

На правах рукописи



**Катасонов Александр Олегович**

**ВИХРЕТОКОВЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ И  
ДЕФЕКТОВ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК**

специальность 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Барнаул — 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»,  
кафедра общей и экспериментальной физики

**Научный руководитель:** **Сагалаков Анатолий Михайлович**  
доктор физико-математических наук,  
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный  
университет», профессор.

**Официальные оппоненты:** **Бобров Алексей Леонидович**, доктор  
технических наук, ФГБОУ ВО «Сибирский  
государственный университет путей  
сообщения», профессор

**Дементьева Мария Михайловна**, кандидат  
физико-математических наук, НИЦ  
«Курчатовский институт», научный  
сотрудник

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный  
университет»

Защита состоится «12» декабря 2023 г. в 10:00 часов на заседании  
диссертационного совета 24.2.269.03 при ФГБОУ ВО «Алтайский  
государственный университет» по адресу: 656049, Россия, Алтайский край, г.  
Барнаул, пр. Ленина, д. 61, ауд. 416.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО  
«Алтайский государственный университет»,  
[https://www.asu.ru/science/dissert/physic\\_diss/](https://www.asu.ru/science/dissert/physic_diss/)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Волков Николай Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Современные тенденции научно-технического развития в России и мире диктуют все более возрастающие требования к приборам, предназначенным для исследования материалов. Анализируя особенности развития новых приборов для исследования материалов, можно отметить следующее:

- одними из наиболее перспективных являются методы и средства бесконтактного исследования материалов;
- значительно возросли требования к точности и производительности измерений контролируемых параметров;
- стала очевидной необходимость создания универсальных методик и средств исследования материалов, позволяющих на одном и том же образце осуществлять измерение нескольких характеристических параметров одновременно;
- приобрели большое значение задачи разработки и применения автоматизированных измерительных установок.

Среди методов исследования металлических объектов особое место занимает вихретоковый метод. Он позволяет производить исследование таких объектов, как массивные проводящие структуры, слоистые композитные материалы, металлические листы, а также объекты с малым значением толщины, наиболее характерным примером которых могут выступать тонкие металлические пленки.

Научно-техническое направление, связанное с получением и применением тонких металлических пленок, за последние десятилетия приобрело стремительный рост и во многих отраслях современного производства занимает ключевые позиции. В настоящее время использование тонких пленок в микроэлектронике, СВЧ-технике, оптике и многих других отраслях науки и техники открывает перспективы создания и совершенствования не только новых приборов, но и целых технологических направлений.

Многообразие структуры и специфические свойства, связанные с малостью толщины таких объектов, приводят к тому, что их физические характеристики могут существенно отличаться от характеристик этих же материалов в массивном состоянии.

Для полноценного использования тонких пленок в различных областях электроники необходима полная информация об их материальных константах и физических параметрах, в частности однородности. Связанным с однородностью параметром пленки является и степень ее дефектности. Следовательно, необходимы новые методы определения характеристик исследуемых тонких пленок.

Для определения характеристик тонких металлических пленок широко применяются следующие методы неразрушающего исследования: атомно-силовая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия, рентгеновская дифрактометрия, спектроскопическая эллипсометрия, четырехзондовый метод, вихретоковый метод.

Вихретоковый метод имеет значительные преимущества в исследованиях металлических пленок. Он предоставляет возможность просто и точно производить измерения без необходимости прямого контакта с исследуемым объектом, а также предоставляет возможность производить измерения непосредственно в среде, в которой происходит рост пленки, а это дает возможность более точно контролировать процесс выращивания пленок.

Недостатком этого метода является низкая частота электромагнитного поля, используемого при исследованиях. Характерный диапазон частот, используемых в приборах, реализующих этот метод исследования, составляет 500 Гц — 1 МГц, что является недостаточным при исследовании объектов с толщиной менее 1 мкм, характерной для тонких пленок. Использование более высокой частоты затрудняется необходимостью эффективной и быстрой оцифровки сигнала вихретокового преобразователя, несущего информацию об объекте исследования. Кроме того, одним из аспектов развития современного вихретокового метода исследования материалов является автоматизация процесса сканирования. Автоматизация процесса сканирования позволяет значительно повысить скорость и точность исследований.

Таким образом, актуальной задачей развития вихретокового метода исследования материалов является создание программно-аппаратного комплекса, позволяющего производить исследование однородности и дефектности тонкой металлической пленки. Перспективным направлением развития видится автоматическое перемещение датчика над поверхностью исследуемой пленки с небольшим шагом и регистрация сигнала вихретокового преобразователя в каждой точке измерения в режиме реального времени.

#### **Степень разработанности темы исследования**

Проведенный анализ разработок в области вихретоковой дефектоскопии ведущих ученых России и мира (Клюев В. В., Леонтович М. А., Каценеленбаум Б. З., Кравченко А. Н., Белокур И. П., Косовский Д. И., Корнеев Б. В., Сясько В. А., Дорофеев А. Л., Шлеин Д. В., Коробцов А. С., Учанин В. Н., Соболев В. С., Бакунов А. С.) и стран Азии (Z. Qu, W. Wang, S. Yang, Q. Sun, Z. Fang and Y. Zheng и др.) показывают, что вихретоковый метод имеет большие перспективы в плане автоматизации и применимости для исследования новых материалов, таких как тонкие пленки и композиты.

В связи с этим существует проблема реализации полного комплексного исследования, позволяющего рассчитать основные параметры миниатюрного вихретокового преобразователя и разработать на их основе миниатюрный вихретоковый преобразователь и аппаратно-программный комплекс, предназначенный для исследования тонких металлических пленок, что определяет актуальность диссертационной работы.

#### **Цель работы**

Цель работы — разработка и совершенствование конструкции миниатюрного вихретокового преобразователя, основанного на нем программно-аппаратного комплекса и методик определения местоположения, формы и геометрических размеров неоднородностей и дефектов типа нарушения сплошности тонких металлических пленок.

## **Задачи**

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи.

1. Проведение анализа особенностей и проблем существующих методов и средств неразрушающего исследования тонких металлических пленок.

2. Разработка конструкции миниатюрного вихретокового преобразователя, предназначенной для определения местоположения, формы и геометрических размеров дефектов тонких металлических пленок и основанной на результатах моделирования распределения вихревых токов в объекте исследования методом конечных элементов.

3. Разработка программно-аппаратного комплекса на основе миниатюрного вихретокового преобразователя, предназначенного для управления работой преобразователя, автоматизации процесса измерений и удобной визуализации получаемых результатов.

4. Разработка методики анализа скорости изменения сигнала вихретокового преобразователя, которая позволяет снизить погрешность измерения размеров дефектов и неоднородностей тонкой металлической пленки.

5. Сравнение результатов измерений разработанного метода определения местоположения, формы и геометрических размеров, неоднородностей и дефектов тонких металлических пленок и результатов измерений, полученных с использованием оптической микроскопии и фотометрии.

## **Научная новизна**

Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов, выводов и рекомендаций заключается в следующем:

1. Впервые предложена конструкция вихретокового преобразователя с характеристиками, позволяющими осуществлять локальное сканирование тонких металлических пленок, определять координаты границ пленок и производить измерения размеров дефектов и неоднородностей, имеющих площадь от 10 000 мкм<sup>2</sup>;

2. Разработан программно-аппаратный комплекс, реализующий метод вихревых токов, предназначенный для экспериментального исследования неоднородностей и дефектов тонких металлических пленок, имеющих толщину от 100 нм и удельную электропроводность от 14 МСм/м;

3. Предложен метод измерения размеров дефектов и неоднородностей тонкой металлической пленки с погрешностью до 9% по данным о скорости изменения сигнала вихретокового преобразователя.

4. Установлен диапазон частот возбуждающего сигнала вихретокового преобразователя – 10-30 МГц, позволяющий производить исследования дефектов структуры пленок, имеющих толщину от 100 нм;

## **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Методом конечных элементов произведено моделирование распределения вихревых токов, наводимых в объекте исследования накладным вихретоковым преобразователем различных конструкций. Полученные результаты были использованы для расчета конструкции накладного вихретокового преобразователя, позволяющего производить исследования тонких пленок.

2. Разработана конструкция сверхминиатюрного накладного дифференциального вихретокового преобразователя, позволяющая производить локальные исследования неоднородностей и дефектов тонких пленок и проводить дефектоскопию других металлических материалов.

3. Разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий осуществлять управление разработанным вихретоковым преобразователем и производить исследование различных параметров (электрическая проводимость и ее распределение по поверхности материала, толщина, степень дефектности) тонких металлических пленок и других металлических материалов и визуализировать результаты исследования.

4. Результаты сканирования тонких металлических пленок, полученные, с использованием разработанного программно-аппаратного комплекса и обработанными с использованием метода анализа изменения производной сигнала, демонстрируют возможность измерений размеров дефектов пленок с погрешностью 9%.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Миниатюрный вихретоковый преобразователь трансформаторного типа, разработанный на основе результатов моделирования распределения вихревых токов методом конечных элементов, позволяющий осуществлять локальное сканирование тонких металлических пленок и производить измерения размеров неоднородностей и дефектов типа нарушение сплошности имеющих площадь от 10 000 мкм<sup>2</sup>.

2. Программно-аппаратный комплекс, позволяющий осуществлять сканирование в автоматическом режиме, с возможностью изменения амплитуды (от 10 до 500 мВ) и частоты (от 100 кГц до 25 МГц) тока возбуждения преобразователя в зависимости от электрической проводимости (от 14 до 57 МСм/м) и толщины (от 100 нм) тонких металлических пленок, представляя результаты измерений в 2D и 3D режимах с возможностью определения местоположения и измерения размеров неоднородностей и дефектов.

3. Метод измерения размеров дефектов и неоднородностей тонкой металлической пленки по данным о скорости изменения сигнала вихретокового преобразователя, позволяющий по величине изменения производной сигнала снизить погрешность измерений до 9 %.

4. Результаты верификации разработанного программно-аппаратного комплекса, соответствующие результатам, полученным с использованием метода оптической микроскопии и фотометрического метода.

