

На правах рукописи.



Суторихин Владимир Анатольевич

**Индикация дефектов металлических объектов
СВЧ колебаниями при воздействии ультразвука**

Специальности: 01.04.03 Радиофизика,
05.11.13 Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2020

Работа выполнена в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) на кафедре радиоэлектроники и систем связи (РСС).

Научный руководитель:

Авдоченко Борис Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры РСС ТУСУРа.

Официальные оппоненты:

Чугуй Юрий Васильевич, доктор технических наук, профессор, научный руководитель, директор Конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН;

Клименов Василий Александрович, доктор технических наук, профессор, руководитель Отделения материаловедения инженерной школы новых производственных технологий Томского политехнического университета.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Новосибирский государственный технический университет**» (НГТУ), г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

Защита состоится 5 ноября 2020 г. в 15-30 на заседании диссертационного совета Д 212.268.04 Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по адресу: г. Томск. пр. Ленина 40. ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники:

<https://postgraduate.tusur.ru/urls/ok3oegyw>

Автореферат разослан 03.09.2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.268.04,
доктор технических наук, профессор,



Акулиничев Юрий Павлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Предупреждение и предотвращение техногенных катастроф всегда являлось актуальной задачей. Небольшие затраты на профилактические мероприятия позволяют на порядки уменьшить экономический ущерб и избежать человеческие жертвы. Наиболее актуальным и наименее затратным является обнаружение, исследование и определение границ изменений свойств металлов на начальной стадии разрушения металлических конструкций.

Известные методы неразрушающего контроля основаны на использовании контактных способов возбуждения и приема ультразвуковых зондирующих сигналов. Общими недостатками этих методов диагностики являются необходимость контакта излучателей и приемников акустических колебаний и небольшой динамический диапазон, не позволяющий обнаруживать различные стадии разрушения, от уровня нарушений кристаллических решеток металлов, до образования больших (опасных) трещин.

Есть области, где контактные методы измерений практически неприменимы. Например, контроль объектов, находящихся под воздействием высоких температур и давлений, покрытых слоем изоляции, находящихся в механическом движении. Примером таких объектов являются паропроводы, температура которых может превышать 500-600 градусов Цельсия.

С середины прошлого века проводятся исследования возможности замены контактных пьезоэлектрических сенсоров бесконтактными, с использованием микрофонов, лазерного излучения, приемопередающих устройств, СВЧ сенсоров.

Экспериментальные исследования, проведенные группой профессора Горбунова В.И., доказали изменения поверхностной проводимости металлов при акустическом воздействии на зону внутренних дефектов в металлах. В результате была показана возможность обнаружения начальной стадии разрушения металлов по изменению поверхностной проводимости, которую можно дистанционно регистрировать с помощью доплеровских СВЧ радаров.

Актуальность работ в этом направлении подтверждается наличием различных государственных программ, например, «Разработка СВЧ сенсора для контроля параметров акустической эмиссии для объектов министерства энергетики» (1992-1998 г), федеральной программы «Старт 10» (2011г).

Объектом исследования является изучение взаимодействия электромагнитных СВЧ колебаний с поверхностью металла, содержащего дефекты не только на поверхности, но и в глубине металла, при совместном ультразвуковом воздействии на область дефекта.

Предметом исследования является поиск путей увеличения чувствительности метода АЭ с помощью СВЧ сенсоров, до уровня, позволяющего обнаруживать дефекты в различных металлах на начальной стадии разрушений металлических конструкций.

Цель работы: практическая реализация предельно возможной чувствительности СВЧ сенсора для дистанционной диагностики дефектности металлов, изучение влияния видов и размеров области дефектов на характеристики СВЧ сигнала.

Работа выполнена по государственному контракту №7901р/11410 от 15.04.2010 (тема "Разработка, исследование, испытания дистанционных индикаторов активных дефектов (ДИАД) на образцах и железнодорожных колесах в статическом режиме.")

Методы исследований. На начальной стадии исследования использовался абстрактно-логический метод, позволивший найти нестандартный путь решения проблемы повышения чувствительности.

Для выяснения эффекта взаимодействия акустических колебаний с областью дефекта использовался метод теоретического исследования. Была доработана теория взаимодействия СВЧ волн с измененной (при наличии дефектов в металлах) поверхностной проводимостью.

Для расчетов изменения поверхностной проводимости в результате взаимодействия акустических волн с зоной дефекта использовался метод математического моделирования, позволивший рассчитывать предельные характеристики разрабатываемых приборов.

Для реализации предельной чувствительности СВЧ сенсоров при обнаружении различных дефектов в металлах использовался метод фазовой модуляции.

Эмпирический метод исследований использовался для подтверждения результатов теоретических исследований. Проводились измерения чувствительности разработанных приборов, исследовались возможности обнаружения дефектов различной природы. Для обработки результатов экспериментальных исследований использовалось быстрое преобразование Фурье (БПФ).

Основные задачи исследований. Для достижения цели диссертации были поставлены и решены следующие задачи.

1. Проведен аналитический обзор использования СВЧ сигналов в методах неразрушающего контроля металлов по различным источникам информации и выбрано направление работы.

2. Предложена математическая модель изменения поверхностной проводимости в результате взаимодействия акустических волн в металле с дефектами.

3. Проведены теоретические исследования предельной чувствительности микроволновых радаров, основанные на взаимодействии колебаний металлической поверхности с электромагнитным излучением различных частот.

4. Определены требования к основным узлам прибора, необходимые для реализации предельной чувствительности, разработаны структурная и принципиальная схемы прибора для дистанционной индикации активных дефектов (ДИАД), изготовлены образцы прибора.

5. Исследовано влияние видов и размеров области дефектов в металлах на характеристики СВЧ сигнала, проведены исследования по локализации места дефекта, по восстановлению свойств дефектов металлов при термическом воздействии

Научная новизна работы.

1. Доказана возможность значительного увеличения чувствительности ультразвукового метода обнаружения дефектов металлов при совместном использовании СВЧ зондирования поверхности.

2. Разработаны математические модели изменения поверхностной проводимости металлов в результате взаимодействия акустических волн с дефектами в металле и взаимодействия поверхностной проводимости с СВЧ излучением.

3. Доказано, что фазовый метод измерения колебаний проводимости металлической поверхности обеспечивает значительное увеличение чувствительности по сравнению с амплитудным методом.

4. Доказано, что бесконтактный СВЧ сенсор по выявлению опасных дефектов является инвариантным к магнитным и немагнитным металлам.

5. Показана возможность обнаружения СВЧ сенсором застарелых дефектов металлов после термического воздействия.

Полученные научные результаты соответствуют пунктами 1 паспорта специальности **01.04.03 «Радиофизика»:**

1. Изучение линейных и нелинейных процессов излучения, распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации волн в естественных и искусственных средах,

и пункту 3 специальности **05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»:**

3. Разработка, внедрение и испытания приборов, средств и систем контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, имеющих лучшие характеристики по сравнению с прототипами.

