

На правах рукописи

Маликов Владимир Николаевич

**КОНТРОЛЬ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ, ПРИМЕСЕЙ И
ДЕФЕКТОВ ПРОВОДЯЩИХ СПЛАВОВ И
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ
СВЕРХМИНИАТЮРНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

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

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

Томск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Алтайский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор,
Сагалаков Анатолий Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, старший научный сотрудник, Мишакин Василий Васильевич,
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук", заведующий лабораторией неразрушающего контроля и диагностики материалов и конструкций

доктор физико-математических наук,
профессор,
Бержанский Владимир Наумович,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», заведующий кафедрой экспериментальной физики

Защита состоится « 8 » октября 2019 г. в ____ часов ____ минут на заседании диссертационного совета ДС. ТПУ. 13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" по адресу: 634050, г. Томск, проспект Ленина, д. 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: dis.tpu.ru

Автореферат разослан « _____ » 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета, кандидат
технических наук,
доцент



Шевелева Елена Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из важных фундаментальных и прикладных задач физического материаловедения является разработка и совершенствование методов исследования и диагностики физико-химических и эксплуатационных характеристик материалов, используемых в современной промышленности и научно-исследовательской сфере. Производство и эксплуатация ряда высокотехнологичных изделий, используемых в авиакосмической отрасли, в транспортной сфере, в ядерной сфере, а также в экстремальных условиях добычи полезных ископаемых, невозможны без контроля их качества. Наиболее актуальными при этом становятся неразрушающие методы контроля качества, поскольку только они позволяют производить анализ объектов без вмешательства в их внутреннюю структуру и изменения их эксплуатационных свойств.

В современном неразрушающем контроле имеется тенденция к значительному ужесточению требований к разрешающей способности применяемых методов, к совершенствованию аппаратной и программной части приборов, позволяющих производить анализ объектов, к снижению их стоимости при сохранении необходимых характеристик. При проведении контроля в условиях реального производства требуется производить отстройку от мешающих факторов, обеспечивать защиту приборов от внешних воздействий: влажности, пыли, вибраций, ударов и т.д.

Всем вышеперечисленным требованиям удовлетворяет неразрушающий вихретоковый неразрушающий контроль (ВТК). ВТК может быть применен для контроля различных объектов, преимущественно электропроводящих материалов, сплавов, полупроводников. Однако, в некоторых случаях, его можно использовать и для дефектоскопии материалов, не обладающих проводящими свойствами с условием применения специальных магнитопорошковых смесей. ВТК часто применяется при определении толщины непроводящих покрытий, нанесенных на электропроводящую основу. Метод также пригоден для исследования толщины металлических листов, стенок труб.

Одно из важных преимуществ ВТК – возможность производить исследование без прямого контакта датчика и объекта, что позволяет добиться надежных результатов при высокой скорости сканирования. Однако при этом важной задачей является исключение влияния помех, существенно влияющих на величину полезного сигнала.

Ограничениями ВТК может являться малая глубина сканирования, а также трудности в определении глубины залегания дефекта. Также достаточно малым параметром, служащим серьезным ограничением метода, является площадь зоны контроля. Максимальная глубина залегания дефектов, а также

минимальный размер зоны контроля существенно ограничены конструктивными особенностями преобразователей и недостаточной аппаратной и программной обработкой сигнала вихретокового преобразователя. Нередко затруднительно оценить геометрические параметры отдельного дефекта, залегающего в толще металла. Актуальной проблемой современной дефектоскопии является и определение качества сварных швов металлов. В этом случае, чувствительность метода определяется размерами выявляемых дефектов, возникаемых при низком качестве сварки.

В связи с этим, актуальной задачей является разработка вихретоковой измерительной системы, позволяющей локализовать малые дефекты на значительной глубине, производить эффективную обработку получаемого сигнала с целью устранения мешающих факторов и обеспечивать наглядную визуализацию полученных данных в режиме реального времени.

Объектом исследования является миниатюрные вихретоковые преобразователи(ВТП), используемые для неразрушающего контроля проводящих материалов, сплавов и покрытий.

Предметом исследования являются методики улучшения таких характеристик ВТП, как глубина и локальность вихретокового контроля, возможность поиска сверхмалых дефектов, возможность контроля толщины покрытий.

Цель работы - разработка и совершенствование программно-аппаратных комплексов, предназначенных для сканирования проводящих материалов и сплавов.

Задачи исследования

1. Разработка и исследование различных конструкций ВТП, позволяющих локализовать магнитное поле на малом участке объекта контроля и на значительной глубине.

2. Исследование работы ВТП и анализ зависимостей вносимого напряжения от различных параметров преобразователя и объекта контроля. Исследование магнитной проницаемости различных сплавов и выбор оптимального материала, имеющего максимальное значение магнитной проницаемости и наименьший разброс значений магнитной проницаемости, предназначенный для конструирования сердечника сверхминиатюрного ВТП, способного производить эффективную локализацию магнитного поля.

3. Тестирование разработанных ВТП на образцах с модельными дефектами с известными характеристиками (глубина залегания, размер, ширина раскрытия, протяженность, концентрация дефектов на единицу объема). Определение влияния различных параметров дефектов на сигнал разработанных преобразователей

4. Тестирование различных конструкций преобразователей в разных режимах работы (различная частота и амплитуда тока возбуждения, дифференциальное и абсолютное включение преобразователей) на бездефектных объектах контроля, имеющих известные характеристики (химический состав, твердость, состояние поверхности, шероховатость и др.). Тестирование материалов, наиболее часто используемых в промышленности

(алюминиевые и титановые сплавы, слоистые металлопластиковые композиты, материалы на основе меди, конструкционные стали). Исследование сварных швов различных металлах и сплавах.

5. Создание ВТП с оптимальной формой и размером сердечника, числом катушек индуктивности и витков проволоки в них, позволяющий эффективно локализовать электромагнитное поле на участках площадью от 2500 мкм^2 , с глубиной проникновения в исследуемый объект до 5 мм.

6. На основе разработанного ВТП создать программно-аппаратный комплекс, позволяющий эффективно управлять работой вихретокового преобразователя (формировать переменный ток различной частоты, обеспечивать его подачу на разные вихретоковые преобразователи, принимать полезный сигнал с преобразователей, осуществлять его фильтрацию от различных помех и обеспечивать его удобную визуализацию с возможностью отображения различных параметров исследуемого объекта).

Методы исследования. Для расчета параметров ВТП и элементов используемого программно-аппаратного комплекса использовались методы моделирования с помощью программы Proteus. Для получения и анализа сигналов ВТП на объектах контроля использовались экспериментальные методы исследования.

Научная новизна.

Научная новизна исследования заключается в следующих результатах:

1. В процессе проведенных исследований было установлено значительное влияние материала и формы сердечника на эффективность проводимой вихретоковой дефектоскопии. Получена графическая зависимость между величиной магнитной проницаемости и локальностью магнитного поля, генерируемого ВТП.

2. Установлено значительное влияние режимов отжига и последующего охлаждения сплава 81НМА на значение его магнитной проницаемости. Наибольшая магнитная проницаемость достигалась при максимальной температуре 850°C , скорость нагрева: 300°C/ч , скорость охлаждения: до 600°C - со скоростью 50°C/ч , от 600°C до 400°C - со скоростью 400°C/ч , до $T < 100^\circ\text{C}$ - со скоростью 100°C/ч .

3. Получены зависимости напряженности поля от глубины проникновения в проводящие вещества с различной электрической проводимостью ($7,96\text{--}54 \text{ МСм/м}$), иллюстрирующие степень проникновения электромагнитного поля в проводящее вещество при малом обобщенном параметре.

