчик, М.Л. Методы и средства натурной тензометрии [Текст] / М.Л. Дайчик, Н.М. Пригоровский, Г.Х. Харшудов. – М. : Машиностроение, 1989. – 240 с.
53. Горелик, С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: учебное пособие для вузов [Текст] / С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев. – М. : МИСИС, 2002. – 360 с.
54. Мужичкий, В.Ф. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния труб магистральных газопроводов [Текст] / В.Ф. Мужичкий [и др.] // Сборник докл. междуна. деловой встречи «Диагностика 97», Т 2. – М. : ИРЦ Газпром, 1999. – С. 163.
55. Бахарев, М.С. Разработка методов и средств измерения механических напряжений на основе необратимых и квазиобратимых магнитоупругих явлений [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.13 / Михаил Самойлович Бахарев. – Тюмень, 2004. – 45 с.
56. Макаров, В.Н. Методы и устройства определения напряжений в элементах стальных конструкций, основанные на магнитоупругом эффекте [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.04.11 / Владимир Николаевич Макаров. – Свердловск, 1984. – 25 с.
57. Макаров, П.С. Совершенствование методов магнитного контроля напряженно-деформированного состояния элементов конструкций магистральных тру-

- бопроводов [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / Павел Сергеевич Макаров. – Уфа, 2007. – 119 с.
58. Дубов, А.А. О проблеме измерения характеристик напряжённо-деформированного состояния конструкционных материалов сложных технических объектов. Энергетическая концепция диагностики напряжённо-деформированного состояния (НДС) материалов [Электронный ресурс] / А.А. Дубов, В.Т. Власов // URL: <http://www.energodiagnostics.ru/article-about-mmm-sss-diagn.html>.
59. Дубов, А.А. Диагностика котельных труб с использованием магнитной памяти металла [Текст] / А.А. Дубов. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 112 с.
60. Дубов, А.А. Исследование свойств металла с использованием метода магнитной памяти [Текст] / А.А. Дубов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. - 1997. – №9. - С. 35.
61. Горицкий, В.М. Исследование структурной повреждаемости стальных образцов с использованием метода магнитной памяти металла [Текст] / В.М. Горицкий, А.А. Дубов, Е.А. Демин // *Контроль. Диагностика*. – 2000. - №7. – С. 3.
62. Дубов, А.А. Диагностика прочности оборудования и конструкций с использованием метода магнитной памяти металла [Текст] / А.А. Дубов // *Контроль. Диагностика*. – 2001. – №6. – С. 19.
63. Власов, В.Т. Физические основы метода магнитной памяти металла [Текст] / В.Т. Власов, В.А. Дубов. – М. : ЗАО «ТИССО», 2004. – 424 с.
64. Дубов, А.А. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля: учебное пособие [Текст] / А.А. Дубов, Ал.А. Дубов, С.М. Колокольников. – М. : Издательский дом «Спектр», 2012. – 395 с.
65. Бозорт, Р. Ферромагнетизм [Текст] / Р. Бозорт. - М. : Иностранная литература, 1956. – 784 с.
66. Кифер, И. И. Испытания ферромагнитных материалов [Текст] / И.И. Кифер, В.С. Пантюшин. – М. : Госэнергоиздат, 1955. – 240 с.
67. Вонсовский, С.В. Ферромагнетизм [Текст] / С.В. Вонсовский, Я.С. Шур. – М.; – Л. : ОГИЗ, Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. – 816 с.
68. Вонсовский, С.В. Магнетизм [Текст] / С.В. Вонсовский. – М. : Наука, 1971. – 1032 с.