Практическая значимость работы. В результате проведенной работы:

1. Предложен вариант метода дистанционного определения опасных дефектов металла на основе использования СВЧ сенсора и воздействия на область дефекта слабого ультразвука, основанный на измерении спектральной плотности мощности фазомодулированного отраженного сигнала, отличающийся значительным увеличением чувствительности по сравнению с известными методами.
2. Созданы действующие образцы прибора для обнаружения начальной стадии разрушения металлов, что позволяет проводить профилактические мероприятия и предотвращать разрушение конструкций.
3. Высокая чувствительность предложенного прибора позволяет обнаруживать дефекты без использования механических нагрузок, что значительно (в сотни раз) сокращает время диагностики конструкций, не снижая надежности обнаружения опасных дефектов.
4. Разработанный СВЧ сенсор позволяет обнаруживать дефекты металлов подвижных объектов и скрытых трубопроводов, объектов с высокими температурами и расширить область применения дефектоскопа.
5. Разработанный бесконтактный СВЧ сенсор не реагирует на промышленные помехи, что позволяет использовать его для работы с объектами без остановки технологического процесса и осуществлять непрерывный контроль состояния объектов повышенной опасности.
6. СВЧ сенсор позволяет обнаруживать старые дефекты металлов, после термического воздействия на зону дефекта и последующего охлаждения.
7. Введены и практически проверены ограничения на возможность применения бесконтактного СВЧ сенсора при исследованиях различных видов дефектов в типовых металлических конструкциях, изделиях специального назначения.
8. Установлены технические требования к параметрам отдельных элементов, необходимой мощности, частотам, фазовым шумам СВЧ сенсора, необходимых для реализации высокой чувствительности приборов по обнаружению дефектов в металлах.

Положения, выносимые на защиту.

1. Применение СВЧ зондирования в сочетании с ультразвуковым воздействием на область дефекта позволяет существенно (на 2-3 порядка) повысить чувствительность метода АЭ и расширить возможности выявления дефектов на начальной стадии разрушения металлов.
2. Дефекты в металлах при взаимодействии с ультразвуком частот 44-50 кГц мощностью 10-20 Вт/см² увеличивают коэффициент фазовой модуляции отраженного СВЧ излучения частотой 30-40 ГГц на 6-50 дБ.
3. Термическое воздействие на область дефекта в металле, утратившем свойства активности, температурой 250°С -300°С с последующим быстрым охлаждением, позволяет восстановить активность дефекта и возможность его обнаружения при сочетании СВЧ и ультразвукового воздействия.
4. Уровень полезного сигнала о дефекте зависит от уровня ультразвука в месте динамического дефекта, размеров дефекта и практически не зависит от места облучения поверхности металлического объекта СВЧ полем.

Достоверность полученных результатов. Теоретические и экспериментальные результаты, полученные автором, не противоречат известным теоретическим работам. Достоверность теоретических положений диссертации подтверждается расчетами, моделированием на компьютере и результатами экспериментов. Первичные результаты экспериментальных исследований получены с использованием аттестованных серийных измерительных приборов.

Апробация результатов работы. Основные результаты и положения работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

Основные результаты и положения работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

1. Международной научной Интернет-конференции с «Спектрометрические методы анализа», Казань, 2013 г.

2. Международной НПК «Современные тенденции в образовании и науке», Тамбов, 2014г.

3. VII Международной НПК «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия», Новосибирск, 2014 г.

4. Международном конкурсе научного представления «Наукоград», Вологда, 2014 г.

5. XVII Международной НПК «Научные Перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия», Международный Научный Институт «EDUCATIO», Новосибирск, 2015г.

6. Международная НПК, «Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2017) Кемерово: КузГТУ 2017 г

7. 46-я Международная научная конференция ЕНО, технические науки, Москва, 2018 г.,

8. Всероссийская НТК с международным участием «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («VI Козловские чтения»), Самара, 2019г.

Личный вклад автора. Автор обнаружил и экспериментально доказал возможность регистрации начальной стадии разрушения в различных металлах при воздействии ультразвуковых колебаний на область дефекта в металле с помощью СВЧ сенсора. Основные теоретические результаты, экспериментальные исследования, разработка и изготовление сенсора дефектов металла на основе СВЧ зондирования выполнены лично автором.

Автором самостоятельно разработаны математические модели и методики испытаний образцов с различными дефектами.

Практическая реализация отдельных узлов и конструкции опытного образца разработанного прибора для экспериментальных исследований проводились совместно с Гавриловым А.Н.

Экспериментальные исследования СВЧ сенсора при использовании режима реактивации выполнены с участием Бричкова С. А.

Постановка цели и формулировка задач научного исследования, подготовка материалов диссертации велась совместно с научным руководителем Авдоченко Б.И..

Публикации. По теме диссертации опубликована 31 работа, в их числе 2 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, 2 статьи в журналах, входящие в базу цитирования W&S, SCOPUS, 2 статьи, входящие в базу цитирования COPERNICUS, 9 докладов на международных НТК, 1 тезис международной НТК, 3 патента РФ на изобретения.

Остальные работы опубликованы в научных журналах Канады («Applied Physics Research»), Америки («American Journal of Aerospace Engineering»), Индии («British Journal of Applied Science & Technology»), имеющих индекс цитирования Хирши от 3 до 5.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений, имеет 113 страниц машинописного текста, в тексте приведено 34 рисунка. Список литературы составляет 97 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость, достоверность, апробация и показан личный вклад автора.

В первой главе «Использование СВЧ в методах неразрушающего контроля металлов» рассмотрены научные и технические проблемы индикации малых амплитуд колебания (вибрации) металлической поверхности с помощью СВЧ радара.

Задача изучения возможности индикации дефектов металла путем сравнения поверхностных состояний металла с величиной и расположением внутренних дефектов помощью сигналов СВЧ ставилась перед исследователями неоднократно.

Возможность существования высокочастотного резонанса в металлах, пронизанных магнитным полем, впервые описаны в работах Л.В.Шубников и De Haas-van Alphen. Функциональные связи магнитного поля и проводимости металла хорошо известны как «эффект Шубникова-де Гааза». В последующих работах, выполненных Л.Д.Ландау, впервые было введено понятие «поверхностная проводимость», отличающаяся от понятия «скин-слой» глубиной проникновения (в тысячи раз меньше). Исследования были ограничены областью сверхнизких температур (3-20°градусов Кельвина). Исследование практического применения высокочастотного резонанса при температуре 300° Кельвина не принесло желаемых результатов.

Примером оригинальных теоретических работ в области определения механических напряжений в металле является работа Б. В. Васильева и В.Л. Любошица. Ее результаты значительно отличаются от известных положений «Теории металлов» академика А.А. Абрикосова, предсказана возможность появления электрического поля внутри металла при механическом сжатии. Авторы из Института атомной энергии имени И.В. Курчатова доказали, что возможно появление электрического поля внутри металлических объектов, «электронного газа», без использования сверхнизких температур или ионизирующих излучений. В работе впервые было теоретически предсказано появление «поверхностных волн проводимости» металлов под действием механического давления на электронный газ.

Российские ученые Л.Б.Зуев и Я.Е. Гегузин описали явление, названное «электронным ветром», которое возникает при воздействии внешнего электрического поля на неоднородности кристаллической решетки металла через дислокации. Дислокации начинают движение, вызывая периодическое изменение модуля упругости металла, и, следовательно, изменяя коэффициент отражения. По мнению этих специалистов, плотность тока в «электронном ветре» достигает сотен ампер. Описанное явление нашло практическое применение при изготовлении медных проводов, протягиваемых через фильеры. Продолжением этих теоретических изысканий явилось появление множества работ по упрочнению или снижению прочности металлов с помощью статического электричества. В результате появилось много приборов, определяющих параметры металла через измерение коэффициента отражения при сканировании. Невозможность регистрации слабых колебаний поверхности (1-10 нанометров), вызванных началом разрушения металлов под механической нагрузкой, является основной проблемой этих исследований.