4. Установлено, что разработанный сверхминиатюрный ВТП с сердечником пирамидальной формы и изготовленный из сплава 81НМА, отожженного по определенной методике, с диаметром измерительной катушки $0,1 \text{ мм}$, способен локализовать магнитное поле на участке от 2500 мкм^2 и получать отклик от неоднородностей вещества, находящихся на глубине 5 мм. Показана эффективность дифференциальной схемы включения преобразователей при поиске дефектов глубокого залегания.

5. Обнаружено, что при условии достаточной локализации магнитного поля и эффективной обработке получаемого сигнала с использованием селективного усиления и фильтрации возможно фиксировать очень слабые изменения электромагнитного поля (от 5 А\м) при максимальной напряженности поля (соответствующей бездефектной части образца) до 2500 А\м.

6. Установлены зависимости между выходным сигналом ВТП и различными параметрами дефектов (геометрические размеры, глубина залегания, форма и тип дефекта) в металлах, сплавах, слоистых композитах и сварных швах в области малого обобщенного параметра, соответствующего характеристикам сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей.

Практическая значимость работы.

Практическая ценность работы заключается в создании комплексной системы вихретоковой дефектоскопии, разработанной на основе миниатюрных и сверхминиатюрных ВТП, позволяющих определять различные физико-механические свойства вещества, концентрацию, размер и глубину дефектов, залегающих на поверхности и в глубине вещества. С помощью разработанной измерительной системы можно производить анализ качества сварных швов в различных проводящих материалах. Измерительную систему можно использовать для сканирования структур типа металл-диэлектрик-металл и анализа толщины различных покрытий. Разработанная измерительная система используется в институте физики прочности и материаловедения Сибирского Отделения Российской Академии Наук для сканирования алюминиево-магниевого сплава (акт о внедрении) и на Бийском котельном заводе.

Методологические основы исследования

Методологической основой исследования служили научные работы крупных российских и иностранных ученых в сфере неразрушающего контроля, физики конденсированного состояния вещества и металловедения, обработки металлов и сплавов, сварки. Для решения поставленных в работе задач использовались качественные методы отжига и охлаждения сплавов, точной лазерной обработки сердечников, высокотехнологичные способы намотки проволоки на сердечники сверхмалых размеров.

Степень достоверности полученных результатов

Результаты экспериментов, представленные в данной работе, согласуются с ранее опубликованными результатами в работах в области их пересечения.

Достоверность полученных в работе результатов, аргументированность заключений и выводов диссертации обеспечивается экспериментальными подтверждениями выдвинутых положений, применением математических способов обработки экспериментальных данных и определения погрешностей измерений. Достоверность полученных данных подтверждается неоднократным проведением экспериментов на различных объектах. Разработанная методика измерений тестировалась на модельных объектах с известными дефектами. При этом было получено полное соответствие полученных результатов с данными на модельных объектах: пластины из технического титана марки ВТ1-0, соединенные с помощью сварных швов, пластины из сплава Al-Mg (Al-94%,

Mg-3%), структуры металл-диэлектрик, представляющие из себя чередование алюминиевых и полиэтиленовых слоев, полупроводниковых материалов As-In, As-Ga. Данные вихретоковой дефектоскопии, полученные в ходе выполнения данной работы, сопоставлялись с данными, полученными с помощью других физических методов неразрушающего контроля.

Достоверность экспериментальных данных обеспечивается использованием современных средств и методик проведения исследований. Положения теории основываются на известных достижениях фундаментальных и прикладных научных дисциплин, сопряженных с предметом исследования диссертации.

Обоснованность результатов, выдвинутых соискателем, основывается на согласованности данных эксперимента и научных выводов.

Достоверность теоретических результатов работы подтверждается экспериментальными данными, представленными в известных работах других авторов-

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Использование измерительных систем, основанных на сверхминиатюрных ВТП и системах фильтрации и обработки сигнала, значительно улучшает локализацию и глубину проникновения электромагнитного поля в сравнении с известными ранее аналогичными системами.

2. Существенное влияние на эффективность вихретокового метода контроля оказывает материал и форма сердечника ВТП. Сердечник пирамидальной формы, изготовленный из материала, отожжённого по специальной температурной методике с целью достижения максимальной магнитной проницаемости, значительно повышает локализацию магнитного поля преобразователя.

3. Использование оригинальной системы фильтрации и селективного усиления позволяет выделять слабые полезные сигналы, несущие информацию об объекте контроля и отсеивать помехи, что способствует обнаружению сверхмалых дефектов глубокого залегания

4. Исполнение разработанной системы в формате виртуализированного прибора позволяет реализовать широкий спектр приборных измерительных функций в одной компьютерной программе. В числе данных функций: поиск дефектов в проводящих материалах, определение электропроводности материалов, измерение толщины непроводящих покрытий, оценка напряженности магнитного поля.

Апробация работы:

1. Вторая Международная выставка «Измерения, мир, человек — 2012» Алтайского государственного технического университета, 2012, г. Барнаул, серебряная медаль;

2. Двенадцатая Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи, 2012, г. Москва, премия «Победитель»;

3. Пятая международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики», Томский Государственный университет, г. Томск, 2012;

4. Третья Международная выставка «Измерения, мир, человек — 2013» Алтайский государственный технический университет, 2013, г. Барнаул, золотая медаль;

5. Всероссийская молодежная школа-конференция «Неразрушающий контроль-2013», Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет в рамках всероссийской конференции с международным участием «Sibtest-2013», 2013, г. Томск, диплом первой степени;

6. Четвертая Международная выставка «Измерения, мир, человек — 2014» Алтайский государственный технический университет, 2014, г. Барнаул, золотая медаль;

7. Двенадцатая Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи, г. Москва, 2014, диплом;

8. Международная конференция «Современные проблемы физики», г. Москва, Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 2014, диплом за лучший доклад на русском языке и диплом за практическую значимость изобретения;

9. Международная конференция «Перспективные материалы в строительстве и технике», г. Томск, Томский государственный, архитектурно-строительный университет, 2014, диплом третьей степени за лучший доклад;

10. Международная конференция «Электротехника. Энергетика. Машиностроение», г. Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет, 2014, диплом за второе место;

11. IV международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», 2015, г. Москва, Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ;

12. III всероссийский форум студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Космическое приборостроение», 2015, г. Томск;

13. X Международная Конференция "Механика, ресурс, диагностика материалов и конструкций", г. Екатеринбург, 2016

14. V Международная конференция студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Институт неразрушающего контроля, 2016, г. Томск, диплом за первое место;

16. 7-ая международная выставка научно-технических и инновационных разработок "Измерения, мир, человек-2017", г. Барнаул, Алтайский государственный технический университет, 17-18 мая, 2017 г., золотая медаль.

Личный вклад

Личный вклад автора состоит в разработке программного кода для программно-аппаратного комплекса, создании экспериментальных стендов, выборе методов экспериментальных исследований, проведении экспериментальных и численных исследований, анализе их результатов,

подготовке публикаций и заявок на патенты. Представленные в диссертации результаты получены автором лично. Автором самостоятельно выдвинуты все защищаемые научные положения. Вклад соавторов в основные публикации не превышал 40% от общего объема работы

Связь диссертационных исследований с научно-техническими программами и грантами.

Часть результатов, представленных в работе, была использована при выполнении грантов и контрактов:

Грант Администрации г. Барнаула «Оптимизация конструкции программно-аппаратного комплекса для неразрушающего контроля высокотехнологических изделий, микро- и наноструктурных материалов»

Грант Алтайского государственного университета по программе стратегического развития для аспирантов, преподавателей и молодых ученых «Разработка дефектоскопа слоистых композитов, изделий и сварных конструкций из дюралюминия»

Контракт с Алтайским государственным университетом №1694-44/14. «Исследование и анализ дефектной структуры образцов алюминиево-магниевого сплава».