69. Ворошилов, В.П. О влиянии упругих напряжений на магнитострикцию ферромагнетиков [Текст] / В.П. Ворошилов, Ф.Н. Дунаев, В.И. Зверева // Изв. Вузов СССР. Физика. – 1969. – №2. – С. 89.
70. Каганов, М.И. Природа магнетизма [Текст] / М.И. Каганов, В.М. Цукерник. – М. : Наука, 1982. – 192 с.
71. Безлюдько, Г.Я. Изменение магнитного состояния металла стальной конструкции при механических воздействиях [Текст] / Г.Я. Безлюдько, С.А. Волохов, Р.Н. Соломаха // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. – №3. – С. 42.
72. Загидулин, Р.В. Расчёт поля остаточной намагниченности деформированной стальной пластины [Текст] / Р.В. Загидулин, В.Ф. Мужижкий, Т.Р. Загидулин // – Уфа : Вестник Башкирского университета. – 2007. – №2. Т. 12. – С. 12.
73. Самуль, В.Н. Основы теории упругости и пластичности [Текст] / В.Н. Самуль. – М. : Высшая школа, 1982. – 264 с.
74. Толмачев, И.И. Магнитные методы контроля и диагностики : учебное пособие [Текст] / И.И. Толмачев. – Томск : Томский политехнический университет, 2008. – 216 с.
75. Гольдштейн, А.Е. Физические основы получения информации : учебник [Текст] / А.Е. Гольдштейн. – Томск : Томский политехнический университет, 2010. – 292 с.
76. Винокуров, Б.Б. Измерение неэлектрических величин : учебное пособие [Текст] / Б.Б. Винокуров, Г.В. Вавилова, И.А. Клубович. – Томск : Томский политехнический университет, 2008. – 290 с.
77. Селезнев, Ю.В. Магнитные измерения : учебное пособие [Текст] / Ю.В. Селезнев, Д.К. Пискунов. – Омск. : Омский политехнический институт, 1980. – 80 с.
78. Белов, К.П. Магнитострикционные явления и их технические приложения [Текст] / К.П. Белов. – М. : Наука, 1987. – 159 с.
79. Шур, Е.А. Повреждения рельсов [Текст] / Е.А.Шур. – М. : Интекс, 2012. – 192 с.
80. Альбрехт, В.Г. Бесстыковый путь [Текст] / В.Г. Альбрехт [и др.]; под ред. В.Г. Альбрехта, А.Я. Когана. – М. : Транспорт, 2000. – 408с.

81. Гурвич, А.К. Неразрушающий контроль рельсов при их эксплуатации и ремонте [Текст] / А.К. Гурвич [и др.]; под ред. А.К. Гурвич. – М. : Транспорт, 1983. – 318 с.
82. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле [Текст] / Л.А. Бессонов. – М. : Высшая школа, 1978. – 231с.
83. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники [Текст] / Л.А. Бессонов. – М. : Высшая школа, – 1978. – 528 с.
84. Зевеке, Г.В. Основы теории цепей [Текст] / Г.В. Зевеке [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, – 1989. – 528 с.
85. Справочник по теории автоматического управления [Текст] / Под ред. А.А. Красовского. – М. : Наука, 1987. – 712 с.
86. Вексер, Н.А. Исследование магнитоупругого эффекта в рельсовой стали [Текст] / Н.А. Вексер [и др.] //Дефектоскопия. – 1975. – № 2. – С. 69.
87. Касимов, Г.А. Исследование магнитных свойств стали в процессе усталости [Текст] / Г.А. Касимов, А.Д. Покровский // Заводская лаборатория. – 1976. – № 12. – С. 1488.
88. Универсальный учебный комплекс по сопротивлению материалов СМ1 [Электронный ресурс] :
// URL: <http://www.rosuchpribor.ru/russian/Prof2007/sopromat/sm-1.html>.
89. Нехендзи, Ю.А. Стальное литьё [Текст] / Ю.А. Нехендзи. – М. : Metallurgizdat, 1948. – 766 с.
90. Константинов, Л.С. Напряжения, деформации и трещины в отливках [Текст] / Л.С. Константинов, А.П. Трухов. – М. : Машиностроение, 1981. – 199 с.
91. Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах: расчёты методом расчленения тела [Текст] / В.В. Абрамов. – М.: Машгиз, 1963. – 356 с.
92. Рыжиков, А.А. Теоретические основы литейного производства [Текст] / А.А. Рыжиков. – М. : Машгиз, 1951. – 448 с.
93. Гликман, Л.А. Остаточные напряжения в сварных таврах / Л.А. Гликман, Д.И. Греков. – М. : Госстройиздат, 1934. – 297 с.
94. Николаев, Г.А. Сварные конструкции : учебное пособие для вузов [Текст] / Г.А. Николаев. – М. : Машгиз, 1953. – 536 с.
95. Окерблом, Н.О. Сварочные деформации и напряжения. Теория и её применение [Текст] / Н.О. Окерблом. – М. : Машгиз, 1948. – 252 с.

