

На правах рукописи

ЧЕРТОВ Дмитрий Николаевич

**ВИХРЕТОКОВЫЕ МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОГО
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

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

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

Санкт-Петербург - 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор

Потапов Анатолий Иванович

Официальные оппоненты:

Марусина Мария Яковлевна

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии, заведующий кафедрой

Ляшков Александр Иванович

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе» Российской академии наук, лаборатория физики прочности, старший научный сотрудник

Ведущая организация – ОАО «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология»

Защита диссертации состоится 17 июня 2013 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.07 при Национальном минерально-сырьевом университете «Горный» по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. № 7212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

Автореферат разослан 16 мая 2013г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета

ГАБОВ Виктор Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Углепластики и углерод-углеродные композиционные материалы – композиционные материалы на основе полимерных и углеродных матриц соответственно, армированные наполнителями из углеродных волокон, широко применяются в различных отраслях промышленности при все более возрастающих требованиях к их гарантированному качеству. В процессе производства изделий из углеродных композиционных материалов не всегда выдерживаются заданные параметры (толщина стенки, структура, электропроводность), могут образовываться различные виды неоднородностей структуры (пористость, волнистость волокон, посторонние включения, расслоения и трещины), являющиеся местами локализаций процесса разрушения. При эксплуатации также могут возникать трещины и внутренние объемные разрушения вследствие циклических и ударных механических нагрузок. Указанные дефекты снижают прочностные характеристики изделий и их долговечность, что обуславливает необходимость неразрушающего контроля (НК) на производстве и при эксплуатации изделий.

В настоящее время для контроля изделий из углеродных композиционных материалов применяются методы акустического, радиационного, теплового и оптического вида НК. Большинство из них не обеспечивают комплексного контроля, а радиационные методы требуют повышенных требований безопасности, а так же сложной калибровки.

В связи с этим представляет интерес использование методов вихретокового вида НК, обладающих чувствительностью к изменению интегральных электропроводящих свойств изделий, обусловленных описанными выше дефектами. Контроль с их использованием можно проводить без контакта преобразователя с поверхностью объекта, он отличается высокой производительностью, сигналы преобразователя не чувствительны к параметрам окружающей среды, таким как влажность, давление, загрязненность, и др.

Актуальной задачей является разработка новых вихретоковых измерительных преобразователей, алгоритмов преобразования первичной измерительной информации и методик их применений

для обеспечения требуемой чувствительности к контролируемым параметрам и подавлении влияния мешающих параметров.

Цель работы: Повышение эффективности комплексного неразрушающего контроля углеродных композиционных материалов и изделий из них в процессе производства и эксплуатации применением вихретоковых методов.

Идея работы: Использование различных накладных вихретоковых преобразователей (ВТП) с ферритовыми и диэлектрическими сердечниками и схем, обеспечивающих измерение фазы и амплитуды вносимого напряжения, а также соответствующих алгоритмов обработки измерительной информации обеспечивает измерение электропроводности и толщины, выявление расслоений, трещин, волнистости и контроль структуры материала.

Задачи исследования:

- анализ существующих технологий и методов контроля углеродных композиционных материалов;
- разработка моделей вихретоковых первичных измерительных преобразователей с воздушными и ферритовыми сердечниками и заданной частотой тока возбуждения;
- исследование влияния контролируемых и мешающих параметров на вносимое напряжение каждого из вихретоковых первичных измерительных преобразователей;
- разработка алгоритмов обработки информации, получаемой с вихретоковых первичных измерительных преобразователей, позволяющие проводить измерения с погрешностью, не превышающей заданную, при отстройке от мешающих параметров, обусловленных электрофизическими и геометрическими характеристиками изделий, а также условиями внешней среды;
- разработка методик расчета параметров вихретоковых первичных измерительных преобразователей для повышения чувствительности к контролируемым параметрам;
- разработка методик градуировки, калибровки и проведения измерений с отстройкой от мешающих параметров, а также методик аттестации средств вихретокового контроля и контрольных образцов;
- изготовление и проведение испытаний разработанных средств вихретокового неразрушающего контроля;

- внедрение результатов работы на промышленных предприятиях.

Методы исследований.

Для расчета параметров ВТП использовался метод формализации. Для исследования взаимодействия ВТП и объекта контроля использовались методы моделирования, в частности, метод конечных элементов. Исследование алгоритмов выделения информативного параметра сигнала ВТП проводилось с применением методов математического моделирования. Для получения сигналов с макетов ВТП на контрольных образцах использовались экспериментальные методы исследования.

Научная новизна работы:

1. Установлены зависимости комплексного относительного вносимого напряжения при заданной частоте возбуждения вихревых токов на измерительных обмотках вихретоковых первичных измерительных преобразователей, оси которых параллельны и перпендикулярны объекту контроля, от толщины изделия, электропроводности, анизотропии свойств объекта контроля и от наличия трещин и расслоений, позволившие разработать преобразователи с повышенной чувствительностью к контролируемым параметрам.

2. Разработаны модель и основные теоретические положения, описывающие вихретоковый тангенциальный преобразователь над анизотропным электропроводящим неферромагнитным изделием, позволяющие выявлять разрывы нитей и расслоения.

3. Разработан алгоритм обработки сигналов с вихретоковых первичных измерительных преобразователей при двухчастотном режиме возбуждения, обеспечивающий измерение толщины изделий с заданной погрешностью с подавлением влияния двух мешающих параметров.