Одновременно с исследованиями по применению СВЧ сенсоров развивалось направление, связанное с использованием контактных сенсоров. В отличие от хорошо известных приемов «просвечивания» ультразвуком, появился метод «прослушивания» объектов во время постепенного увеличения механической нагрузки. Этот метод, названный «акустической эмиссией» имеет значительные преимущества по сравнению с обычным ультразвуковым.

Метод акустической эмиссии (АЭ) является основным методом надежного определения опасных дефектов. Метод появился на основе исследования явления, названного «криком олова», характерного для начала разрушения при пластической деформации. Акустическая эмиссия отличается от ультразвуковой дефектоскопии применением дополнительных механических нагрузок исследуемого объекта. При изменении нагрузок происходит первоначальное изменение структуры кристаллической решетки вплоть до начала разрушения ослабленных зон (зон повышенной концентрации дислокаций). В результате появляется акустическое возбуждение в виде упругих колебаний кристаллической структуры, имеющих мощность до единиц джоуля и время существования акустических импульсов от 10 наносекунд до 100 микросекунд. В отличие от методов ультразвукового, радиоволнового, тепловизионного контроля, метод АЭ определяет опасные дефекты с высокой надежностью, обусловленной принципом регистрации разрушающегося

материала. Практическое измерение описанных сигналов проводят с помощью контактных сенсоров – пьезоэлектриков чувствительностью 30-36 КВ/мм.

Основными недостатками метода АЭ являются необходимость применения значительной механической нагрузки объектов исследований для регистрации сигналов АЭ, а также сложностью использования контактных сенсоров на основе пьезокерамики для движущихся объектов и объектов с высокой температурой. Кроме того, динамический диапазон сенсоров не превышает 45-50 дБ, при динамическом диапазоне регистрируемых сигналов 90-120 дБ.

Проведенные ранее многочисленные научные исследования по взаимодействию электронов проводимости с различными внешними факторами (ультразвуком, температурой, механической деформацией, магнитным полем и т.д.), убедительно доказали, что такое взаимодействие приводит к изменению поверхностной проводимости металла. Однако эти взаимодействия считались крайне слабым, не имеющем практического применения.

Попытки обнаружения СВЧ сенсорами вибраций металлической поверхности с амплитудой несколько нанометров не имели практического выхода. Полезный сигнал оказывался ниже уровня естественных шумов. Амплитудный метод измерения, используемый для контроля параметров АЭ, прямо связанный с природой случайных сигналов, не предполагает применение для регистрации чувствительных спектральных методов с возможностью резкого ограничения спектра полезных сигналов и снижения уровня спектральной мощности шума. При спектральном методе появляется возможность использовать принцип накопления полезного сигнала в течении времени регистрации.

На основе проведенного обзора было выбрано следующее направление исследований, позволяющее достичь поставленной цели:

- в качестве источника информации о наличии дефекта использовать изменение поверхностной проводимости металла, возникающее в результате взаимодействия ультразвука с областью дефекта;
- для регистрации изменения поверхностной проводимости необходимо применить СВЧ зондирование;
- для анализа отраженных СВЧ сигналов использовать спектральный метод, позволяющий проводить накопление полезного сигнала от области дефекта;
- для повышения чувствительности и обнаружения начальной стадии разрушения использовать фазовый метод регистрации.

Во второй главе «Теоретические исследования по измерению поверхностной проводимости с помощью СВЧ зондирования» проведены теоретические исследования возможности регистрации слабых изменений поверхностной проводимости металлов при акустическом воздействии на зону дефекта через изменение СВЧ поля, отраженного от этой поверхности.

В результате теоретических исследований автором показано, что амплитуда колебаний поверхности металлов величиной 0,1-25 нанометров, характерная для начала возникновения дефектов, может определяться СВЧ полем частотой 30-40 ГГц при мощности 1-2 мВт.

Расчет указанной амплитуды колебаний металлической поверхности был выполнен с использованием цилиндрических функции Бесселя первого рода.

Отраженный СВЧ сигнал представляется в виде спектра колебаний несущей частоты ω_0 , модулируемой по фазе частотой Ω и состоит из бесконечного числа боковых составляющих, симметрично отстоящих от частоты несущей ω_0 на величины, кратные частоте модуляции Ω .

Амплитуды боковых составляющих A_n выражаются через функции Бесселя J_n первого рода n – го порядка:

$$A_n = J_n(\beta) A_0 \quad (2.1),$$

где A_0 – амплитуда немодулированного колебания, β - индекс угловой модуляции (коэффициент фазовой модуляции), которым задается интенсивность колебаний начальной

фазы. Коэффициент фазовой модуляции может измеряться в дБ относительно своего минимального значения .

При малых индексах модуляции

$$d\varphi_{\Omega}/d\varphi_{w_0} = \beta \ll 1$$

основная энергия спектра сосредоточена в полосе частот $2\Omega_B$, где Ω_B наивысшая частота спектра функции изменения фазы (модулирующей функции). Начальная фаза колебаний:

$$\varphi(t) = \beta \sin(\Omega t),$$

где Ω – частота модуляции (частота упругих колебаний поверхности).

Максимальное значение изменения фазы при модуляции определяется раствором квазилинейного участка фазового детектора, составляющего четверть длины волны СВЧ колебания.

Отсюда следует соотношение, связывающее амплитуду механических колебаний поверхности с фазовыми сдвигами:

$$4a_{\max} / \lambda = 2X / \pi = \beta \quad (2.2)$$

где a_{\max} – амплитуда механических колебаний, X – фазовый сдвиг (в радианах).

Математическая модель однотоновых ФМ сигналов с любым значением индекса модуляции β в общем случае получается разложением функции (2.1) в следующий ряд:

$$u(t) = U_{\beta} \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(\beta) \cos[(w_0 + k\Omega)t], \quad (2.3)$$

где $J_k(\beta)$ – функция Бесселя k -го индекса от аргумента β . Из этого уравнения следует, что спектр сигнала содержит бесконечное число составляющих - нижних и верхних боковых колебаний, с частотами $w_0 + k\Omega$, которые соответствуют гармоникам частоты модуляции, и с амплитудами, пропорциональными значениям $J_k(\beta)$. Формулу (2.2) при однотоновой модуляции можно преобразовать к виду:

$$u(t) = U_{\beta} \cos(\beta \sin(\Omega t)) \cos(w_0 t) - U_{\beta} \sin(\beta \sin(\Omega t)) \sin(w_0 t). \quad (2.4)$$

При малой величине индекса $\beta < 1$, значимые амплитудные значения имеют только первые гармоники, поэтому имеют место приближенные равенства:

$$\cos(\beta \sin(\Omega t)) \approx 1, \quad \sin(\beta \sin(\Omega t)) \approx \beta \sin(\Omega t),$$

при их подстановке в (2.4), получаем:

$$u(t) = U_{\beta} \cos(w_0 t) + (\beta U_{\beta} / 2) \cos((w_0 + \Omega)t) + (-\beta U_{\beta} / 2) \cos((w_0 - \Omega)t) \quad (2.5)$$

