

На правах рукописи.

**Суторихин Владимир Анатольевич**

05  
138

**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

**диссертация**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук,

профессор кафедры РСС ТУСУРа

Авдоченко Борис Иванович

**Томск 2020**

## Оглавление

<b>ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.....</b>	<b>4</b>
Актуальность темы диссертационного исследования. ....	4
Степень разработанности темы.....	4
Основные задачи исследований.....	8
Научная новизна.....	9
Практическая значимость.....	9
Публикации по теме исследования.....	11
Положения, выносимые на защиту.....	11
Достоверность полученных результатов .....	11
Апробация результатов работы.....	12
<b>ГЛАВА 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЧ В МЕТОДАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОВ .....</b>	<b>14</b>
1.1 Исследования возможности индикации состояний металла при СВЧ зондировании.....	14
1.2 Определение опасных дефектов металлов методом акустической эмиссии .....	20
1.3 Аппаратура, используемая при диагностике методом акустической эмиссии .....	23
1.3.1 Преобразователи акустической эмиссии .....	23
1.3.2 Имитаторы сигналов акустической эмиссии.....	24
1.3.3 Электронные блоки.....	25
1.3.4 Достоинства и недостатки метода акустической эмиссии .....	25
1.4 Направления исследований по доработке метода акустической эмиссии.....	28
1.5 Исследование процесса взаимодействия упругих колебаний с внутренними дефектами в металле .....	29
1.6 Выбор направления исследования.....	31
<b>ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ С ПОМОЩЬЮ СВЧ ЗОНДИРОВАНИЯ .....</b>	<b>32</b>
2.1 Расчет спектра отраженного фазомодулированного сигнала через функции Бесселя.....	32
2.2 Расчет необходимой мощности СВЧ излучателя.....	35
2.3 Расчет изменений поверхностной электрической проводимости .....	38
2.4 Расчет объема обнаруживаемого дефекта.....	43
2.5 Выводы по второй главе .....	47
<b>ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ПРИБОРА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АКТИВНЫХ ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛОВ.....</b>	<b>49</b>
3.1 СВЧ сенсор.....	50

3.1.1 Генератор на диоде Ганна .....	50
3.1.2 Фазовый детектор.....	51
3.2 Электронный имитатор активного дефекта.....	55
3.3 Генератор ультразвука.....	56
3.4 Методика настройки СВЧ сенсора .....	58
3.5 Расчет конструктивных параметров прибора ДИАД для индикации дефектов железнодорожных колес в движении .....	59
3.6 Заключение по третьей главе .....	61
<b>ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>	<b>63</b>
4.1 Направления выполненных экспериментальных исследований.....	63
4.2 Общая методика испытаний.....	65
4.2.1 Проверка работоспособности и первичная настройка прибора.....	65
4.2.2 Установка СВЧ излучателя .....	67
4.2.3 Последовательность операций по обнаружению и регистрации дефектов .....	67
4.3 Результаты испытаний .....	68
4.3.1 Испытания на разрыв .....	68
4.3.2 Испытания на изгиб .....	72
4.3.3 Локализация места дефекта.....	73
4.3.4 Восстановление активности образцов.....	75
4.3.5 Испытания на усталостную прочность бигармоническим ультразвуковым сигналом .....	88
4.4 Исследование дефектов различных объектов СВЧ методом. ....	89
4.5 Выводы по четвертой главе.....	92
<b>ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ .....</b>	<b>93</b>
Список литературы .....	96
Приложение А. Патенты.....	106
Приложение Б. Документы по использованию и испытаниям.....	109

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы диссертационного исследования.**

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 высокая чувствительность при небольшом динамическом диапазоне, не позволяющая обнаруживать различные стадии разрушения, от уровня нарушений кристаллических решеток металлов, до образования больших (опасных) трещин.

Актуальность работы 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).

### **Степень разработанности темы**

Из известных методов диагностики, позволяющих обнаруживать начальные стадии разрушения, наиболее чувствительным методом определения дефектов является метод акустической эмиссии (АЭ). Основными недостатками метода, кроме необходимости подключения большого числа контактных сенсоров, являются необходимость использования при экспериментах механических нагрузок исследуемых

конструкций и обеспечение отсутствия посторонних акустических шумов во время измерений [1].

При использовании АЭ затруднена диагностика подвижных объектов, трубопроводов, закрытых спецзащитой, объектов с высокими температурами, превышающими максимальную рабочую температуру пьезоэлектрических контактных сенсоров (точка Кюри 250-300°C). Акустические шумы движущихся под высоким давлением газообразных веществ (перегретого пара) достигают значения 100-120 дБ, при таких значениях акустической мощности контактные сенсоры разрушаются [1-3]. Примером объектов с механическим движением могут служить железнодорожные колеса, валы турбин, генераторов, штанги глубинных насосов.

Частично проблема регистрации сигналов АЭ, для исследования подобных объектов, может быть решена применением бесконтактных способов: с использованием микрофонов [4], лазерного излучения [5,6] и приемопередающих устройств [7-9].

Имеется ряд работ российских и зарубежных исследователей, в которых изучается эффект появления электромагнитного излучения в различных спектрах при разрушениях в металлах и деформациях различных пород. Известны работы индийского ученого А.А. Misra [10-12], в которых исследуется эффект излучения радиосигналов при разрушении металлов. Эффект излучения радиоволн при разрушении горных пород описано российскими и японскими учеными [13,14]. Регистрация радиоволнового излучения используется при предсказании землетрясений. Недостатком использования радиоволн подобной природы для поиска дефектов является невозможность появления сигналов на ранней стадии, до начала разрушений.

Непосредственное измерение внутренних дефектов в металлах воздействием СВЧ колебаний невозможно из-за незначительной глубины проникновения, обусловленной скин-эффектом, однако их можно использовать для регистрации изменений на поверхности металлов.

С середины прошлого века проводятся исследования возможности регистрации ультразвуковых колебаний поверхности металлов СВЧ сенсорами, способными заменить контактные, пьезоэлектрические сенсоры. Значительным преимуществом СВЧ сенсоров, относительно контактных, является возможность работы на значительном расстоянии от исследуемых объектов, достигающем сотни метров [15]. Такие сенсоры могут работать с объектами, нагретыми до температуры в тысячи градусов, движущимися объектами. Динамический диапазон регистрируемых СВЧ сенсором сигналов может достигать 100-120 дБ [16].

Предварительные теоретические исследования предельной чувствительности микроволновых радаров, основанные на взаимодействии колебаний металлической поверхности с электромагнитным СВЧ излучением [17,18] показали, что предельная чувствительность по регистрируемой амплитуде колебаний должна быть сравнима с чувствительностью пьезоэлектрических сенсоров. Но практическая реализация СВЧ сенсоров, представляющих собой радары Доплера, для контроля механических колебаний поверхности металлов оканчивалась неудачами [19,20]. Минимальный уровень амплитуд колебаний поверхности, регистрируемый микроволновыми сенсорами на основе радаров Доплера, составляет 1-2 мкм [8,9,21], что значительно, на 2-3 порядка больше уровня, измеренного контактным методом с использованием пьезопреобразователей (0,5-5 нанометров) [3,22,23]. Чувствительность СВЧ устройств регистрации оставалась слишком низкой для практических применений.

**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 №7901p/11410 от 15.04.2010 (тема "Разработка, исследование, испытания дистанционных индикаторов активных дефектов (ДИАД) на образцах и железнодорожных колесах в статическом режиме") [24].

**Методы исследований.** На начальной стадии 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, впервые предложенная профессором Васильевым Б.В [25]. В развитии метода автором этой работы была предложена математическая модель, описывающая изменения поверхностной проводимости в результате взаимодействия акустических волн с дефектами, образования переменной поверхностной проводимости и взаимодействия СВЧ колебаний с этой измененной поверхностной проводимостью [26, 27-43].

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 фазовый метод регистрации.

Исследование характеристик разработанного прибора и возможности обнаружения дефектов различной природы проводилась эмпирическим методом [27-43].

Обработка результатов исследования проводилась с помощью разработанной компьютерной программы с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ).

### **Основные задачи исследований**

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи.

1. Проведен аналитический обзор использования СВЧ сигналов в методах неразрушающего контроля металлов по различным источникам информации и выбрано направление работы [27-30].

2. Предложена математическая модель изменения поверхностной проводимости в результате взаимодействия акустических волн в металле с дефектами [26].

3. Проведены теоретические исследования предельной чувствительности микроволновых радаров, основанные на взаимодействии измененной проводимости металлической поверхности с электромагнитным излучением различных частот [27].

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 релаксационных свойств дефектов металлов при термическом возбуждении.

## Научная новизна

1. Доказана возможность значительного увеличения чувствительности метода АЭ по обнаружению дефектов металлов при использовании СВЧ зондирования совместно с ультразвуковым сигналом.

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

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 провести профилактические мероприятия и предотвратить разрушение конструкций.

3. Высокая чувствительность предложенного прибора позволяет обнаруживать дефекты без использования механических нагрузок, что значительно (в сотни раз) сокращает время диагностики, не снижая надежность обнаружения опасных дефектов.

4. Разработанный СВЧ сенсор позволяет обнаруживать дефекты металлов подвижных объектов и скрытых трубопроводов, внутри которых находятся в движении мощные потоки жидких или газообразных веществ, 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.

## **Публикации по теме исследования**

По теме диссертации опубликовано 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.

## **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/см<sup>2</sup> увеличивают коэффициент фазовой модуляции отраженного СВЧ излучения частотой 30-40 ГГц на 6-50 дБ.

3. Термическое воздействие на дефекты металла, утратившие свойства активности, температурой более 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 дефекта, размеров дефекта и практически не зависит от места облучения поверхности металлического объекта СВЧ волнами.

## **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:

1. Международной научной Интернет-конференции с «Спектрометрические методы анализа», Казань, 2013 г.
2. Международной НПК «Современные тенденции в образовании и науке», Тамбов 2014 г.
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 сочетанием

ультразвукового воздействия на область дефекта и СВЧ сенсора[26-28]. Основные теоретические результаты, экспериментальные исследования, разработка и изготовление сенсора дефектов металла на основе СВЧ зондирования [32-35] выполнены лично автором.

Автором самостоятельно разработаны математические модели и методики испытаний образцов с различными дефектами [36-38].

Практическая реализация отдельных узлов и конструкции опытного образца разработанного прибора для экспериментальных исследований проводились совместно с Гавриловым А.Н. [73-75].

Экспериментальные исследования СВЧ сенсора при использовании режима реактивации выполнены с участием Бричкова С. А. [24,31]

Постановка цели и формулировка задач научного исследования, подготовка материалов диссертации велась совместно с научным руководителем Авдоченко Б.И. [73].

# ГЛАВА 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЧ В МЕТОДАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОВ

## 1.1 Исследования возможности индикации состояний металла при СВЧ зондировании

Диссертационное исследование проведено с целью повышения чувствительности методов неразрушающего контроля до уровня, позволяющего обнаруживать начальные стадии разрушения металлических конструкций.

Из известных методов диагностики, позволяющих обнаруживать начальные стадии разрушения, наиболее надежным методом определения опасных дефектов является метод акустической эмиссии (АЭ).

Метод основан на «прослушивании» объектов во время постепенного увеличения механической нагрузки на объекты исследований. При начале разрушения металлов появляются акустические импульсы, количество которых  $N$  регистрируется контактными сенсорами.

Сигналы, регистрируемые контактными сенсорами, принято разделять по степени «активности» дефекта. Если при механическом нагружении активность  $N$  возрастает как линейная функция приложенного напряжения  $P$

$$N = P^m, (m=1),$$

то дефект считается «активным».

При значении  $1 < m < 3$ , дефект считается «повышенной активности», а при выполнении условия  $m > 6$  дефект становится «катастрофическим».

Задача обнаружения начальной стадии разрушения металлов может быть решена путем значительного повышения чувствительности этого метода. При этом методе ультразвуковые приемники должны быть установлены на поверхности металла вблизи области дефекта. Из природы регистрируемого явления становится очевидным, что самыми слабыми по амплитуде механических колебаний являются «активные» дефекты с амплитудой 5-25 нм. В диссертационном исследовании эта амплитуда

колебаний поверхности считается минимальной, соответствующей начальной стадии разрушения.

В проведенном исследовании показано, что разработанный сенсор способен регистрировать дефекты, не имеющие никакой акустической активности, без нагружения конструкций. Было принято решение называть такие дефекты **динамическими**, поскольку регистрируемые от них сигналы возникают при условии воздействия ультразвука на область дефекта.

Первой теоретической работой, связывающей электропроводность с внутренним строением металлов, является классическая теория проводимости металлов П.Драуде, разработанная около 1900г [44]. В теории П.Драуде электроны металла рассматривались как классический «электронный» газ. Теория позволила объяснить явление термоэлектронной эмиссии, возникновение контактной разности потенциалов, объяснила эффект Холла и другие результаты, полученные на практике. Объяснения процессов в металлах при различных воздействиях на основе теории Драуде физически наглядны.

Задача изучения возможности регистрации состояний поверхностей металла с помощью СВЧ сигналов малых амплитуд ставилась исследователями неоднократно [45-50]. Исследования выполняли известные ученые. Возможность существования высокочастотного резонанса в металлах, пронизанных магнитным полем, впервые открыли Л.В.Шубников и De Haas-van Alphen [51]. В их работах впервые было введено понятие «поверхностная проводимость» для слоя толщиной в 1-10 межатомных слоев (0,1-1 нм), отличающаяся от понятия «скин-слой», в котором глубина проникновения СВЧ определяется при ослаблении амплитуды электрической составляющей электромагнитного поля в  $e$  раз.

Эти исследования были продолжены в совместных работах Э. Канера и М. Азбеля, работу которых Л. Ландау оценил как «одну из самых лучших теоретических работ в области физики твёрдого тела». Работа вошла в реестр

государственных открытий. Эти работы имеют самые высокие международные индексы цитируемости среди научных статей по физике.

Хорошо известны работы, посвященные исследованиям функциональной связи магнитного поля с коэффициентом отражения от поверхности металла для СВЧ волн, получившей название «эффекта Шубникова-де Гааза» [52] или «эффект циклотронного резонанса в металлах» [53]. Вариации коэффициента отражения СВЧ волны от металлической поверхности при сильных магнитных полях позволили сравнительно просто и точно определять химический потенциал металлов и полупроводников.

Проведенные исследования были ограничены областью сверхнизких температур (3-20°K). Повторение экспериментов циклотронного резонанса при температуре 300°K не принесло желаемых результатов. Практическое применение нашел принцип определения химического потенциала  $\mu$  с помощью теории циклотронного резонанса. В свою очередь, высокая точность определения  $\mu$  пригодилась в дальнейшем при оценке работы выхода электронов полупроводниковых структур [53].

Дальнейшие исследования в этом направлении завершились открытием – экспериментальным обнаружением акустоэлектронного взаимодействия при сверхнизких температурах. Эффект предсказан теоретически Р. Парментером в 1953 году [54,] и позже Л. Гуревичем [55]. В 1957 году акустоэлектронное взаимодействие было экспериментально обнаружено в Германии Г. Вайнрайхом и Х. Дж. Уайтом. Их экспериментами доказано, что акустические волны в полупроводниковых структурах приводят к появлению электрического тока. Из-за малости наблюдаемого электрического поля, эффект Вайнрайха-Уайта не нашел практического применения.