4. Разработаны меры толщины и контрольные образцы, а также методики градуировки, калибровки, аттестации и проведения контроля изделий с подавлением мешающих параметров.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждается результатами аналитических расчетов и моделирования методом конечных элементов, а также результатами экспери-

ментальных исследований в лабораторных условиях на контрольных образцах изделий.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- разработан прибор и измерительные преобразователи, обеспечивающие комплексный контроль качества анизотропных изделий из углеродных композиционных материалов с низкой удельной электропроводностью для использования в цеховых и полевых условиях, а также методики их применения;
- разработаны меры толщины и контрольные образцы различных изделий, их дефектов и структур, обеспечивающие требуемую погрешность измерений;
- разработаны методики градуировки, калибровки, аттестации и контроля.

Реализация выводов и рекомендаций работы.

Результаты работы были использованы научно-производственной фирмой ЗАО "Константа" при разработке вихретокового дефектоскопа «Константа ВД1», толщиномера «Константа Кб», измерителя электропроводности «Константа Кб» и вихретоковых преобразователей к ним. Результаты работы могут быть применены для контроля изделий из углеродных композиционных материалов в процессе производства и эксплуатации в различных отраслях промышленности.

Личный вклад автора:

- предложено и обосновано применение вихретоковых методов для неразрушающего контроля изделий из углеродных композиционных материалов;
- обоснована возможность применения вихретокового тангенциального преобразователя для измерения удельной электропроводности анизотропных изделий, выявления волнистости и разрыва волокон;
- разработан алгоритм обработки сигналов с вихретоковых первичных измерительных преобразователей при двухчастотном режиме возбуждения, обеспечивающий измерение толщины изделий с заданной погрешностью с отстройкой от влияния двух мешающих параметров;

- выполнены расчеты параметров вихретоковых измерительных преобразователей, разработаны модели преобразователей, проведены эксперименты, определены зависимости сигналов от контролируемых и мешающих параметров, обработаны полученные результаты;

- подготовлены для производства вихретоковые преобразователи.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и получили положительную оценку на конференциях: "The 50th Annual Conference of The British Institute of Non-Destructive Testing", Telford, UK, 2011 г.; "XIX всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике", г. Самара, 2011 г.; "II Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых", г. Ижевск, 2012 г.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 работы в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 142 страницах. Содержит 46 рисунков, 14 таблиц и список литературы из 83 наименований.

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулирована идея диссертационной работы, на основании которой поставлены цель и основные задачи исследования, а также определены научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В главе 1 проведен анализ углеродных композиционных материалов, их структура, электрические и механические свойства, рассмотрены основные типы дефектов в объекте контроля, проведен обзор и анализ существующих видов, методов и технических средств неразрушающего контроля углеродных композиционных материалов, обоснованы цели и задачи исследований.

В главе 2 представлена общая характеристика вихретокового вида неразрушающего контроля, предложены расчетно-теоретические модели взаимодействия вихретокового измерительного первичного преобразователя с объектом контроля, определены основные меша-

ющие параметры, характерные для измерения электропроводности, толщины, выявления трещин и расслоений, а также их влияние на сигналы преобразователей.

В главе 3 рассмотрены структуры вихретоковых первичных измерительных преобразователей, рассмотрены принципы расчета и построения измерительных преобразователей, предложены алгоритмы преобразования первичной информации, позволяющие отстроиться от влияния мешающих параметров вихретокового контроля.

В главе 4 сформулированы требования к мерам толщины и контрольным образцам, предложена методика их изготовления и аттестации, разработаны методики градуировки и калибровки вихретоковых измерительных преобразователей, исследовано влияние мешающих параметров на погрешность измерений.

В главе 5 представлены результаты экспериментальных исследований разработанных вихретоковых преобразователей на комплектах контрольных образцов из углеродных композиционных материалов, приведены перспективы развития и области применения результатов работы.

В заключении представлены обобщенные выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решенными задачами.

Защищаемые научные положения

1. Двухчастотный режим возбуждения вихревых токов и метод последовательного приближения при измерении фаз разностных напряжений вихретокового четырехобмоточного скомпенсированного преобразователя обеспечивает измерение толщины T неферромагнитных электропроводящих объектов контроля с абсолютной погрешностью не более $\pm(0,02T + 0,2 \text{ мм})$ в диапазоне от 1 до 10 мм при вариации зазора h между преобразователем и объектом контроля до 1,5 мм и удельной электропроводности материала σ в диапазоне от 5 до 45 кСм/м.

При контроле толщины изделий из углеродных композиционных материалов методами вихретокового вида НК на сигналы вихретокового преобразователя оказывают влияние как контролируемый (толщина), так и мешающие параметры. Наибольшее влияние на сигнал ВТП оказывает изменение воздушного зазора h между

контактной поверхностью преобразователя и объектом контроля и других геометрических мешающих параметров, например шероховатости, изменение радиуса кривизны поверхности, которые могут быть сведены к эквивалентному зазору $h_э$, а также девиация электропроводности изделия, которая для углеродных композиционных материалов может составлять 10...15 %.