#### **Достоверность результатов работы**

Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью постановки задач и их физической обоснованностью, применением современной элементной базы, аппаратуры и актуальных систем высокоуровневого программирования при разработке программно-аппаратного комплекса для исследования неоднородностей и дефектов тонких металлических пленок, комплексным характером подхода к решению поставленных задач, достаточным объемом экспериментальных данных, полученных при проведении лабораторных исследований, обработкой экспериментальных данных с

разработкой и использованием специальных компьютерных программ, получением результатов, не противоречащих физике исследуемых процессов.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты работы докладывались, обсуждались на конференциях российского и международного уровней: «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, 2016г.; «Измерения, мир, человек — 2016», Барнаул, 2016 г.; «Инновации в неразрушающем контроле», Новосибирск, 2017г.; «Измерения, мир, человек — 2017», Барнаул, 2017 г.; «Актуальные проблемы электронного приборостроения», Москва, 2018г.; «V Международная конференция по инновациям в неразрушающем контроле», Екатеринбург, 2019г.; «Измерения, мир, человек — 2019», Барнаул, 2019 г.; «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», Томск, 2019г. «Измерения, мир, человек — 2020», Барнаул, 2020 г.; «Метрологическое обеспечение инновационных технологий», Санкт-Петербург, 2021г.; «MIP: Engineering-III-2021: Модернизация, Инновации, Прогресс: Передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации», Красноярск, 2021г.; «ICMSIT-III - 2022: Метрологическое обеспечение инновационных технологий», Красноярск, 2022г.

Результаты работы апробировались и использовались при выполнении фундаментальных работ по грантам РФФИ № 17-48-220044 «Создание и исследование высокоэффективных композиционных и наноструктурированных упрочняющих покрытий», № 18-38-00272 «Исследование сплавов, композиционных и полупроводниковых материалов, проводящих пленок с помощью миниатюрных и сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей» и № 20-38-90062 «Разработка программно-аппаратных комплексов для исследования проводящих материалов на основе сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей».

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора заключается в формулировании целей и задач исследований совместно с научным руководителем, в разработке программной и аппаратной составляющих экспериментальной установки, в проведении анализа научных достижений по теме научной работы, в проведении экспериментов с последующей обработкой результатов, в обобщении полученных результатов и формировании выводов по полученным результатам, подготовке публикаций в коллективе соавторов, апробации работы на всероссийских и международных конференциях.

### **Публикации**

По тематике диссертационного исследования опубликовано 39 работ, в том числе 32 публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 7 в перечне ВАК. Результаты исследования нашли отражение в 3 патентах РФ.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 100 наименований и приложений. Работа содержит 123 страницы, 2 таблицы, 52 рисунка, два приложения.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** посвящена научному анализу современного состояния приборов для исследования тонких металлических пленок.

На основании обзора современного состояния и литературы в области неразрушающего исследования тонких металлических пленок был выделен ряд свойств, оказывающих влияние на характеристики тонкой металлической пленки. К ним относятся толщина, форма профиля пленки, степень покрытия подложки, наличие объемных дефектов в пленке, параметры островков и т. д. В данной работе рассматриваются следующие параметры — толщина пленки и наличие объемных дефектов в пленке. Установлено, что оптимальным с точки зрения соотношения производительность/качество методом исследования тонкопленочных структур является неразрушающий вихретоковый метод, позволяющий производить исследование поверхности и структуры пленки с использованием вихретокового преобразователя (ВТП).

Создание ВТП, пригодных для измерения параметров металлических пленок в широком диапазоне для различных сочетаний материала пленки и подложки, а также многослойных структур осложнено малой толщиной и низкой электропроводностью пленок, однако получение первичной информации в виде электромагнитных сигналов, бесконтактность и высокая производительность определяют широкие возможности автоматизации вихретокового исследования для задач исследования тонких металлических пленок.

Установлено, что для исследования дефектов тонких металлических пленок эффективно применять трансформаторные накладные ВТП. Они обеспечивают меньшую зависимость выходного сигнала ВТП от зазора, высокое отношение сигнал/шум при относительной простоте конструкции.

Важной задачей при реализации вихретокового метода исследования является и повышение точности измерений. Добиться повышения точности возможно с использованием улучшенных ВТП и применением компьютеризированных методов обработки сигнала ВТП.

**Во второй главе** приведены результаты моделирования методом конечных элементов распределения вихревых токов в тонкой металлической пленке, наводимых накладным вихретоковым преобразователем.

Рассмотрены основные принципы построения вихретоковых преобразователей, описана конструкция разработанного накладного трансформаторного миниатюрного вихретокового преобразователя с сердечником из феррита для исследования электропроводности тонких металлических пленок (рис. 1). Сердечник представляет собой усеченный конус высотой 4,3 мм с диаметром основания 1,5 мм и диаметром вершины 0,1 мм (рис. 1, а). Измерительная обмотка (50 витков) расположена на острие конуса, генераторная обмотка (50 витков) расположена по центру сердечника и намотана таким образом, чтобы радиус был как можно меньше, для достижения максимальной локализации поля. Обмотки выполнены медной проволокой

диаметром 15 мкм. Для устранения влияния генераторной обмотки на измерительную обмотку и повышения отношения сигнал/шум в ВТП добавлена компенсационная обмотка, измерительная и компенсационная обмотки подключены по дифференциальной схеме, изображенной на рис. 1, б.

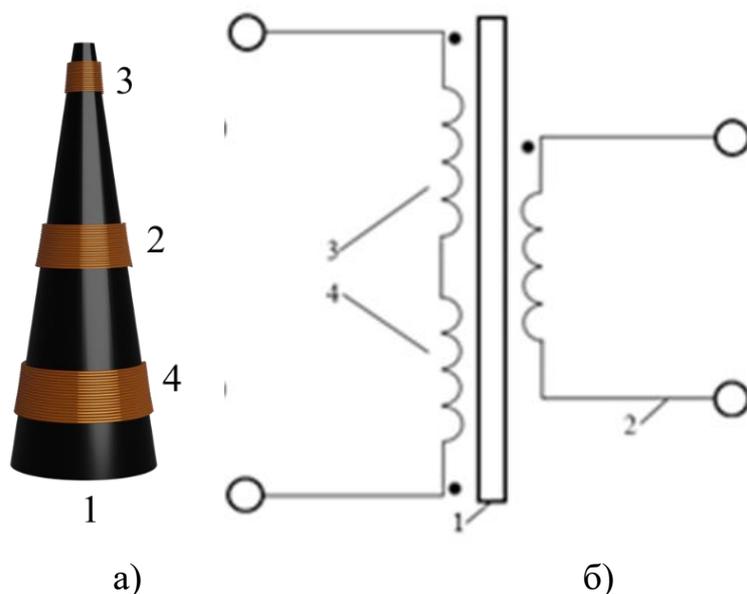


Рис. 1. Конструкция разработанного ВТП: а — 3D-модель; б — схема подключения катушек; 1 — ферритовый речечник, 2 — генераторная обмотка, 3 — измерительная обмотка, 4 — компенсационная обмотка

Приведена структурная схема (рис. 2) и описан алгоритм работы программно-аппаратного комплекса, приведены характеристики основных составляющих аппаратной части программно-аппаратного комплекса. Все составляющие комплекса разработаны или выбраны исходя из следующих критериев: компактность, доступность, программное управление, простота в управлении, низкое электропотребление, высокая скорость работы и рабочая частота, соответствующая диапазону, пригодному для исследования пленок, и т. д.

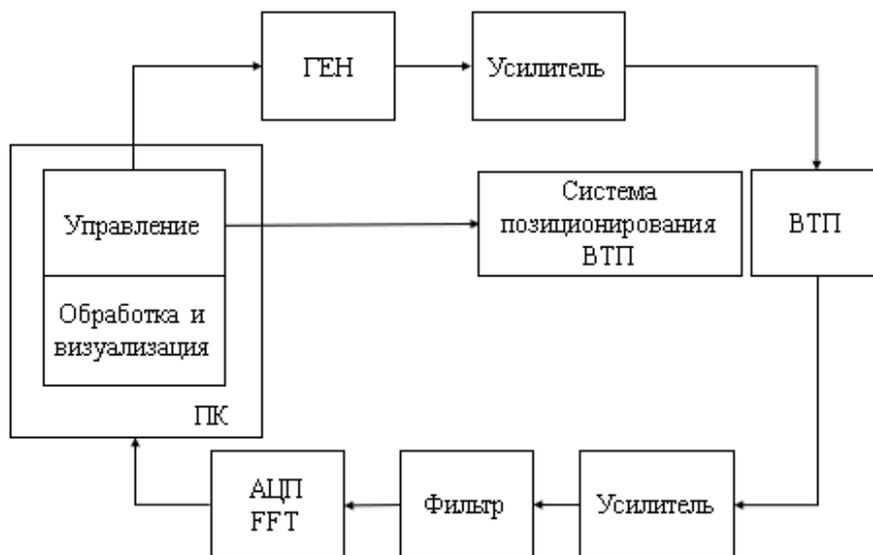


Рис. 2. Схема вихретокового программно-аппаратного комплекса

Описан алгоритм работы программного обеспечения, управляющего работой программно-аппаратного комплекса и отвечающего за обработку и визуализацию результатов в удобном для оператора виде. Программное обеспечение написано на Python и Processing с использованием библиотек с открытым исходным кодом. На рис. 3 приведено главное окно графического интерфейса разработанного программно-аппаратного комплекса.