Интересной теоретической работой, объясняющей эффекты в металлах при возникновении опасных напряжений, является работа Б.В. Васильева и В.Л. Любошица [25]. Ее результаты значительно отличаются от известных положений «Теории металлов» [56] академика А.А. Абрикосова, гипотезы

возникновения «Волны Ценека» [46], термоэлектрического метода Тупикина Ф.Д [57] относительно возможности появления электрического поля внутри металла при механическом сжатии. Б.В. Васильев и В.Л. Любошиц, сотрудники института Курчатова, используя известный математический аппарат, доказали, что возможно появление электрического поля внутри металлических объектов (электронного газа) без использования сверхнизких температур или ионизирующего излучения. В работе [25] впервые было теоретически предсказано появление **«поверхностных волн проводимости» металлов** под действием механического давления на внутренние области электронного газа.

Российские ученые Л.Б. Зуев и Я.Е. Гегузин. И.Л. Батаронов, В.Д. Нацик описали явление, которое возникает при воздействии на неоднородности кристаллической решетки металла через дислокации внешним электрическим полем, названное «электронным ветром» [58-60]. Под действием переменного поля дислокации начинают движение, вызывая периодическое изменение модуля упругости металла. По мнению этих специалистов, плотность тока в «электронном ветре» достигает сотен ампер. Продолжением этих теоретических исследований явились работы по исследованию эффекта упрочнения и снижения прочности металлов при воздействии статическим электричеством [61-63]. Эффект упрочнения использовался при изготовлении медных проводов, протягиваемых через фильеры. На основе полученных экспериментальных результатов были разработаны специальные приборы, позволяющие изменять плотность металлов.

Проведена большая работа по исследованию взаимодействия ультразвуковых и СВЧ колебаний с целью проверки возможности регистрации ультразвуковых колебаний поверхности СВЧ сенсорами. Результаты теоретических исследований предельной чувствительности микроволновых радаров, основанные на взаимодействии колебаний металлической поверхности с электромагнитным излучением, приведенные

авторами в открытой печати [21,22], показали, что предельная чувствительность по регистрируемой амплитуде колебаний (деформации) поверхности должна быть сравнима с чувствительностью пьезоэлектрических сенсоров, составляющей единицы нанометра.

Проблемой исследований по дефектоскопии металлов было противоречие расчетных и экспериментальных результатов при регистрации слабых колебаний поверхности (1-10 нанометров), вызванных началом разрушения металлов при механической нагрузке, старении, низкотемпературной деформации.

Проведены исследования по генерации упругой ультразвуковой волны для колебаний металлической поверхности бесконтактным способом, путем лазерного возбуждения волн. В период 1970-1980 годов американские генераторы ультразвука выпускались военной промышленностью как один из вариантов практического использования лазеров.

Исследовалась также возможность регистрация отраженного лазерного излучения с целью замены контактных сенсоров на лазерные. В результате исследований выяснилось, что чувствительность лазерного сенсора для контроля поверхностных деформаций оказалась весьма слабой. Полезный сигнал при ультразвуковых колебаниях поверхности мог быть обнаружен с помощью лазера только при амплитуде упругой деформации в несколько микрон, в то время как контактные сенсоры могли обнаруживать амплитуды колебаний единицы нанометра (в тысячи раз меньше).

Теоретически лазерные сенсоры могут обнаруживать «перемещения» металлической поверхности и величиной 0,1- 0,5 нанометра [3], но такие «перемещения» возможно замерить только с помощью искусственных имитаторов, представляющих собой зеркально обработанные поверхности весьма малых размеров (100-200 микрон). Практика использования лазерных сенсоров на обычных поверхностях столкнулась с высоким уровнем сложности обработки, не позволяющей исследовать колебания поверхности частотой более 100 Герц [77].

Применения в исследованиях чувствительных СВЧ сенсоров казались более перспективными, чем регистрация случайных колебаний в методе АЭ. В отличие от амплитудных методов регистрации, спектральные методы, применяемые в радарх Доплера, предполагают выбор частот для воздействия на объект анализа. При этом возникает возможность значительного ограничения спектра приема полезных сигналов и повышения чувствительности. Принцип накапливания полезного сигнала в течении времени регистрации позволяет обнаруживать полезные сигналы ниже уровня спектральной мощности тепловых шумов. Применение спектральных методов обработки сигналов становится возможным при использовании в качестве сенсора СВЧ радара. Задача такого применения СВЧ сенсора неоднократно ставилась перед разработчиками во второй половине прошлого века.

В начале этих исследований в открытой литературе появилось много патентов, описывающих возможности реализации СВЧ сенсоров, заменяющих контактные «акустоэмиссионные», однако практическая проверка не подтвердила надежды. На практике, полезный сигнал, соответствующий началу разрушения металлов, на выходе радаров Доплера разных частот (от 10 до 40 ГГц) был ниже уровня шума даже для температур близких к абсолютному нулю. Однако публикация статей о возможности использования сенсоров на основе радара продолжалась. Примером может быть публикации американского исследователя Грегори Смита [97], который предлагает реализацию своего изобретения, повторяющее российское авторское свидетельство, опубликованное на двадцать лет раньше [76].

В результате таких исследований было разработано много приборов, определяющих параметры металла через измерение коэффициента отражения при сканировании поверхностей [31-35], но зарегистрировать слабые колебания металлической поверхности при ультразвуковом воздействии или от сигналов акустической эмиссии, не удавалось. Практические исследования показали, что минимальный уровень

регистрируемой микроволновыми сенсорами вибраций поверхности значительно, на 2-3 порядка больше уровня, измеренного контактным методом АЭ (0,5-5 нанометров) [1-3,24].

## 1.2 Определение опасных дефектов металлов методом акустической эмиссии

Одновременно с исследованиями по применению СВЧ сенсоров развивалось направление, связанное с повышением чувствительности контактных сенсоров.

**Точность определения размеров дефекта** с помощью ультразвука существенно зависит частоты ультразвука, размеры дефекта меньше  $1/20$  длины волны практически не определяются. При размерах дефектов менее 1 микрона ультразвуковые методы практически не используются из-за возрастания потерь в металле с увеличением частоты ультразвука выше 20 МГц.

Наряду с хорошо известными методами, основанными на «просвечивании» ультразвуком, появился метод «прослушивания» объектов во время постепенного увеличения механической нагрузки на объекты исследований. Метод, названный «акустической эмиссией» (АЭ), имеющий значительные преимущества.

Метод появился в результате изучения явления, называемого «криком олова» [52], характерного для начала разрушения при пластической деформации. Акустическая эмиссия отличается от метода ультразвуковой дефектоскопии [55,56] применением дополнительных механических нагрузок. Именно во время этих нагрузок происходит первоначальное изменение структуры кристаллической решетки металла вплоть до разрушения ослабленных зон (зон повышенной концентрации дислокаций). В результате акустического возбуждения появляются упругие колебания кристаллической структуры мощностью от нескольких десятков электрон-вольт до единиц джоуля [1-3,24,91]. Время существования отдельных

акустических импульсов составляет от 10 нс до 100 мкс, время появления импульсов является случайным. Для регистрации сигналов о наличии дефектов применяются пьезоэлектрические сенсоры высокой чувствительности (свыше 30кВ/мм).

Акустическая эмиссия проявляется при упругой и пластической деформации твердых материалов, возникновении и развитии в них дефектов, например: образование трещин, фазовых превращений, связанные с изменением кристаллической решетки. Физическим механизмом, объясняющим ряд особенностей акустической эмиссии, является движение в веществе дислокаций и их скоплений [61-65,]. Дислокационные процессы, связанные с отрывом дислокаций от точек закрепления, торможением их у препятствий, возникновением и уничтожением отдельных дислокаций, имеют прерывистый и существенно неравномерный, характер.

В качестве источника акустической эмиссии можно рассматривать расположенный в глубине образца твердого тела элемент объема, испытывающий изменение напряженного состояния (стадия упругого взаимодействия) и пластической деформации. Сигналы акустической эмиссии проявляются в виде колебаний поверхности образца и (упругие деформации), величиной от  $10^{-9}$ -  $10^{-3}$  мм. Иногда эти сигналы достаточно сильны и могут восприниматься на слух («крик олова») [66]. Распространяясь от источника к поверхности образца, сигнал АЭ претерпевает существенное искажения вследствие дисперсии скорости, трансформации типа и формы волны, затухания звука. Если время затухания сигнала и время переходных процессов в образце меньше промежутка времени между излучаемыми импульсами, эмиссия воспринимается в виде последовательности импульсов и называется дискретной или импульсной. Если же интервал между отдельными актами излучения меньше времени затухания, эмиссия имеет характер непрерывного нестационарного излучения и называется непрерывной. Дискретная эмиссия имеет место,

например, при образовании трещин. Частотный спектр акустических эмиссий весьма широк – от области звуковых частот до десятков и сотен МГц [67].

Основными параметрами акустической эмиссии являются [67]:

- число импульсов дискретной эмиссии за исследуемый промежуток времени;
- число превышений сигналом эмиссии установленного уровня за исследуемый промежуток времени (суммарная или интегральная эмиссия);
- интенсивность эмиссии – число превышений сигналом эмиссии установленного уровня в единицу времени  $N$ ;
- амплитуда эмиссии – максимальное значение сигнала эмиссии (обычно с помощью пьезоэлектрических сенсоров) в течение заданного промежутка времени;
- уровень сигналов эмиссии – среднее квадратичное значение амплитуды сигнала за рассматриваемый промежуток времени

Метод АЭ определяет опасные дефекты с высокой надежностью, обусловленной принципом регистрации разрушающегося материала. Из-за надежности метод АЭ является одним из основных методов определения наличия или отсутствия дефектов в оборудовании атомных электростанций [6], опасных дефектов емкостей газовых и нефтяных хранилищ, железнодорожных мостов, взлетных полос аэродромов. Такие протяженные объекты не могут быть исследованы ультразвуковым, магнитоэлектрическим или рентгеновским методом. Места опасных дефектов, найденные с помощью АЭ, могут уточняться другими методами.

Кроме того существует и более совершенный метод – просвечивание металлов с помощью рентгенографии. Однако и он при всех своих преимуществах имеет недостатки. Метод практически не применяется для микротрещин размерами меньше единиц нанометра, при таких размерах происходит «залечивание» микротрещин высокоэнергетическим гамма

излучением [68]. Кроме того, рентгенография сложный и дорогостоящий процесс, используемый в исключительных случаях.

### **1.3 Аппаратура, используемая при диагностике методом акустической эмиссии**

Практическое измерение параметров АЭ проводят с помощью контактных сенсоров. К типовому оборудованию, используемому при акустико-эмиссионном контроле относятся [67]:

- преобразователи АЭ с материалами для обеспечения акустической связи с объектом контроля;
- имитаторы сигналов АЭ;
- электронные блоки, предназначенные для усиления и обработки сигналов АЭ;
- вычислительные средства для обработки и представления результатов контроля, включая программное обеспечение;
- средства, обеспечивающие механическую нагрузку контролируемого объекта.

#### **1.3.1 Преобразователи акустической эмиссии**

Чаще всего для преобразования механического колебания в электрический сигнал применяются пьезоэлектрики чувствительностью 30-36 КВ/мм. Преобразователи АЭ определяют чувствительность аппаратуры контроля и рабочий частотный диапазон. Рабочая частота выбирается из условий превышения уровня шумов и величины затухания ультразвука в объектах, имеющих различные размеры. Для контроля сосудов, котлов и аппаратов рекомендуется использовать диапазон 100-500 кГц. При контроле технологических трубопроводов обычно используется более низкий диапазон частот, 20-60 кГц.

При выборе частоты работы преобразователя необходимо учитывать, что при контроле объектов на более низких частотах наблюдается высокий уровень посторонних механических шумов, а в диапазоне свыше 500 кГц сказывается большое затухание ультразвуковых волн в конструкции. При работе необходимо принимать меры по помехозащищенности преобразователей АЭ и размещать предусилитель непосредственно в его корпусе.

При установке преобразователя АЭ на объект контроля акустическая контактная среда должна обеспечивать эффективную акустическую связь преобразователя АЭ с объектом. Уменьшение амплитуды сигнала при его прохождении из объекта в преобразователь АЭ не должно превышать 6-12 дБ, что достигается использованием иммерсионной смазки между поверхностями металла и преобразователя. В качестве смазки используются вода, эпоксидная смола без отвердителя, машинное масло, глицерин и другие жидкие среды. Поверхность объекта контроля в месте установки преобразователя АЭ необходимо зачищать до чистоты не хуже R<sub>z</sub>40.

Этот перечень необходимых условий для контактных пьезопреобразователей дает некоторое представление о сложности подготовительных операций при использовании методов АЭ.

### **1.3.2 Имитаторы сигналов акустической эмиссии**

После проведения подготовительных операций необходимо провести предварительную проверку качества их выполнения и работоспособность аппаратуры. В качестве имитатора сигналов АЭ обычно используется пьезоэлектрический преобразователь, возбуждаемый электрическими импульсами. Частотный диапазон имитационного импульса должен соответствовать частотному диапазону системы контроля.

Типовые параметры имитатора:

- частота следования импульсов - 1-1000 Гц;

- амплитуда генерируемых импульсов должна обеспечивать изменение амплитуды на выходе преобразователей системы контроля 10-30 мВ;
- длительность возбуждающего электрического импульса не должна превышать 0,1-0,2 мкс.

### 1.3.3 Электронные блоки

Служат для выделения сигналов, близких по параметрам к сигналам акустической эмиссии. Содержат усилители с малым уровнем шума (2-5 дБ), высокодобротные фильтры на основе *LC* компонент или пьезоэлектрические фильтры на Поверхностных Акустических Волнах (ПАВ).

Современные электронные блоки содержат логарифмические усилители, расширяющие динамический диапазон регистрируемых входных сигналов (до 60-80 дБ) и аналого-цифровые преобразователи с разрядностью не менее 10. Такие блоки вместе с встроенными имитаторами и программным обеспечением выполняют первичную проверку работоспособности, повышают точность обнаружения, учитывают неоднородность среды по изменению скорости акустических сигналов.

### 1.3.4 Достоинства и недостатки метода акустической эмиссии

Акустическая эмиссия показала свои преимущества по надежности определения опасных дефектов (вероятность обнаружения 90-98%) относительно ультразвуковых (вероятность обнаружения 50-60%) и рентгеновских методов (вероятность обнаружения 70-80%) . Современная аппаратура, предназначенная для исследований методом АЭ, позволяет выявлять более 90% дефектов, поэтому широко используется при определении качества сварных швов трубопроводов для атомной энергетики [57].

Большим недостатком метода является необходимость обеспечения значительной механической нагрузки объекта исследования. В зависимости

от размеров исследуемой конструкции, величина силовой нагрузки может превышать десятки тонн, для чего используются специальное оборудование. Степень акустической активности испытываемого объекта повышается с увеличением нагрузки, как указывалось выше, вводятся понятия «активный дефект», «дефект повышенной активности», «катастрофический дефект». В процессе исследования величина нагрузки (давление, температура, число изгибов) постепенно увеличивается до появления сигналов повышенной акустической активности. Аппаратура АЭ следит за уровнем активности и при превышении заданных пределов выдает сигнал о прекращении испытаний, после которого нагрузка снимается (давление сбрасывается, нагревание прекращается, производится охлаждение, прекращается процесс изгиба).

Время проведения одного испытания с увеличением нагрузки может составлять от нескольких десятков минут до нескольких часов, что препятствует быстрому проведению проверки и является недостатком метода.

Перед проведением испытаний проводится предварительный расчет по размещению и распределению чувствительных сенсоров на поверхности испытываемого объекта. Для сигналов АЭ с характерным диапазоном частот 200-300 кГц, из-за большого затухания таких сигналов в металле (20-30 дБ/м), требуется установка сенсоров не реже чем через 4-6 метров. Приборы для контроля АЭ могут содержать несколько десятков контактных сенсоров со встроенными преобразователями, ячейками радиосвязи, как между основными узлами приборов, так и между собой [45]. При использовании проводной связи с контактными датчиками общая длина передающих проводов может превысить километр. Большое количество датчиков повышает точность, но усложняет расчет локализации места дефекта.