96. Окерблом, Н.О. Сварочные напряжения в металлоконструкциях [Текст] / Н.О. Окерблом. – М. : Машгиз, 1950. – 144 с.
97. Талыпов, Г.Б. Сварочные деформации и напряжения [Текст] / Г.Б. Талыпов. – Л. : Машиностроение, 1973. – 280 с.
98. Беленов, Ф.С. О приближённом определении остаточных закалочных напряжений [Текст] / Ф.С. Беленов // Журнал техн. Физики. – 1953. – Т. 23. – Вып. 11. – С. 2045.
99. Компанеец, Д.С. Остаточные напряжения в закалённых образцах цилиндрической формы [Текст] / Д.С. Компанеец // Журнал техн. Физики. – 1939. – Т. 9. – Вып. 4. – С. 287.
100. Ломакин, В.В. Теоретическое определение остаточных напряжений при термической обработке металлов [Текст] / В.В. Ломакин // Проблемы прочности в машиностроении : Сб. науч. тр. – М. : Изд. АН СССР, 1959. – Вып. 2. – С. 72.
101. Никитина, Н.Е. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин [Электронный ресурс] / Н.Е. Никитина, С.В. Казачек // Интернет журнал «Вестник научно-технического развития». – 2010. – №4 (32). URL: [http:// www.vntr.ru](http://www.vntr.ru).
102. Гордиенко, В.Е. Научные основы неразрушающего контроля металлических конструкций по остаточной намагниченности в области Рэлея [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.13 / Валерий Евгеньевич Гордиенко. – СПб., 2009. – 356 с.
103. Писаренко, Г.С. Сопротивление материалов : учебник для вузов [Текст] / Под общ. ред. Г.С. Писаренко. – 4-е изд. перераб. и доп. – Киев : Вища школа. Головное изд-во, 1979. – 696 с.
104. Горбаш, В.Г. Неразрушающий контроль в промышленности. Магнитный контроль [Текст] / В.Г. Горбаш, М.Н. Делендик, П.Н. Павленко // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2011. – №2. – С. 48.
105. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1974. – 831 с.
106. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М. : Мир, 1979. – 392 с.