На рисунке 1 представлены рассчитанные по (1) универсальные зависимости (кривые 1 и 3) комплексного относительного вносимого напряжения от контролируемого и мешающих параметров изделия с электропроводностью σ_i для преобразователя с параметрами R_i, f_i (кривая 1) и f_b (кривая 3).

$$\dot{U}_{ВН}^* = \frac{\dot{U}_{ВН}}{|\dot{U}_0|} = \frac{j\pi\mu_0 R_b R_i}{M} \int_0^\infty J_1(\lambda R_b) J_1(\lambda R_i) e^{-\lambda|z_b+z_i|} \chi_0 d\lambda, \quad (1)$$

где T – толщина материала; R_b – радиус обмотки возбуждения; R_i – радиус измерительной обмотки; z_i, z_b – расстояние от измерительной обмотки и обмотки возбуждения до поверхности изделия, соответственно; $J_i(\lambda R_i)$ – функция Бесселя первого порядка; λ – параметр преобразования; M – коэффициент начальной взаимной индукции между обмотками;

$$\chi_0 = \frac{(\lambda^2 - q^2)(1 - e^{-2Tq})}{(\lambda + q)^2 - (\lambda - q)^2 e^{-2Tq}}, \quad (2)$$

$$q = \sqrt{\lambda^2 + j\sigma_i \omega}, \quad (3)$$

σ_i – электропроводность материала, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота тока возбуждения.

При уменьшении σ_i на 10% эти кривые смещаются (кривые 2 и 4). Линии отвода 5 и 6 иллюстрируют влияние зазора h между преобразователем и объектом контроля.

Очевидно, что, используя фазовый или амплитудно-фазовый метод обработки информации, можно отстроиться только от одного мешающего параметра.

Для компенсации влияния двух мешающих параметров было предложено использование двухчастотного режима возбуждения вихревых токов, при котором расчет значения толщины осуществляется методом последовательного приближения при измерении фаз φ разностных напряжений. На рисунке 2 представлена структурная схема вихретокового двухчастотного фазового преобразователя.

Для подавления влияния зазора, а также эквивалентных зазору шероховатости и кривизны поверхности, необходимо выбрать точку отсчета фазы (начальную точку) комплексного относительного вносимого напряжения по комплексной плоскости $U_{см}$, в которой сходятся все прямые, проведенные через две точки каждой линии отвода, соответствующих диапазону изменения h . Выбор точки отсчета фазы выполняется электронной балансировкой комплексного относительного вносимого напряжения внутри микроконтроллера преобразователя.

Для уменьшения количества обрабатываемой информации следует рассматривать ограниченные заданным диапазоном σ_n участки зависимостей. Рассмотрим процедуру определения толщины материала с удельной электропроводностью σ_n с использованием метода последовательного приближения.

Экспериментально определено, что для обеспечения заданной погрешности необходимо, чтобы значения обобщенного параметра $\beta = R\sqrt{2\pi f\sigma_n\mu_0}$ (где R – эквивалентный радиус обмотки возбуждения, f – частота тока возбуждения, μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость) отличались не менее, чем в 4 раза.

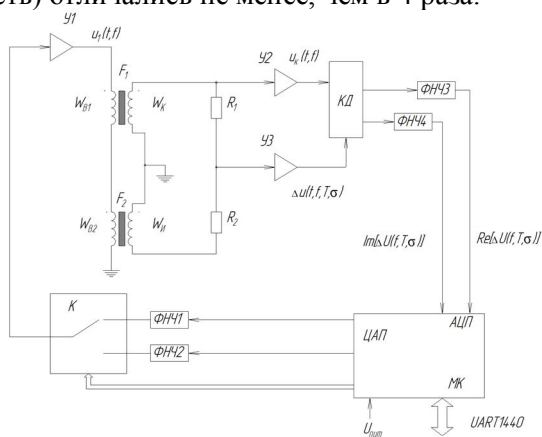


Рисунок 2 – Структурная схема вихретокового двухчастотного амплитудно-фазового преобразователя: У1 - У3 – усилители, КД – квадратурный детектор, ФНЧ1 - ФНЧ4 – фильтры низкой частоты, W_{B1} и W_{B2} – обмотки возбуждения, W_K и $W_{и}$ – дифференциально включенные компенсационная и измерительная обмотки, F_1 и F_2 – ферритовые сердечники, МК – микроконтроллер, К – управляемый ключ

На представленных на рисунке 3 зависимостях $\varphi(T)$ и $\varphi(\sigma)$ по определенным φ_1' и φ_1'' по (4) рассчитываются значения толщин на низкой T_n и высокой T_b частотах соответственно при σ (точки 1 на рисунке 3).

$$T = a \cdot \ln \varphi + b/\varphi + c, \quad (4)$$

где a, b, c , – коэффициенты, определяемые по детерминантам матриц:

$$\Delta = \begin{pmatrix} \ln \varphi_1 & \frac{1}{\varphi_1} & 1 \\ \ln \varphi_2 & \frac{1}{\varphi_2} & 1 \\ \ln \varphi_3 & \frac{1}{\varphi_3} & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\Delta_a = \begin{pmatrix} T_1 & \frac{1}{\varphi_1} & 1 \\ T_2 & \frac{1}{\varphi_2} & 1 \\ T_3 & \frac{1}{\varphi_3} & 1 \end{pmatrix}, \Delta_b = \begin{pmatrix} \ln \varphi_1 & T_1 & 1 \\ \ln \varphi_2 & T_2 & 1 \\ \ln \varphi_3 & T_3 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\Delta_c = \begin{pmatrix} \ln \varphi_1 & \frac{1}{\varphi_1} & T_1 \\ \ln \varphi_2 & \frac{1}{\varphi_2} & T_2 \\ \ln \varphi_3 & \frac{1}{\varphi_3} & T_3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Среди множества различных функций интерполяции данные зависимости обеспечивают наименьшую погрешность при расчете значения толщины T .