Грант Фонда содействия инновациям малых форм предприятий в научно-технической сфере, договор 5673ГУ2/2014 «Разработка конструкции программно-аппаратного комплекса предназначенного для многопараметрового неразрушающего контроля высокотехнологических изделий, микро- и наноструктурных материалов»

Грант Российского фонда фундаментальных исследований 17-48-220044 p_a, «Создание и исследование высокоэффективных композиционных и наноструктурированных упрочняющих покрытий»

Грант Российского фонда фундаментальных исследований 18-38-00272 мол-а «Исследование сплавов, композиционных и полупроводниковых материалов, сверхтонких проводящих пленок с помощью миниатюрных и сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей»

Публикации. По результатам исследований были опубликованы в соавторстве 26 статей, в том числе 17 статей в изданиях из списка Scopus и Web of Sciences, 9 – в изданиях из списка ВАК, получено 2 патента РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 144 наименования. Содержит 157 страниц текста, 76 рисунков и 5 таблиц.

Интеллектуальная собственность:

Патент 2564823 от 10.10.2015 «Устройство для обнаружения дефектов малых линейных размеров»;

Патент 2639592 от 21.12.2017 «Дефектоскоп для сварных швов»;

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируется цель исследований, перечисляются задачи и основные положения, выносимые на защиту

В первой главе анализируется современное состояние и практическое значение методов и средств дефектоскопии электропроводящих материалов, сплавов и покрытий, рассматриваются основные типы материалов, для сканирования которых целесообразно использовать методы вихретоковой дефектоскопии. Также представлены основные направления разработки и усовершенствования методов вихретокового контроля в нашей стране и за рубежом. Среди российских и советских ученых, значительный вклад в развитие вихретоковой дефектоскопии внесли Кессених В.Н, Шилов Н.М., Сапожников А.Б, Михановский В.И., Ключев В.В., Герасимов В.Г. Среди зарубежных ученых, сделавших значительный вклад в развитие неразрушающего вихретокового контроля стоит отметить работы Barbato L, Rocha J, Ramos H G. Среди современных авторов, активно работающих над проблематикой дефектоскопии с использованием метода вихревых токов, стоит отметить Qu Z, Barbosa C.F., Загидулин Т.Р., Сясько В.А., Ивкин А.Е.

Изготовление и эксплуатация ответственных конструкций машиностроения обуславливает высокие требования к их качеству и надежности.

Поэтому важными задачами неразрушающего контроля проводящих материалов являются поиск дефектов сплошности и определение их размеров и глубины. Одной из задач неразрушающего контроля является разделение сигналов от дефектов, залегающих на небольшом расстоянии друг от друга, со сложным характером их взаимного распределения. Актуальной проблемой неразрушающих методов измерений является и поиск малых дефектов, расположенных в глубине исследуемого материала. В связи с этим приобретают особенную важность проблемы анализа сигнала дефектоскопа, позволяющего повысить точность оценки размеров и местоположения отдельного дефекта. К важным задачам неразрушающего контроля можно также отнести контроль толщины исследуемого материала, анализ его химического состава, оценка шероховатости его поверхности.

Метод вихревых токов, как правило, применяется для анализа сварных швов в металлах, измерения электропроводности, толщины, сканирования структур металл-диэлектрик-металл и исследования топологии тонких пленок. К числу основных параметров контроля относятся фаза и амплитуда сигнала.

Во второй главе рассмотрены общие сведения о теории ВТК, описаны основные типы преобразователей и схемы включения обмоток преобразователя, приведены основные формулы, описывающие взаимодействие магнитного поля ВТП с объектом контроля. Приведены результаты расчетов напряжения, вносимого в измерительную обмотку ВТП при его взаимодействии с объектами контроля при малых размерах преобразователя. На основании полученных данных построены годографы, иллюстрирующие зависимости вносимого напряжения от различных

параметров преобразователя и объекта контроля. Построенные годографы хорошо иллюстрируют зависимость полного вносимого напряжения от различных параметров датчика и объекта контроля. На значение вносимого напряжения значительное влияние оказывает расстояние от измерительной катушки до объекта контроля (Рисунок 1 а), а также частота тока возбуждения. Значительное влияние также оказывают значения электрической проводимости исследуемого объекта (Рисунок 1 б.) и его магнитные свойства. Таким образом, данные годографы позволяют оптимизировать конструкцию датчика, выбрать наиболее эффективные параметры для конкретной измерительной задачи, с учетом зазора ВТП, а также его магнитных свойств.

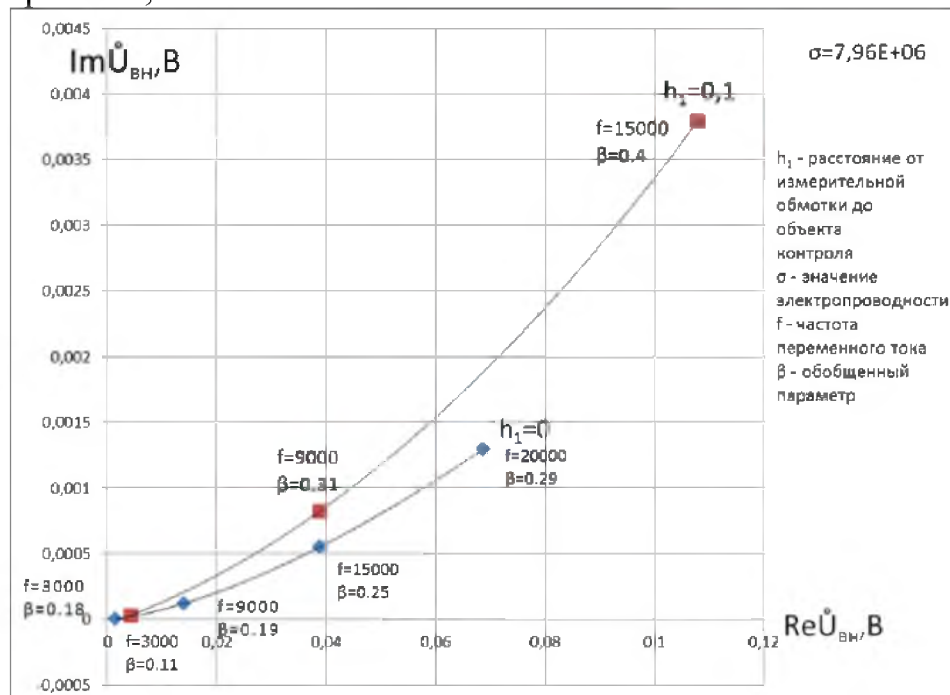


Рисунок 1.а. Годограф напряжения при увеличении зазора ВТП

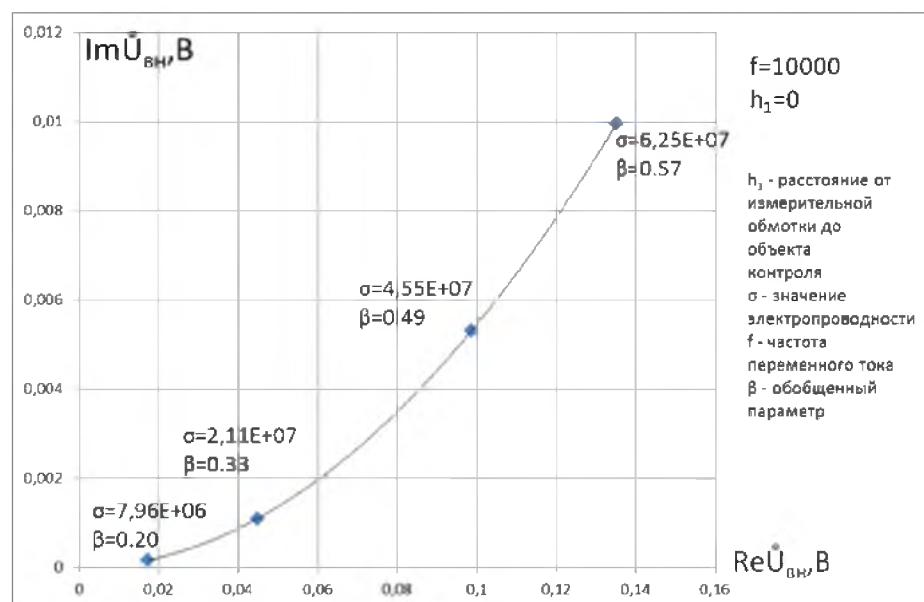


Рисунок 1.б. Годограф напряжения при увеличении электрической проводимости

В соответствии с полученными годографами разработан сверхминиатюрный вихретоковый преобразователь, основанный на сердечниках, имеющих различную форму – пирамиды, конуса, трапециевидную форму.