Динамический диапазон большинства чувствительных сенсоров не превышает 45-50 дБ, тогда как динамический диапазон измеряемых сигналов

при катастрофической активности может быть 90-120 дБ, в результате чего высокочувствительные сенсоры выходят из строя.

Большие проблемы возникают при испытаниях АЭ объектов в условиях отрицательных температур окружающей среды.

Диагностика движущихся объектов для регистрации сигналов АЭ происходит на фоне посторонних шумов, рождаемых движением, что значительно уменьшает чувствительность метода и делает сложным и ненадежным обнаружение начальной стадии разрушения. При движении объекта наблюдения для передачи сигнала от контактного сенсора на неподвижный регистрирующий комплекс обходима сложная радиоаппаратура.

Контактные сенсоры из пьезокерамики невозможно использовать при температуре поверхности исследуемого объекта выше точки Кюри ( $300^{\circ}$ - $500^{\circ}$ С).

Наличие приведенных недостатков, а также необходимость определения дефектов от движущихся объектов, объектов с термозащитой требовали доработки метода АЭ.

Было известно, что метод АЭ требует для своей реализации в качестве имитационных сигналов применения ультразвука. Но исследователи не пытались объединить пассивный метод ультразвуковой диагностики или метода АЭ с методом активной локации. Считалось, что они имеют свои преимущества и не могут быть объединены.

Проведенные исследования показали, что применение СВЧ сенсора для регистрации слабых поверхностных колебаний металлов, возникающих при дополнительном воздействии на область внутреннего дефекта ультразвуком, позволяет обнаруживать и регистрировать начальные стадии разрушения. Обнаруженный эффект был исследован автором и защищен патентом №2372615 на «Способ регистрации сигналов акустической эмиссии» (приложение А). Объединение ультразвукового и СВЧ колебания позволило значительно повысить чувствительности дефектоскопов на

практике и уверенно обнаруживать начальные стадии возникновения дефектов.

#### 1.4 Направления исследований по доработке метода акустической эмиссии

Природа регистрации случайных сигналов АЭ не позволяет использовать накопления полезного сигнала, что ограничивает чувствительность метода АЭ и его применение для обнаружения начальной стадии разрушения.

Частично проблема повышения чувствительности решается при использовании так называемой «безпороговой» регистрации сигналов акустической эмиссии, в которой вместе с амплитудными используются спектральные методы [69,70]. Применение спектральных методов позволяет выбрать для анализа частоты, характерные для процесса АЭ. При этом возникает возможность фильтрации спектра принимаемых сигналов, выделение полезных спектральных составляющих, что позволяет повысить чувствительность датчиков.

Применение спектральных методов обработки сигналов становится возможным при использовании СВЧ сенсора. Кроме того, становится возможным использование накопления полезного сигнала в течение значительного времени регистрации, что позволяет обнаруживать полезные сигналы ниже уровня спектральной мощности шума. В связи с очевидными преимуществами СВЧ излучения, задача о его применении неоднократно ставилась перед разработчиками во второй половине прошлого века. Как указывалось выше, результаты практических попыток обнаружения вибраций упругих деформаций металлической поверхности с амплитудой в несколько нанометров СВЧ сенсорами разных частот, от 10 до 300 ГГц, даже при низкой температуре (2-3 градуса Кельвина), заканчивались неудачами. Полезный сигнал, возникающий на стадии разрушения металла, оказывался ниже уровня шумов.

Рассмотрим, при условиях возможна регистрация сигнала СВЧ сенсором при деформациях в металлах.

### **1.5 Исследование процесса взаимодействия упругих колебаний с внутренними дефектами в металле**

Многочисленные научные исследования убедительно доказали факт взаимодействия электронов проводимости с различными внешними воздействиями (температурой, механическими деформациями, магнитным полем и т.д.). Такое взаимодействие приводит к изменению поверхностной проводимости металла.

Первой теоретической работой, позволяющей связать механические ультразвуковые колебания внутри металла с поверхностной проводимостью, является работа Б.В. Васильева и В.Л. Любошица [25] по определению аномального взаимодействия ультразвука с «электронным газом».

Проведенные в известной работе Ю.В. Гуляева, В.П. Плесского [71] теоретические расчеты колебаний проводимости металлической поверхности под действием ультразвука подтверждаются экспериментальными результатами. В данной работе измерение механических колебаний поверхности выполнялось с использованием чувствительных контактных сенсоров. В работе исследовались изотропные материалы и не учитывалось влияние электронного газа на упругие волны плотности металла.

Измеренная практически с помощью контактных датчиков амплитуда колебаний поверхности под действием акустических сигналов составила 0,1-25 нанометров, это значение амплитуды колебаний поверхности взято в качестве минимальной, необходимой для регистрации с помощью СВЧ датчика и используется в дальнейших расчетах.

Попытки исследователей в нашей стране и за рубежом определить условия измерения поверхностной проводимости металла, возбуждаемого ультразвуком, с помощью СВЧ полей при разных углах падения и отражения, на разных частотах изменения, оканчивались неудачами.

Уровень полезного сигнала на выходе СВЧ сенсора был ниже уровня тепловых шумов.

Регистрация малых амплитуд упругих колебаний поверхности СВЧ сенсорами стала возможной при учете особенностям взаимодействия ультразвука с «электронным газом» в области дефекта и генерации этими зонами акустической активности электрических зарядов. В данной работе эти зоны называются динамическими дефектами, поскольку обнаруживаются только при воздействии ультразвука. Способность динамических дефектов генерировать электрическое поле под действием давления упругих волн ультразвука малой мощности была впервые обнаружена группой профессора ТПУ В.И. Горбунова в 1995 году, результаты исследований опубликованы автором в открытой печати [27]. Теоретическое обоснование возможности изменения компенсирующих поверхностных зарядов под действием механических напряжений в металлах впервые было выдвинуто в 1994 году.

Для объяснения этого эффекта была высказана следующая гипотеза. Поскольку число заряженных частиц (электронов) на поверхности металла ограничено и равно числу атомов кристаллической решетки, относящихся к поверхности, появление дополнительных заряженных частиц приводит к изменению поверхностной плотности зарядов (проводимости). Доказано, что скорость движения волны поверхностной проводимости равна скорости распространения электрического поля в электронном газе [25,72], эта скорость на 4-5 порядков выше скорости упругой волны в кристаллической решетке. В результате момент разрушения кристаллической решетки металла, сопровождающийся изменением поверхностной проводимости, практически «мгновенно» можно обнаружить дистанционно, с помощью СВЧ поля. Скорость изменения поверхностной проводимости можно, по аналогии, сравнить со скоростью электрического тока. Раньше, чем упругие колебания достигнут поверхности, изменения проводимости будут обнаружены СВЧ сенсорами. Такое интерпретирование особенности рождения поверхностной проводимости, благодаря взаимодействию упругой

волны с электронами проводимости, позволяет утверждать, что изменение поверхностной проводимости позволяет не только обнаруживать дефект, но и указать место его существования, размеры. Результаты опубликованы автором в открытой печати [73].

Практическое подтверждение теории было получено нами в институте Интроскопии Томского Политехнического университета и опубликовано авторами в открытой печати [74-76].

Исследования в области практического применения обнаруженного эффекта проводились в ТИАСУРе совместно с институтом Физики Прочности и Материаловедения СО РАН г. Томска.

## **1.6 Выбор направления исследования**

На основе проведенного обзора было выбрано направление исследований, позволяющее достичь поставленной цели диссертационного исследования – практической реализации максимально возможной чувствительности СВЧ сенсора сигнала, позволяющей обнаруживать начальные стадии разрушения металлов.

Для этого:

- в качестве источника информации о наличии дефекта используется изменение поверхностной проводимости металла, возникающее в результате взаимодействия ультразвука с областью дефекта;
- для регистрации изменения поверхностной проводимости было выбрано СВЧ зондирование;
- для анализа отраженных СВЧ сигналов используется спектральный метод;
- для повышения чувствительности применить накопление повторяющегося полезного сигнала от области дефекта.

В результате дальнейших исследований было подтверждена правильность выбранного направления, позволившего значительного, на порядок, увеличить чувствительности СВЧ сенсора. Выполненными

расчетами доказана необходимость использования фазового метода регистрации отраженного от образца сигнала, показана причина малой чувствительности амплитудного метода регистрации.

## **ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ С ПОМОЩЬЮ СВЧ ЗОНДИРОВАНИЯ**

### **2.1 Расчет спектра отраженного фазомодулированного сигнала через функции Бесселя**

Анализ результатов исследований, изложенных в первой главе, показывает, что изменение поверхностной проводимости металла, возникающее в результате взаимодействия ультразвука с областью дефекта, определяются частотой и мощностью ультразвука. Из работ [77-80] следует, что колебания электронов на поверхности металла (изменение поверхностной проводимости), «электронный газ», жестко связаны с колебаниями кристаллической решетки металла, которые вызывают упругие волны ультразвука «увлекая за собой электроны проводимости».

В результате взаимодействия колебаний поверхности металла с СВЧ колебаниями, отраженный от поверхности металла СВЧ сигнал будет модулирован ультразвуковыми частотами.

Определим связь между амплитудой колебаний поверхности и уровнем модуляции СВЧ колебаний.

Теоретический расчет возможности определения указанной выше амплитуды металлической поверхности, необходимой для регистрации дефектов величиной 0,1-25 нанометров [65,67], можно выполнить с использованием разложения в ряд фазомодулированных колебаний. Это разложение, известное как «цилиндрические функции Бесселя первого рода», представляет собой спектр колебаний несущей частоты  $\omega_0$ , модулируемой по фазе другой частотой  $\Omega$  [81].

Спектр фазомодулированного колебания, даже при модуляции гармоническим сигналом, состоит из бесконечного числа боковых составляющих, симметрично отстоящих от частоты несущей  $\omega_0$  на величины, кратные частоте модуляции  $\Omega$ . Амплитуды боковых составляющих  $A_n$  выражаются через функции Бесселя  $J_n$  первого рода  $n$  – го порядка [81]:

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

где  $A_0$  – амплитуда немодулированного колебания,  $\beta$  - индекс угловой модуляции (коэффициент фазовой модуляции), которым задается интенсивность колебаний начальной фазы. Коэффициент фазовой модуляции может измеряться в дБ относительно своего минимального значения .

Следовательно, сигнал при ФМ занимает бесконечную полосу частот. Большая часть энергии спектра фазомодулированного колебания сосредоточена в ограниченной полосе частот. При малых индексах модуляции  $\beta$ , т.е при выполнении условия

$$d\varphi_{\Omega}/d\varphi_{\omega_0} = \beta \ll 1$$

основная энергия спектра сосредоточена в полосе частот  $2\Omega_B$ , где  $\Omega_B$  – наивысшая частота спектра модулирующей функции. Начальная фаза колебаний:

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

где  $\Omega$ - частота модуляции, равная частоте упругих колебаний поверхности. В [82,70] отмечается, что при фазовой модуляции индекс модуляции пропорционален амплитуде низкочастотного сигнала и не зависит от частоты модуляции.

Отметим, что 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).

Из выражения (2.2) следует, что индекс угловой (фазовой) модуляции  $\beta$  обратно пропорционален длине волны СВЧ колебаний и прямо пропорционален амплитуде механических колебаний  $a_{\max}$ , следовательно  $a_{\max}$  прямо пропорциональна фазовому сдвигу  $X$ .

Математическая модель однотоновых ФМ сигналов с любым значением индекса модуляции  $\beta$  получается разложением функции (2.1) в следующий ряд:

$$u(t) = U_{\beta} \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(\beta) \cos(\omega_0 + k\Omega) \quad (2.3)$$

где  $J_k(\beta)$  – функция Бесселя  $k$ -го индекса от аргумента  $\beta$ .

Из этого уравнения следует, что спектр сигнала содержит бесконечное число составляющих – нижних и верхних боковых колебаний, с частотами  $\omega_0 \pm k\Omega$ , которые соответствуют гармоникам частоты модуляции, с амплитудами, пропорциональными значениям  $J_k(\beta)$ . Формулу (2.2) для однотоновой модуляции можно преобразовать к виду [81]:

$$u(t) = U_{\beta} \cos(\beta \sin(\Omega t)) \cos(\omega_0 t) - U_{\beta} \sin(\beta \sin(\Omega t)) \sin(\omega_0 t) \quad (2.4)$$

При малой величине индекса  $\beta$ :

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

При подстановке в (2.4), получаем, что основное значения функции определяется первыми гармониками:

$$u(t) = U_{\beta} \cos(\omega_0 t) + (\beta U_{\beta} / 2) \cos((\omega_0 + \Omega)t) - (\beta U_{\beta} / 2) \cos((\omega_0 - \Omega)t) \quad (2.5)$$

Отметим, что амплитуда несущей  $U_{\beta}$  при  $\beta \ll 1$  значительно больше амплитуды боковых составляющих  $\beta U_{\beta} / 2$ . Расчетное отношение амплитуды несущей к амплитуде боковых составляющих:

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

Результаты расчетов для разных частот СВЧ колебаний при заданной амплитуде колебаний поверхности  $a_{max}$  приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1. Расчетные значения отношение амплитуды несущей к амплитуде боковых составляющих.

$F, ГГц$	10	33	100
$\lambda/4$ (микрон)	7,50E+03	2,27E+03	7,50E+02
$a_{max}$ (микрон)	0,005	0,005	0,005
$\beta$	6,67E-05	2,20E-04	6,67E-04
$20\lg 2/\beta$ дБ	-89	-79	-69

Из таблицы следует, что для обнаружения колебаний металлической поверхности 5 нм амплитуда СВЧ несущей частотой 10-100 ГГц должна превышать амплитуду боковых составляющих на 69-89 дБ.

Обнаружение приведенных выше значений колебаний металлической поверхности возможно при условии, что мощность принимаемых сигналов превышает спектральный шум не менее чем на 3дБ. Из выполнения этого условия можно определить необходимую мощность СВЧ колебания.

## 2.2 Расчет необходимой мощности СВЧ излучателя

Уровень шума связан с рабочей полосой и температурой формулой Найквиста [83]:

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

где  $k$  – постоянная Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К),  $\Delta f$  – полоса рабочих частот,  $T$  – температура металла в градусах Кельвина.

Для рассматриваемого диапазона частот,  $f < 100$  ГГц, плотность мощности на градус Кельвина составляет

$$P(\Delta\omega, T) = -174 \text{ дБ/Вт(1/Герц)},$$

В частотном диапазоне до 100 ГГц ошибка расчета по этой формуле не превышает 0,1-0,3 дБ.

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

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

С учетом шума приемного устройства (3дБ), для обнаружения сигнала на фоне такого шума минимальная мощность боковой составляющей фазомодулированного сигнала должна быть более минус 141 дБ/мВт.

Из результатов таблицы 2.1 следует, что на частоте СВЧ 10 ГГц невозможно обнаружение колебания металлической поверхности в 5 нм при температуре 300 градусов Кельвина, даже при идеальном приемнике с полосой регистрации в 1 Гц. Мощность несущей должна быть повышена до значения минимум 9дБ /мВт для частоты 10ГГц.

На частоте 100 ГГц при регистрации колебаний амплитудой 5 мкм мощностью СВЧ излучения в 1 мВт имеется запас в 11 дБ, что позволяет снизить мощность излучателя или расширить полосу регистрации.

Определим, какие размеры механических колебаний можно обнаружить, в соответствии с (2.2), при различных уровнях и частотах СВЧ колебания. Учтем, что входная мощность современного анализатора спектра  $P_{\text{max}}$  с минимальным уровнем коэффициента шума составляет 1 – 2 мВт:

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

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

График зависимости  $P_{\text{max}} = F(a_{\text{max}}, f)$  где  $a_{\text{max}}$  – амплитуда колебаний металлического отражателя (0,5-25  $10^{-6}$  мм),  $f$  – частота падающего СВЧ колебания (10 – 100 ГГц), приведен на рисунке 2.1.