При отношении $t = T_n/T_b > 1$ необходимо произвести расчет при нижнем граничном значении σ_n . При отношении $t < 1$ необходимо произвести расчет при верхнем граничном значении σ_n .

На каждом следующем шаге i выбирается среднее значение от наибольшей величины σ , при которой $t < 1$, и наименьшей величины σ , при которой $t > 1$ (переход между значениями σ показан стрелками на рисунке 3 в соответствии с шагами i).

На рисунке 4 видно, что с каждым шагом приближений отношение t сходится к 1. На n -ом шаге t входит в диапазон $1 \pm 0,005$, при котором значение толщины T_n является искомым с погрешностью 0,5%.

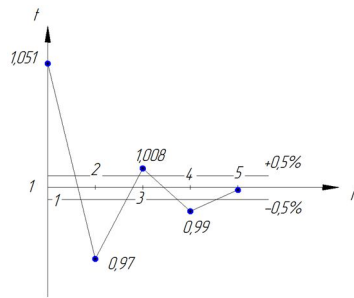


Рисунок 4 – Зависимость отношения значений T от количества шагов вычисления

С учетом погрешностей контрольных образцов и градуировки двухчастотный режим возбуждения вихревых токов и метод последовательного приближения обеспечивает измерение толщины T неферромагнитных электропроводящих объектов контроля с абсолютной погрешностью не более $\pm(0,02T + 0,2 \text{ мм})$.

2. Предлагаемая модель вихретокового тангенциального трансформаторного трехобмоточного скомпенсированного преобразователя с обмоткой возбуждения, имеющей форму прямоугольника, и системой измерительных обмоток, расположенных в плоскости обмотки возбуждения, обеспечивает измерение удельной электропроводности материала объекта контроля с учетом направления намотки нитей изделий из углеродных композиционных материалов с анизотропией электрических свойств при значении обобщенного параметра вихретокового контроля β_z от 5 до 20 формированием однонаправленной горизонтальной составляющей вихревого тока.

Измерение удельной электропроводности анизотропных изделий с помощью традиционных вихретоковых измерительных преобразователей с обмотками, ось которых перпендикулярна объекту контроля, является некорректным решением, так как измеряется интегральная удельная электропроводность изделия по всем направлениям. А в некоторых случаях удельная электропроводность в направлении, перпендикулярном намотке волокон, настолько мала, что вихревые токи в материале практически не наводятся и комплексное относительное вносимое напряжение остается близко к нулю.

В связи с этим был разработан вихретоковый преобразователь с чувствительным элементом тангенциального типа (рисунок 5а).

На представленной модели вихретокового первичного тангенциального скомпенсированного трехобмоточного накладного измерительного преобразователя и плотности распределения вихревых токов в объекте контроля (рисунок 6) направление намотки волокон параллельно оси X (зеленая ось). Максимальная плотность вихревых токов находится под преобразователем, когда он расположен вдоль волокон, и около углов преобразователя, когда он расположен поперек волокон. Это объясняется наличием вихревых токов рассеяния, которые пытаются замкнуться между собой по траектории с малым сопротивлением.

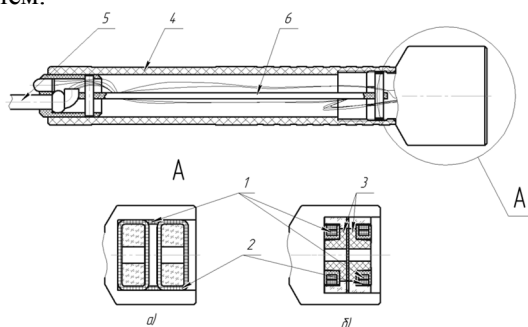


Рисунок 5 –Разработанные преобразователи с обмотками, оси которых расположены: а) параллельно объекту контроля, б) перпендикулярно объекту контроля. 1 – обмотки возбуждения, 2 – измерительные обмотки, 3 –сердечники полуброневые типа, 4 – корпус преобразователя, 5 – вывод кабеля, 6 – плата с электронными компонентами.

При повороте преобразователя относительно направления намотки волокон происходит уменьшение влияния вихревых токов на первичный измерительный преобразователь более, чем в 10 раз.

На представленном годографе зависимости комплексного относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{вн}^*$ от контролируемого и мешающих параметров (рисунок 7) линии влияния σ и изменения угла α между вихретоковым измерительным преобразователем и направлением волокон не параллельны. Следовательно, для измерения удельной электропроводности и выявления волнистости нитей в изделиях необходимо составлять две градуировочных характеристики.

Для подавления влияния зазора используется описанный выше алгоритм с выбором точки отсчета фазы φ комплексного относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^*$.