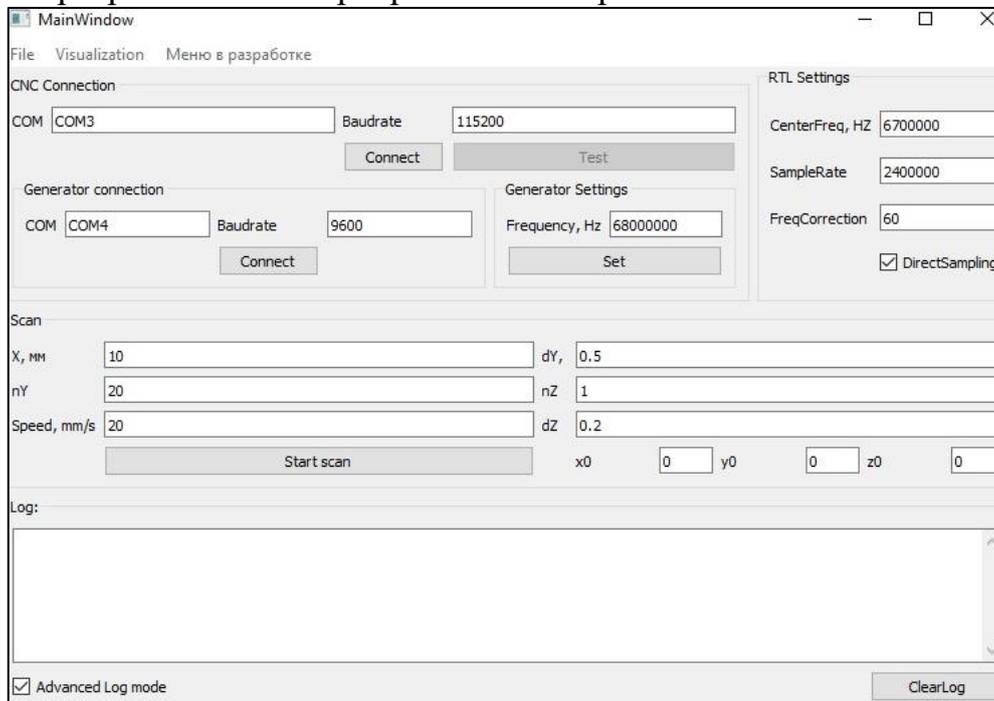


Рис. 3. Главное окно графического интерфейса программного обеспечения

Описаны реализованные режимы визуализации результатов сканирования. На рис. 4 приведен пример представления результата сканирования объекта исследования в виде гистограммы, по оси абсцисс отложены измеренные значения амплитуды сигнала, а вдоль оси ординат отложено количество точек, имеющих такую амплитуду. Такое графическое представление позволяет производить оценку однородности объекта исследования по высоте максимумов и их площади.

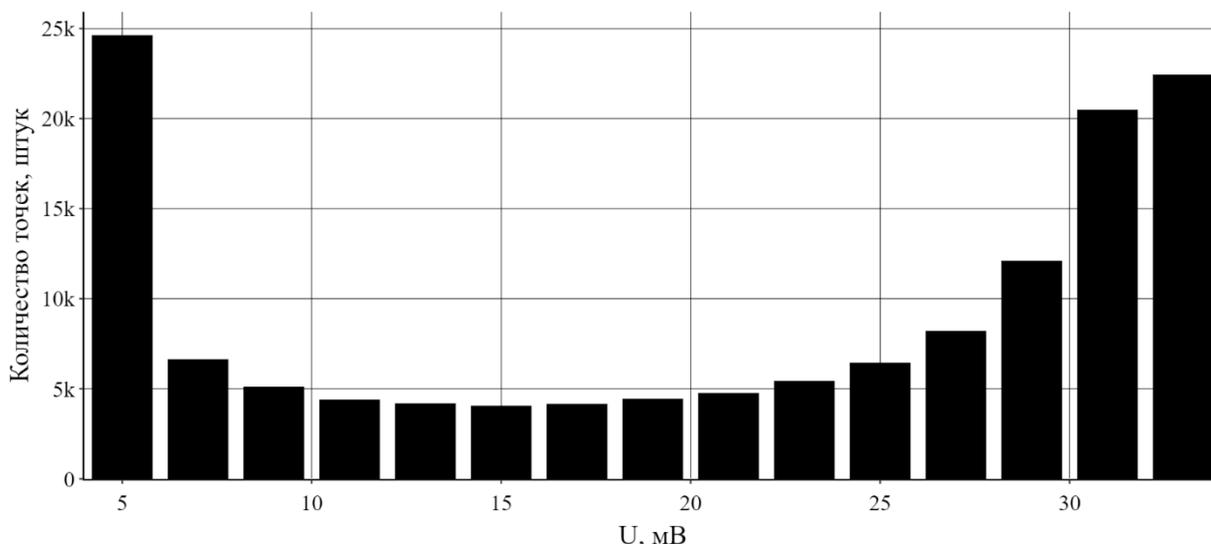


Рис. 4. Графическое представление результата сканирования объекта исследования в виде гистограммы

На рис. 5 приведено графическое представление результатов сканирования объекта исследования в трехмерном виде. Вдоль осей X и Y откладываются координаты положения датчика над объектом в миллиметрах, вдоль оси Z откладывается значение амплитуды сигнала в мВ. Кроме того, значения амплитуды сигнала выражены цветом каждой точки, справа приведена цветовая линейка для определения амплитуды по цвету. Такое графическое представление позволяет проводить анализ поверхности объекта.

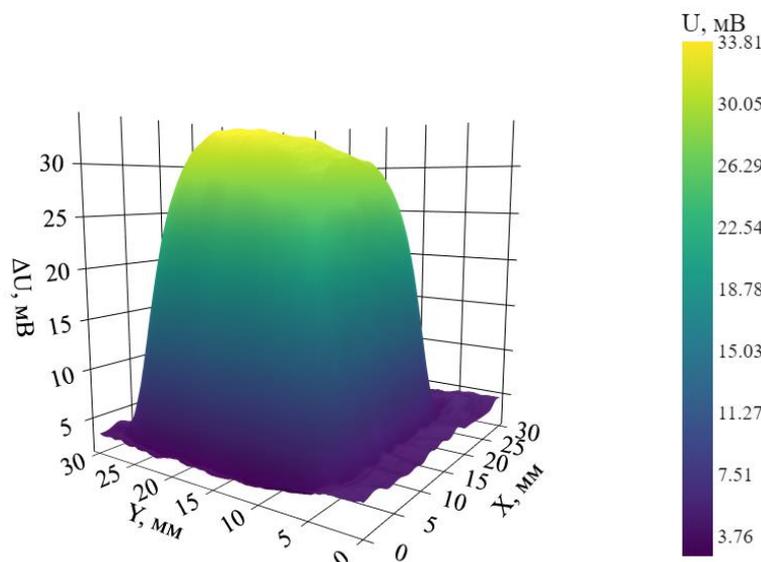


Рис. 5. Графическое представление результата сканирования пленки в трехмерном виде

На рис. 6 приведено графическое представление результатов сканирования объекта исследования в двумерном виде. Вдоль осей X и Y откладываются координаты положения датчика над объектом исследования в миллиметрах, а амплитуда сигнала закодирована в цвете точки и приведена цветовая линейка для определения амплитуды по цвету, также проведены изолинии для удобного определения амплитуды сигнала на отдельных участках. Такое графическое

представление позволяет визуально разделить области с различными значениями амплитуды сигнала и оценить размеры дефектов и неоднородностей на этих участках.

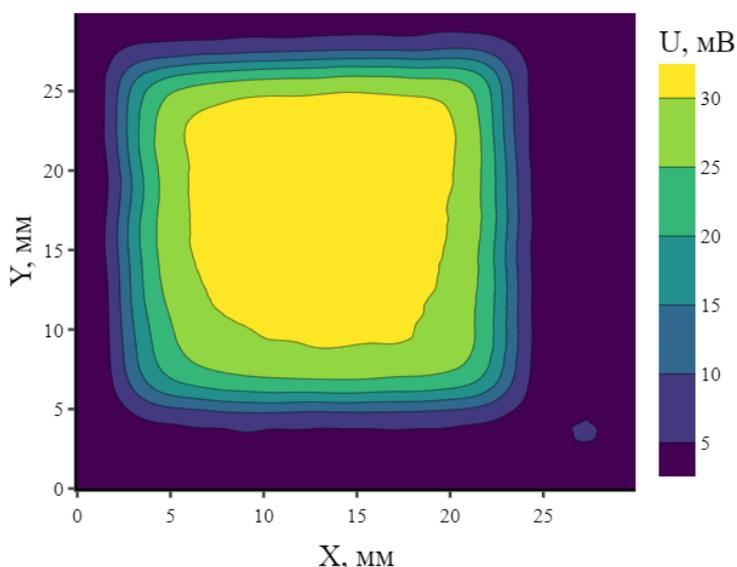


Рис. 6. Графическое представление результата сканирования пленки в двумерном виде

**В третьей главе** описываются экспериментальные исследования работы разработанного программно-аппаратного комплекса.

В качестве объекта для исследования работы разработанного программно-аппаратного комплекса использовались тонкие пленки металлов Cu и Ni, полученные методом конденсации из газовой фазы в вакууме на подложки из силикатного стекла.

Было получено несколько партий пленок, отличающихся материалом и толщиной. Толщина пленок в различных партиях варьировалась от 100 до 1000 нм, что обуславливалось использованием разного количества испаряемого вещества: с увеличением номера партии количество вещества увеличивалось.

Проанализирована работа измерительной системы с различной частотой возбуждающего сигнала. Показано что с ростом частоты возбуждающего сигнала качество получаемых результатов увеличивается, о чем свидетельствует значительное повышение соотношения сигнал/шум (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение результатов сканирования тонкой пленки на разной частоте возбуждающего сигнала

Параметр	4 МГц	7 МГц	13 МГц	19 МГц	25 МГц
$U_{\max}$ , мВ	7,5	22,5	37,9	42,9	47,4
$U_{\min}$ , мВ	5,87	4,76	6,16	7,07	6,95
$\Delta U$ , мВ	0,51	0,29	0,44	0,17	0,22
$\delta$ , %	5,31	1,30	1,16	0,38	0,47
Сигнал/шум	1,28	4,72	6,15	6,07	6,82

На рис. 7 приведена зависимость амплитуды выходного сигнала ВТП от частоты возбуждающего сигнала при сканировании тонкой медной пленки.

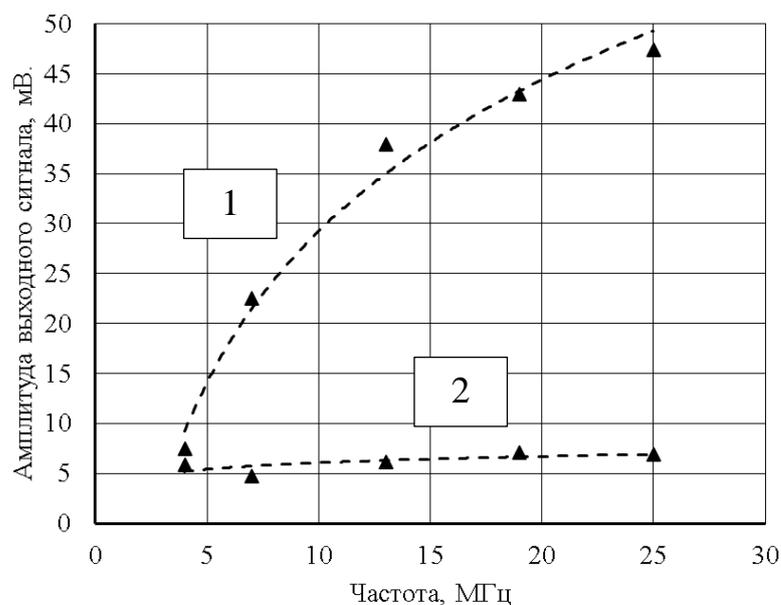


Рис. 7. Зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты возбуждающего сигнала при сканировании тонкой медной пленки: 1 — максимальная амплитуда над объектом исследования, 2 — минимальная амплитуда без объекта исследования

Таким образом, в результате тестирования работы программно-аппаратного комплекса на разных частотах в качестве рабочей частоты возбуждающего сигнала было выбрано значение 25 МГц. Эта частота позволила обеспечить наибольшее значение отношения сигнал/шум и, как следствие, повысить точность измерений.