Представлены основные принципы фокусировки магнитного поля в магнитопроводах и приведено обоснование выбора материала, применяемого при изготовлении магнитопроводов. Данный материал должен иметь наибольшее значение магнитной проницаемости при малой напряженности магнитных полей. Увеличение магнитной проницаемости используемых сердечников позволяет значительно улучшить локальность вихретокового контроля, глубину проникновения поля и исследовать микроскопические структуры на большой глубине. В этой связи представляется необходимым использование сплавов с максимальным значением начальной магнитной проницаемости. Повышение значения магнитной проницаемости таких сплавов можно произвести, используя различные режимы термообработки. В качестве материала с максимальной магнитной проницаемостью, был выбран сплав 81НМА, имеющий наивысшее значение магнитной проницаемости в слабых постоянных и переменных магнитных полях, а также пониженную чувствительность к механическим воздействиям и повышенную прочность. Для данного материала была разработана технологическая инструкция, определяющая режимы термообработки сплава.

Установлено явное влияние отжига на магнитную проницаемость образцов. Увеличение значения магнитной проницаемости составляло от 18.5 раз (образец №2 с максимальным значением начальной магнитной проницаемости), до 76.5 раз (образец №6). В среднем, магнитная проницаемость образцов под влиянием отжига увеличивалась в 30-40 раз.

Кроме того, было проанализировано влияние объемной доли объекта на ЭДС на измерительной обмотке для обычного и миниатюрного ВТП. Из представленных зависимостей видно существенное увеличение стабильности вносимого напряжения миниатюрного преобразователя при достижении порога определенных параметров.

Представлена концепция виртуализированных измерительных приборов - это единая измерительная система, интегрированная в составе специализированного программно-аппаратного комплекса. Данная система позволяет эффективно решать универсальные задачи по получению, преобразованию и визуализации измерительной информации, выбору и оптимизации модели объекта измерения. Результаты эксперимента, включая статистическую обработку результатов измерений, представляются оператору в удобной для восприятия форме. Описано универсальное программное обеспечение для реализации различных измерительных функций с использованием одного датчика.

Программное обеспечение можно условно разделить на пять частей:

1. виртуальный генератор;
2. блок обработки сигнала;
3. блок управления;
4. индикатор.

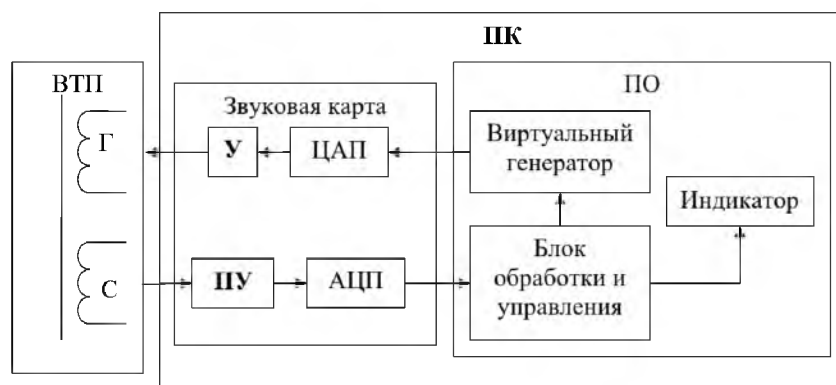


Рисунок 2. Структурная схема устройства.

Структурная схема устройства представлена на Рисунке 2. После запуска ПО, блок управления, при помощи микшерной подсистемы Windows, выставляет коэффициенты усиления входного и выходного усилителей звуковой карты ПК на определенные уровни, а так же непосредственно задает уровень и частоту синусоидального сигнала виртуального генератора. После подготовительных действий виртуальный генератор переводится в режим генерации сигнала. Цифровой сигнал от виртуального генератора поступает на вход ЦАП, проходя через который преобразовывается в аналоговый. Аналоговый сигнал, в свою очередь, подается на генераторную катушку (Г) ВТП. При протекании синусоидального сигнала по генераторной катушке ВТП, создается электромагнитное поле, которое в свою очередь создает вносимую ЭДС в измерительной катушке (С) ВТП. Это напряжение подается на вход АЦП. Оцифрованный сигнал передается блоку обработки сигнала ПО. Блок обработки фиксирует уровень цифрового сигнала в условных единицах.

Также подробно описана разработка системы генерации и обработки сигнала. Эффективным решением проблемы генерации качественного синусоидального сигнала в данной работе служит генератор на мосте Вина с нелинейным элементом в цепи. Такая схема отличается удобством использования - регулировка частоты перестраивается сдвоенным резистором, управление которого нетрудно реализовать через компьютер. В отличие от обычных RC-генераторов, схема генератора с обратной связью использует нелинейный элемент в цепи – например, диод, стабилитрон, лампа накаливания или светодиод.

С измерительной обмотки ВТП сигнал, несущий информацию об объекте контроля, усиливался и поступал на систему фильтрации, разделяющую двухчастотный сигнал на два сигнала с разными частотами, каждый из которых несет информацию об объектах контроля на разной глубине. Для реализации данного разделения, система фильтрации представляла собой два модифицированных фильтра Дельяна. Данный фильтр обладает высокой стабильностью и низкой чувствительностью к разбросу параметров схемы.

Расчет частоты среза данного фильтра заключается в выборе резисторов R_1 , R_4 и конденсатора C_1 .

Анализ амплитуды сигнала и очистки амплитудного значения сигнала от помех позволило значительно упростить конструкцию измерительной системы

и избежать необходимости анализа изменения фазы сигнала при сканировании объектов.

В третьей главе представлены результаты экспериментов разработанной измерительной системы на различных образцах, изготовленных из алюминиевых и титановых сплавов. В качестве примера представлены эксперименты, проводящиеся на пластинах №1 и №2 из дюралюминия марки Д16Т, образце №3, представляющем из себя соединение пластин из сплава алюминий-магний сварным швом методом сварки трением и пластине №4 из титана.

Пластина №1 толщиной 5.5 мм имела три дефекта в виде прорези шириной 1 мм, расположенных на глубине 1-4 мм. Пластина №2 толщиной 5.5 мм имела шесть дефектов в виде прорези шириной 0,25 мм, расположенных на глубине 1-5.3 мм. При проведении экспериментов с пластиной №1 напряжение, подаваемое на обмотку возбуждения ВТП составляло $U_B = 2$ В. С целью определения чувствительности датчика к дефектам в глубине металла осуществлялось сканирование с бездефектной стороны образца.

Полученные данные представлены на Рисунке 3.