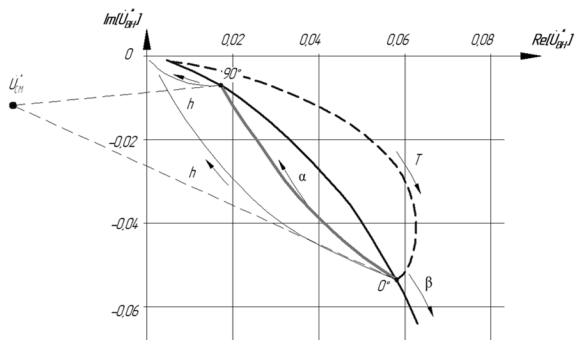


Рисунок 7 – Зависимость комплексного относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ от контролируемого и мешающих параметров

Для отстройки от влияния толщины изделия выбирается частота возбуждения вихревых токов, при которой глубина проникновения вихревых токов будет максимально велика, но меньше толщины изделия. При этом будет измеряться интегральная удельная электропроводность по глубине.

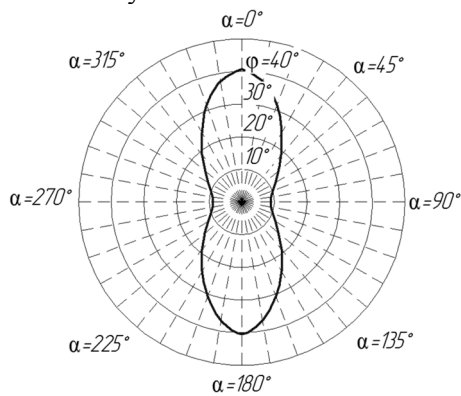


Рисунок 8 – Изменение фазы относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ при изменении угла между направлением волокон и измерительным преобразователем.

Из представленной зависимости $\varphi(\alpha)$ (рисунок 8) следует, что изменение фазы комплексного относительного вносимого напряже-

ния $U_{\text{вн}}^*$ составляет больше 30° , что является высокой чувствительностью. Следовательно, тангенциальный преобразователь обеспечивает измерение удельной электропроводности материала с учетом его анизотропии.

3. Разработанные модели вихрековых измерительных фазовых и частотных преобразователей, оси которых параллельны и перпендикулярны объекту контроля соответственно, принципы построения и оптимизации измерительных преобразователей, а также методики настройки, градуировки и калибровки с использованием предлагаемых контрольных образцов, обеспечивают выявление трещин, глубиной более 0,5 мм, вызванных многократными разрывами нитей, в изделиях из углеродных композиционных материалов с двунаправленной и однонаправленной схемах армирования.

Для выявления трещин в изделиях из углеродных композиционных материалов необходимо подобрать параметры преобразователя так, чтобы значение обобщенного параметра β было больше 10.

В связи с низкой интегральной удельной электропроводностью углеродных композиционных материалов при сохранении высокой локальности контроля необходимо возбуждать вихревые токи на частотах ~ 20 МГц. Для преобразователей, реализующих фазовый, амплитудный и амплитудно-фазовый методы такая частота в настоящее время недостижима. В связи с этим применен вихрековый частотный (параметрический) преобразователь (рисунок 5б).

При контроле с помощью вихрекового частотного метода трещины в объекте контроля ведут к уменьшению его интегральной электропроводности $\sigma_{\text{и}}$, что влияет на относительную индуктивность обмотки $l(z)$ и соответственно на выходную частоту автогенераторной схемы $f(z)$, на которой выполняются вихрековые частотные преобразователи.

$$l(z) = L_{\text{вт}}(z)/L_{\infty}, \quad (7)$$

где z – глубина трещины, $L_{\text{вт}}$ – индуктивность влияния вихревых токов, L_{∞} – собственная индуктивность обмотки,

$$f(z) = 1/(2\pi\sqrt{L_{\text{вт}}(z)C_{\text{э}}}), \quad (8)$$

где $C_3 = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$ – эквивалентная емкость колебательно-го контура.

Для обеспечения приемлемой чувствительности преобразователя оптимальное значение частоты рассчитывается по формуле:

$$f_{\text{опт}} \approx (0,6 \dots 0,8) / (\pi \mu_0 \sigma_n z^2_{\text{макс}}). \quad (9)$$

Из графика зависимости $l(z)$ (рисунок 9) следует, что вихретоковый частотный преобразователь позволяет гарантированно выявлять трещины, глубиной более 0,5 мм при девиации электропроводности $\pm 0,15\sigma$.

При однонаправленном армировании углеродных композиционных материалов использование вихретокового преобразователя с чувствительным элементом, ось которого перпендикулярна плоскости объекта контроля, не позволяет выявлять трещины, вызванные разрывами нитей. Для решения данной задачи было предложено использовать вихретоковый тангенциальный преобразователь. В качестве обобщенного параметра предлагаю принять величину β_z :

$$\beta_z = L \sqrt{2\pi f \mu_0 \sigma_i}, \quad (10)$$

где L – длина участка обмотки возбуждения, параллельного объекту контроля.

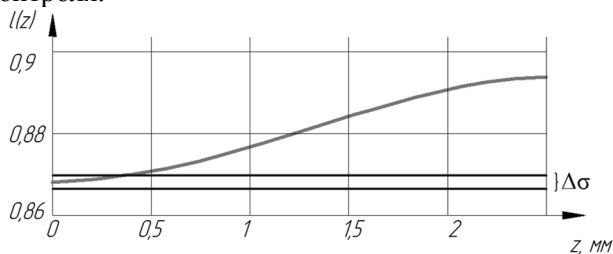


Рисунок 9 – Зависимость относительной индуктивности преобразователя от глубины трещины

Оптимальная чувствительность для выявления трещин обеспечивается при значении $\beta_z = 5 \dots 20$. Точка отсчета фазы сдвигается по комплексной плоскости в точку $U_{\text{см}}$.