Приведены результаты сканирования нескольких партий тонких медных пленок на стеклянных подложках. Сканирование ряда образцов металлических пленок показало, что вещество полученных пленок не распределено однородно по поверхности подложки. На рис. 8 для сравнения приведены результаты сканирования двух пленок с разной однородностью в 2D- и 3D-режимах визуализации. Проводя сравнение размеров площади областей, представленных на рис. 8, можно отметить значительный участок на рис. 8, а, где амплитуда сигнала ВТП составляет порядка 25 мВ. Этот участок занимает более 80% площади пленки. Это позволяет сделать вывод о высокой однородности пленки. Напротив, на рис. 8, б отмечается несколько различных участков с различной амплитудой сигнала ВТП, что свидетельствует о низкой однородности пленки.

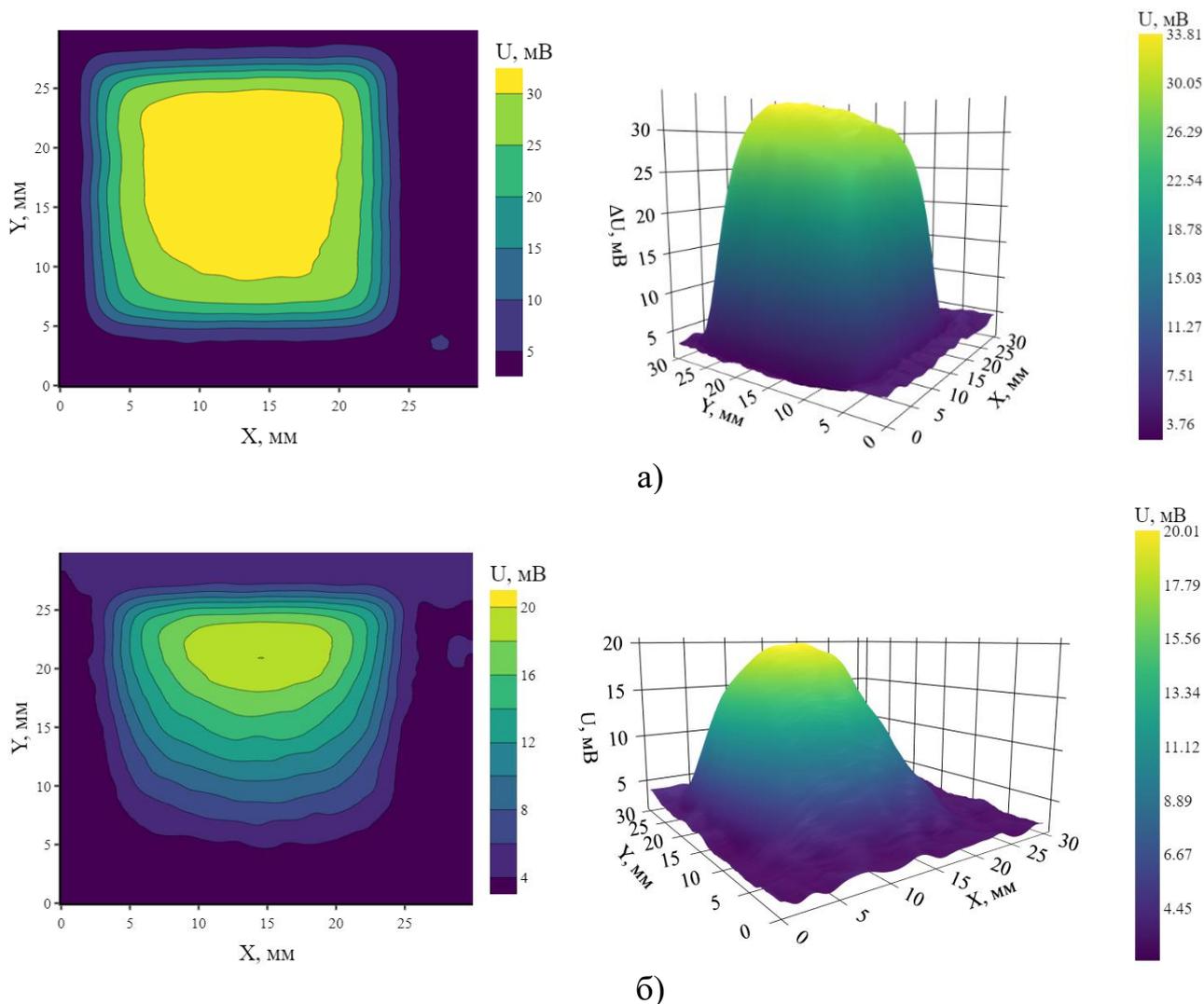


Рис. 8. Результаты сканирования двух медных пленок с разной однородностью распределения электропроводности: а — высокая однородность; б — низкая однородность

Также была определена зависимость амплитуды сигнала ВТП от толщины пленки. Для пленок толщиной от 100 до 500 нм и электропроводностью 14 МСм/м максимальная амплитуда сигнала колебалась от 5,98 до 8,76 В соответственно.

На рис. 9 приведена зависимость амплитуды сигнала ВТП от толщины пленок Ni. По графику можно сделать вывод о прямой зависимости амплитуды сигнала ВТП от толщины пленки Ni в диапазоне проведенных нами измерений.

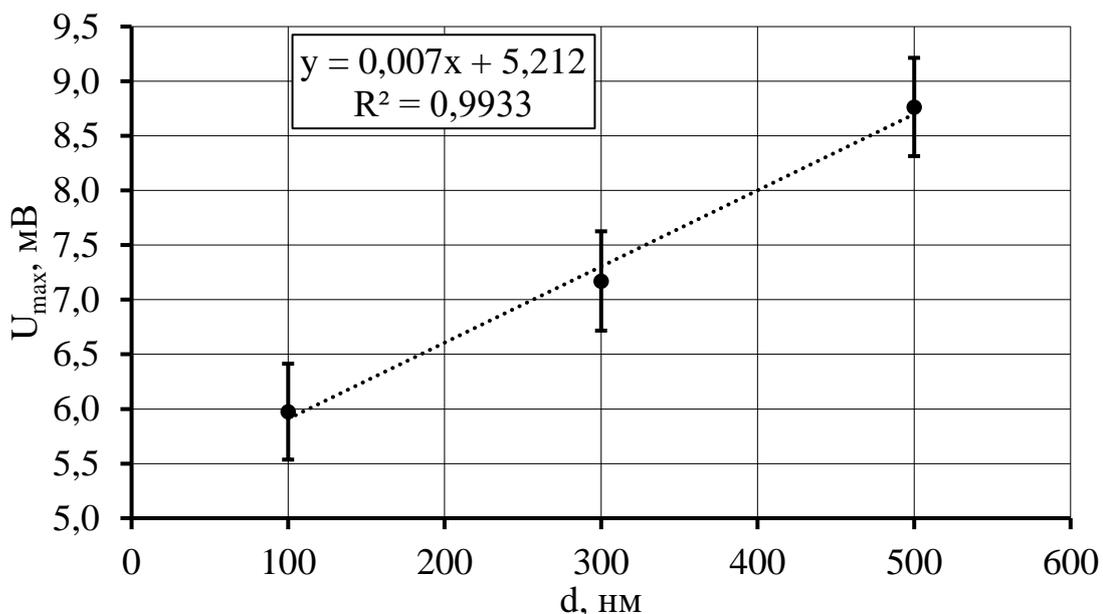


Рис. 9. Зависимость амплитуды сигнала ВТП от толщины пленок Ni

Для проверки получаемых результатов анализа распределения неоднородностей пленок по поверхности с использованием вихретокового метода были проведены исследования светопропускания пленок (фотометрический метод). На рис. 10 приведена схема измерительной установки, лазерный луч с длиной волны 650 нм пропускался сквозь пленку, доля прошедшего излучения измерялась фоторезистором.

На рис. 11, а приведены результаты измерения коэффициента ослабления лазерного излучения тонкой пленки с низкой однородностью, для сравнения на рис. 12, б приведен результат измерения амплитуды сигнала ВТП над этой пленкой.