Пары боковых составляющих равны по амплитуде и отличаются по фазе на $\pi/2$. Амплитуда несущей U_{β} значительно больше амплитуды боковых составляющих $\beta U_{\beta} / 2$ при $\beta \ll 1$. Расчетное отношение амплитуды несущей к амплитуде одной из боковых составляющих:

$$U_{\beta} / (\beta U_{\beta} / 2) = 2 / \beta. \quad (2.6)$$

Данные по расчету минимальной амплитуды деформации на разных частотах при разных уровнях угловой модуляции β сведены в таблицу 2.1

Таблица 2.1 Расчетные значения минимальной амплитуды деформации a_{\max}

$f, \Gamma\text{Гц}$	10	33	100
$\lambda/4, \text{мкм}$	$7,5 \cdot 10^3$	$2,27 \cdot 10^3$	$7,5 \cdot 10^2$
$a_{\max}, \text{мкм}$	0,005	0,005	0,005
$\beta, \text{ед}$	$6,67 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$6,67 \cdot 10^{-4}$
$\beta, \text{дБ}$	-150	-139	-72,5

Поскольку каждая составляющая меньше несущей в $\beta/2$ раз, обнаружение этой составляющей возможно при условии, что ее мощность превышает спектральный шум не менее чем на 3дБ. Уровень шума связан с рабочей полосой и температурой формулой Найквиста.

$$P(\Delta\omega, T) = 4kT\Delta f,$$

где k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), Δf полоса частот, внутри которой измеряются флуктуации напряжения, T – температура объекта в градусах Кельвина.

Спектральная плотность шума для температуры 300 градусов Кельвина в полосе 1 Гц

$$P(\Delta\omega, T) = -144 \text{ дБ/мВт (1/Герц)}.$$

Учитывая (2.2), определим необходимый уровень обнаруживаемого сигнала

$$P_{max} = -141 + 20 \lg(2a_{max}/(\lambda/4)) = -141 + 20 \lg(8fa_{max}/C) \quad (2.7)$$

где f – несущая частота (в герцах), $C = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

График зависимости $P_{max} = F(a_{max}, f)$ при разной величине амплитуды колебаний металлической поверхности a_{max} приведен на рисунке 2.1.

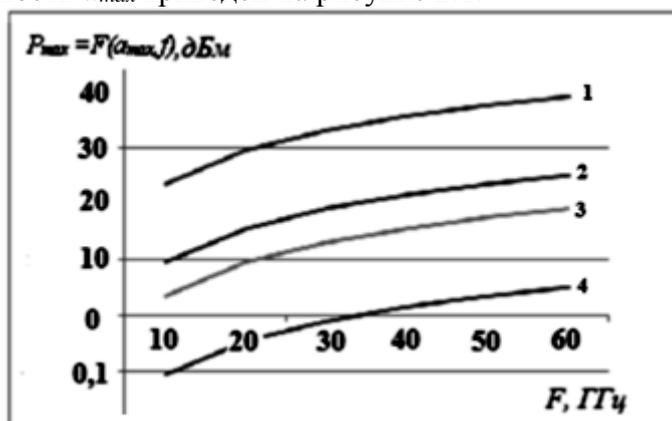


Рис.2.1. График зависимости $P_{max} = F(a_{max}, f)$ от частоты,

1 – $a_{max} = 5$ нм; 2 – $a_{max} = 1,0$ нм; 3 – $a_{max} = 0,5$ нм; 4 – амплитуда $a_{max} = 0,1$ нм.

График позволяет оценить необходимую минимальную мощность СВЧ излучения, позволяющую обнаруживать колебания поверхности металла с заданной амплитудой. Например, для наблюдения боковой составляющей фазомодулированного сигнала с несущей 10 ГГц при амплитуде механических колебаний более 5 нанометров необходимо повышение мощности на 10 дБ, т.е. минимальная мощность СВЧ излучателя должна быть 10 дБ/мВт.

На практике не удалось зарегистрировать с помощью СВЧ сигнала и современных анализаторов спектра амплитуду колебаний поверхности величиной менее 1 микрона, что на 2-3 порядка больше, чем амплитуда колебаний, регистрируемых контактными сенсорами. Вероятно это заставило множество исследователей, занимавшихся экспериментами по регистрации колебаний металлической поверхности СВЧ полем путем использования амплитудных методов обработки сигналов, отказаться от дальнейших работ.

Для выяснения причин малой чувствительности амплитудного метода регистрации колебаний металлической поверхности был проведен расчет модуля и фазы коэффициента отражения СВЧ сигнала от поверхности металла.

Из-за высокой электрической проводимости металла глубина проникновения электромагнитного поля в металл значительно меньше длины возбуждающей электромагнитной волны.

Комплексная диэлектрическая проницаемость металла определяется соотношением

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_L + j \frac{4\pi\sigma}{\omega},$$

где ε_L – диэлектрическая проницаемость кристаллической решетки, σ – электропроводность металла, ω – круговая частота.

Электропроводность некоторых металлов показана в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Электропроводность металлов

Металл	Проводимость СГСЭ (1/с)
Al	$31,5 \cdot 10^{16}$
Сталь	$3 \cdot 10^{16} - 8,29 \cdot 10^{16}$

В теории ультразвукового зондирования используется параметр, названный импедансом поверхности Z . Известна связь поверхностного импеданса Z с коэффициентом отражения ρ , рассматриваемом в технике СВЧ

$$\rho = H_t(x) / H_t(0) = (1 - CZ / 4\pi) / (1 + CZ / 4\pi) \quad (2.8)$$

где H_t вектор магнитного поля, C - скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с), $Z(\omega, \sigma)$ - поверхностный импеданс (с/м),

$$Z(\omega, \sigma) = (4\pi / c) \sqrt{\varepsilon}(\omega, \sigma), \varepsilon = \varepsilon_1 + j4\pi\sigma / \omega \quad (2.9)$$

где $\varepsilon(\omega, \sigma)$ - комплексная диэлектрическая проницаемость, ε_1 - действительная часть диэлектрической проницаемости, ω - круговая частота (рад/с).

Путем подстановки численных значений $f = 10^{10}$ (Гц), $\varepsilon_1 = 1 - 100$ (раз), $\sigma = 7,2 \cdot 10^{16}$ (1/с) (для стали), можно заметить, что действительная часть выражения (2.9) много меньше мнимой части по модулю ($10^2 \ll 1,44 \cdot 10^8$).

Рассчитаем зависимость коэффициента отражения от проводимости.

$$\text{mod } \varepsilon(\omega, \sigma) = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \left(\frac{2\sigma}{f}\right)^2} \quad (2.10)$$

получаем следующую зависимость фазы коэффициента отражения:

$$\varphi(\rho) = \arctan\left(\frac{\sin B}{\cos B - 1/\sqrt{A}}\right) - \arctan\left(\frac{\sin B}{\cos B + 1/\sqrt{A}}\right)$$

Модуль проводимости ρ в квадрате можно записать

$$\rho^2 = \frac{1+A-2\cos B(\sqrt{A})}{1+A+2\cos B(\sqrt{A})} \text{ или } \rho^2 = \frac{C-D}{C+D}$$

$$\rho = \sqrt{\frac{C-D}{C+D}} \quad (2.12)$$

производная по модулю $\frac{d\rho}{dx}$ где $x = \frac{2\sigma}{f}$:

$$\frac{\sqrt{C^2-D^2}}{C+D} \left(D \frac{dC}{dx} - C \frac{dD}{dx} \right) \frac{1}{(C+D)^2} > 0. \quad (2.13)$$

Физическая величина проводимости σ ($10^{18} - 10^{19}$) 1/с, диэлектрической проницаемости $\varepsilon = (10 - 1000)$, для выбранных значений проводимости σ и ε производная $\frac{d\rho}{dx}$ всегда больше нуля.