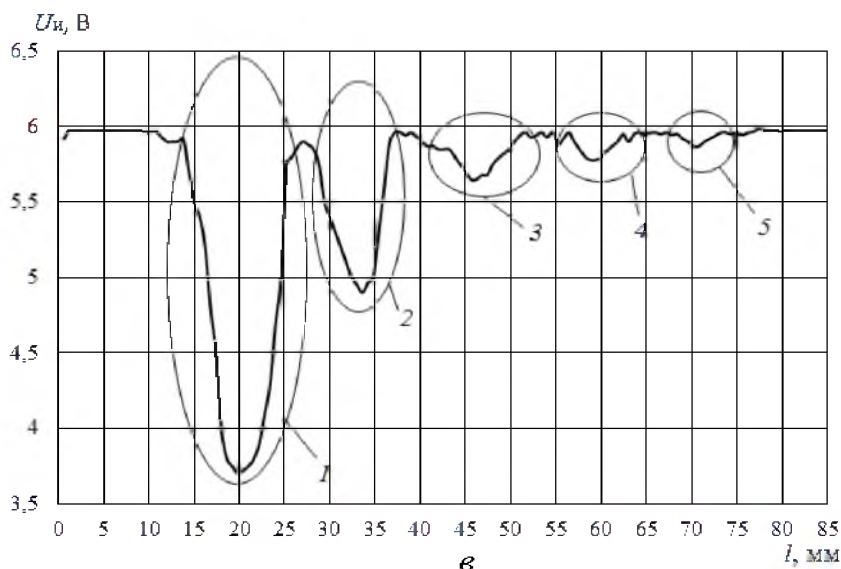


Рисунок 3. Результаты сканирования с использованием измерительной системы с использованием системы с двумя ВТП.

Результаты дефектоскопии пластины №1 с дефектами, шириной 1 мм при частоте $\omega = 500$ Гц позволили обнаружить все три прорези по уменьшению амплитуды выходного сигнала U_n . Уменьшение амплитуды сигнала U_n на первом дефекте составило 0,75 В, на втором – 0,2 В, на третьем – 0,1 В.

Результаты эксперимента подтвердили эффективность разработанной измерительной системы для поиска дефектов шириной от 1 мм, находящихся на глубине до 4 мм.

В следующем эксперименте измерительную систему тестировали на пластине №2 с дефектами шириной 0,25 мм, расположенными на глубине до 5,3 мм.

Результаты дефектоскопии при аналогичном напряжении на обмотке возбуждения ВТП позволили обнаружить первый дефект на глубине $h=1$ мм

при соответствующем уменьшении амплитуды выходного сигнала $U_{\text{и}}$ примерно на 0,1 В.

Для повышения локализации магнитного поля была проведена существенная модернизация конструкции измерительной системы. С целью повышения мощности поля путём увеличения напряжения $U_{\text{в}}$ на обмотке возбуждения ВТП с 2 до 3,5 В, в программно-аппаратный комплекс был введен второй ВТП, основанный на сердечнике из отожжённого пермаллоя 81НМА. Первый ВТП располагался неподвижно и использовался для получения отклика от бездефектной части образца, второй ВТП применялся непосредственно для сканирования. В процессе сканирования, получаемый со второго ВТП сигнал вычитался из сигнала, получаемого с первого ВТП, т.е. выходным сигналом измерительной системы становилась разность откликов двух преобразователей. В экспериментах использовалось две формы сердечника – в форме заостренного конуса и трапеции (Рисунок 4).

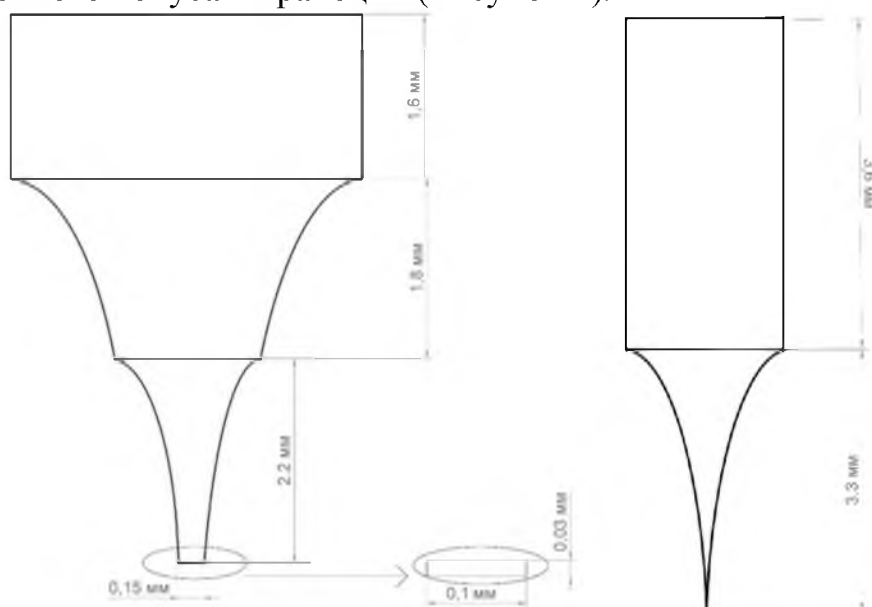


Рисунок 4. Сердечники в виде трапеции и заостренного конуса.

При этом была установлена существенная роль магнитной проницаемости используемого сердечника для поиска дефектов глубокого залегания. Использование для сканирования ВТП с ферритовым сердечником в форме заостренного конуса позволило добиться обнаружения 2 дефектов, в форме трапеции – 3 дефектов.

Введение в измерительную систему ВТП, с сердечником, изготовленным из отожжённого сплава 81НМА со значением магнитной проницаемости 35000, в форме заостренного конуса позволило добиться обнаружения 4 дефектов, в форме трапеции – 5 дефектов. Таким образом использование сердечника, изготовленного в форме трапеции из сплава 81НМА позволило значительно улучшить видимость дефектов и снизить помехи.

Результаты дефектоскопии при частоте $\omega = 500$ Гц позволили обнаружить пять дефектов. Уменьшение амплитуды выходного сигнала $U_{\text{и}}$ на первом дефекте составило 2,5 В (место 1), на втором дефекте – 1 В (место 2), на третьем дефекте – 0,4 В (место 3), на четвертом – 0,2 В (место 4), на пятом – 0,1 В

(место 5). Изменения отклика сигнала при прохождении над шестым дефектом не зафиксировано.

Также проводилось исследование сварных швов алюминиевых и титановых сплавов. Образец №3 представлял из себя две пластины из сплава алюминий-магний, соединенных с помощью сварки трением. Толщина пластин составляла 8,3 мм. Ширина сварного шва составила 2 см. Сканирование осуществлялось путем движения датчика перпендикулярно линии шва с измерением расстояния от области калибровки до области измерения.

В экспериментах с образцом было установлено, что пластины, скрепленные сварным швом дают разные значения вносимого напряжения, что, очевидно, указывает на различные материалы пластин. Результаты эксперимента представлены на Рисунке 5 а. Границам сварного шва соответствует падение вносимого напряжения. Разница в амплитуде сигналов при исследовании различных пластин соответствует разнице электрической проводимости исследуемых материалов. По краям сварного шва можно видеть участки значительного падения вносимого напряжения, соответствующие границам сварного шва.