Рис. 10. Схема измерения коэффициента ослабления света тонкой пленки

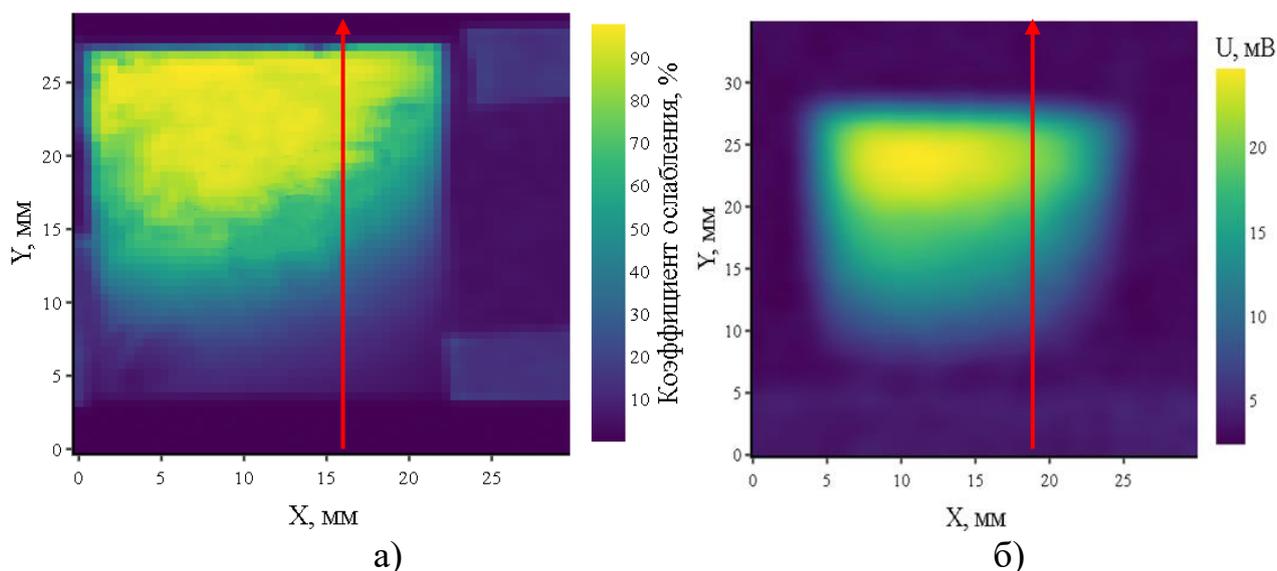


Рис. 11. Результаты сканирования пленки: а — вихретоковым методом; б — фотометрическим методом

Изображения, полученные в результате измерений фотометрическим и вихретоковым методом, обладают значительным визуальным сходством. Для количественной оценки степени сходства изображений на рис. 12 вынесены сечения, проходящие через одинаковые области пленки. На рис. 11 выбранные сечения изображены красными линиями.

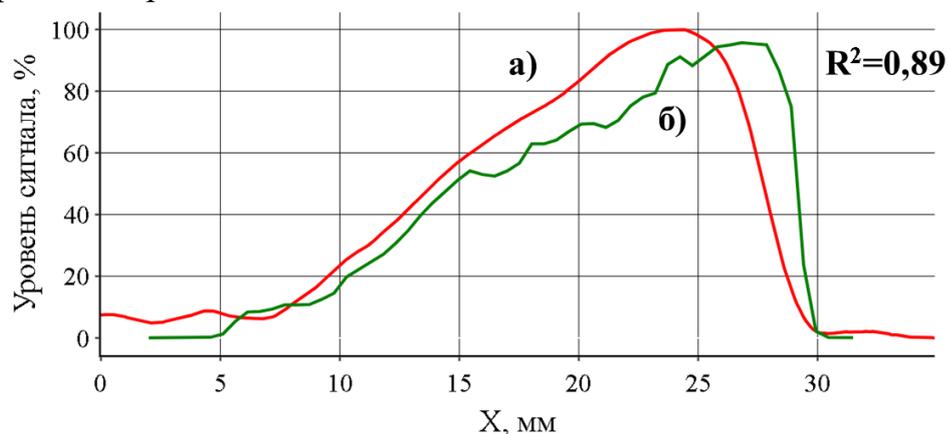


Рис. 12. Зависимость уровня сигнала от координаты вдоль выбранного сечения: а — вихретоковый метод; б — фотометрический метод

Результаты позволяют сделать вывод о высокой степени корреляции между амплитудой сигнала ВТП и коэффициентом ослабления лазерного излучения тонкой пленкой, который, в свою очередь, прямо пропорционален толщине пленки. Коэффициент корреляции составил 0,89.

Для определения способности разработанного программно-аппаратного комплекса к обнаружению дефектов типа нарушения сплошности на пленки были нанесены дефекты различных размеров.

На рис. 13 приведены снимки дефектов пленки, полученные оптическим микроскопом. Дефект (а) имеет размеры  $6,2 \times 0,11$  мм и расположен параллельно оси X, соответствующей направлению непрерывного движения датчика, а дефект (б) расположен параллельно оси Y, соответствующей направлению дискретного движения датчика, и имеет размеры  $4,5 \times 0,17$  мм. Соответственно,

дефект, представленный на рис. 13, а, можно считать продольным, а дефект, представленный на рис. 13, б, — поперечным.

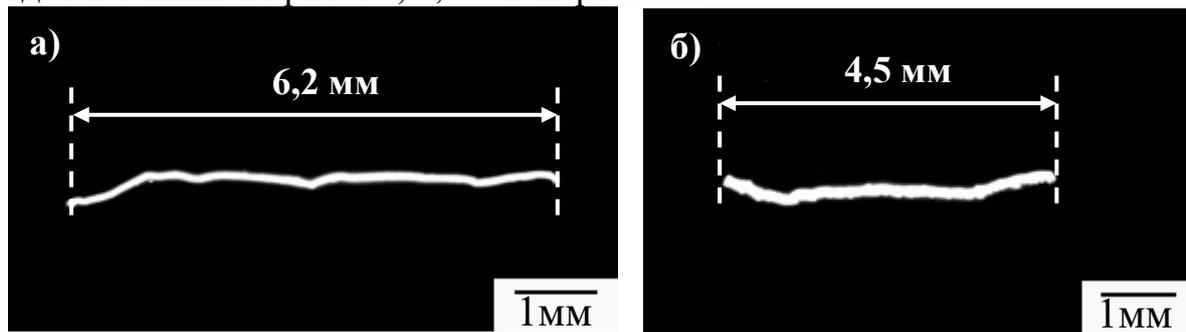


Рис. 13. Снимок дефектной области с помощью оптического микроскопа.  
а — продольный дефект, б — поперечный дефект

На рис. 14, а приведен результат сканирования данной пленки разработанным вихретоковым программно-аппаратным методом, области 1 и 2 соответствуют дефектам, представленным на рис. 13, а и б соответственно. На рис. 14, б приведено изменение амплитуды сигнала по сравнению с бездефектной пленкой, сечение 1 проходит вдоль продольного дефекта, а сечение 2 — вдоль поперечного дефекта.

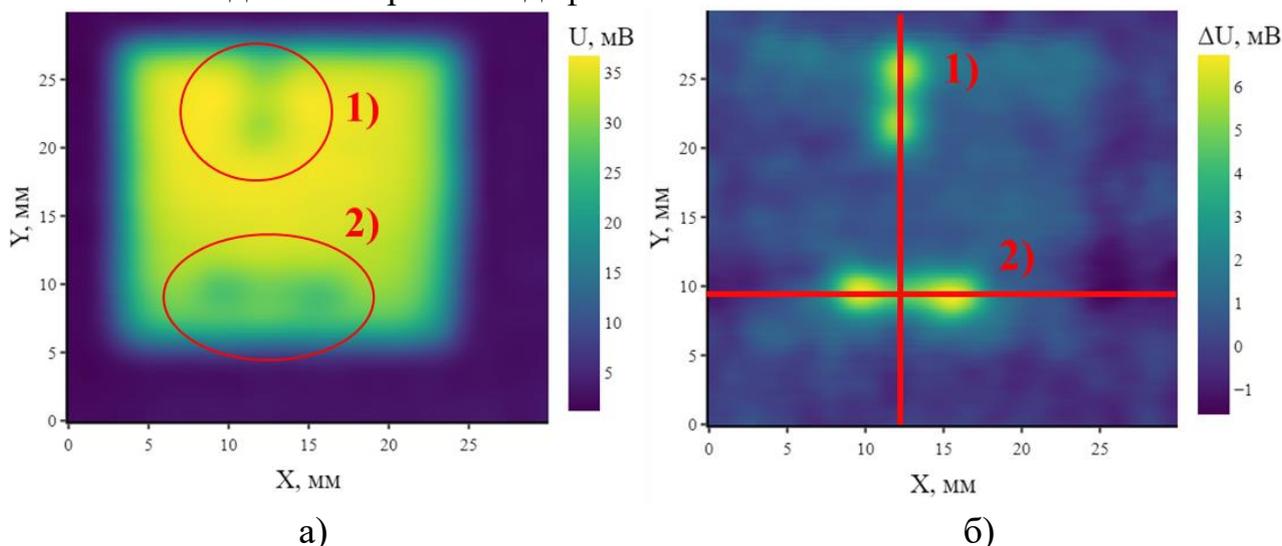


Рис. 14. Результаты сканирования пленки с дефектами: 1 — амплитуда сигнала ВТП; 2 — изменение амплитуды сигнала ВТП относительно бездефектной пленки

Для определения размеров дефектов на рис. 15 вынесены выбранные сечения 1 и 2.

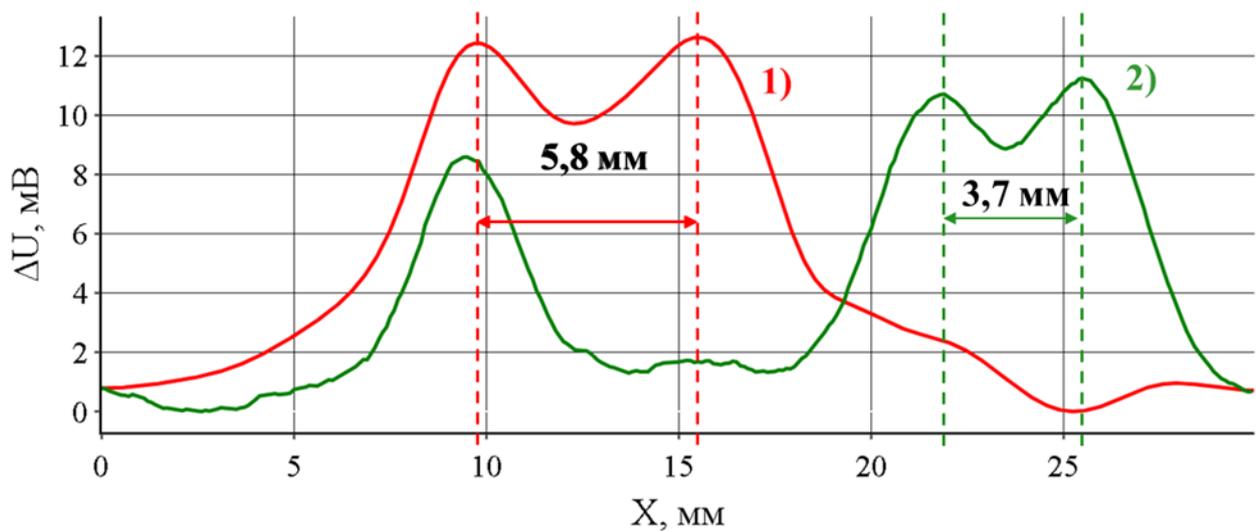


Рис. 15. Изменение амплитуды сигнала вихретокового преобразователя вдоль выбранных сечений

Если считать, что границе дефекта соответствует максимум изменения амплитуды сигнала то длина дефекта 1 — 5,8 мм, а длина дефекта 2 — 3,7 мм. Отклонение результатов измерения вихретоковым методом от оптического метода — 6,4% для продольного дефекта 1 и 17% для поперечного дефекта 2.