Производная по фазе

$$d\varphi/dx = \frac{1}{(1 + \sin B / (\cos B + \frac{1}{\sqrt{A}}))^2} \frac{\cos B \frac{dB}{dx} (\cos B + \frac{1}{\sqrt{A}}) - \sin B (0,5^{-1,5} \frac{dA}{dx} - \sin B \frac{dB}{dx})}{(\cos B + \frac{1}{\sqrt{A}})^2} < 0 \quad (2.14)$$

для тех же значений σ и ε всегда меньше нуля.

Для частоты 33 ГГц расчетная зависимость модуля и фазы коэффициента отражения от изменения проводимости поверхности приведена на рисунке 2.2.

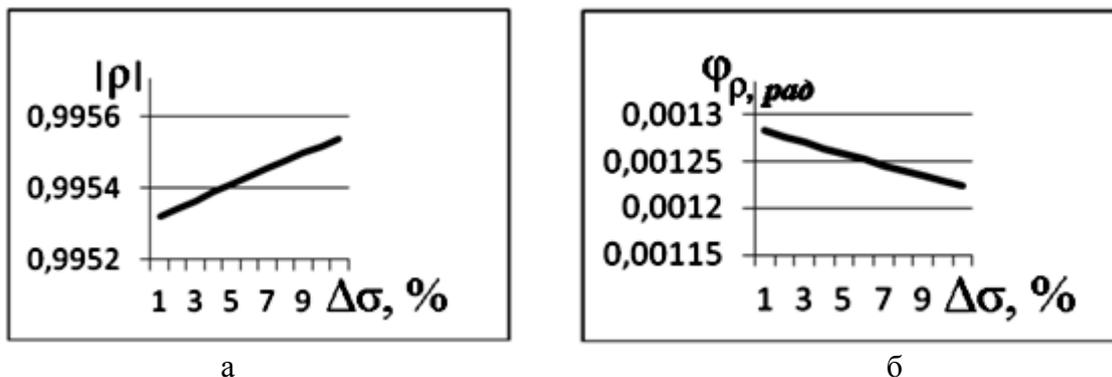


Рис.2.2. Зависимость модуля (а) и фазы (б) коэффициента отражения от изменения проводимости

Из проведенного расчета следуют выводы:

- изменение проводимости на 1% приводит к изменению фазы коэффициента отражения на 0,5 %, изменение модуля – в 40 раз меньше;
- производная по фазе $d\varphi/d\sigma$ имеет отрицательное значение, увеличение проводимости приводит к снижению фазы коэффициента отражения;
- производная по модулю $dp/d\sigma$ положительная, растет при увеличении проводимости;
- фаза коэффициента отражения линейно зависит от изменения проводимости;
- общий вывод: производная dp/dx модуля коэффициента отражения от проводимости σ мала, тогда как незначительное изменение проводимости поверхности σ приводит к существенному изменению фазы коэффициента отражения.

Из расчетов следует, что при отражениях СВЧ сигнала от поверхности металла необходимо учитывать не только амплитуду механических колебаний поверхности, но и изменение поверхностной плотности металла. Появление упругой поверхностной волны приводит к изменению плотности кристаллической решетки: уменьшению в максимуме и повышению в минимуме волны. Снижение плотности кристаллической решетки ведет к снижению поверхностной проводимости, повышение плотности приводит к повышению поверхностной проводимости. В результате фаза отраженного сигнала из-за механических колебаний поверхности оказываются в противофазе с фазой колебаний плотности проводимости, поэтому эта пара фазовых составляющих, одинаковых по величине, но противоположных по знаку приводит к невозможности наблюдать изменение суммарной фазы отраженного СВЧ сигнала с амплитудой менее 500 нм.

Оценим возможность регистрации при использовании фазового метода

Для частоты 33 ГГц и изменении проводимости от $2,34 \cdot 10^{11}$ до $2 \cdot 10^{11}$ (на 17%) с учетом линейности характеристики $d\varphi/d\sigma$ происходит изменение фазы $d\varphi = 7,7$ %. Возьмем изменение проводимости в сто раз меньше, на 0,07%. Индекс модуляции фазомодулированного сигнала:

$$\beta = 2d\varphi/\pi.$$

При $d\varphi = 1,21 \cdot 10^{-3}$ рад индекс модуляции $\beta = 7,7 \cdot 10^{-4}$, и, соответственно, уровень боковой составляющей равен $20 \cdot \lg(2/\beta) = 68,29$ дБ. При уровне несущей $P_{max} = 1$ мВт уровень боковой составляющей равен минус 68,29 дБ/ мВт. С учетом (2.7), уровень боковой составляющей будет превышать уровень шумов на $141 - 68,29 = 72,71$ дБ.

При приеме сигнала анализатором спектра с коэффициентом шума 10 дБ и полосой приема 3 кГц будет наблюдаться превышение сигнала над шумом на 31-32 дБ.

Отметим, что экспериментальные результаты отличаются от расчета менее чем на 3 дБ.

Размер обнаруживаемого дефекта является одной из основных характеристик каждой измерительной установки. Предложена модель процессов, происходящих в металле при ультразвуковом воздействии на область дефекта, которая описывает эффект возникновения изменений поверхностной проводимости металлических объектов, содержащих дефекты. Полученные расчетом минимальные размеры активной области дефектов составляют 200-300 микрон, что мало отличается от практических размеров обнаруженных дефектов (500-600 микрон), замеренных рентгеновским методом.

Выводы по второй главе.

1. Выполненные теоретические исследования не имеют строгого теоретического обоснования и могут рассматриваться как гипотеза. Результаты экспериментальных исследований удовлетворительно совпадают с проведенными на основе выдвинутой гипотезы расчетами. Для повышения точности расчетов требуется уточнение модели изменений проводимости под действием ультразвука с учетом мощности и частоты ультразвука.

2. В случае, когда металл не содержит области дефектов, воздействие ультразвука малой мощности на область дефекта не вызывает изменения поверхностной проводимости и не обнаруживается СВЧ сенсором.

3. Представленные результаты содержит практические рекомендации по увеличению чувствительности СВЧ сенсора микроволнового диапазона 30÷100 ГГц с целью регистрации виртуальных колебаний поверхности с величиной 0,5÷5 нанометров.

4. Выполненные расчеты по формулам зависимости коэффициента отражения от изменения проводимости (2.11-2.14) показывают, что в основу определения изменений поверхностной проводимости должны быть положены фазовые методы измерения. По сравнению с изменением модуля, фаза меняется значительно, в 40 раз больше, что обусловлено малостью влияния действительной части диэлектрической проницаемости по сравнению с ее мнимой составляющей.