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 10дБ/мВт

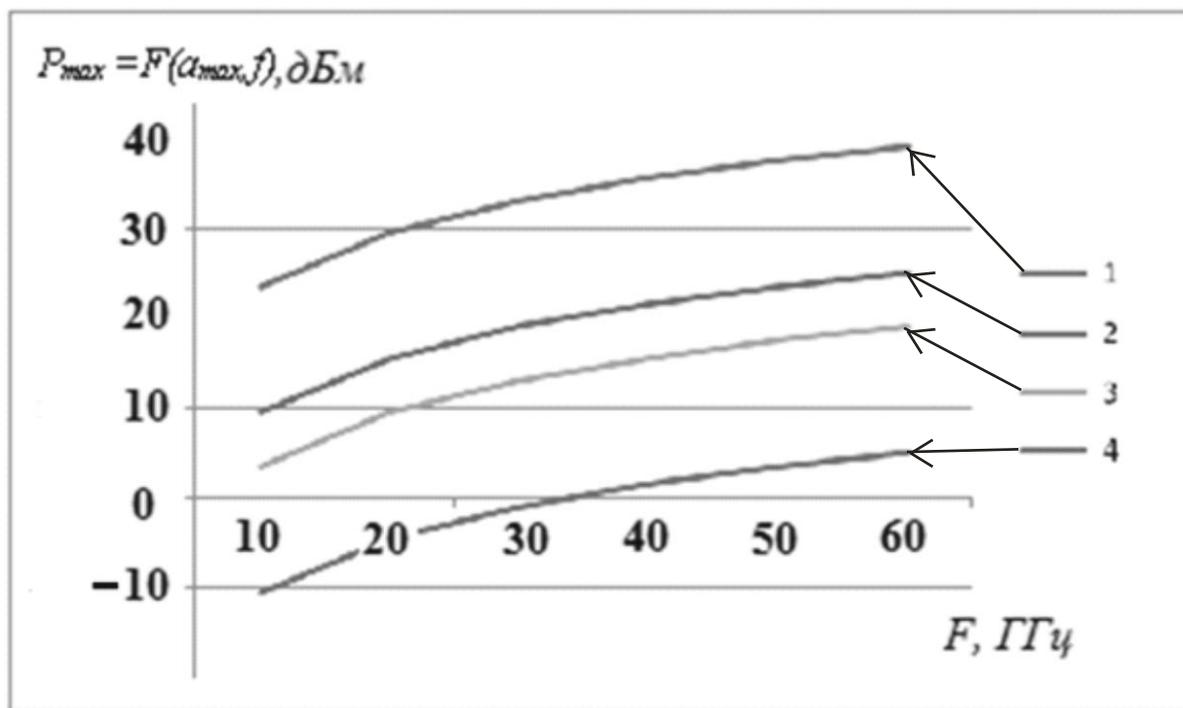


Рисунок 2.1. График зависимости  $P_{max} = F(a_{max}, f)$  от частоты, 1 –  $a_{max}=0,1$  нм; 2 –  $a_{max}=0,5$  нм; 3 –  $a_{max}=1,0$  нм; 4 –  $a_{max}=5$  нм.

Подчеркнем, что выполненные расчеты, опубликованные автором в открытой печати [38,39,42] **проведены для фазомодулированных колебаний.**

При экспериментальных исследованиях с помощью современных анализаторов спектра [84] на множестве образцов, возбуждаемых большей ультразвуковой мощностью (измеренная амплитуда акустических колебаний 20-30 нм) не удалось зарегистрировать полезный СВЧ сигнал. Это заставило множество исследователей, занимавшихся экспериментами по регистрации колебаний металлической поверхности СВЧ сенсором путем использования амплитудных методов обработки сигналов, отказаться от дальнейших работ [9,18,21]. Было принято считать, что СВЧ сенсор может регистрировать вибрации металлической поверхности величиной не менее 1 микрона, что на

2-3 порядка больше, чем необходимо для регистрации колебаний, вызванных сигналами акустической эмиссии [22,23].

### 2.3 Расчет изменений поверхностной электрической проводимости

Для выяснения причин малой чувствительности амплитудного метода при регистрации колебаний металлической поверхности проведем 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. Электромагнитное поле проникает в глубину металла незначительно, много меньше длины возбуждающей электромагнитной волны, вследствие высокой электрической проводимости металла. Электропроводность металлов показана в таблице 2.2

Таблица 2.2. Электропроводность металлов.

Металл	Проводимость $\sigma$ , См/м
Ag	$6255 \cdot 10^5$
Cu	$5815 \cdot 10^5$
Al	$3705 \cdot 10^5$
Ni	$1155 \cdot 10^5$
Fe	$103 \cdot 10^5$
Сталь	$30 \cdot 10^5 - 80 \cdot 10^5$

Приведем цитату из [85]:

*«Электропроводность обусловлена присутствием свободных носителей заряда в твёрдом теле, направленное движение которых и есть электрический ток».*

Электромагнитное поле, распространяясь в металле, проникает на глубину, которая зависит от частоты и поверхностной проводимости.

Амплитуда электрической составляющей уменьшается с увеличением глубины, вводится понятие «толщины скин-слоя»  $\delta_0$ , на которой амплитуда уменьшается в  $e$  раз (на 8,62дБ):

$$\delta_0 = \frac{c}{\sqrt{2\pi\omega\sigma}}.$$

Так для стали с электропроводностью  $\sigma = 72 \cdot 10^5 \text{ СМ/м}$  на частоте 1ГГц  $\delta_0 = 4,460 \cdot \text{микрона}$ .

Очевидно, что при такой глубине большое значение имеет состояние самой поверхности.

Поверхность, обработанная по 13-14 классу чистоты (неровности 340 нм) можно считать практически идеальной. Обработанная по 4-5 классу чистоты (неровности 10-15 мкм) поверхность отражает СВЧ поле частотой выше 10 ГГц с активными потерями, хотя способность отражать СВЧ поле сохраняется при весьма грубой обработке, наличии окалины, краски, масла, грязи. В общем случае от такой металлической поверхности способно отражаться более 95-98% энергии СВЧ поля.

Комплексная диэлектрическая проницаемость металла определяется соотношением

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

где  $\varepsilon(\omega, \sigma)$  – комплексная диэлектрическая проницаемость,  $\omega$  – круговая частота (рад/с).  $\varepsilon_L$  – действительная часть диэлектрической проницаемости,  $\sigma$  – электропроводность металла,  $\omega$  – круговая частота.

Например, расчет диэлектрической проницаемости золота по модели Друде

$$\varepsilon = 1 - \frac{\sigma_0}{(\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \tau)}$$

дает значение [103]:  $\varepsilon \approx -101641 + j284090$ .

Поверхностный импеданс  $Z$  связан с коэффициентом отражения  $\rho$  следующим выражением [89,90]:

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

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

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

Определим функциональную зависимость коэффициента отражения от проводимости.

$$\rho = \frac{\sqrt{\varepsilon(\omega, \sigma)} - 1}{\sqrt{\varepsilon(\omega, \sigma)} + 1}$$

Обозначим

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

$$2B = \varphi(\varepsilon) = \arctan\left(\frac{2\sigma}{\varepsilon_l f}\right)$$

тогда 
$$\rho = \frac{\left(\cos B - \frac{1}{\sqrt{A}}\right) + j \sin B}{\left(\cos B + \frac{1}{\sqrt{A}}\right) + j \sin B}.$$

Зависимость фазы коэффициента отражения:

$$\varphi(\rho) = \arctan\left(\frac{\sin B}{\cos B - 1/\sqrt{A}}\right) - \arctan\left(\frac{\sin B}{\cos B + 1/\sqrt{A}}\right) \quad (2.11)$$

Модуль  $\rho$  в квадрате можно записать

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

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

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

Производная по модулю

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

где  $x = \frac{2\sigma}{f}$ .

При значениях проводимости  $\sigma=(10^{18}\div 10^{19})1/c$  и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon=10^5$ , производная  $\frac{d\rho}{dx}$  всегда **больше нуля**.

Производная по фазе

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

для тех же значений  $\sigma$  и  $\varepsilon$  всегда **меньше нуля**.

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

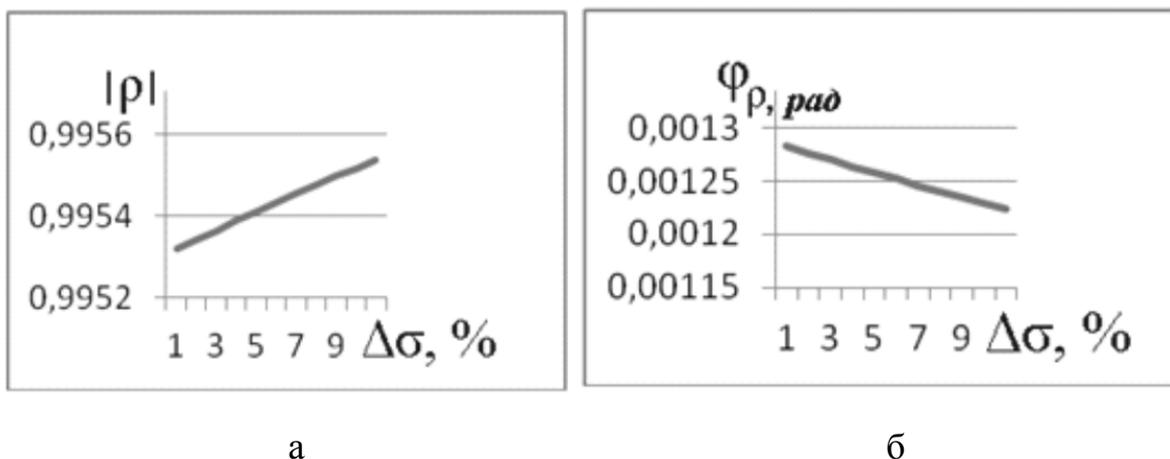


Рисунок 2.2. Зависимость модуля (а) и фазы (б) коэффициента отражения от изменения проводимости

Из полученных зависимостей можно сделать следующие выводы:

- производная по фазе  $d\varphi/d\sigma$  имеет отрицательное значение, увеличение проводимости приводит к снижению фазы коэффициента отражения.

- В результате изменений проводимости и плотности поверхности металлов модуль коэффициента отражения изменяется незначительно

**Общий вывод:** изменение проводимости поверхности  $\sigma$  приводит к изменению фазы коэффициента отражения на порядки больше, чем изменение модуля коэффициента отражения.

Физически объяснить полученный результат можно следующим. Известно, что плотность электронов проводимости металла прямо пропорциональна плотности самого металла [85]. Плотность кристаллической решетки уменьшается в максимуме и повышается в минимуме поперечной волны поверхностной упругой деформации. В свою очередь, снижение плотности кристаллической решетки ведет к снижению плотности «электронного газа», снижению «поверхностной» проводимости. В результате фазовый сдвиг отраженной волны из-за механического колебания поверхности оказываются в противофазе с фазовым сдвигом от переменной проводимости поверхности и колебаний «электронного газа». Происходит компенсация положительной и отрицательной фазовых составляющих СВЧ сигнала, поэтому невозможно наблюдать модуляцию фазы отраженного СВЧ сигнала для малых значениях амплитуды образующей поверхности металла (меньше 0,5-1 микрона).

**Пример.** Из рисунка 2.2: при частоте 33 ГГц и изменении проводимости от  $2,34 \cdot 10^{11}$  до  $2 \cdot 10^{11}$  (на 17%), происходит изменение фазы  $d\varphi = 7,7\%$ .

С учетом линейности характеристики  $d\varphi/d\sigma$  определим величину уровня боковой составляющей при изменении проводимости на 0,07%, т.е. в сто раз меньшей.

Индекс модуляции фазомодулированного сигнала:

$$\beta = 4d\varphi/\pi.$$

При  $d\varphi = 9,63 \cdot 10^{-4}$  (рад), индекс угловой модуляции  $\beta = 12,26 \cdot 10^{-4}$ , и, соответственно, уровень боковой составляющей равен  $20 \cdot \lg(2/\beta) = 64,25$  дБ, при уровне несущей 1 мВт он равен минус 64 дБ/мВт. Следовательно, с учетом (2.7), уровень боковой составляющей будет превышать уровень шумов на  $141 - 64,25 = 76,75$  дБ

На выходе приемника (анализатора спектра), имеющего коэффициент шума 10 дБ и полосу приема 3 кГц будет наблюдаться превышение сигнала над шумом 31-32 дБ.

Результаты выполненных исследований опубликованы автором в открытой печати [87].

Как показано в дальнейших исследованиях, отклонение между расчетными и экспериментальными результатами не превышают 3 дБ.

Плотность кристаллической решетки изменяется в результате упругой механической деформации при дефекте в металле, что позволяет при соответствующей мощности ультразвуковых и СВЧ колебаний обнаруживать начальную стадию разрушения металлов.

## 2.4 Расчет объема обнаруживаемого дефекта

Теоретические исследования по расчету чувствительности метода акустической эмиссии проводились Исаковым В.А. в работе [86]. Было показано, что нарастание акустического сигнала в «активной» среде требует слишком высокой концентрации точек «активности». Такая концентрация означает разрушение самого металла или превращение его в структуру типа полупроводника. Без учета появления электрического заряда в «необычной области» не удалось подтвердить нарастание акустической активности за счет дополнительного ультразвукового сигнала.

Не вдаваясь подробно в физические процессы преобразования ультразвукового воздействия на зону дефекта в электрические процессы в металле, можно качественно оценить связь размеров дефекта с изменением поверхностной проводимости исследуемого образца.

Пусть объем области дефекта металла  $V$  представляет собой куб с гранью  $m$ , где  $m$  – число межатомных расстояний, (одновременно единица измерения) рисунок 2.3. При отсутствии внешних полей изменение количества имеющихся на поверхности электронов проводимости пропорционально количеству генерируемых ультразвуком дополнительных электронов проводимости, находящихся внутри дефекта.

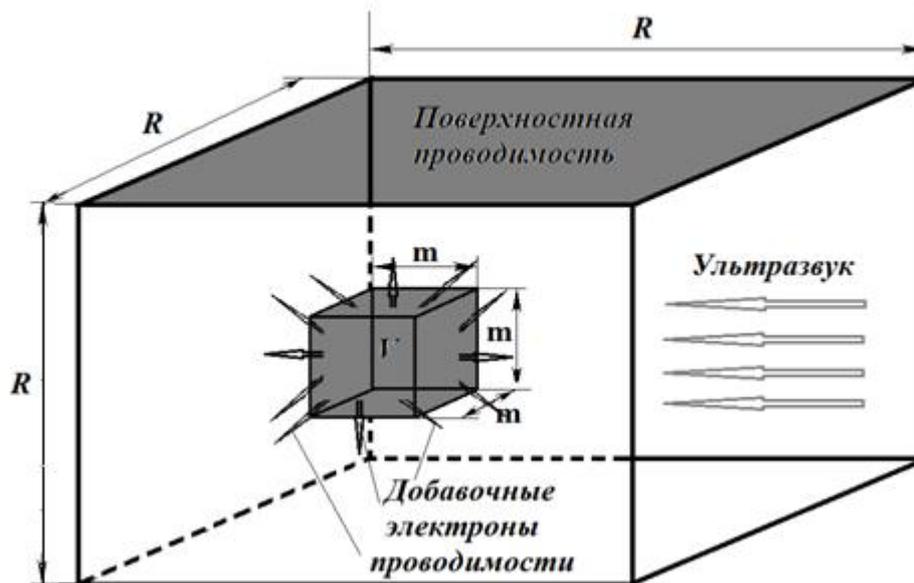


Рисунок 2.3. Образец с областью дефекта

Предположим, что дополнительная периодическая нагрузка образца с помощью ультразвука будет приводить к вытеснению акустической эмиссией носителей из области дефекта. Дополнительные заряды, обусловленные дефектами, должны добавиться к уже имеющимся на поверхности электронам проводимости.