Для повышения точности определения границ дефектов и неоднородностей, а также границ пленок проведен анализ зависимости амплитуды сигнала при приближении к границе пленки на разной скорости.

На рис. 16, а и 17, а приведены зависимости амплитуды сигнала от положения датчика относительно границы пленки при разной скорости движения датчика, а на рис 16, б и 17, б приведена первая частная производная амплитуды сигнала от координаты ( $\partial U/\partial x$ ).

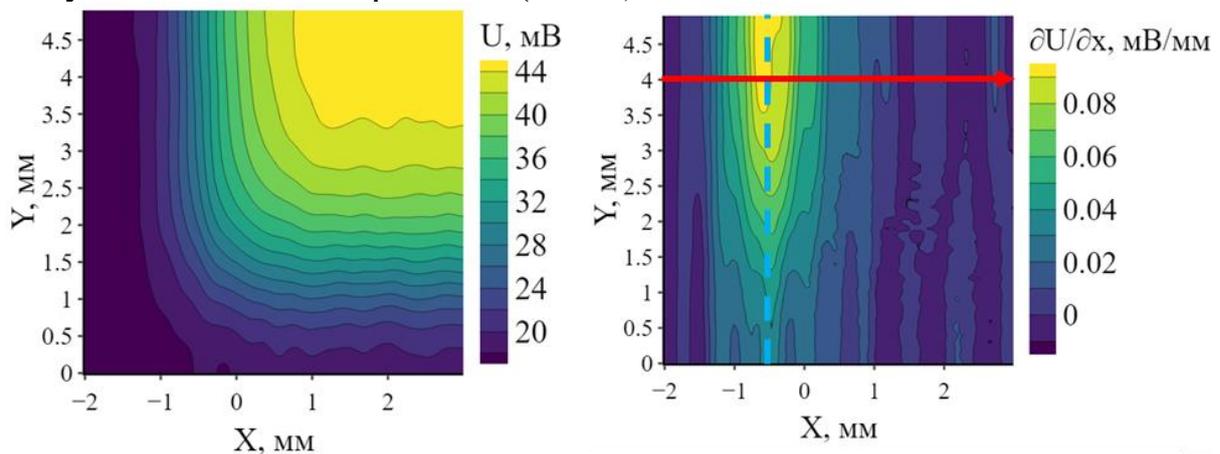


Рис. 16. Результаты сканирования края пленки при скорости движения датчика 1 мм/с: а — амплитуда сигнала б — скорость изменения амплитуды сигнала

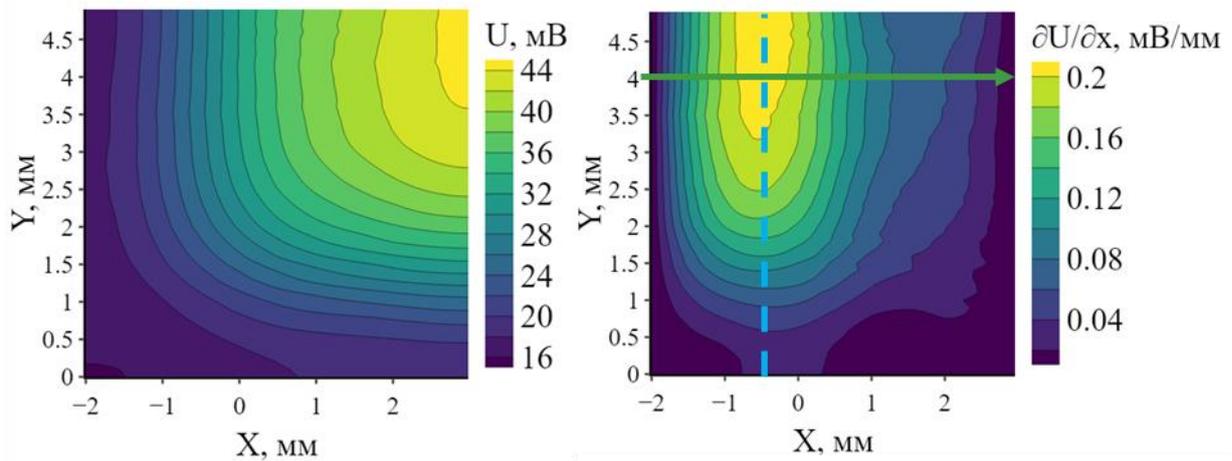


Рис. 17. Результаты сканирования края пленки при скорости движения датчика 10 мм/с: а — амплитуда сигнала б — скорость изменения амплитуды сигнала

На рисунке 18 приведены зависимости амплитуды сигнала от положения датчика относительно границы пленки, при движении датчика на минимальной скорости 1 мм/с (1) и 10 мм/с (2) вдоль выбранного сечения.

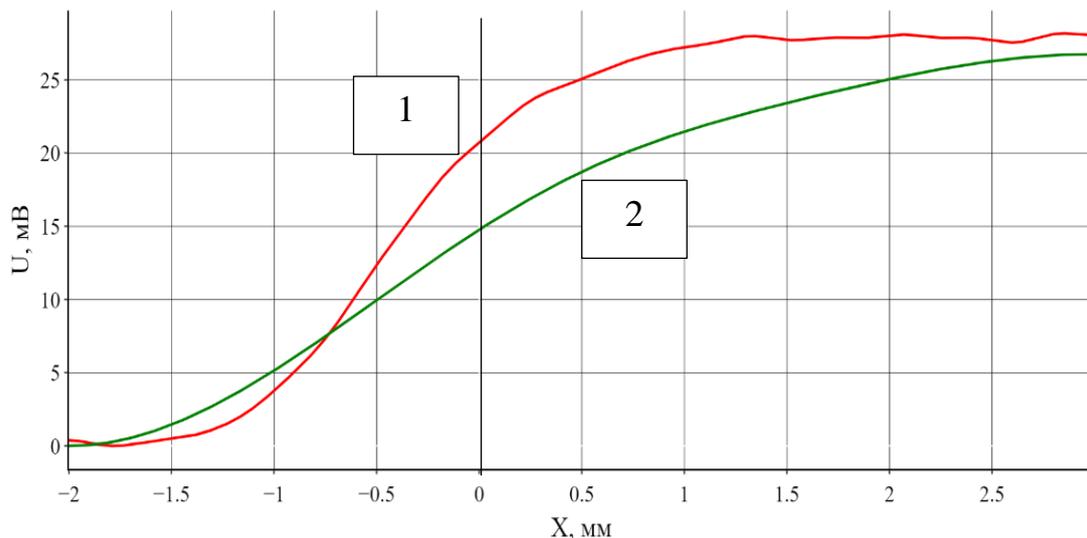


Рис. 18. Зависимость амплитуды сигнала от положения датчика относительно границы пленки при разной скорости движения ВТП: 1 — 1 мм/с; 2 — 10 мм/с

Рисунок 18 демонстрирует разницу в ширине переходной зоны от области без объекта исследования до области, содержащей объект исследования, на которой уровень амплитуды сигнала преобразователя принимает стабильное значение. Ширина этой зоны значительно меняется в зависимости от скорости движения ВТП.

Анализ скорости изменения амплитуды сигнала, приведенной на рис. 19, показал, что вне зависимости от скорости движения датчика, максимум скорости изменения амплитуды сигнала располагается, на расстоянии  $0,5 \pm 0,06$  мм от границы пленки.

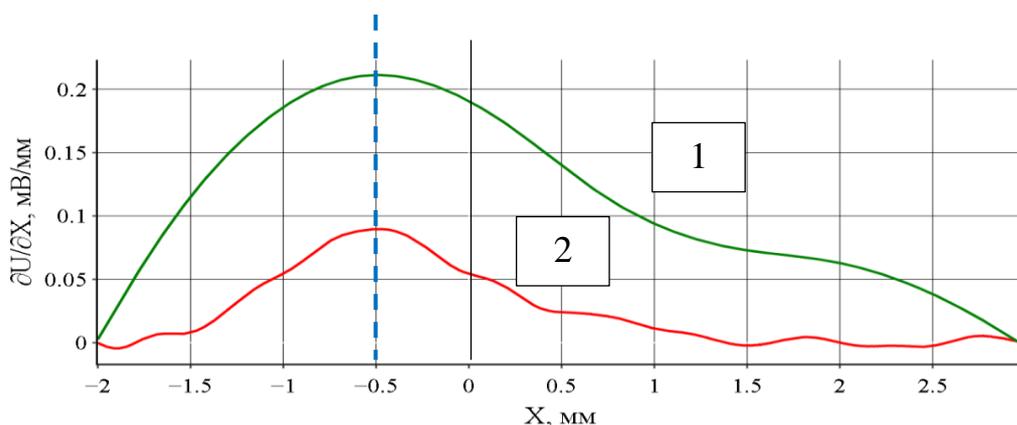


Рис. 19. Зависимость скорости изменения сигнала от положения датчика относительно границы пленки при разной скорости движения ВТП: 1 — 1 мм/с; 2 — 10 мм/с

Основываясь на выводах предыдущего пункта, был проведен анализ скорости изменения сигнала в дефектных областях. На рис. 20 приведены результаты анализа скорости изменения сигнала ВТП при сканировании пленки с дефектами.