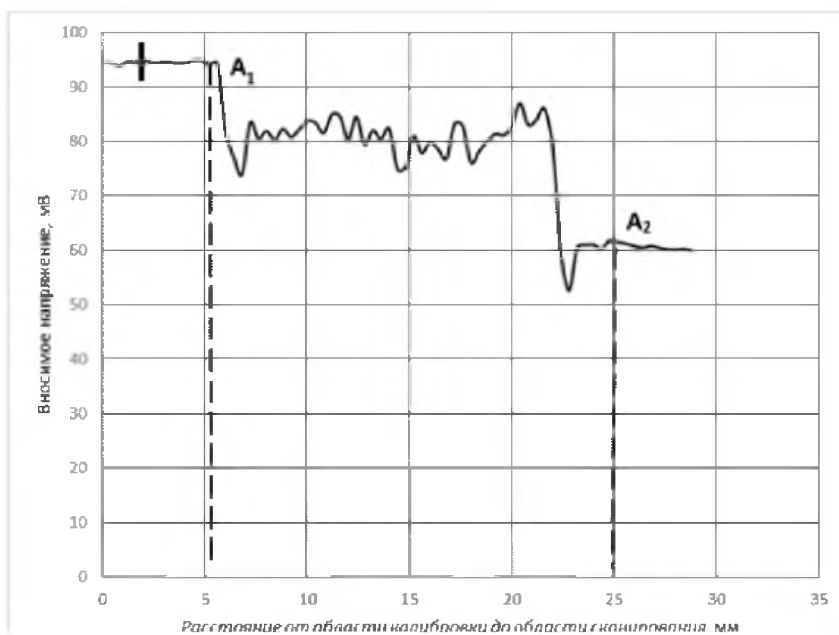


Рисунок 5.а. Величина отклика при сканировании алюминиевого сплава

Образцы №4, 5 представляли из себя пластины из титана, соединенные с помощью сварных швов. Толщина пластин составляла 5 мм. Ширина сварного шва составляла 5 мм.

Сканирование осуществлялось поперек сварного шва. Длина сварного шва составляла 150 мм. Шов был разбит на 30 областей по 5 мм в каждой из 30 областей так, чтобы снять сигнал как с самого шва, так и непосредственно с пластин. Полученные зависимости усреднялись. Результаты эксперимента представлены на Рисунке 6.

В образце №4(Рисунок 6.а) влияние некачественного сварного шва на вносимое напряжение явно прослеживается по значительному падению амплитуды сигнала в области сварного шва по сравнению с областью пластин.

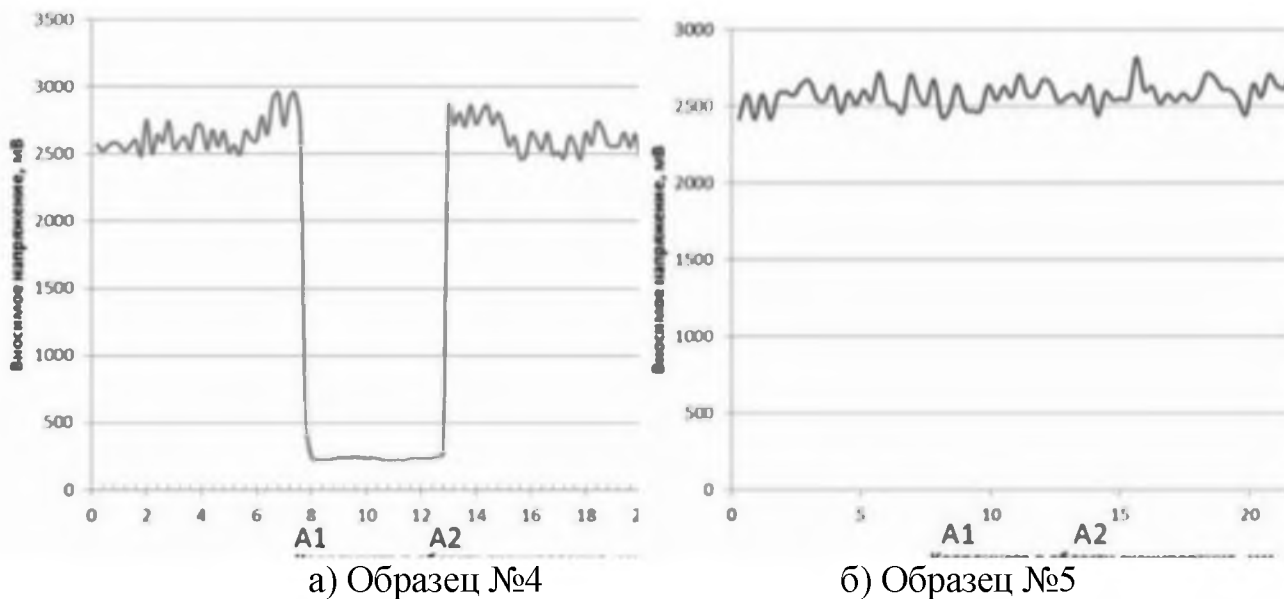


Рисунок 6. Величина отклика при сканировании сварного шва.

На основании проведенного эксперимента сделан вывод о низком качестве сварного шва образца №4. Низкое качество сварки было подтверждено и непосредственно при разрезании сварного шва. Сканирование образца №5 (Рисунок 6 б) показало отсутствие отклонений амплитуды сигнала в пределах сварного шва. Разрезание сварного шва образца №6 показало высокое качество сварки.

В четвертой главе проводилось исследование металлополимерных слоистых композитных материалов (МПСК) металл-диэлектрик-металл и измерение толщины проводящего и непроводящего слоя. Дефектоскопия МПСК осуществляется для определения следующих типовых дефектов: нарушений сплошности металлического и(или) полимерного слоя, количество и толщина слоев, проводящие и непроводящих перемычки между слоями, деформация поверхности металлического слоя, изменение состояния границы раздела между металлическими и полимерными слоями МПСК. МПСК, использованный в данном эксперименте, был получен чередованием 2-х слоев алюминиевой фольги (20 мкм) и одним слоем полиэтилена низкого давления (20 мкм). Измерения проводились на частоте тока возбуждения 35 кГц, материал сердечника ВТП – феррит, материал основы - ГСО меди М1.

Диагностирование дефектов несплошности МПСК в виде межслойного замыкания, перемычек и др. возможно при непосредственном, контактном сканировании поверхности образца датчиком. В этом случае образцом дефекта может служить амплитудно-временная зависимость сигнала датчика в режиме реального времени. Для демонстрации работоспособности предлагаемого метода с целями исследования дефектов несплошности использовалась структура, представляющая собой чередование алюминиевой фольги толщиной 100 мкм и бумаги, также имеющей толщину 100 мкм. В качестве модельного дефекта, между слоями помещался полый параллелепипед с толщиной стенок 300 мкм.

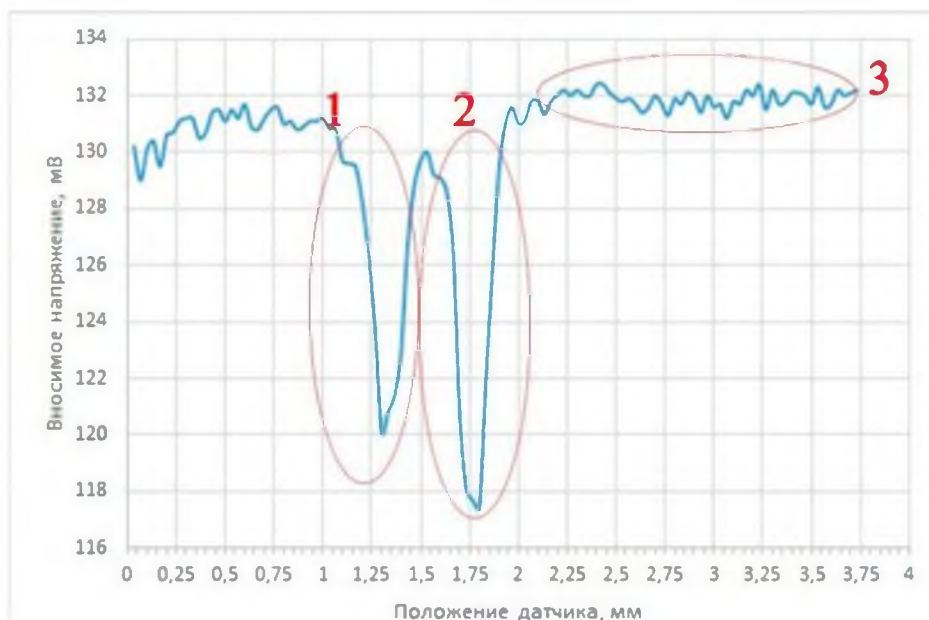


Рисунок 7. а. Результаты сканирования при перемещении датчика над слоистой средой металл-полиэтилен-металл с использованием сверхминиатюрного ВТП



Рисунок 7. б. Результаты сканирования при перемещении датчика над слоистой средой металл-полиэтилен-металл с использованием обычного ВТП.