Исходя из годографа комплексного относительного вносимого напряжения (рисунок 10), с учетом девиации удельной электропроводности изделий, тангенциальный преобразователь обеспечивает выявление трещин, глубиной от 0,5 мм, вызванных многократными разрывами нитей.

Градуировка преобразователей производится на аттестованных контрольных образцах с искусственными трещинами. Контрольные образцы изготавливаются из материалов с известными свойствами, повторяющими структуру реальных объектов контроля.

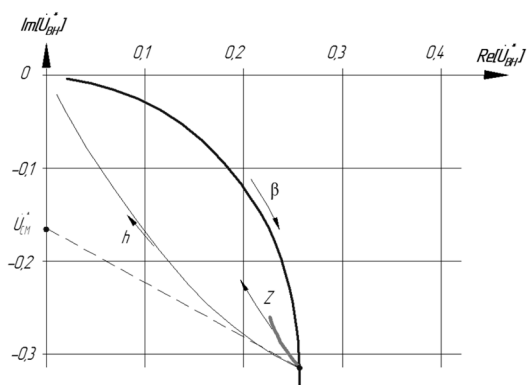


Рисунок 10 –Зависимость комплексного относительного вносимого напряжения преобразователя от глубины трещины

В случаях возникновения необходимости калибровки приборов в производственных условиях, разработанные методики одноточечной и двухточечной калибровки обеспечивают заданные погрешности результатов контроля продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, на основе анализа литературных источников и существующих технологий и методов контроля и выполненных теоретических и экспериментальных исследований была решена актуальная научно-практическая задача – повышение эффективности неразрушающего контроля углеродных композиционных материалов и изделий из них при воздействии характерных мешающих параметров с применением вихретоковых методов. На основании проведенных исследований получены следующие научные результаты работы:

1. Предложено и рекомендовано применение вихретоковых методов для комплексного неразрушающего контроля изделий из

углеродных композиционных материалов.

2. Разработаны модели и конструкции тангенциальных чувствительных элементов вихретоковых первичных измерительных преобразователей, позволяющих решать задачи выявления расслоений, волнистости и трещин, а также отдельного измерения электропроводности анизотропных материалов в разных направлениях.

3. Установлены зависимости комплексного относительного вносимого напряжения вихретокового измерительного тангенциального преобразователя от контролируемых и мешающих параметров.

4. Разработан способ выделения информативных параметров сигналов с вихретоковых первичных измерительных преобразователей при двухчастотном режиме возбуждения, обеспечивающий измерение толщины T изделий с заданной погрешностью с отстройкой от влияния двух мешающих параметров σ и h .

5. Разработаны вихретоковые преобразователи для задач измерения электропроводности и толщины, параметры которых обеспечили повышенную чувствительность к контролируемым параметрам.

6. Разработаны, изготовлены и испытаны приборы с преобразователями, реализующими фазовый, частотный и амплитудно-фазовый методы, для измерения толщины, электропроводности, выявления трещин, расслоений и волнистости, подтвердившие теоретические расчеты и результаты моделирования.

7. Разработаны контрольные образцы, а также методики градуировки, калибровки, контроля и аттестации преобразователей.

Публикации по теме диссертации:

1. Потапов А.И., Сясько В.А., Чертов Д.Н. Измерение толщины изделий из углеродных композиционных материалов с использованием вихретокового двухчастотного амплитудно-фазового метода // *Контроль. Диагностика* №4, 2013. С. 17-21.

2. Сясько В.А., Чертов Д.Н., Ивкин А.Е. Измерение толщины стенок изделий из углеродных композиционных материалов с использованием вихретокового фазового метода // *Дефектоскопия*. №8, 2011. С. 76-84.

3. Потапов А.И., Сясько В.А., Чертов Д.Н. Выявление расслоений и глубины их залегания в углепластиковых кон-

струкциях с использованием вихретокового вида неразрушающего контроля // Известия высших учебных заведений. №8, 2012. С. 66-69.

4. Чертов Д.Н., Сясько В.А. Анализ неразрушающих методов контроля углепластиков // Неразрушающий контроль и диагностика окружающей среды, материалов и промышленных изделий: Межвузов. сб., вып. 19, 2010. С. 72-80.

5. Чертов Д.Н. Разработка вихретоковых фазовых преобразователей для комплексного контроля изделий из углепластиков // Измерения, контроль и диагностика – 2012: сб. материалов II Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, с междунар. участием, посвященной 60-летию Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова. Ижевск, 14-16 мая 2012. С. 160.

6. Сясько В.А., Чертов Д.Н., Соломенчук П.В. Вихретоковый неразрушающий контроль углепластиковых изделий авиакосмической техники // XIX Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: тезисы докладов. Самара, 6-8 сентября 2011. С. 394.

7. Юхацкова О.В., Муханов Е.Е., Сясько В.А., Чертов Д.Н. Исследование возможности радиоволнового контроля сплошности полимерных композиционных материалов // XIX Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: тезисы докладов. Самара, 6-8 сентября 2011. С. 439-444.