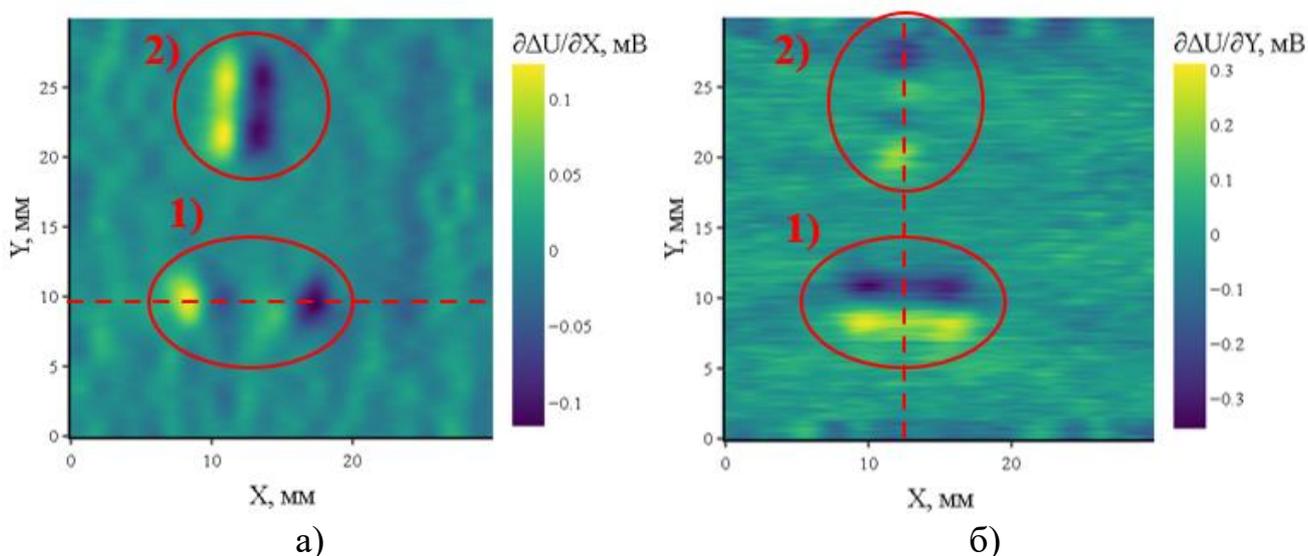


Рис. 20. Результаты анализа скорости изменения сигнала ВТП при сканировании пленки с дефектами относительно бездефектной пленки: 1 — границы продольного дефекта; 2 — границы поперечного дефекта; а — скорость изменения сигнала вдоль оси X; б — скорость изменения сигнала вдоль оси Y

На рис. 21 приведено сравнение амплитудного метода и метода анализа скорости изменения сигнала для определения длины продольного дефекта.

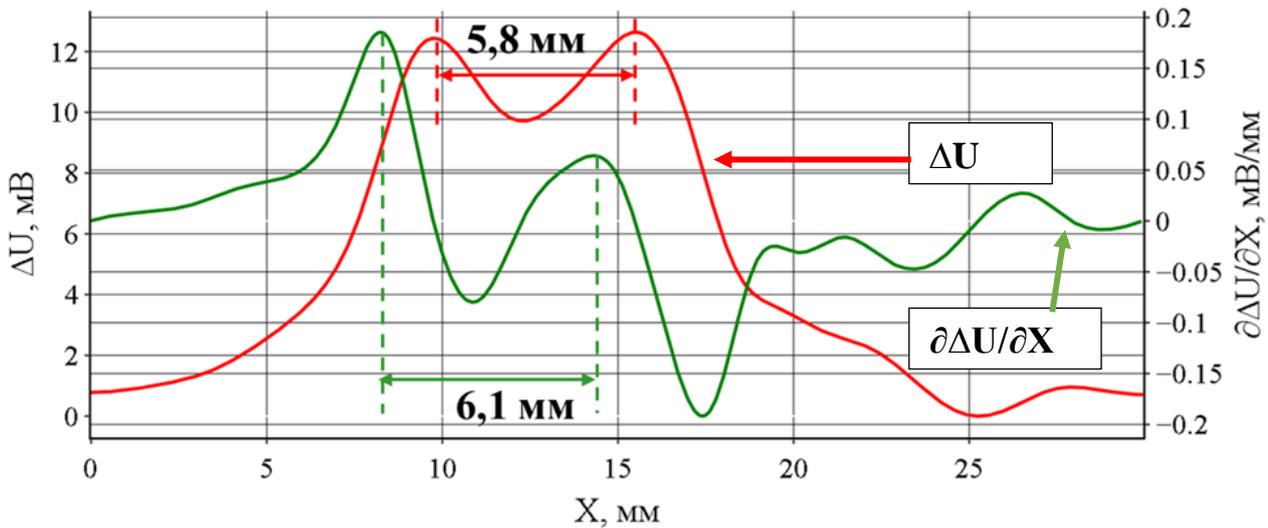


Рис. 21. Определение длины продольного дефекта (а) по изменению амплитуды сигнала и по скорости изменения сигнала

Установлено, что при длине продольного дефекта 6,2 мм анализ изменения амплитуды сигнала позволил получить значение длины дефекта 5,8 мм, анализ скорости изменения амплитуды сигнала позволил получить значение длины дефекта 6,1 мм. Таким образом, отклонение результатов измерения длины амплитудным методом от истинного значения длины составило 6,4%, а результаты метода анализа скорости — 1,6%.

На рис. 22 приведено сравнение амплитудного метода и метода анализа скорости изменения сигнала для определения длины поперечного дефекта.

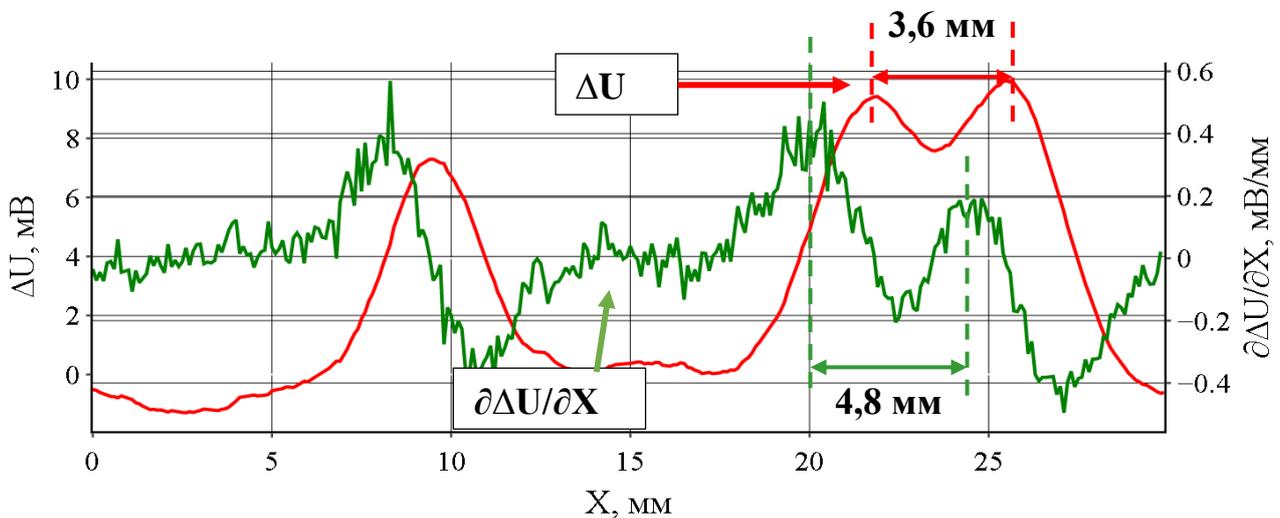


Рис. 22. Определение длины поперечного дефекта (б) по изменению амплитуды сигнала и по скорости изменения сигнала

При длине поперечного дефекта 4,5 мм анализ изменения амплитуды сигнала позволил получить значение длины дефекта 3,7 мм, анализ скорости изменения амплитуды сигнала позволил получить значение длины дефекта 4,8 мм. Таким образом, отклонение результатов измерения длины амплитудным методом от истинного значения длины составило 20%, а результаты метода анализа скорости — 6,7%.

## Заключение

Таким образом, основные научные результаты диссертации заключаются в том, что:

1. Разработана и исследована новая конструкция вихретокового преобразователя с характеристиками, рассчитанными на основе результатов математического моделирования, позволяющая осуществлять локальное сканирование тонких металлических пленок, определять координаты границ пленок и производить измерения размеров дефектов и неоднородностей площадью от 10 000 мкм<sup>2</sup>.

2. Разработан программно-аппаратный комплекс реализующий метод вихревых токов, предназначенный для экспериментального исследования неоднородностей и дефектов тонких металлических пленок, имеющих толщину от 100 нм и удельную электропроводность от 14 МСм/м.

3. Разработан метод измерения размеров дефектов и неоднородностей тонкой металлической пленки по данным о скорости изменения сигнала вихретокового преобразователя. Предложенный метод показал значительное увеличение точности определения границ и размеров дефектов. Погрешность измерения положения границ пленки предложенным методом составила 9 %.

Результаты верификации разработанного программно-аппаратного комплекса, соответствуют результатам, полученным с использованием метода оптической микроскопии и фотометрического метода.

4. Установлен диапазон частот возбуждающего сигнала вихретокового преобразователя – 10-30 МГц, позволяющий производить исследования дефектов структуры пленок, имеющих толщину от 100 нм.

### Список публикаций по теме диссертации

#### Публикации в изданиях, индексируемых перечнем ВАК

1. Дмитриев, С. Ф. Дефектоскопия сплавов методом вихревых токов / С. Ф. Дмитриев, А. О. Катасонов, В. Н. Маликов, А. М. Сагалаков // Дефектоскопия. – 2016. – №1. – С. 41 – 47.

2. Катасонов, А. О. Контроль дефектов в структурах металл- диэлектрик с использованием сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей. / С.Ф. Дмитриев, А. В. Ишков, В. Н. Маликов, А. М. Сагалаков, А. О. Катасонов // Инженерная физика. – 2018. – № 10. – С. 50 – 54.

3. Катасонов, А. О. Сверхминиатюрные вихретоковые преобразователи для контроля дефектов в структурах металл-диэлектрик / С. Ф. Дмитриев, А. В. Ишков, В. Н. Маликов, А. М. Сагалаков, А. О. Катасонов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2019. – № 2. – С. 55 – 57.

4. Катасонов, А. О. Измерительная система для исследования дефектов пластин из сплавов с помощью сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей / А. О. Катасонов, В. Н. Маликов, А. Ю. Филимонова, А. А. Григорьев, К. А. Муравлев // Инженерная физика. – 2019. – № 12. – С. 37 – 42.

5. Катасонов, А. О. Исследование поверхности и электропроводности тонких металлических пленок системы Ni–Al / С. Ф. Дмитриев, А. В. Ишков, А.