В третьей главе «Разработка экспериментального образца прибора для обнаружения активных дефектов металлов» рассмотрена практическая реализация дистанционного индикатора динамических (активных) дефектов (ДИАД) металла на основе радара Доплера. Проведены расчеты характеристик узлов приборов на основе современных полупроводниковых приборов отечественного производства.

Расчетами доказано и подтверждено на практике, что для обеспечения необходимых технических характеристик, общая структура прибора может быть ограничена следующим составом:

- полупроводниковым СВЧ генератором на основе диода Ганна, работающего в импульсном режиме работы (диод 3А728В разработки ОАО НИИПП г. Томска), с использованием керамических резонаторов для снижения уровня фазовых шумов;

- фазовым детектором на СВЧ диоде А121В, позволяющим регистрировать фазовые изменения сигнала при амплитуде на уровне минус 130дБн/мВт, сравнимой с амплитудой акустических шумов в методе АЭ;

- управляемым генератором ультразвука с частотами 10-50 кГц и мощностью 10-20 Вт/см²,

- персональным компьютером с устройством записи выходного сигнала фазового детектора, программой расчета спектра сигнала через быстрое преобразование Фурье и программой управления генераторами ультразвука и СВЧ.

Для удобства работы с различными объектами исследований были разработаны несколько модификаций приборов (макетов) – дистанционных индикаторов активных дефектов.

Выводы по третьей главе. В результате проведенных исследований показана возможность практической реализации прибора, способного обнаруживать начальную стадию разрушения металлов, определены требования к элементам прибора, обеспечивающего чувствительность, достаточную для определения начальной стадии разрушения металла, показана возможность реализации прибора на отечественных полупроводниковых приборах:

- в качестве генератора СВЧ колебаний возможно использование полупроводникового диода Ганна (3А728В) в импульсном режиме работы, с применением керамических резонаторов, снижающих уровень фазовых шумов,-

- в качестве смесителя возможно применение СВЧ диода с контролем рабочей точки, что позволяет при использовании фазового метода регистрации измерять сигналы на уровне минус 130дБн/мВт и получить чувствительность не хуже, чем в методе АЭ.

Очевидным достоинством прибора является отсутствие нагружения исследуемого образца, малое время непосредственного измерения сигналов прибором, определяющим наличие или отсутствие дефектов (не превышает 1-2 секунды).

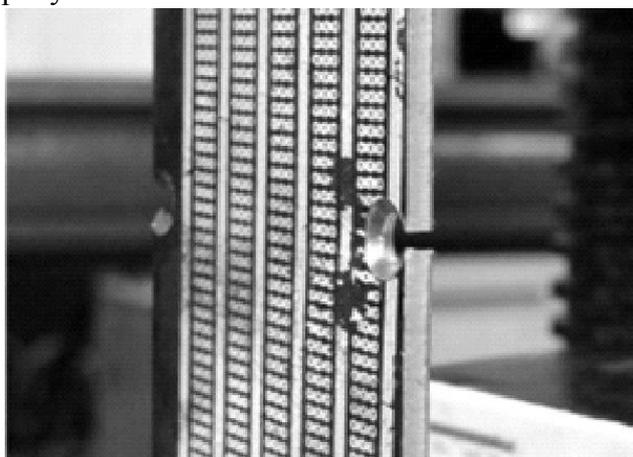
В четвертой главе описаны экспериментальные исследования различных дефектов металла с помощью разработанных приборов. В экспериментах применялись СВЧ сенсоры с рабочей частотой 10 и 33 ГГц. Состав и общий вид установки приведен на рисунке 4.1



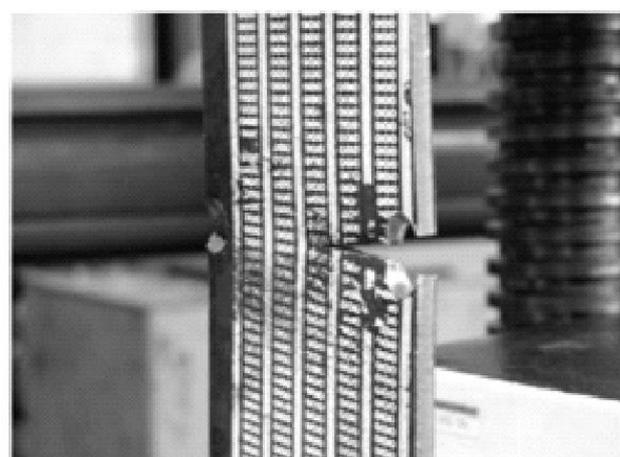
Рисунок 4.1 Общий вид экспериментальной установки для испытаний на разрыв, разрывная машина ГСМ-50 и комплект ДИАД

В экспериментальных исследованиях проводилось уточнение размеров и типов дефектов, обнаруживаемых с помощью СВЧ зондирования. Исследовались разные материалы (сталь Ст4, специальная сталь, алюминий), разной толщины (сталь 3-5 мм, алюминий 2-20 мм, электротехническая сталь 0,4 мм). В экспериментах использовалось увеличение усилий на образцы от нуля до разрыва образцов, а также циклические изгибы образцов.

Испытания на разрыв. Испытания проводились на кафедре теоретической и прикладной механики ТПУ на стальных образцах (Ст4, размер 450x65x5 мм). Для изменения прилагаемых усилий использовалась разрывная машина ГМС-50 с максимальным усилием 50 тонн, с плавной регулировкой усилия. Вид исследуемых образцов приведен на рисунке 4.2.



а



б

Рис.4.2. а – образец до разрушения, б – образец после образования трещины

Усредненные по результатам десятикратных измерений результаты представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Результаты экспериментов при растяжении образцов

Серия первая						
Усилие, тонн	0	5	1	7	10,6	12,9
Уровень сигнала, дБ	0	8	4	12	4	7
Серия вторая						
Усилие, тонн	0	5	1	5	7	12,5
Уровень сигнала, дБ	0	2	0	8	7	0

Типовой вид регистрируемого сигнала на экране компьютера приведен на рисунке 4.3

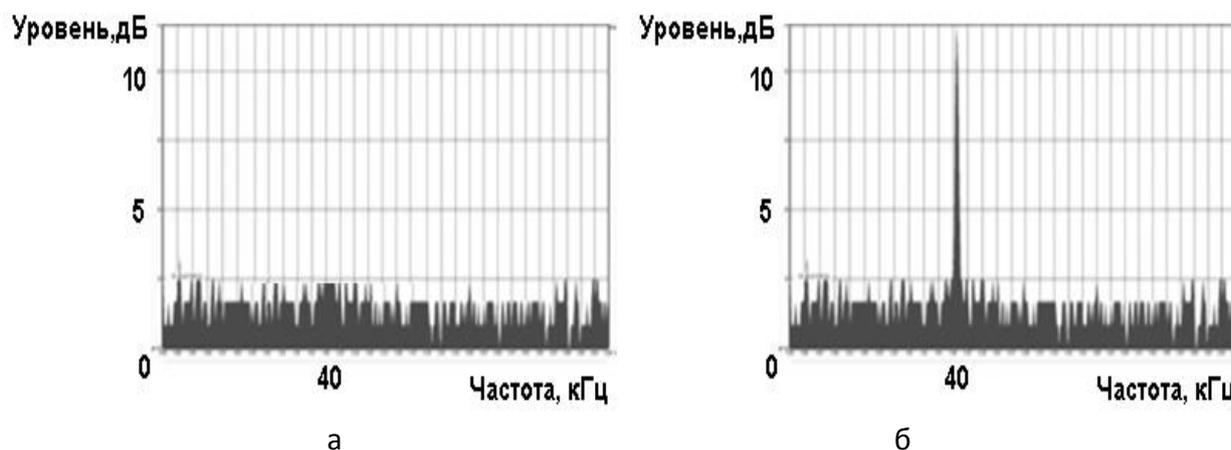


Рис 4.3. Вид регистрируемого сигнала: а – при отсутствии дефекта, б – при наличии дефекта (уровень сигнала 12 дБ)

При отсутствии активных дефектов спектр выходного сигнала не содержит спектральных составляющих с частотой ультразвука, рис.4.3а. По мере нагружения (1-5 тонн) появляется составляющая ультразвука, превышающая уровень шума на 2-8 дБ. Максимальный уровень сигнала (8-12 дБ, рис 4.3б) получен при начале пластической деформации (нагрузка 5-7 тонн).