При равномерном распределении появившихся свободных зарядов внутри образца (предполагаем отсутствие влияния внешних электрических и магнитных полей) в поверхностном слое металла толщиной скин-слоя  $\delta_0$  добавится проводимость, пропорциональная объему области дефекта  $m^3$ .

Поверхность, занятая этими новыми зарядами, может быть описана площадью  $6R^2$ , где  $R$  – сторона квадратной поверхности в единицах межатомных расстояний и объемом  $R^3$ . Не следует забывать, что, амплитуда изменения общей поверхностной проводимости вызванная этими новыми источниками, зависит не только от объема внутреннего дефекта  $m^3$  но и от мощности ультразвука, вызвавшего это явление. Число новых проводящих частиц должно быть равно числу выделенных зарядов из области дефекта, соответственно плотность проводящих носителей, на поверхности изменит

общую поверхностную проводимость  $\sigma$  пропорционально отношению числа прежних  $N$  и новых  $dN$  носителей

С учетом неизменной площади исследуемого объекта это отношение можно определить по следующему выражению:

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{dN}{N} = \frac{m^3}{M}.$$

Где  $m^3$  = число дополнительных поверхностных зарядов,  $M$ - число прежних поверхностных зарядов. определить необходимое изменение проводимости на поверхности. Зная площадь поверхности объекта  $S$ , следует определить такую площадь  $s$  (виртуальную), при которой проводимость изменится в 2 раза из за действия «новых» частиц поверхностного заряда. Полагая природу новых заряженных частиц электронной, запишем

$$(\Delta\sigma + \sigma) / \sigma = 2.$$

Отношение новой проводимости к прежней равно 2 для нового (виртуального) значения поверхности  $s$ .

Очевидно, отношение  $S/s$  определяет изменение объемов натурального  $R^3$  и виртуального, образованного внутри площади, новых зарядов.

Поскольку для виртуального объема площадь равна  $6r^2$ , где  $r$ –ребро куба (виртуального объема), численное значение этого объема  $r^3$  можно записать как площадь стороны куба из новых носителей  $m^2$ , умноженную на число таких площадей в объеме  $m^3$  ( $s=6r^2 = m^2m$ ), или

$$r = m \sqrt{m/6},$$

$$s = m^2m$$

$$S/s = N/dN = \sigma/\Delta\sigma$$

где  $m$  является одновременно и числом зарядов (ребром куба из зарядов) и единицей измерения.

Например, для изменения фазы  $\Delta\varphi_\rho = 7,7\%$ ,  $d\varphi = 7,7\%$  на частоте 33 ГГц изменение проводимости составит соответствующее изменения фазы от  $2,34 \cdot 10^{11}$  до  $2 \cdot 10^{11}$  (на 17%),  $S/s = \sigma/\Delta\sigma = 5,88$ .

Для измеренного значения  $S = 100 \cdot 10^{18}$  (нанометров<sup>2</sup>) =  $100 \text{ м}^2$ , (куб с ребром 4 м) получим

$$m = \sqrt[3]{0,17 * S} = 2,4 \cdot 10^7 \text{ нанометров} = 2,4 \text{ см}$$

Выполненный расчет показывает, что для металлического объекта, имеющего площадь  $100 \text{ м}^2$  (куб с ребром 4 м) и величину полезного сигнала 7,7%, ожидаемый размер дефекта имеет общий объем  $2,4 \text{ см}^3$ .

Представленный эскизный расчет дает качественную картину физических процессов, происходящим в металле при ультразвуковом воздействии. В реальных исследованиях существенное влияние на эффект выделения электронов оказывает мощность ультразвуковых волн, попадающих на область дефекта, которая зависит от качества ультразвукового контакта, параметров излучателей, ультразвуковой мощности генератора.

В проведенных экспериментальных исследованиях при мощности ультразвука  $2-3 \text{ Вт/см}^2$  минимальный регистрируемый сигнал от исследуемых объектов с дефектами составлял  $(0,1-0,05)\%$ , что соответствует на порядок меньшим размерам дефектов.

Пересчетом размеров исследованных образцов ( $5 \times 45 \times 450 \text{ мм}$ ) в размеры дефектных областей автор получил оценочные (предполагаемые) размеры активной области величиной  $200-300 \text{ микрон}$ , что мало отличается от практических размеров дефектов ( $500-600 \text{ микрон}$ ), замеренных рентгеновским методом.

Предложенная модель процессов, происходящих в металле при ультразвуковом воздействии на область дефекта наглядно описывает эффект взаимодействия СВЧ поля с поверхностями металлических объектов, содержащих дефекты.

Полученные результаты подтверждают теоретическую работу Б.В.Васильева и В.Л.Любошица [25], в которой предсказана возможность обнаружения дефектов с помощью СВЧ излучения не только на поверхности, но и внутри металла, где скрытые дефекты раньше обнаруживались только

контактными методами. Из теоретических результатов ученых Курчатовского института следует, что скорость распространения поверхностного заряда равна скорости света, следовательно, наблюдение за изменением поверхностных свойств металла с дефектом (имеющим градиент упругой деформации) возможно практически в любой точке поверхности металла, что подтверждается проведенными автором экспериментами.

Размер обнаруживаемого дефекта является одной из основных характеристик каждой измерительной установки. По предложенной модели он может быть определен по результатам измерений проводимости объекта под действием ультразвукового излучения конкретной установки.

## 2.5 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  $30 \div 100$  ГГц с целью регистрации виртуальных колебаний поверхности с величиной  $0,5 \div 5$  нанометров.

4. Выполненные расчеты 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.

### **ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ПРИБОРА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АКТИВНЫХ ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛОВ**

Теоретические исследования предыдущих разделов работы послужили основой для расчета характеристик основных узлов прибора, предназначенного для обнаружения дефектов в металлах, в том числе начальных стадий разрушения. Первые лабораторные испытания, доказывающие полную работоспособность самого метода дистанционного СВЧ зондирования, результаты которых опубликованы автором в открытой печати [21,26,27] были выполнены на серийных приборах, используемых в методе АЭ (см. раздел 1.3 диссертации). После подтверждения возможности регистрации дефектов в металлах при взаимодействии СВЧ и ультразвуковых колебаний была поставлена задача улучшения основных эксплуатационных характеристик прибора: улучшения чувствительности, уменьшения энергопотребления, увеличения удобства в работе. С этой целью были проведены исследования по реализации предельной чувствительности СВЧ сенсора путем оптимизации уровня мощности СВЧ генератора, времени действия, частоты и мощности ультразвукового передатчика, разработки чувствительного фазового детектора.

По результатам проведенных исследований автором были разработаны несколько вариантов дистанционных индикаторов активных дефектов (ДИАД) для различных областей применения. Результаты разработки и исследований опубликованы автором в открытой печати [30,39,79,75 87].

Конструктивно разработанные приборы состоят из четырех блоков: СВЧ сенсора, генератора ультразвуковых колебаний, имитатора сигналов АЭ и ноутбука с программным обеспечением для обработки и представления результатов контроля.

### 3.1 СВЧ сенсор

СВЧ сенсор состоит из СВЧ передатчика и СВЧ приемника. Основной показатель всего комплекса – чувствительность при обнаружении малых размеров области дефекта, зависит от мощности СВЧ передатчика и коэффициента шума приемника.

#### 3.1.1 Генератор на диоде Ганна

Основные требования к генератору: малая потребляемая мощность, низкий уровень фазовых шумов, низкая цена. Исходя из этих требований, передающая часть сенсора выполнена в виде автогенератора на диоде Ганна, работающего в различных режимах на частотах в диапазоне 10...100ГГц. Конструкция СВЧ генератора на диоде Ганна выполнена по известному варианту на прямоугольном волноводе [91] и приведена на рисунке 3.1.

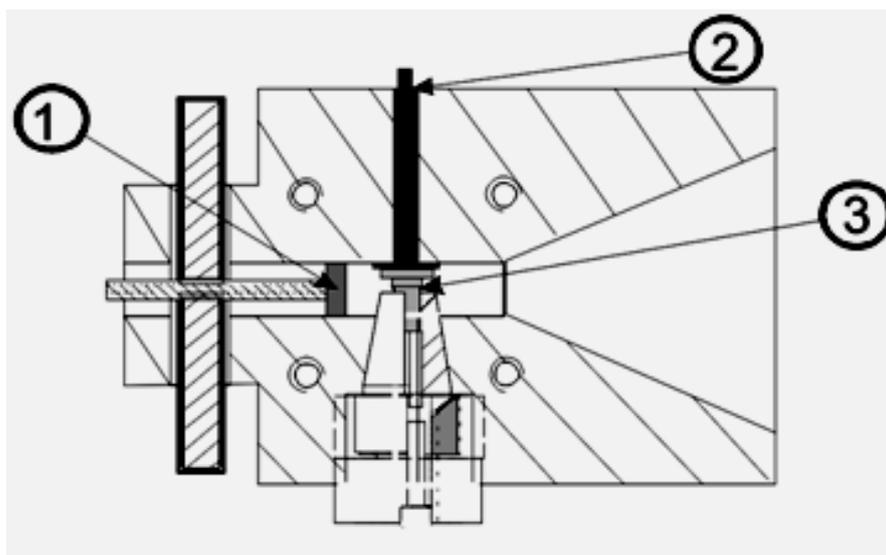


Рисунок 3.1 Конструкция СВЧ генератора: 1 – поршень - короткозамыкатель, 2 – вывод питания, 3 – диод Ганна

Настройка генератора на максимальную мощность проводится изменением расстояния до короткозамкнутой стенки волновода с помощью плунжера. Для вывода СВЧ излучения используется расширение волновода, представляющее собой рупорную антенну.

В непрерывном режиме работы генераторы на диодах Ганна имеют низкий КПД (2...4%) и могут обеспечить выходную мощность от единиц милливатт до единиц ватт [89,90]. Переход в импульсный режим работы позволяет увеличить КПД в 2...3 раза и получить значение выходной мощности в десятки ватт [15]. Благодаря импульсному режиму работы снижается потребляемая мощность, и генераторный диод работает в облегченном тепловом режиме без применения специального охлаждения.

Как показано выше, даже на нижних частотах для применения СВЧ генератора в сенсоре достаточно мощности 10-20 мВт.

Для снижения фазовых шумов, основной характеристики генератора, используются керамических резонаторы с практически достигнутой добротностью 10000. Дополнительно для снижения фазовых шумов применялась предварительная разбраковка арсенид-галлиевых диодов Ганна 3A728B [89,90] и оптимизация мощности генератора. Принятые меры обеспечили минимизацию величины фазовых шумов генератора при достаточно большой мощности. При использовании простой элементной базы и минимальной стоимости генератора, мощности 10 мВт на частоте 33 ГГц и частоте отстройки 50 кГц получен уровень фазовых шумов минус 120 дБн/Гц. Для сравнения, лучшие лабораторные генераторы диапазона 33-40 ГГц, выпускаемые серийно фирмой Rode&Sh [84] имеют фазовые шумы минус 136-140 дБн/Гц при стоимости на два порядка большей.

В целях снижения потребляемой мощности используется импульсная модуляция СВЧ генератора применением импульсного питания частотой 2,4-3 МГц при скважности, равной 6.

### **3.1.2 Фазовый детектор**

Фазовый детектор (ФД) [92] необходим для получения выходного напряжения, пропорционального разности фаз двух когерентных колебаний СВЧ, падающего и отраженного.

Для регистрации изменения фазы СВЧ колебания используется перемножение отраженного и излученного СВЧ сигнала с последующей фильтрацией. Конструкция смесителя показана на рисунке 3.2

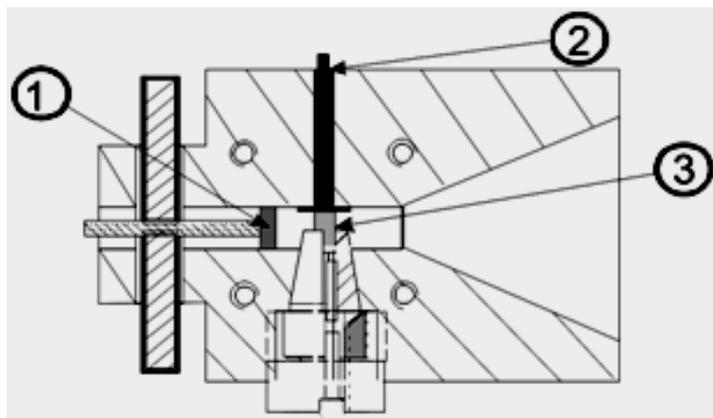


Рисунок 3.2. Конструкция смесителя: 1–поршень-короткозамыкатель, 2–выход смесителя, 3–смесительный диод.

Смеситель выполнен на основе волноводной детекторной секции на диоде с барьером Шоттки типа 3A121В. Для подстройки чувствительности детектора в волноводной секции используется концевой поршень.

Важной частью детекторной секции является пассивный сумматор, предназначенный для сложения сигналов, отраженного от исследуемой поверхности и от генератора. Сумматор представляет собой прямоугольный волновод, который содержит камеру выделения части сигнала генератора и одновременно сумматор отраженного сигнала, рисунок 3.3. Для получения максимальной чувствительности фазового детектора используется сдвиг фазы принятого сигнала с помощью фазовращателя – отрезка фторопластового материала, расположенного в раскрыве рупора передатчика. Это позволяет отразить принятый сигнал в раскрыве рупора фазового детектора, чем достигается увеличение чувствительности.

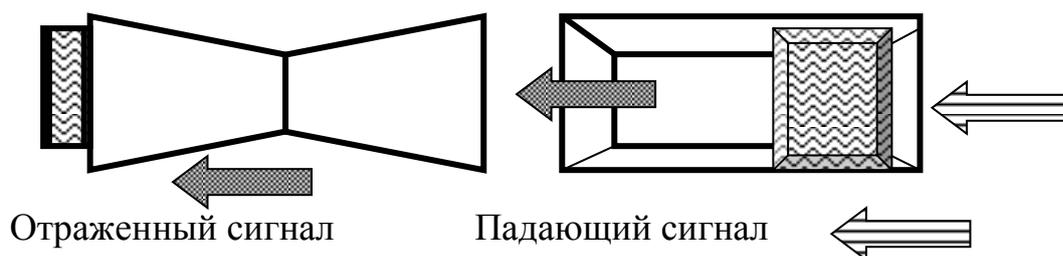


Рисунок 3.3 Сумматор на входе (выходе) СВЧ сенсора.

Рассмотрим возможность реализации характеристик ФД, необходимых для получения определенной выше чувствительности прибора.

Статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ)  $p-n$ -перехода смесительного диода аппроксимируется выражением [76]

$$I = I_s(\exp(eU/mkT) - 1),$$

где  $I_s$  – ток насыщения при обратном смещении на диоде (0,1 мкА для диодов с барьером Шоттки),  $e$  – заряд электрона ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  К),  $U$  – напряжение на диоде (150-190 мВ),  $m$  – коэффициент неидеальности ВАХ (1,5 для диодов с барьером Шоттки),  $k$  – постоянная Больцмана ( $kT = 0,4 \cdot 10^{-20}$  Дж),  $T$  – абсолютная температура (300°).