На Рисунке 7 представлена картина, наблюдающаяся при перемещении датчика над слоистой средой, внутри которой находится дефект. Уровень сигнала с измерительной обмотки ВТП характеризует значения электропроводности на исследуемом участке. Для основной рабочей частоты тока возбуждения 1000 Гц уровень вносимого в измерительную обмотку ВТП напряжения составлял 130 ± 2 мВ. Области 1 и области 2 на графике (Рисунок 7 а), в которых происходит падение уровня напряжения до 115 мВ, соответствуют стенкам параллелепипеда. Данное изменение амплитуды сигнала составляет 11% от уровня сигнала, соответствующего бездефектной области образца. При этом колебания амплитуды сигнала на бездефектном участке не превышают 4 мВ, что составляет 3% от уровня сигнала, соответствующего бездефектной области образца. Степень локализации дефекта составляет 0,1 мм. Для сравнения, на Рисунке 7 б приведены результаты сканирования образца с использованием обычного ВТП (диаметр

измерительной обмотки ВТП – 4 мм). Несмотря на то, что дефект по прежнему заметен по падению амплитуды сигнала, наблюдается значительное снижение степени локализации дефекта (0.25 мм).

Вплоть до глубины расположения дефекта, равной 1400 мкм, прослеживалась явная зависимость отклика преобразователя от положения преобразователя над дефектом. Фиксируя изменение амплитуды отклика преобразователя, обусловленное дефектом, можно изменить частоту тока возбуждения так, чтобы вихревые токи концентрировались в слоях композита, расположенных выше дефекта. Решение обратной задачи позволяет определить глубину залегания дефекта. После калибровки фурье-анализатора по типичным дефектам можно использовать прибор ИЭНМ-5ФА для диагностики композитных многослойных материалов толщиной от 1 до 1400 мкм.

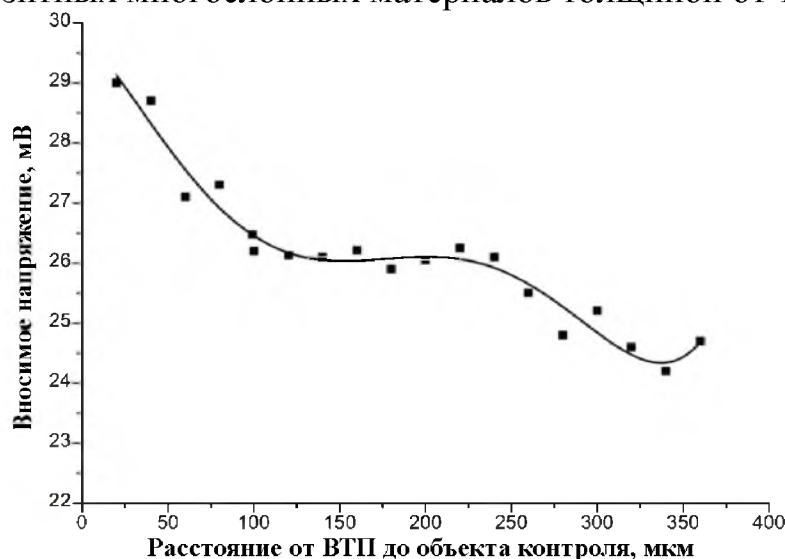


Рисунок 8. Зависимость сигнала ВТП от зазора ВТП

Как следует из Рисунка 8, образец такого МПСК по отношению к медной основе выполняет функцию экрана, введенного в зазор между датчиком прибора и медной основой и постепенно ослабляющего измеренный сигнал. На расстоянии 100...250 мкм от поверхности МПСК наблюдается участок, на котором показания прибора сохраняют постоянные значения. Очевидно, что на таком удалении от проводящей медной основы топология поля вихревых токов контролируемого образца воспринимается датчиком прибора как поле от однородной среды и появление любого дефекта в материале вызовет отклонение его показаний от среднего значения, измеренного на расстоянии 100...250 мкм. Проведение дефектоскопии МПСК в таком случае возможно при настройке показаний прибора на ноль на бездефектной области (с постоянным значением электропроводности).

Следующий эксперимент проводился с участием двух материалов, расположенных на расстоянии 1 см друг от друга. Сканирующие измерения первоначально проводились с электротехнической сталью 1212 (образец №1), через диэлектрик (бумагу) и заканчивались на стали 3414 (образец №2).

Для детального изучения падения вносимого напряжения на границе ферромагнетик - диэлектрик, была построена зависимость амплитуды вносимого напряжения от положения датчика. Данная зависимость

демонстрирует характер изменения амплитуды вносимого напряжения в процессе перемещения ВТП над границей сталь-диэлектрик.. График зависимости вносимого напряжения от положения датчика наглядно показывает какие эффекты происходят на границе раздела. Результаты экспериментов представлены на Рисунке 9.

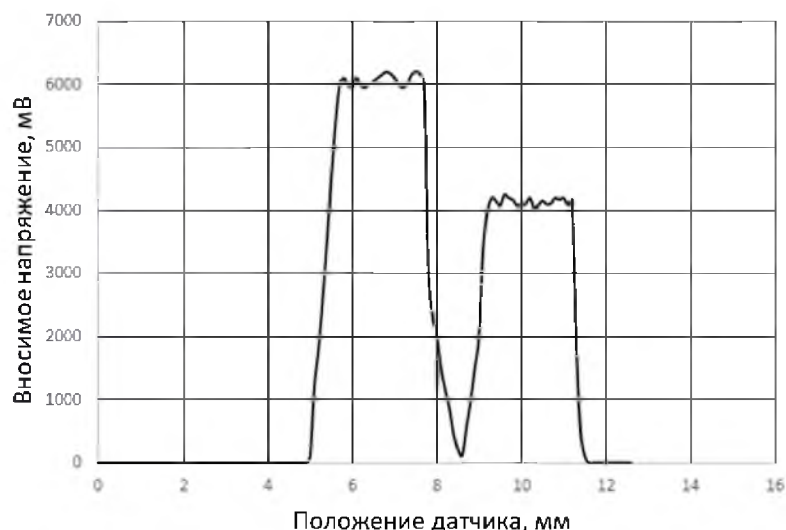


Рисунок 9 – Зависимость вносимого напряжения от положения датчика при непрерывном сканировании с частотой 1000 Гц

Разность высоты пиков на графике зависит от величины магнитной проницаемости электротехнической стали. Из данного графика видно, что в области диэлектрика вносимое напряжение резко падает от значения 6000 мВ до значения 2000 мВ и далее плавно стремится к нулю. Для более детального изучения падения вносимого напряжения на границе ферромагнетик - диэлектрик, мы построили дискретную зависимость амплитуды вносимого напряжения от положения преобразователя. Эксперимент предполагал локальное дискретное сканирование объектов. Измерения проводились в точках, находящихся на расстоянии 0,1 мм.

Из результатов данного эксперимента вытекает следующий вывод: на границе раздела отклик ферромагнетика не прекращается резко до нуля, а убывает по квадратичному закону (область 1). Минимальное значение амплитуды вносимого напряжения составляет 50 мВ. Возрастание амплитуды сигнала по мере приближения ко второму образцу стали происходит по закону, близкому к экспоненциальному (область 2).

Такая зависимость объясняется остаточным напряжением в обмотках ВТП. В поле электротехнической стали выделяются замкнутые силовые линии. Поэтому электромагнитное поле, препятствующее возникновению самоиндукции в измерительной обмотке ВТП, генерируемое вихревыми токами не будет сильно влиять на вносимое напряжение. При этом величина отклика не уменьшается до нуля в силу влияния ферромагнетика на датчик.