107. Шимкович, Д. Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows [Текст] / Д. Г. Шимкович. – М. : ДМК Пресс, 2003. – 448 с.
108. Андреева, Е.Г. Математическое моделирование электротехнических комплексов [Текст] / Е.Г. Андреева, В.З. Ковалёв; под общ. ред. Ю.З. Ковалёва. – Омск : ОмГТУ, 1999. – 172 с.
109. Степанов, А.П. Способ магнитной дефектоскопии протяжённых ферромагнитных конструкций [Текст] / А.П. Степанов, М.А. Степанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – №1(33). – С. 69.
110. Степанов, М.А. Способ магнитной дефектоскопии ферромагнитных конструкций, находящихся в напряженном состоянии [Текст] / М.А. Степанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – №4(36). – С. 154.
111. Степанов, А.П. Метод магнитного контроля и диагностики напряжённого состояния элементов стальных конструкций, имеющих осесимметричное сечение [Текст] / А.П. Степанов, М.А. Степанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 1 (49). – С. 60.
112. Пат. № 2387983 Российская Федерация, RU 2 387 983 С1, МПК G01N 27/82 (2006.01). Способ магнитной дефектоскопии [Текст] / 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.
113. Пат. № 2441227 Российская Федерация, RU 2 441 227 С1, МПК G01N 27/72 (2006.1). Способ магнитной дефектоскопии изделий в напряжённом состоянии [Текст] / 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.
114. Пат. № 2452943 Российская Федерация, RU 2 452 943 С1, МПК G01N 27/82 (2006.1). Способ обнаружения изгибных напряжений [Текст] / 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.
115. Пат. № 2455634 Российская Федерация, RU 2 455 634 С1, МПК G01N 27/80 (2006.1). Способ оценки запаса прочности изделий в процессе эксплуатации [Текст] / 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.
116. Пат. № 2521753 Российская Федерация, RU 2 521 753 C1, МПК G01N 27/82 (2006.1). Способ оперативного обнаружения дефектов и механических напряжений в протяжённых конструкциях [Текст] / 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.
117. Пат. № 2590224 Российская Федерация, RU 2 590 224 C1, МПК G01N 27/72 (2006.1). Способ оценки изгибных напряжений в элементах конструкций [Текст] / 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.
118. Степанов, М.А. Исследование картин магнитных полей сечений ферромагнитных конструкций при наличии дефектов [Текст] / 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.
119. Степанов, М.А. Способы обнаружения дефектов и изгибных напряжений в конструкциях из ферромагнитного материала [Текст] / 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.
120. Степанов, М.А. Анализ картин магнитных и силовых полей сечений элементов протяжённых ферромагнитных конструкций [Текст] / 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.
121. Степанов, М.А. Реализация и исследование способов магнитной дефектоскопии и обнаружения внутреннего напряжённого состояния стального прямоугольного профиля [Текст] / М.А. Степанов, А.П. Степанов, А.А. Пыхалов // Проблемы проектирования, строительства, диагностики и технического со-

- держания объектов железнодорожного транспорта : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Чита, 24 октября – 15 ноября 2013 г. – Чита : Заб ИЖТ, 2013. – 133с., – С. 69.
122. Степанов, М.А. Оценка изгибных напряжений стальных конструкций, имеющих сечение простой симметричной формы [Текст] / 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.
123. Степанов, А.П. Оценка нормального напряжения при плоском изгибе балки с помощью метода магнитного контроля и моделирования на основе метода конечных элементов [Текст] / 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.
124. Степанов, М.А. Моделирование полей напряжения в сечениях балки при её плоском изгибе [Текст] / 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.
125. Степанов, М.А. Способы магнитного контроля элементов стальных конструкций [Текст] / 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.
126. Устройство приставное намагничивающее МСН 14 [Электронный ресурс] : // URL: mikroakustika.ru/index.php?lang=rus&l1...l2=34...msn14.
127. Руководство по эксплуатации Иа2.778.006 РЭ [Электронный ресурс] : // URL: nio12.ru/RE/mf23im.pdf.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ
(Рекомендуемое)

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер ВСЖД

Н.Г.Скосырский

«10» _____ 2017 г.

АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертационной работы
Степанова Максима Александровича

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы **«Разработка способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций»**, представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, использованы в практической деятельности Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» в виде методологического пособия.

1. Найдены методы разработки новых способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций с поперечным сечением в виде симметричной геометрической фигуры (рельсы, балки и др.).

2. На основе новых методов установлены зависимости между дефектами, структурными изменениями и механическим напряжением в поперечных сечениях контролируемого объекта, искажающими симметрию внешнего магнитного поля поперечного сечения, предварительно созданного симметричным относительно геометрической фигуры поперечного сечения объекта контроля, и магнитной индукцией внешнего поля.

3. Разработаны новые способы магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций, которые позволяют по отклонению следа нулевой магнитной индукции от

расчётной и по разности магнитной индукции в характерных точках сечений на контролируемом участке выявить и оценить дефекты, структурные изменения и механические напряжения в сечениях.

3. Представлена блок-схема автоматизации разработанных способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций.

Результаты работы используются при проведении неразрушающего контроля нестандартных конструкций в хозяйствах пути и электроснабжения.

Подписи:

40.	НТН		<u>Чернига Ю. М.</u> «10» <u>мая</u> 20 <u>17</u> г.
410	П -		<u>Белков СВ</u> «10» <u>мая</u> 20 <u>17</u> г.
	НТЭ -		<u>Алексеев ИВ</u> «__» _____ 20__ г.