8. Syasko V.A., Pilatova I.V., Ivkin A.E., Chertov D.N. Eddy current NDT for carbon fibre-reinforced products for aerospace technique // The 50th Annual Conference of The British Institute of Non-Destructive Testing. Telford, UK, 13-15 September 2011. P. 17.

9. Сясько В.А., Чертов Д.Н. Выявление расслоений углепластиковых материалов с использованием тангенциальных вихретоковых преобразователей // В мире неразрушающего контроля. №2, 2012. С. 19-21.

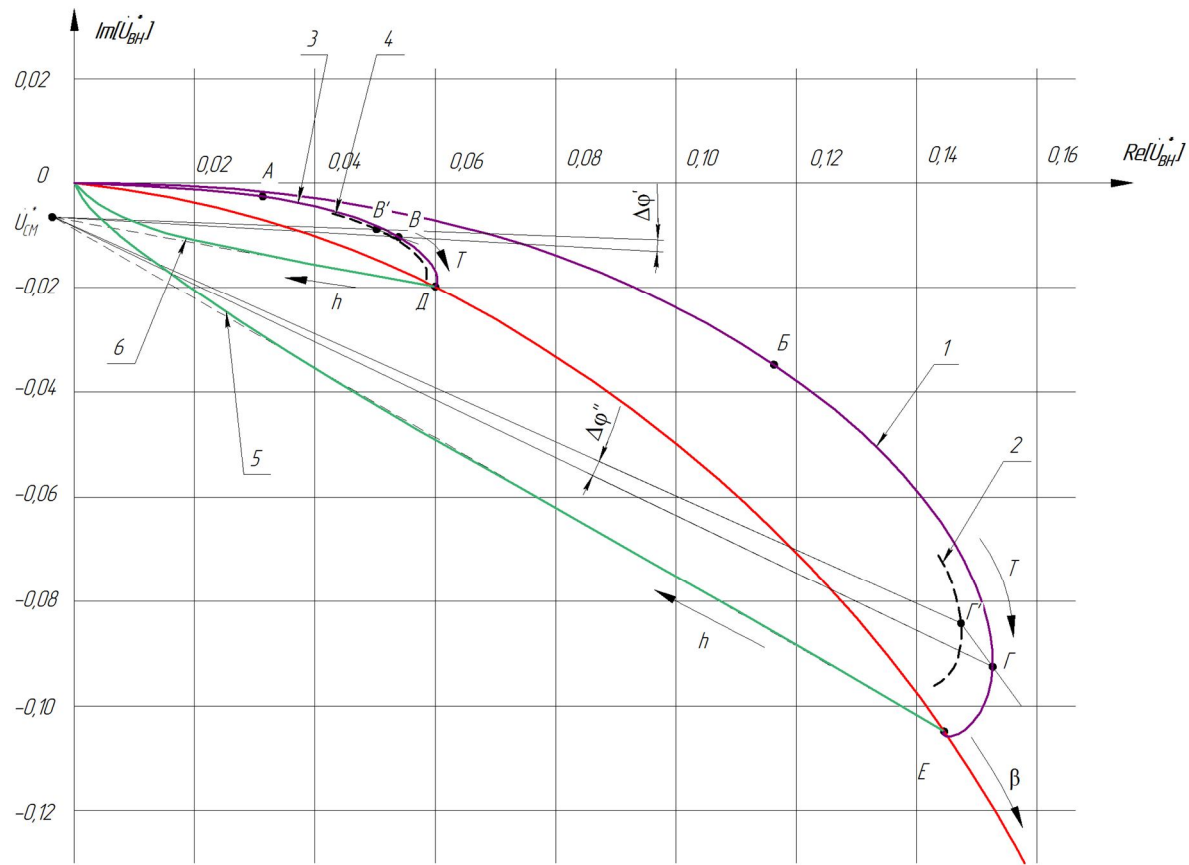


Рисунок 1 – Зависимость комплексного относительного вносимого напряжения U^*_{BH} от контролируемого и мешающих параметров (σ , h) при измерениях T