Чувствительность диода по току  $\chi$  определяется отношением приращения выпрямленного тока  $\Delta I_{кз}$  в режиме короткого замыкания выходной цепи детекторного диода по постоянному току к мощности входного сигнала ( $P_{вх} = 10$  мкВт):

$$\chi = (\Delta I_{кз} / P_{вх}) = (I_{кз} - I_n) / P_{вх} \quad (3.1)$$

где  $I_n$  – ток при наличии нагрузки (170 мкА);  $I_{кз}$  – ток через диод при коротком замыкании (0,8 мА).

Для повышения чувствительности по току, зависящей от выбора рабочей точки, используют прямое смещение диода током  $I_0 = 200 \div 600$  мкА подачей опорного напряжения от СВЧ генератора.

При работе в непрерывном режиме предельная рассеиваемая СВЧ мощность  $P_{рас}$  для германиевых диодов составляет  $P_{рас} \approx 10 \dots 40$  мВт, для кремниевых диодов с барьером Шоттки (ДБШ)  $P_{рас} \approx 10 \dots 100$  мВт.

При детектировании сигналов больших амплитуд, получаемых при прямом попадании сигнала генератора, детекторные диоды должны иметь высокое значение напряжения пробоя, поэтому используются преимущественно ДБШ.

Расчетная мощность рассеивания диода в рабочем режиме

$$P_{рас} = I_n^2 R_n = (0,6 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 360 = 130 \text{ мкВт}, \quad (3.2)$$

значительно меньше допустимой.

Пусть на вход смесителя поступают два колебания,  $U_1(t)$ , – напряжение сигнала,  $U_2(t)$ , – опорное напряжение

$$U_1(t) = U_1 \sin(\omega t + \phi), \quad U_2(t) = U_2 \sin \omega t,$$

причем  $U_2 \geq U_1$ . На выходе детектора получаем сигнал

$$U_{\Sigma}^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos \phi.$$

Основная характеристика фазового детектора – нормированная амплитудно-фазовая характеристика (АФХ)

$$U_{\text{вых}}/U_{\text{вых max}} = F(\phi), \text{ рад}$$

Для линейного режима работы диода (ток в рабочей точке наличии нагрузки при СВЧ сигнале до 500-600 мкА, измеренное значение 550 мкА) и значениях напряжений сигнала и опорного  $U_1(t) < U_2(t)$ , фазовая характеристика представляет собой косинусоиду

$$F(\phi) = A_0 \cos \phi.$$

Минимальное значение фазовой характеристики  $F(\phi)$  соответствует  $\cos(\phi) = -1$ , при противофазном значении сигнала и гетеродина, максимальное – синфазному,  $\cos(\phi) = 1$ . Максимальная крутизна преобразования фазы соответствует экстремумам производной:

$$dF(\phi)/d(\phi) = \max, \min. = A_0 \sin(\phi).$$

Фаза сигнала генератора должна быть сдвинута на  $\pi/2$  относительно отраженного сигнала. Ввиду периодичности функции  $\sin(\phi)$  следующая рабочая точка с максимальной крутизной соответствует сдвигу  $3\pi/2$  и так далее.

Практически замеренные значения токов и напряжений детектора на диоде 3А121 в волноводе на частоте 33 ГГц были следующие:

- при синфазном напряжении сигналов  $U_{\text{вых max}} = 180-190$  мВ,
- при противофазном напряжении сигнала  $U_{\text{вых min}} = 60-66$  мВ,
- ток диода при нагрузке 360 Ом  $I_{\text{н}} = 440$  мкА,
- ток через диод при коротком замыкании  $I_{\text{кз}} = 0,8$  мА.

- расчетная чувствительность диода при  $P_{ex}=200$  мкВт,  $\chi=1,8$ А/Вт

Такая чувствительность оказывается достаточной для приема фазомодулированного сигнала мощностью 1 мВт.

В разделе 2.2 показано, что расчетное значение шумовой спектральной плотности в полосе 1 Гц для окружающей температуры 300° Кельвина составляет минус 144 дБ/мВт. Учитывая уровень спектральных составляющих через функции Бесселя (2.5), максимальное значение изменения фазы при модуляции равно отношению четверти волны рабочей частоты СВЧ к амплитуде (половине размаха) механических колебаний поверхности:

$$(1/(\lambda/4)/a_{max}) = (1/(\pi/2)/X), = \beta = -134 \text{ дБ} .$$

Принимая во внимание, что дополнительные шумы (амплитудные и фазовые) детектора (величиной 6-8 дБ) приведут к снижению чувствительности, пересчитаем минимально возможную амплитуду виртуальных колебаний поверхности. Для частоты 33 ГГц ( $a_{max} \approx 2,27$ мм),  $\beta = 134-8$  (дБ) получим  $a_{min} = a_{max} * \beta = 0,5 * 10^{-6}$  мм. (0,5 нанометра), что удовлетворяет заданному значению регистрируемой минимальной деформации поверхности.

При использовании лучшего образца импортных анализаторов спектра R&S® FSVA40, который имеет минимальный уровень фазовых шумов на частоте 40 ГГц для рабочей частоты 100 кГц величиной -137 дБн/мВт [84], минимальный расчетный уровень виртуальных колебаний составит величину 0,14 нм.

### 3.2 Электронный имитатор активного дефекта

Для первичной настройки СВЧ сенсора необходимо иметь искусственный источник сигналов переменной электрической проводимости. За основу такого источника сигнала был выбран отражательный фазовращатель. Его принцип действия основан на периодическом изменении фазовой задержки сигнала, отраженного от металлической поверхности,

облучаемой генератором из состава СВЧ сенсора. Реализация переменной фазовой задержки производится путем перемангничивания пластинки высокочастотного феррита (от микрополоскового циркулятора частотой 33ГГц), расположенной перед отражающей медной пластиной. Частота переменной фазы выбирается равной частоте возбуждения передатчика ультразвука (50 кГц). Благодаря высокой широкополосности выбранного типа фазовращателя (десятки Гигагерц), возможно его применение для частот СВЧ диапазона от 10 до 100 ГГц. Амплитуда переменного значения фазы выбрана так, чтобы величина полезного сигнала на выходе радара Доплера обеспечила превышения уровня шумов на 45-50 дБ. Такое высокое значение амплитуды коэффициента фазовой модуляции позволяет выполнять первичную настройку электронной схемы радара при подключении к осциллографу.

Использование имитатора позволяет контролировать работу генератора СВЧ и чувствительность радара Доплера, устанавливать необходимое рабочее расстояние до исследуемого объекта путем контроля тока фазового детектора.

### 3.3 Генератор ультразвука

Генератор используется для возбуждения контактного пьезопреобразователя типа MA40MF14-5B. Генератор построен по известной схеме с первичным двухфазным генератором на микросхеме SG3524N, приведенной на рисунке 3.4.

Для управления временем включения-выключения по программе применен электронный коммутатор на цифровой логической микросхеме КР1533 ЛАЗ. Запуск и остановка коммутатора производится импульсами со счетчика на микросхемах 561 ИЕ16, управлении счетчиком осуществляется от *SOM* порта персонального компьютера или кнопки «пуск» на передней панели генератора ультразвука.

За время работы счетчика (1 секунда) двухфазный сигнал частотой 44-46 кГц подается через эмиттерные повторители (транзисторы КТ315) на вход усилителя мощности. Схема усилителя мощности выполнена по трансформаторной схеме на двух транзисторах р-п-р типа КТ 851 (максимальное рабочее напряжение 120 В, при токе 1,5 А) на каждый канал.

### Схема генераторов Ультразвука для ДИАД-4

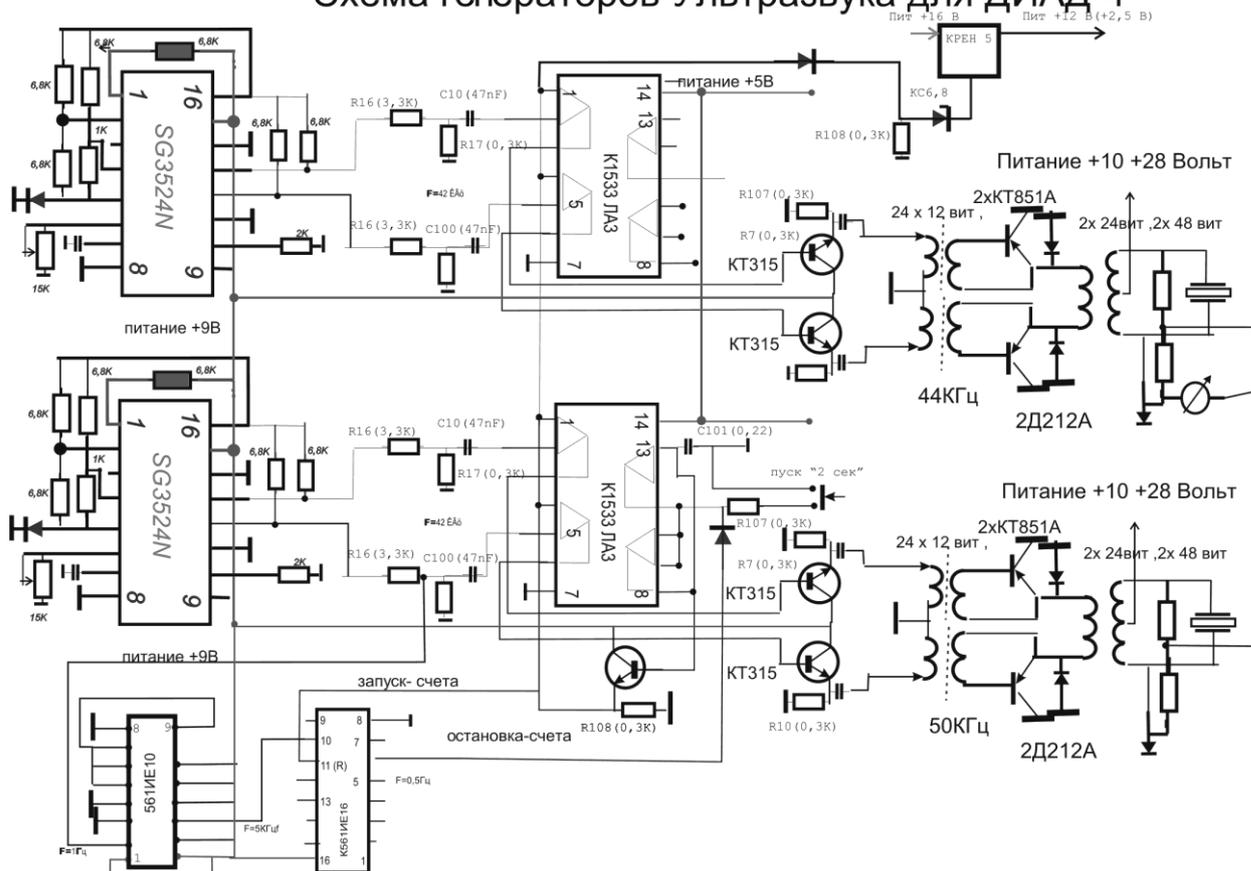


Рисунок 3.4 Электрическая схема бигармонического генератора двух ультразвуковых частот 44 и 50 кГц.

С целью снижения тепловых потерь коллекторы усилительных транзисторов имеют электрический (и тепловой) контакт с радиатором охлаждения. Радиатор выполнен из алюминиевого сплава, подключен к нулевой шине блока питания 25-30 В. От эмиттера каждого усилителя через общий трансформатор на ферритовом кольце выходной сигнал амплитудой 60-90В с помощью экранированного 4-х проводного кабеля подается на пьезоэлектрический преобразователь – возбудитель ультразвука.

### 3.4 Методика настройки СВЧ сенсора

Настройка на максимальную чувствительность производится посредством установки оптимального тока диода путем изменения расстояния от СВЧ генератора до исследуемого объекта.

Для настройки необходимо произвести последовательно следующие операции.

- Включение генератора ультразвука или нескольких генераторов.
- Запись сигнала с выхода СВЧ сенсора с помощью звуковой платы ПК.
- Выделение сигнала с помощью преобразования Фурье (ПФ).
- Оценка спектральной мощности выделенного сигнала.
- Регистрация величины полезной гармоник (или гармоник) с последующей записью файла зарегистрированного сигнала.

В качестве нулевого уровня для отсчета спектральной составляющей принимается уровень 3-4 дБ, обусловленный шумами аппаратуры.

Первичная настройка прибора на определение оптимального рабочего тока диода выполняется с помощью имитатора, входящего в комплект каждого прибора. СВЧ сенсор устанавливается на расстоянии 100-150 мм от защитной поверхности имитатора. Включается режим имитатора, выход СВЧ сенсора подключается к входу осциллографа или в режиме «непрерывный анализ» к входу звуковой платы ПК. На экране осциллографа или ПК наблюдается величина рабочего сигнала. Меняя рабочее расстояние до имитатора, его положение, добиваются максимального уровня полезного сигнала и фиксируют значение тока диода по прибору, включенному в цепь диода. Это значение в дальнейшем используют при установке оптимального расстояния для СВЧ сенсора. Допустимое отклонение тока диода от оптимального значения не более  $\pm 10-15\%$ . (1,2 дБ).

Последние варианты СВЧ сенсора оборудованы автоматической настройкой на оптимальное расстояние. При загорании зеленого индикатора «настройка» происходит автоматическая установка необходимого сдвига

фазы дополнительным регулятором фазы, управляемым током диода. Поскольку все операции в этом случае выполняются автоматически, процесс измерения определяется временем работы ультразвукового генератора (1-3 сек) и временем расчета по программе БПФ (0,5-1 сек).

### **3.5 Расчет конструктивных параметров прибора ДИАД для индикации дефектов железнодорожных колес в движении**

Разработанные приборы дистанционных индикаторов активных дефектов (ДИАД), информация о которых опубликована автором в открытой печати, [26-43,87] имеют несколько модификаций для удобства работы с различными объектами исследований.

Результаты, полученные с помощью этих приборов, были первыми практическими результатами, подтверждающими возможности бесконтактного индицирования параметров АЭ СВЧ сенсором, которые опубликована автором в открытой печати [27]. При испытаниях макетов ДИАД, впервые удалось получить полезный сигнал, связанный с наличием опасных дефектов без воздействия дополнительных рабочих нагрузок. Информация об использовании прибора в дальнейших практических разработках опубликована автором в открытой печати [41,42,87].

Рассмотрим специфику работы прибора, предназначенного для определения дефектов движущегося объекта – железнодорожного колеса.

При скорости вращения ЖД колеса диаметром 950 мм при скорости движения 40 км/час или 11,1 м/с, число оборотов составляет 3,72 оборотов/с или 2,8 радиана за 120 миллисекунд, что соответствует дуге 160 градусов. Для контроля одного ЖД колеса потребуется генератор ультразвука с длиной волны в металле  $\pi 950 \times 160 / 360 = 1326$  мм. При такой длине будет индицировано более четверти диска вращающегося колеса. Для контроля ЖД колес в движении со скоростью 100 км/час потребуется повысить частоту ультразвукового генератора в 400 раз, до 30 МГц. Время индикации дефекта составит 30 микросекунд.

Для удовлетворительной точности измерения 1дБвремя записи и расчета по БПФ составляет 8-10 тысяч периодов ультразвука. Для сокращения числа отсчетов необходимо увеличить скорость работы аналого-цифрового преобразования. При скорости отсчетов 500кГц время записи сигнала сократится, с 3 сек до 120 миллисекунд. Однако малая длина волны ультразвукового передатчика позволит индцировать только 1/20 часть колеса. Для проверки сектора в четверть всего диска потребуется длина сенсора того же размера (1300 мм).