С целью проверки эффекта Кайзера, плавное увеличение нагрузки прерывается ее сбросом (от 5 тонн до 1 тонны) и последующим нарастанием нагрузки. При сбросе нагрузки наблюдается резкое снижение полезного сигнала (до 0-4 дБ), что указывает на незначительную величину активных дефектов в режиме упругой деформации, при увеличении нагрузки до 7 тонн сигнал снова увеличивается (эффект Кайзера). Трещина показанная на рис.4.2б, возникает при усилии 12,5 тонн.

Аналогичные результаты получены при испытаниях алюминиевых образцов на базе Института физики прочности и материаловедения СО РАН г. Томска.

Испытания при циклическом изгибе образцов. Испытания проводились на базе Института физики прочности и материаловедения на разрывной машине с усилием 10 тонн. Испытывались образцы из алюминия размерами 150x20x2 мм со специальной шейкой для локализации места разрыва, рисунок 4.4а. При испытаниях было установлено, что уровень полезного сигнала скачком нарастает только при появлении трещин показанных на рисунке 4.4б. Накопления усталостных напряжений и рост амплитуды полезного сигнала отсутствует.

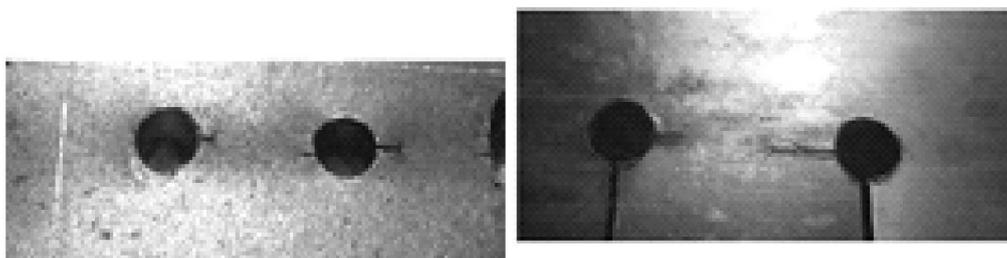


Рис. 4.4. Появление трещин на образце после изгибов

Проведена серия испытаний при импульсном и при бигармоническом воздействии ультразвуком на образцы. При бигармоническом воздействии частотами 107 и 47 кГц с увеличением нагрузки на образцы на выходе СВЧ сенсора в начале пластической (необратимой) деформации в спектре сигнала появились новые комбинационные составляющие (13, 60 и 28кГц). Появление гармоник при начале необратимых изменений в металле позволяет обозначить границу, с которой возникает дефект в металле.

Локализация места дефекта. Для определения местоположения внутреннего дефекта металла, по методике, предложенной профессором Капрановым Б.И., были выполнены эксперименты с различными местами установки ультразвукового излучателя, показанными на рисунке 4.5.

Наибольшие изменения показаний СВЧ прибора получены при установке ультразвукового датчика в точках 2 (на 8 дБ) и 3 (на 10 дБ). Это объясняется расположением дефекта сварного шва рядом с точкой 3. Изменение показаний СВЧ прибора контроля при изменении места установки ультразвукового излучателя позволяет локализовать место расположения дефекта.

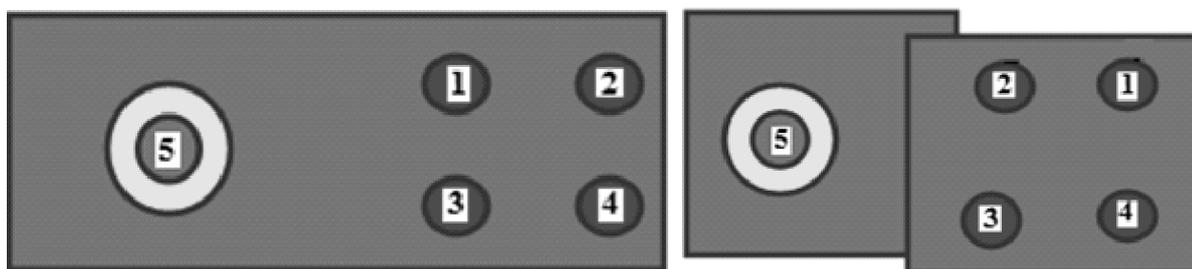


Рис.4.5 Места установки ультразвукового передатчика (1-4) и СВЧ сенсора (5) на образцах без дефекта и с дефектом

Восстановление активности образцов. Активность дефектов со временем снижается. Проведены исследования возможности восстановления активности дефектов в металлах путем нагрева и быстрого охлаждения. Исследовался образец из стали Ст-45, толщиной 5мм, образец имел застарелый дефект в виде усталостной трещины.

Измерения проводилась на образцах без нагрева и после нагревания образца до температуры 200-250°C и быстрого охлаждения до температуры 20°C. Проводилась серия из 10 измерений для четырех мест установки источника ультразвука. Усредненные результаты измерений мощности спектральной составляющей представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 Результаты испытаний стального образца

Номер точки воздействия	1	2	3	4
Образец до реактивации, мощность, дБ	12	9	8	10
Образец после реактивации, мощность, дБ	16	17	18	13

Погрешность измерений, по методу «три сигма», составила 1,5 дБ.

Из сравнения результатов измерений следует, что степень «активности» бездефектного образца практически не изменилась, а «активность» дефектов на втором образце после реактивации увеличились на 4-10 дБ.

Исследование дефектов различных объектов СВЧ методом. Проведены испытания по использованию ДИАД для обнаружения дефектов металлов в различных объектах: на железнодорожных колесах, трубах различного диаметра и металлических образцах различной формы. Уверенно обнаруживались различные виды дефектов, часть которых показана на рисунке 4.6 а-д. Типичная форма сигнала на выходе СВЧ сенсора при уровне спектральной мощности 14 дБ от дефектного образца показана на рисунке 4.6е.