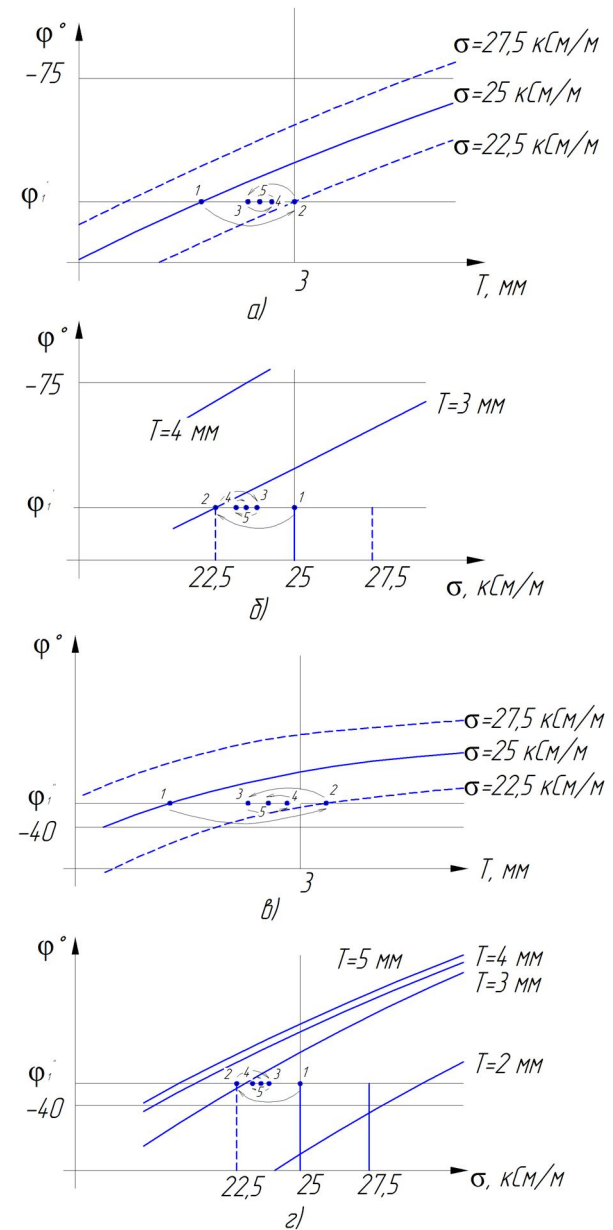


Рисунок 3 – Зависимости φ от T (а) и от σ (б) при $f = 0,15$ МГц, φ от T (в) и от σ (г) при $f = 3,3$ МГц

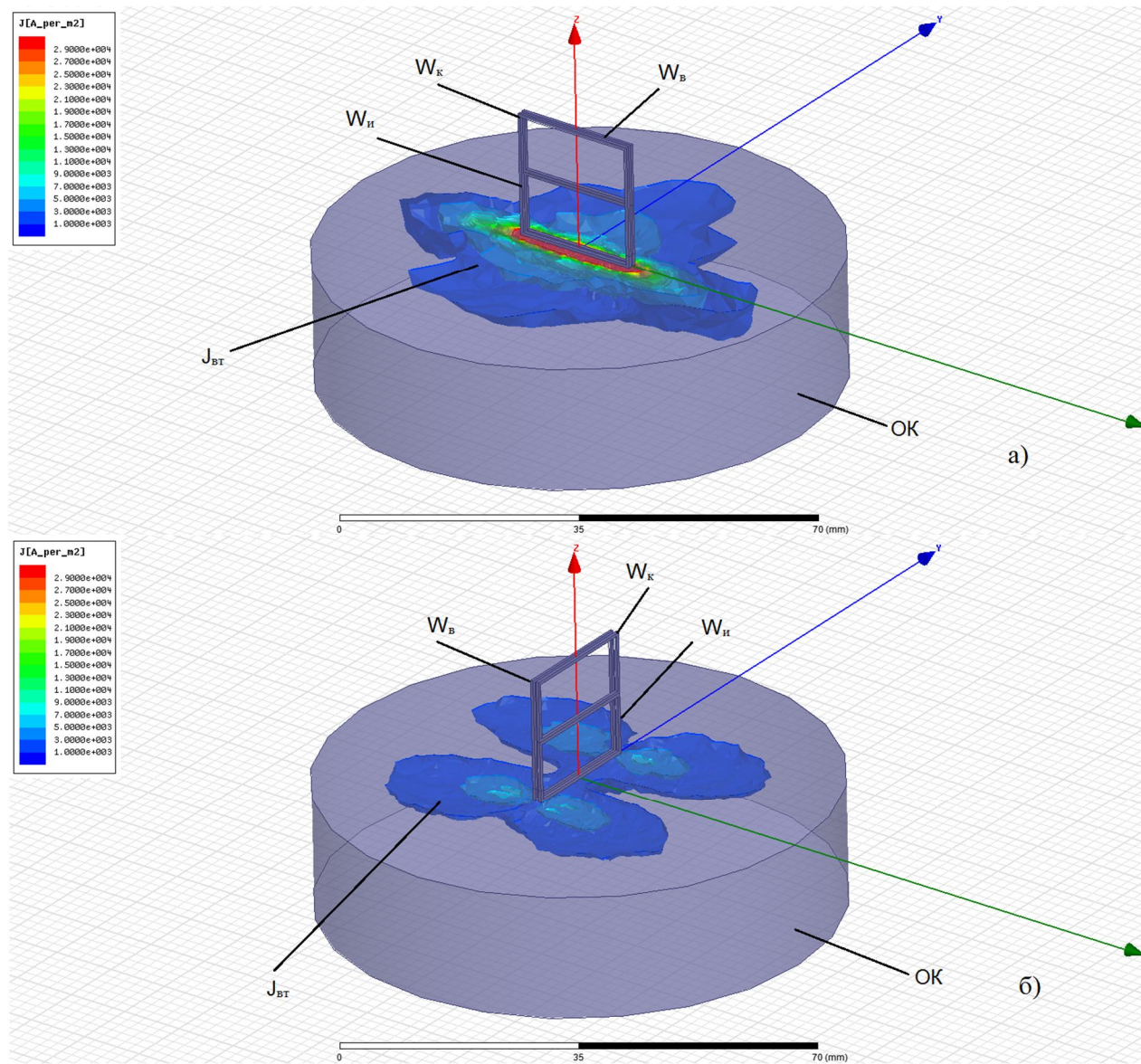


Рисунок 6 – Модель вихрекового тангенціального скompенсованного трьохмоточного накладного первичного вимірювального преобразувача
 а) преобразувач встановлений вдоволь напрямлення волокон, б) преобразувач встановлений поперек напрямлення волокон