М. Сагалаков, А. О. Катасонов, В. Н. Маликов // Российские нанотехнологии. – 2021. – № 2. – С. 56-62.

6. Катасонов, А.О. Измерительная система для исследования дефектов пластин из сплавов с помощью сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей / В. Н. Маликов, А. О. Катасонов, Н. Д. Тихонский, В. Н. Козлова, А. В. Ишков // Инженерная физика. – 2022. – № 5. – С. 15 – 26.

7. Маликов, В.Н. Применение цифровых технологий в вихретоковых методах исследований / В.Н. Маликов, А.В. Ишков, А.О. Катасонов // Вестник машиностроения. – 2023. – № 3. – С. 201 – 207.

### **Публикации в изданиях, индексируемых перечнем Web of Science и Scopus**

1. Dmitriev S.F., Ishkov A.V., Malikov V.N., Sagalakov A.M., Katasonov A.O., Ekkerdt K. Y. Non-destructive Testing of Duralumin and Titanium, International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering" 2017 (AIME 2017)

2. Katasonov, A.O. Subminiature Eddy Current Transducers for Thickness Measurement Problems / S.F. Dmitriev, A.V., A.O. Katasonov, Ishkov, V.N. Malikov, A.M. Sagalakov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2020, - Vol. 49, - №. 9, - P. 783 – 786

3. Katasonov, A. O. Subminiature Eddy-Current Transducers for Conductive Materials and Layered Composites Research / S. F. Dmitriev, A. V. Ishkov, V. N. Malikov, A. O. Katasonov, A. M. Sagalakov, // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – № 692. – P. 655 – 665.

4. Katasonov, A.O. Control properties of steel by using subminiature eddy current transducers / V. N. Malikov, D. A. Fadeev, A. O. Katasonov, S. F. Dmitriev, A. V. Ishkov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1661. – P. 1 – 10.

5. Katasonov, A.O Inspection of corrosion defects of steel pipes by eddy current method / V. N. Malikov, D. A. Fadeev, A. O. Katasonov, S. F. Dmitriev, A. V. Ishkov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 1728. – № 1. – P. 123 – 131.

6. Katasonov, A. O Scanning steel junctions using eddy current probe / V.N. Malikov, D. A. Fadeev, A. O. Katasonov, S. F. Dmitriev, A. V. Ishkov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021 – Vol. 1728. – № 1. – P. 234 – 241.

7. Katasonov, A.O. Scanning the thickness of conductive and dielectric coatings using superminiature eddy current prob / V.N. Malikov, D.A. Fadeev, A.O. Katasonov, S.F. Dmitriev, A. V. Ishkov // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 130. P. 548 - 554

8. Malikov V.N, Katasonov A.O., Tihonskiy N.D., Kozlova V.N, Valulina E.A, Sagalakov A.M., Dmitriev S.F., Ishkov A.V. Computerized Hardware and Software System for Investigation of Welding Defects of High-Strength Steel Based on a Subminiature Eddy-Current Transducer. Lecture Notes in Networks and Systems volume 510, 2023

9. Dmitriev, S. F. Examination of the junctures of aluminium and dielectric structures using subminiature eddy-current transducers / S. F. Dmitriev, V. N. Malikov.

/ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – 2020. – V. 286. – P. 234-239.

10. Katasonov, A. O. Computerized measuring system for study of aluminum alloy defects / V. N. Malikov, A. M. Sagalakov, D. A. Fadeev, A. O. Katasonov, S. F. Dmitriev, A. V. Ishkov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1615. – № 125. – P. 67 – 75.

11. Katasonov, A. O. Subminiature eddy-current transducers for studying steel to dielectric junctions / A. O. Katasonov, V. N. Malikov // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 2053. – P. 1-6.

12. Katasonov, A. O. Application of an eddy-current method to measure electrical conductivity of thin films / A. O. Katasonov, V. N. Malikov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 441. – P. 1-7.

13. Katasonov, A. O. Subminiature eddy-current transducers for thickness studies / A. O. Katasonov, S. F. Dmitriev, A.V. Ishkov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 181. – № 1.. – P. 1-6.

14. Katasonov, A. O. Investigation of welded joints of aluminium alloys using subminiature eddy-current transducers / A. O. Katasonov, S. F. Dmitriev, V. N. Malikov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 327. – № 4. – P. 1-8.

15. Katasonov, A. O. Research of aluminum alloys with using eddy-current transducers on the basis of cores of various form / A. O. Katasonov, A.V. Ishkov, S. F. Dmitriev, V. N. Malikov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 289. – № 1. – P. 1-7.

16. Katasonov, A. O. Research of aluminum alloys with using eddy-current transducers on the basis of cores of various form / A. O. Katasonov, A.V. Ishkov, S. F. Dmitriev, A. M. Sagalakov // MATEC Web of Conferences. – 2018. – V. 143. – № 1. – P. 1-7.

17. Katasonov, A. O. Research of Steel to Dielectric Transition Using Subminiature Eddy-Current Transducer / A. O. Katasonov, A.V. Ishkov, S. F. Dmitriev, V. N. Malikov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 1015. – № 3. – P. 1-8.

18. Katasonov, A. O. Subminiature eddy-current transducers designed to study welded joints of titanium alloys / A. O. Katasonov, V. N. Malikov, A.V. Ishkov, S. F. Dmitriev // AIP Conference Proceedings. – 2017. – V. 1915. – P. 1-4.

19. Katasonov, A. O. Research of aluminium alloys with use of subminiature eddy current transducers / A. O. Katasonov, A.V. Ishkov, S. F. Dmitriev, A. M. Sagalakov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – V. 87. – № 8. – P. 1-6.

20. Katasonov, A. O. Non-destructive testing of Al-Mg alloys by using the eddy-current method / A. O. Katasonov, A.V. Ishkov, S. F. Dmitriev, A. M. Sagalakov // MATEC Web of Conferences. – 2017. – V. 106. – № 1. – P. 1-7.

21. Katasonov, A. O. Research of Conductive Materials by Multifrequency Measuring System on the Basis of Eddy Current Transducers / A. O. Katasonov, A.V. Ishkov, S. F. Dmitriev, V. N. Malikov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 189. – № 1. – P. 1-5.

22. Katasonov, A. O. Non-destructive testing of nanomaterials by using subminiature eddy current transducer / A. O. Katasonov, A.V. Ishkov, S. F. Dmitriev, V. N. Malikov, L. I. Shevtsova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 177. – № 1. – P. 1-5.

23. Katasonov, A. O. Chemical reactions at high-speed HFC-boriding / A. O. Katasonov, A.V. Ishkov, S. F. Dmitriev, V. N. Malikov, L. I. Shevtsova // E3S Web Conf. – 2019. – V. 135. – P. 1-7.

24. Katasonov, A. O. Chemical reactions at high-speed HFC-boriding / A. O. Katasonov, A.V. Ishkov, S. F. Dmitriev, V. N. Malikov // E3S Web Conf. – 2020. – V. 157. – P. 1-6.

25. Katasonov, A. O. Research of aluminium alloys with use of subminiature eddy current transducers / A. O. Katasonov, A.V. Ishkov, S. F. Dmitriev, A. M. Sagalakov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – V. 1515. – P. 1-7.

26. Katasonov, A. O. Non-destructive testing of nanomaterials by using subminiature eddy current transducer / A. O. Katasonov, D.A. Fadeev, A.V. Ishkov, S. F. Dmitriev, V. N. Malikov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – V. 1061. – № 1. – P. 1-9.

27. Katasonov, A.O. Measurement System for Studying Flaws in Alloy Slabs by Means of Subminiature Eddy-Current Transducers / S.F. Dmitriev, A.V. Ishkov, V.N. Malikov, A.M. Sagalakov, A.O. Katasonov, L.I. Shevtsova // Measurement Techniques. – 2017. – Vol. 60. – №4 – P. 372 – 375

28. Katasonov, A.O. Automated software and hardware complex based on an eddy current sensor for studying the properties of thin films / S. Voinash, R. Zagidullin, V. Yumagulova, A. O. Katasonov, A. V. Ishkov // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2573. – P. 1-8

29. Katasonov, A.O. Subminiature eddy-current transducer for studying defects in weld joints of high-strength steel / A. O. Katasonov, A.V. Ishkov, S. F. Dmitriev, A. M. Sagalakov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1515. – P. 1-8.

30. Katasonov, A. O. Investigation of aluminum alloys by using subminiature eddy current probes / A. O. Katasonov, D.A. Fadeev, A.V. Ishkov, S. F. Dmitriev, V. N. Malikov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – V. 510. – № 19. – P. 1-9.

31. Katasonov, A. O. Investigation of aluminum alloys by using subminiature eddy current probes / S. F. Dmitriev, V. N. Malikov, A. M. Sagalakov, A. V. Ishkov, A. O. Katasonov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 365. – № 1. – P. 1-7.

32. Katasonov, A. O. Superminiature Eddy-current Transducers for Thickness Studies / S. F. Dmitriev, V. N. Malikov, A. M. Sagalakov, A. V. Ishkov, A. O. Katasonov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 262. – P. 1-6.

#### **Патенты:**

1. Вихретоковый томограф (Тома). – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016660972; № 2016618522; заявл. 03.08.2016; опубл. 20.10.2016. 3 с.

2. Дефектоскоп для сварных швов: пат. 2 639 592 Рос. Федерация. МПК G01N 27/90 № 2015157395; заявл. 31.12.2015; опубл. 21.12.2017. 5 с.

3. Способ измерения электропроводности тонких металлических пленок 2697473 Рос. Федерация. МПК G10N 27/90 № 2019100657; заявл. 10.01.2019; опубл. 14.08.2019. 6 с.

### **Благодарности**

Автор выражает искреннюю и глубокую благодарность своему научному руководителю, доктору физико-математических наук, **Сагалакову Анатолию Михайловичу** за помощь и поддержку на всех этапах работы. Автор выражает глубокую признательность к.т.н Маликову Владимиру Николаевичу за неоценимый вклад в подготовку и оформление публикаций по материалам исследования. Автор приносит благодарность аспирантам кафедры Общей и экспериментальной физики Шуткину Алексею Александровичу и Тихонскому Николаю Дмитриевичу за помощь в получении тонких металлических пленок и написании программного кода. Особую признательность за консультативную помощь и поддержку на всех этапах выполнения работы автор выражает кандидату технических наук Дмитриеву Сергею Федоровичу.