Дополнительный доплеровский сдвиг СВЧ несущей, вызванный движением колеса относительно неподвижного СВЧ прибора необходимо учитывать расчетом, используя известные уравнения. Известное выражение преобразований Лоренца для нулевой компоненты 4-х мерного вектора  $x^i$  приводит к записи выражения для продольного эффекта Доплера [88]:

$$\Omega_D = \Omega(1 - v/C) / ((1 - v^2/C^2)^{0,5}),$$

где  $\Omega_D$  доплеровский сдвиг частоты,  $\Omega$  несущая частота (50 КГц),  $v/C$  отношение скорости движения  $v$  к скорости света  $C$ . Для скорости движения ЖД колеса  $v \approx 100$  км/час (0,03 км/с) доплеровский сдвиг незначительный и практически не отразится в сдвиге частоты приема  $\Omega$  (50 КГц).

Полученные результаты практической полезности прибора были оформлены в виде патента автора на полезную модель №81577 «Устройство для обнаружения активных дефектов в металлических изделиях» (Приложение А)

Доработка прибора ДИАД проводилась по гранту федеральной программы НИОКР, по теме: "Разработка, исследование, испытания дистанционных индикаторов активных дефектов (ДИАД) на образцах и железнодорожных колесах в статическом режиме", государственный контракт №7901р/11410 от 15.04.2010. По результатам выполненной полностью работы было составлено техническое задание на разработку комплектов ДИАД, пригодных для промышленного использования со

следующими рабочими параметрами:

1. Рабочее расстояние 80-180 мм.
2. Минимальная рабочая площадь облучения 20x20 мм
3. Спектр выходного полезного сигнала СВЧ сенсора –  $44 \pm 5$  КГц.
4. Спектр выходного сигнала специального смесителя  $6,2 \pm 5$  КГц
5. Мощность излучения на частоте 33ГГц не более 10-15 милливатт.
6. Чувствительность – 55-56 дБ относительно уровня шума.
7. Обнаружительная способность для уровня полезного сигнала 5-6 дБ над уровнем шума – опасные дефекты (трещины) объемом не менее  $(3-4) \cdot 10^{-18} \text{мм}^3$  при расстояниях 500-1000 мм от места установки ультразвукового передатчика.
8. Фиксация рабочей точки «смесителя СВЧ» – по микроамперметру «тока смесителя» СВЧ.
9. Уровень мощности ультразвукового генератора на контактном передатчике ULTRASONICSENSORSMA40 SERIES 10-20 Вт.
10. Время работы ультразвукового передатчика – цикл 1 секунда.
11. Время записи сигнала в память компьютера в формате «.wav» – 1-5 секунд
12. Время анализа после записи сигнала -1с.
13. Вес комплекта 4,6 кг. Объем 300 x 400 x 500 мм.

После изготовления прибора были проведены натурные испытания на предприятиях Томска, подтвердившие заявленные параметры. Заводские испытания выполненные в фирме ЗАО "Сибмаш" и в лабораториях ТПУ, СФТИ, ООО "АРЦ НК" АНО", НИИ Интроскопии подтвердили надежность в работе приборов.

### **3.6 Заключение по третьей главе**

Проведены расчеты с использованием известных технических параметров отечественных комплектующих (генераторных диодов Ганна ЗА728В, детекторных диодов Шоттки 2А121В). Изготовленные волноводные

варианты СВЧ сенсора отличается минимальным набором известных технологий, прост в изготовлении и настройке.

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 (3A728B) в импульсном режиме работы, с применением керамических резонаторов, снижающих уровень фазовых шумов [89,90],
- в качестве смесителя возможно применение СВЧ диода с контролем рабочей точки, что позволяет при использовании фазового метода регистрации измерять сигналы на уровне минус 130дБ/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).

Малое время измерений позволило сократить время работы генератора ультразвуковых колебаний, значительно снизить потребляемую прибором мощность и разработать мобильный вариант прибора с общим весом 4,5 кг.

Использование при регистрации сигналов звукозаписывающей аппаратуры с низкой рабочей частотой аналого-цифрового преобразования (до 20-30 кГц) позволяет без дополнительного преобразования выходного сигнала по частоте регистрировать наличие дефекта с помощью звуковой карты и значительно снизить стоимость сенсора.

## ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 4.1 Направления выполненных экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились с целью изучения возможности обнаружения различных видов дефектов, определения размеров дефектов, обнаруживаемых с помощью СВЧ зондирования.

В испытаниях использовались два прибора ДИАД с рабочими частотами 10 и 33 ГГц, с рабочими параметрами, рассчитанными по материалам диссертации, приведенными выше.

Исследовались разные материалы:

- сталь Ст4,
- электротехническая сталь,
- алюминий,

с разной толщиной (сталь 3-5 мм, алюминий 2-20 мм, электротехническая сталь 0,4 мм).

В экспериментах использовались металлы с дефектами разной природы:

- дефектами, образующимися в результате циклических изгибов образцов,
- дефектами, появляющимися при увеличении прикладываемых усилий на образцы (от нуля до разрыва образцов),
- видимых трещин,
- нарушений сварных соединений и других дефектов,
- дефекты образования стружки (алюминий) толщиной менее 1 микрона.

Показана возможность применения разработанного прибора в качестве индикатора процесса резания металла, на что получен патент на полезную модель №85390 «Устройство прецизионного позиционирования при обработке поверхности металлического изделия» (Приложение А).

Отдельно изучались возможности восстановления активности старых дефектов, а также исследовались возможности локализации места дефекта, находящегося внутри образца.

Часть испытаний проводилась в лабораторных условиях с использованием разрывных и гибочных машин. Испытания проводились на лабораторных образцах ДИАД, показанных на рисунке 4.1.

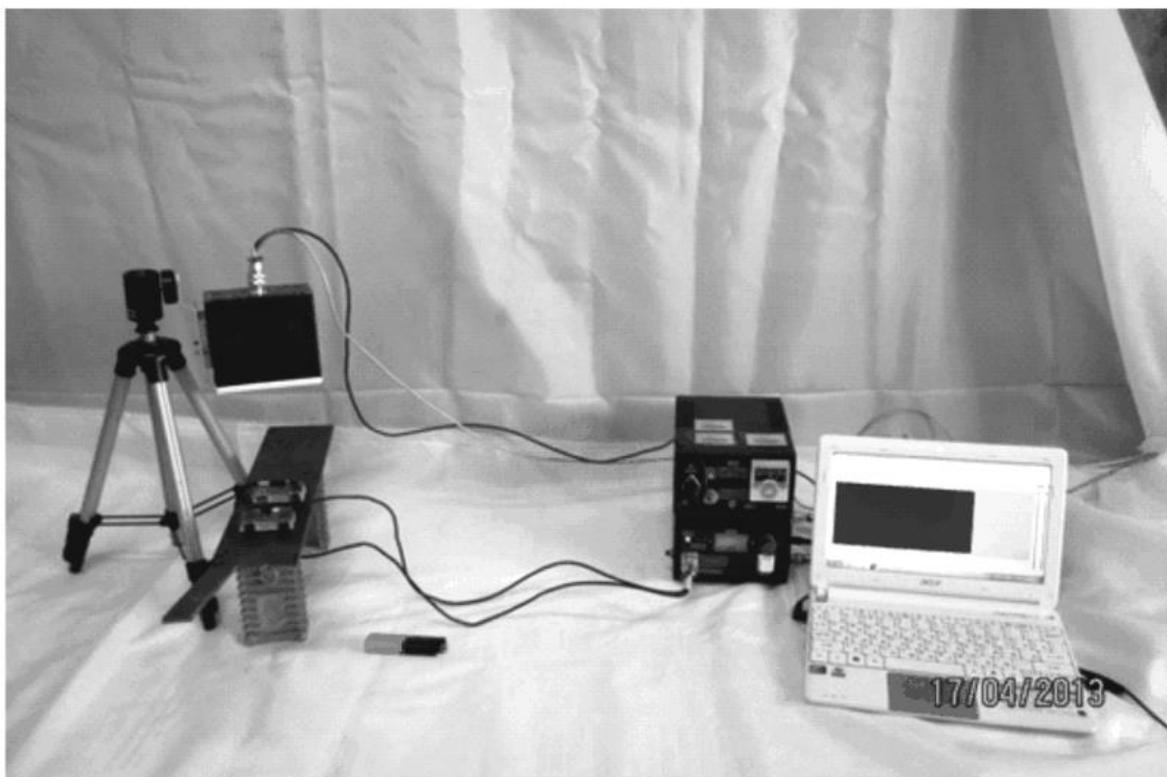


Рисунок 4.1. Лабораторный образец ДИАД-1  
для исследование дефектов стальной пластины

Серии испытаний ДИАД на железнодорожных колесах, трубах различного диаметра и металлических образцах различной формы проведены с выездом на места установки изделий с дефектами при использовании компактного мобильного варианта прибора, показанного на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2. Мобильный комплект ДИАД-1 в кейсе

## **4.2 Общая методика испытаний**

### **4.2.1 Проверка работоспособности и первичная настройка прибора**

Проверка и первичная настройка прибора выполняется с помощью имитатора, входящего в комплект каждого прибора. СВЧ сенсор устанавливается на расстоянии 100-150 мм от излучающей поверхности имитатора, показанного на рисунке 4.3.

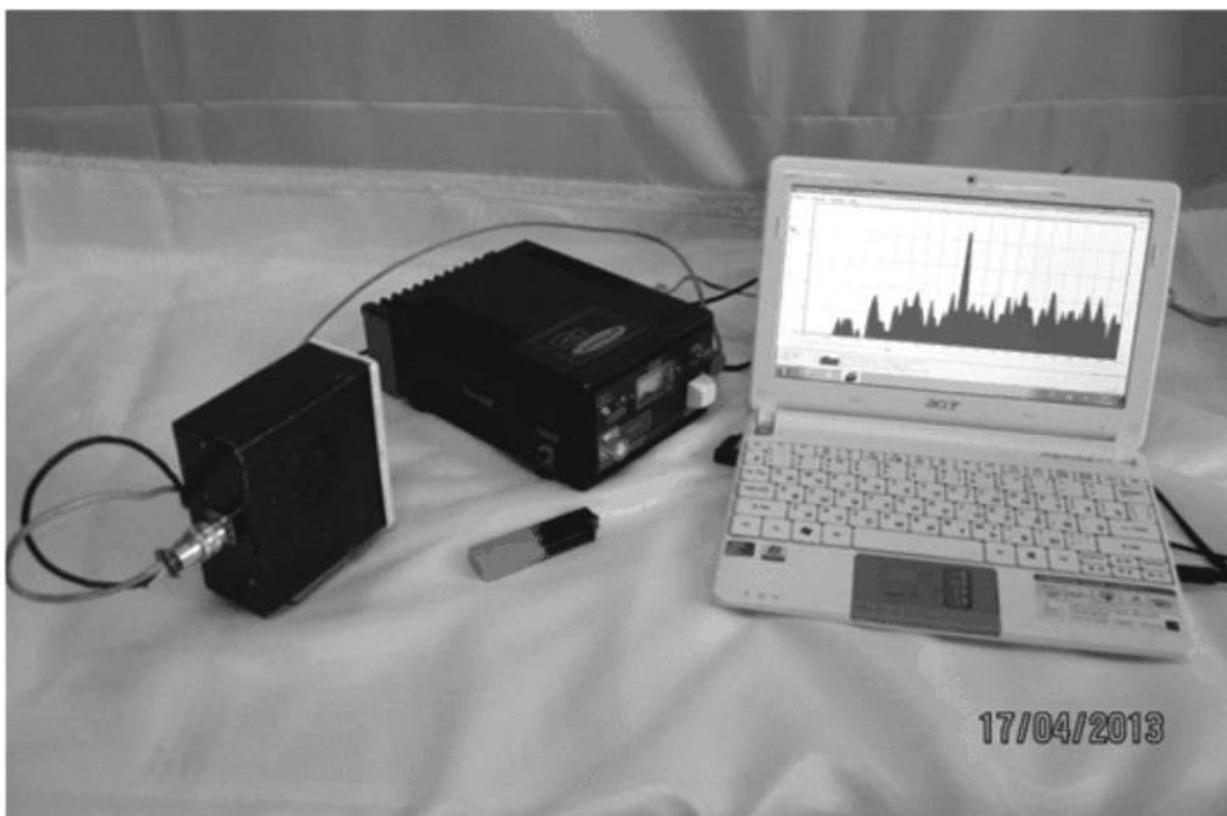


Рисунок 4.3. Проверка прибора в режиме имитации с помощью ферритового фазовращателя. Справа на экране ПК результат БПФ.

После включения имитатора в режиме работы прибора «непрерывный анализ», выход СВЧ сенсора подключается к входу звуковой платы ПК. Спектр выходного сигнала, полученный в результате быстрого преобразования Фурье, показан на рисунке 4.3.

Первичная настройка прибора заключается в получении максимального уровня выходного сигнала.

Наблюдая на экране ПК уровень сигнала первой гармоники ультразвука, изменением расстояния от излучателя до имитатора и его положения добиваются максимального уровня полезного сигнала. По встроенному прибору, включенному в цепь смесительного диода, фиксируется значение тока диода, соответствующего оптимальному значению рабочего расстояния между сенсором и имитатором. Значения оптимального тока и оптимального расстояния до имитатора в дальнейшем используется при установке СВЧ излучателя.

#### 4.2.2 Установка СВЧ излучателя

Путем изменения расстояния от СВЧ излучателя до относительно исследуемого образца или объекта производится настройка на максимальную чувствительность прибора. Критерием максимальной чувствительности является уровень получения оптимального тока диода, соответствующего уровню тока полученного при работе с имитатором.

Типовое расстояние СВЧ излучателя до исследуемых образцов обычно составляет от 70 до 180 мм и устанавливается с шагом в четверть длины волны СВЧ колебания. Допустимое отклонение тока диода от оптимального значения не более 1,2 дБ.

Полученное расстояние до исследуемых образцов в процессе исследований не меняться, для чего производится жесткая фиксация СВЧ излучателя от поверхности образцов.

#### 4.2.3 Последовательность операций по обнаружению и регистрации дефектов

После установки оптимального расстояния по оптимальному току смесительного диода последовательно проводятся следующие операции.

- Включение генератора ультразвука (или нескольких генераторов).
- Запись на ПК сигнала с выхода СВЧ сенсора, подключенного к звуковой плате ПК с помощью программы записи звука.
- Обработка записанного сигнала программой выделения сигнала на основе быстрого преобразования Фурье.
- Регистрация спектральной мощности полезного сигнала в виде таблицы или графика.

Регистрация величины полезной гармоники (или гармоник) с последующей записью файла зарегистрированного сигнала производится командой «Print Sys». Полученный файл заносится в библиотеку ПК под

присвоенным названием и номером. Состав и общий вид экспериментальной установки приведен на рисунке 4.4.