Влияние ферромагнетика на датчик объясняется наличием собственного магнитного поля стали, которое замыкается на ВТП даже на относительно большом расстоянии. Величина индукции данного магнитного поля пропорциональна величине магнитной проницаемости материала.

Эксперименты выявили существенную разницу в амплитуде сигнала ВТП при сканировании сталей с различной магнитной проницаемостью. При этом значение вносимого напряжения значительно меньше напряжения, вносимого в обмотки ВТП преобразователя при размещении датчика непосредственно над сталью. Данное напряжение продолжает уменьшаться с увеличением расстояния между датчиком и объектом исследования.

Приближение ко второму образцу вызывает увеличение амплитуды вносимого напряжения. При этом магнитное поле второго образца влияет на датчик одновременно с магнитным полем первого образца. Экспоненциальный рост амплитуды вносимого напряжения вызывается сложением ЭДС полей от двух образцов стали.

Основные результаты работы

1. Проведено исследование зависимостей вносимого напряжения вихретокового преобразователя от различных параметров и выбран оптимальный материал, предназначенный для конструирования сердечника сверхминиатюрного вихретокового преобразователя, способного производить эффективную локализацию магнитного поля.

2. Разработан сверхминиатюрный вихретоковый преобразователь с оптимальной формой и размером сердечника, числом катушек индуктивности и витков проволоки в них, позволяющий эффективно локализовать электромагнитное поле на участках площадью от 2500 мкм², с глубиной проникновения в исследуемый объект до 5 мм.

3. Разработанный преобразователь был протестирован на образцах с модельными дефектами с известными характеристиками (глубина залегания, размер, ширина раскрытия, протяженность, концентрация дефектов на единицу объема). Определено влияние различных параметров дефектов на сигнал разработанных преобразователей

4. Различные конструкции преобразователей были протестированы в разных режимах работы (различная частота и амплитуда тока возбуждения, дифференциальное и абсолютное включение преобразователей) на бездефектных объектах контроля, имеющих известные характеристики (химический состав, твердость, состояние поверхности, шероховатость и др.). Произведено тестирование материалов, наиболее часто используемых в промышленности (алюминиевые и титановые сплавы, слоистые металлопластиковые композиты, материалы на основе меди, конструкционные стали). Исследованы сварные швы различных металлах и сплавах.

5. На основе разработанного вихретокового преобразователя создан программно-аппаратный комплекс, позволяющий эффективно управлять работой вихретокового преобразователя (формировать переменный ток различной частоты, обеспечивать его подачу на разные вихретоковые преобразователи, принимать полезный сигнал с преобразователей, осуществлять его фильтрацию от различных помех и обеспечивать его удобную визуализацию с возможностью отображения различных параметров исследуемого объекта).

Список основных публикаций по теме диссертации

Статьи в изданиях, входящих в перечень Web of Sciences и Scopus:

1. **Malikov, V. N.** Subminiature eddy current transducers for studying metal-dielectric junctions/ V. N. Malikov, S. F. Dmitriev, A. V. Ishkov, A. M. Sagalakov // Instruments and Experimental Techniques. – 2014. – Vol. 57. – №6. – Pp. 751-754.
2. **Malikov, V. N.** Subminiature eddy current transducers for studying semiconductor material/ V. N. Malikov, S. F. Dmitriev, A. M. Sagalakov // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 643. – №1. – Pp. 1-6.
3. **Malikov, V. N.** Flaw detection of alloys using the eddy-current method/ V. N. Malikov, S. F. Dmitriev, A. O. Katasonov, A. M. Sagalakov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – Vol. 52. – №1. – Pp. 32-37.
4. **Malikov, V.N.** Subminiature eddy current transducers for studying boride coatings/ V. N. Malikov, S. F. Dmitriev, A. V. Ishkov, A. M. Sagalakov // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 729. – №1. – Pp.1-5.
5. **Malikov, V. N.** Eddy-current measuring system for analysis of alloy defects and weld seams/ V. N. Malikov, S. F. Dmitriev, A. O. Katasonov, A. M. Sagalakov // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36. – №8. – Pp. 626-629.
6. **Malikov, V. N.** Flaw inspection of welded joints in titanium alloys by the eddy current method/ V. N. Malikov, S. F. Dmitriev, A. M. Sagalakov, L. I. Shevtsova // Welding International. – 2017. – Vol. 31. – №8. – Pp. 608-611.
7. **Malikov, V. N.** Measurement System for Studying Flaws in Alloy Slabs by Means of Subminiature Eddy-Current Transducers/ V. N. Malikov, S. F. Dmitriev, A. Kolubaev, A. M. Sagalakov // Measurement Techniques. – Vol. 4. – Pp. 1-4.
8. **Malikov, V. N.** Scanning the Welded Seams of Titanium Alloys by Using Subminiature Eddy Current Transducers/ V. N. Malikov, A. O. Katasonov, A. M. Sagalakov // Materials Science Forum. – 2017. – Vol. 906. – Pp. 147-152.
9. **Malikov, V. N.** Subminiature Eddy-Current Transducers for Conductive Materials and Layered Composites Research/ V. N. Malikov, A. M. Sagalakov // Advances in Intelligent Systems and Computing – 2018. – Vol. 692 – Pp. 292-296.

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Маликов, В.Н.** Измерительная система для исследования дефектов пластин из сплавов с помощью сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей/ В.Н. Маликов, С. Ф. Дмитриев, А. В. Ишков, Е. А. Колубаев, А. М. Сагалаков // Измерительная техника. – 2017. – № 4. – С. 46-49.
2. **Маликов, В.Н.** Вихретоковая измерительная система для исследования дефектов сплавов и сварных швов/ В.Н. Маликов, С. Ф. Дмитриев, А. М. Сагалаков // Вестник машиностроения – 2016. – № 5. – С. 23-26.
3. **Маликов, В.Н.** Дефектоскопия сварных швов титановых сплавов методом вихревых токов/ В.Н. Маликов, С. Ф. Дмитриев, В.Н. Маликов, А. М. Сагалаков, Л. И. Шевцова // Сварочное производство. – 2016. – № 8. – С. 21-24.
4. **Маликов, В.Н.** Дефектоскопия сплавов методом вихревых токов/ В.Н. Маликов, С. Ф. Дмитриев, А. О. Катасонов, А. М. Сагалаков // Дефектоскопия. – 2016. – № 1. – С. 41-47.

5. **Маликов, В.Н.** Дефектоскопия сварных швов титановых сплавов методом вихревых токов/ В.Н. Маликов, С. Ф. Дмитриев, А. М. Сагалаков, Л. И. Шевцова // Технология машиностроения. – 2016. – № 6. – С. 53-57.
6. **Маликов, В.Н.** Сверхминиатюрные токовихревые преобразователи для исследования переходов металл–диэлектрик/ В.Н. Маликов, С. Ф. Дмитриев, А. М. Сагалаков // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 6. – С. 102.
7. **Маликов, В.Н.** Вихретоковая дефектоскопия металлополимерных слоистых композитов/ В.Н. Маликов, С. Ф. Дмитриев, А. В. Ишков, Д. Н. Лященко, Г. В. Вавилова // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 13. – С. 63-66
8. **Маликов, В.Н.** Виртуализированный измеритель-трансформер/ В.Н. Маликов, С. Ф. Дмитриев, А. В. Ишков, А. М. Сагалаков // Датчики и системы. – 2013. – № 3. – С. 22-26.
9. **Маликов, В.Н.** Сверхминиатюрные вихретоковые преобразователи для задач неразрушающего контроля неферромагнитных материалов/ В.Н. Маликов, С. Ф. Дмитриев, А. В. Ишков // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – № 9-2. – С. 292-293.