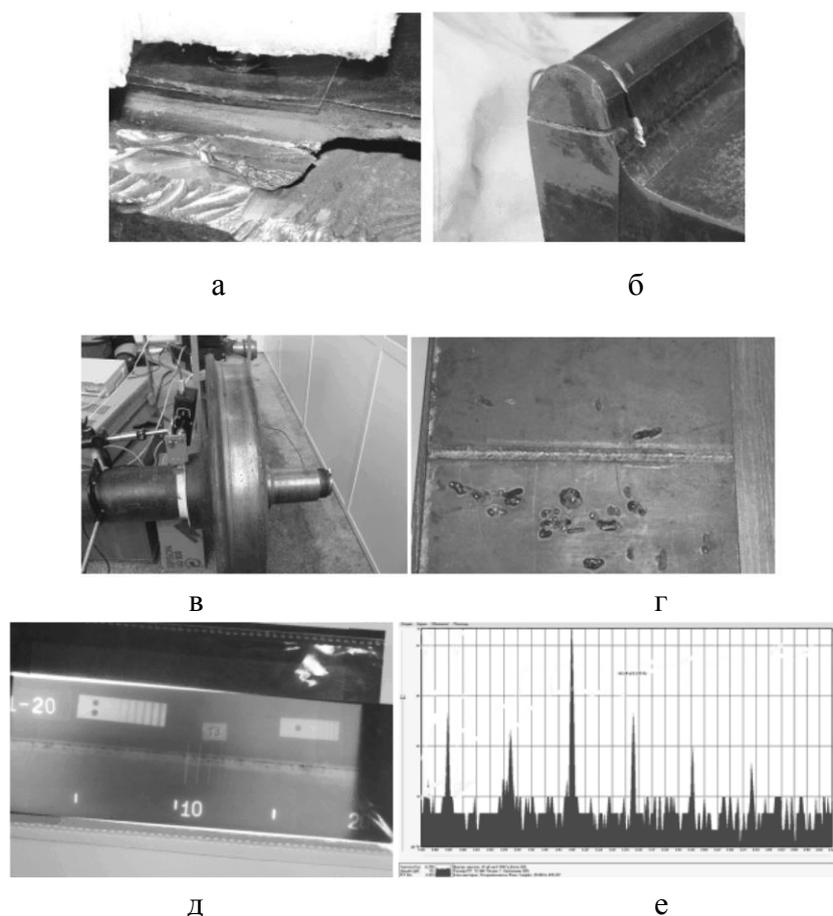


Рис. 4.6. Различные дефекты, обнаруживаемые прибором: а – дефект обода колеса, б – искусственные дефекты, в – прокручивание диска в ступице, г – в сварных соединениях, д – рентгеновский снимок дефектов сварного соединения, е- спектр сигнала

Выводы по четвертой главе. Выполненные экспериментальные исследования подтвердили возможности обнаружения начального процесса усталостного разрушения металлов дистанционно, с помощью СВЧ излучения. Высокая чувствительность СВЧ сенсора позволяет обнаруживать дефекты на начальной стадии разрушения, на участке упругой деформации и последующей пластической деформации.

Исследованиями подтверждена возможность обнаружения старых дефектов потерявших со временем активность. Показана возможность восстановления активности дефектов в металлах путем нагрева и быстрого охлаждения.

При испытаниях был обнаружен известный ранее эффект появления на выходе СВЧ сенсора комбинационных составляющих акустических волн при использовании бигармонического ультразвукового сигнала, что возможно только при использовании фазового метода измерения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенного диссертационного исследования разработан новый прибор для диагностики дефектов в металлах, обладающий высокой чувствительностью, позволяющий обнаруживать начальную стадию разрушения внутри металла, нарушения в кристаллических решетках, наличие механических напряженностей внутри металлов и позволяющий определять степени начального разрушения. Обнаружение механических напряженностей внутри металлов и локализация мест напряженностей под нагрузками позволяет оптимизировать размеры конструкций, уменьшать их габариты, вес и стоимость.

Получены новые научные результаты:

1. Обнаружен и исследован эффект высокой чувствительности бесконтактных СВЧ сенсоров при воздействии ультразвуком в области расположения дефектов объектов.

2. Теоретически исследована и подтверждена практически возможность реализации предельной чувствительности бесконтактных СВЧ сенсоров к сверхмалым (менее 10нм) механическим колебаниям (деформации) поверхности металлов.

3. Доказано, что благодаря взаимодействию динамического (активного) дефекта с ультразвуком мощностью 10-20 Вт/см² в диапазоне частот 44-50 кГц существенно, (до 45 дБ относительно уровня шума), увеличивается уровень коэффициента угловой (фазовой) модуляции отраженного СВЧ колебания частотой 10-40 ГГц .

4. С помощью бесконтактного СВЧ сенсора проведены исследования релаксационных свойств динамических дефектов при термическом возбуждении, показано продолжительное время существования восстановленной активности дефектов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах:

1. Горбунов В.И., Суторихин В.А. Использование дистанционного СВЧ преобразователя акустической эмиссии при контроле качества сварных швов. //Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 1999, №10, том 65, с.36-38.

2. Горбунов В.И., Суторихин В.А. Возможности контроля предела упругих деформаций СВЧ методом // Дефектоскопия, 1999, №7, с.75-80.

Публикации в зарубежных журналах:

1. Microwave Nondestructive Testing Method V.I. Gorbunov & V. A. Sutorikhin //Applied Physics Research, Vol. 4, No. 1; February 2012. P. 206-210 (SCOPE)

2. Sophisticated Microwave Nondestructive Testing Method for Metals .-Vladimir Sutorikhin Applied Physics Research; Vol. 4, No. 4 ,ISSN 1916-9639 E-ISSN 1916-9647 Published by Canadian Center of Science and Education ; 2012 . p, 56-60 (SCOPE)

3. The Usage of the Microwave Crack Detector for Fatigue Cracks Detection.- Sutorikhin V. A. Applied Physics Research; Vol. 5, No. 5; ISSN 1916-9639 E-ISSN 1916-9647 Published by Canadian Center of Science and Education, 2013, p. 60-66 (SCOPE)

4. Dopler Radar in Crack Testing .-Vladimir Sutorichin , Sergei Brichkov, British Journal of Applied Science & Technology, Dopler Radar in Crack Testing Control 4(23), BJASt/10159 2014, p. 3315-3321

5. The Effect Gorbunov In Practice.- Sutorikhin V. A. ,Shchedrivyi K. V. Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST), Vol. 2 Issue 10, ISSN: 3159-0040, JMESTN42351117 2826 October - 2015 ,p. 2826-2829

6. Kapranov B., Sutorikhin V. The Doppler Detection Fault, Physical Science International Journal, www.sciencedomain.org., 13(1): 1-5, 2017; Article no.PSIJ.30562, 2017 , p.5

7. Kapranov B. I., V. A. Sutorikhin Theoretical limit on the measurement of Acoustic Emission signals the Doppler. NORWEGIAN JOURNAL OF DEVELOPMENT OF THE INTERNATIONAL SCIENCE 2017 . P.23-26

8. . Суторихин В.А. Эффект Горбунова расширил возможности акустической эмиссии / Международный научный журнал Scientia, technique №1, 2016, с.19,20.

Патенты, изобретения:

1. Горбунов В.И., Суторихин В.А., Устинов Б.Ф. Способ регистрации сигналов акустической эмиссии в металлах / Патент на изобретение RUS 2372615, 22.07.2008

2. Суторихин В.А., Устинов Б.Ф. Устройство для обнаружения активных дефектов в металлических изделиях /Патент на полезную модель RUS 81577 04.08.2008

3. Бричков С.А., Суторихин В.А. Устройство прецизионного позиционирования при обработке поверхности металлического изделия /Патент на полезную модель RUS 85390 01.12.2008