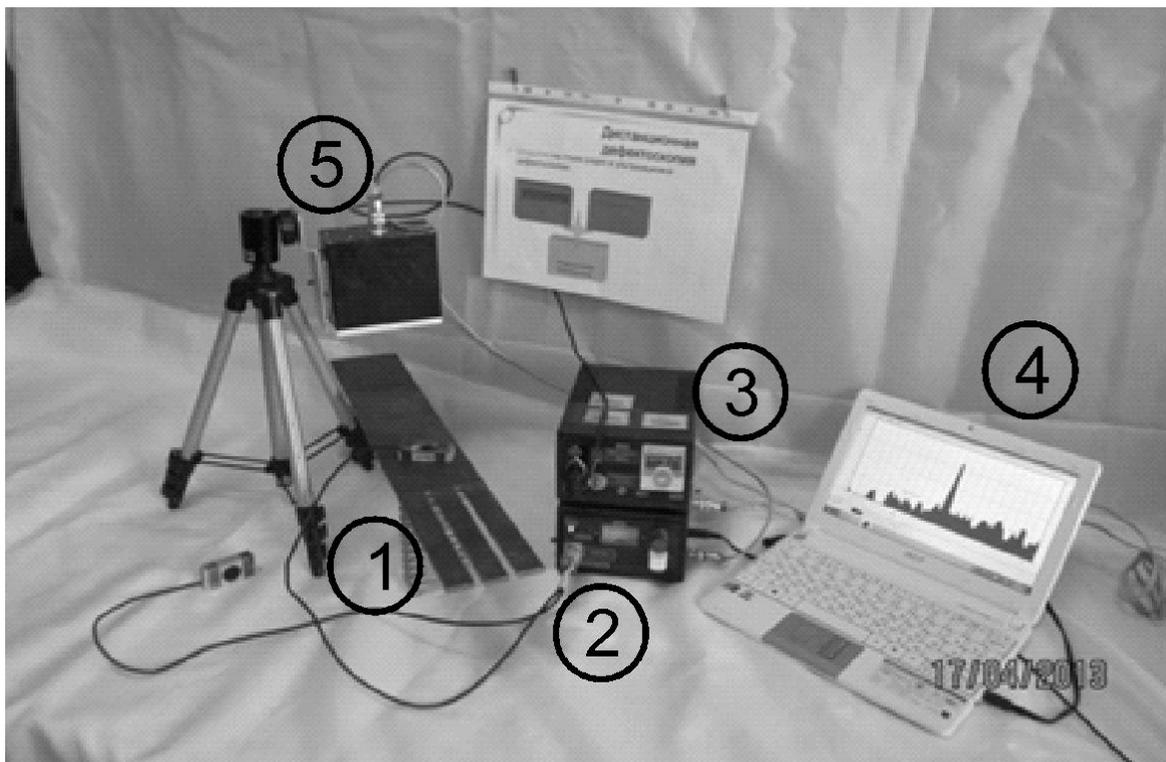


Рисунок 4.4. Состав экспериментальной установки: 1 – испытуемый образец, 2 – генератор ультразвука, 3 – блок питания и преобразователь спектра, 4 – ПК с программой быстрого преобразования Фурье, 5 – СВЧ сенсор.

В качестве нулевого уровня для отсчета спектральной составляющей принимается уровень на 3-4 дБ (сигнал/шум) выше уровня шумовой дорожки.

### 4.3 Результаты испытаний

#### 4.3.1 Испытания на разрыв

Испытания проводились на стальных образцах (Ст4, размер 450x45x3 мм). на кафедре теоретической и прикладной механики ТПУ Информация о проведенных испытаниях и полученных результатах опубликована автором в открытой печати [41].

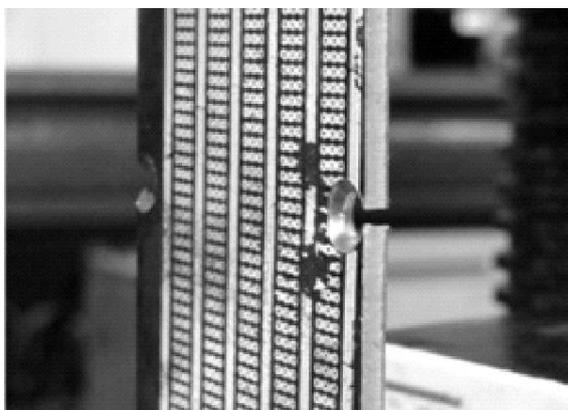
Состав и общий вид экспериментальной установки приведен на рис. 4.5.



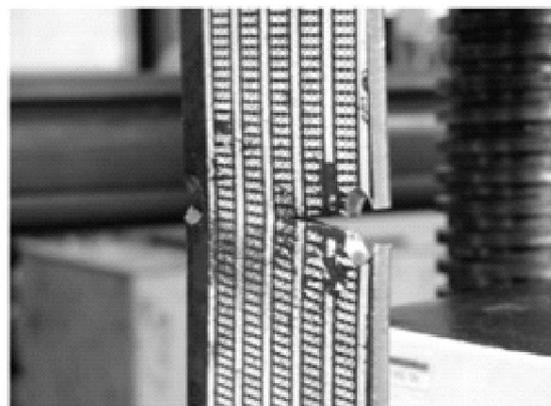
Рисунок 4.5 Общий вид экспериментальной установки для испытаний на разрыв, разрывная машина ГСМ-50 и комплект ДИАД

Для изменения прилагаемых усилий использовалась разрывная машина ГСМ-50 с максимальным усилием 50 тонн, с возможностью плавной регулировкой прилагаемой нагрузки.

Вид исследуемых образцов приведен на рисунке 4.6.



а



б

Рисунок 4.6. Внешний вид образца: а – в начале эксперимента, б – после образования трещины

Плавное увеличение нагрузки проводилось до появления на экране ПК уверенно регистрируемого сигнала, свидетельствующего о появлении начальной стадии деформации образца. Изменение уровня сигнала в процессе увеличения нагрузки образца фиксировалось вплоть до разрушения образца.

Типовой вид регистрируемого сигнала на экране компьютера приведен на рисунок 4.7.

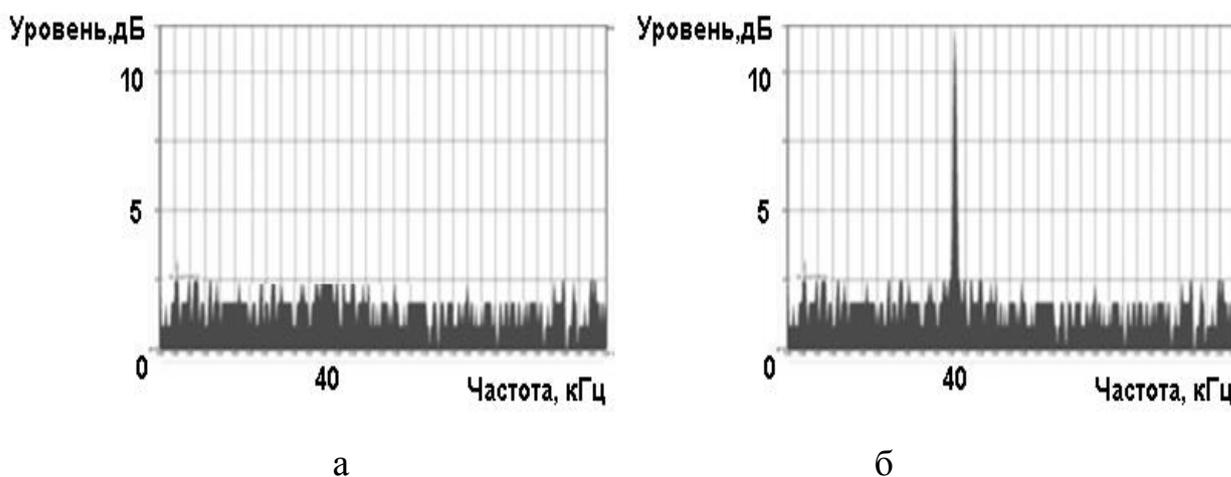


Рисунок 4.7. Вид регистрируемого сигнала: а – при отсутствии дефекта, б – при наличии дефекта

При отсутствии активных дефектов спектр выходного сигнала не содержит спектральных составляющих с частотой ультразвука (рисунок 4.7а). По мере увеличения нагрузки от 1 до 5 тонн появляется составляющая ультразвука с уровнем 2-8 дБ. Максимальный уровень сигнала, на 10 дБ превышающий уровень шума, показан на рис. 4.7б. Этот сигнал получен в результате начала необратимых изменений в образце, при образовании трещины, появившейся при нагрузке более 10 тонн.

С целью проверки эффекта Кайзера (восстановление образца при снятии нагрузки в случае упругой деформации) [93], была проведена вторая серия измерений, в которых плавное увеличение нагрузки прерывается ее сбросом (с 5 тонн до 1 тонны) с последующим нарастанием. При сбросе нагрузки наблюдается резкое снижение полезного сигнала (до 0-2 дБ), что указывает

на обратимость процесса начального разрушения в пределах упругой деформации образцов.

**Проведенный эксперимент подтверждает возможность обнаружения начальной стадии деформации образцов СВЧ сенсором и оценки предельных нагрузочных способностей образцов.**

В дальнейшем, при увеличении нагрузки до 7 тонн сигнал, в соответствии с эффектом Кайзера, снова увеличивается.

Трещина, показанная на рисунке 4.6 б, возникает при усилии 12,5 тонн.

Усредненные по результатам десятикратных измерений результаты представлены в таблице 4.1.

Предполагалось нормальное распределение результатов измерений, погрешность измерений из-за небольшого количества проведенных измерений оцененная методом «три сигма», составила 1,5 дБ.

Таблица 4.1 Результаты экспериментов при растяжении образцов

Серия первая						
Усилие, тонн	0	5	1	7	10,6	12
Уровень сигнала, дБ	0	6	2	8	9	10
Серия вторая						
Усилие, тонн	0	5	1	5	7	12,5
Уровень сигнала, дБ	0	5	1	8	7	11

Во всех случаях полезный сигнал нарастает с ростом усилия нагружения, снижается при сбросе нагрузки, имеет максимальное значение в конце области упругой деформации и начале пластической деформации.

Выполненные эксперименты убедительно доказывают, что чувствительность метода СВЧ диагностики достаточна для обнаружения начальной стадии разрушения металлов на уровне начала необратимой деформации образцов.

На стадии пластической деформации, свидетельствующей о начале

необратимых разрушений металла, дефекты могут регистрироваться методом акустической эмиссии, регистрацией появляющихся сигналов повышенной активности *N*. Выполненные эксперименты по исследованию начальной стадии разрушения СВЧ сенсором и методом АЭ показывают преимущества СВЧ сенсора. При наличии разрушений нет принципиальных отличий между разрушениями, обнаруживаемыми методом АЭ и методом СВЧ диагностики. Сигнал, который обнаруживается при испытаниях образцов методом АЭ, возникает после образования трещины, на уровне необратимой деформации образцов [ 93]. Сигнал, который регистрируется СВЧ сенсором, достаточен для обнаружения начальной стадии разрушения металлов, еще на уровне упругой деформации, что позволяет оценить предельную нагрузку на образцы.

Аналогичные результаты получены при испытаниях деформируемых алюминиевых образцов, проведенных на базе Института Физики Прочности и Материаловедения СО РАН г. Томска.

Положительными особенностями СВЧ метода, в отличии от метода акустической эмиссии, дающего сходные результаты при наличии разрушений, являются:

- наличие расстояния между сенсором и образцом, что позволяет исследовать образцы с высокими (выше 300<sup>0</sup> Цельсия) температурами, находящимися в движении, а также образцов со слоем изоляции;
- отсутствие необходимости нагружения образцов.

#### **4.3.2 Испытания на изгиб**

Испытания проводились на базе Института физики прочности и материаловедения СО РАН г. Томска.

Испытывались образцы из стали размерами 450x45x3мм со специальной шейкой из сквозных отверстий диаметром 9 мм, необходимых для локализации места разрыва, показанные на рисунке 4.8а.

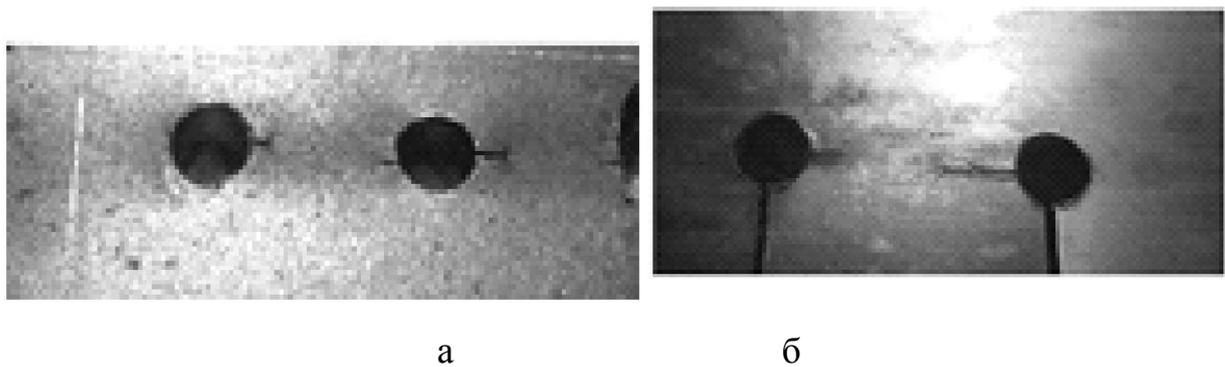


Рисунок 4.8. Испытуемые образцы: а – образец до испытаний максимальной прочности, б – образец с дефектами, сниженной прочности

В испытаниях использовался изгибный станок лаборатории Института физики прочности, результаты опубликованы автором в открытой печати [39].

Перед началом испытаний предполагалось, что процесс увеличения количества изгибов приводит к накоплению усталостных напряжений в соответствии с кривой Веллера [94]. Это должно было привести к росту амплитуды полезного сигнала на выходе СВЧ сенсора при увеличении числа изгибов.

Однако при испытаниях было установлено, что уровень полезного сигнала в режиме упругой и пластической деформации находится в пределах погрешности измерения и практически неизменен. Регистрируемый сигнал скачком нарастает только при появлении трещин, снижающих прочность на 20-30%, показанных на рисунке 4.8 б.

Трещины возникали после 35-38 циклов изгиба, при образовании трещин регистрировалось увеличение уровня полезных сигналов до 6,5-9 дБ.

### 4.3.3 Локализация места дефекта

Своевременное обнаружение места, в котором начинается разрушение металлических конструкций, позволяет принять профилактические меры и в ряде случаев устранить дефект.

Как известно, ультразвуковой метод зондирования позволяет выявить дефект и определить его расположение путем перемещения источника ультразвука и анализа уровня сигнала от пьезодатчиков, расположенных в разных местах исследуемых образцов.

Исследовалась возможность обнаружения дефекта сварного соединения СВЧ сенсором и определения местоположения этого дефекта. Для определения местоположения дефекта по методике профессора Капранова Б.И. [95], были выполнены эксперименты с перемещением мест установки ультразвукового излучателя, показанных на рисунок 4.9.

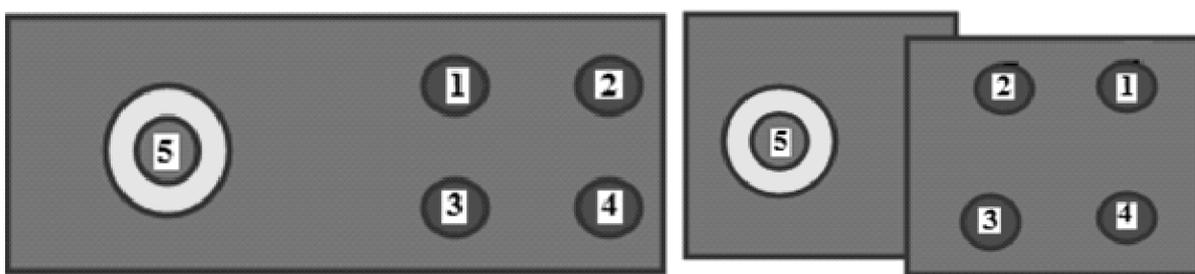


Рисунок 4.9 Места установки ультразвукового передатчика (1-4) и СВЧ сенсора (5) на образцах без дефекта и с дефектом

Для механического возбуждения образцов металла использовался ультразвуковой передатчик на контактном сенсоре марки МА400Е8R/S с рабочей частотой 44-53 кГц.

Испытывались два стальных образца, первый – без активных дефектов, второй имел дефект сварного шва, выявленный ранее ультразвуковым методом.

На образце без дефектов уровень выходного сигнала не выходил за пределы погрешности измерений, независимо от места установки ультразвукового излучателя и СВЧ сенсора.

На образце с дефектом с помощью СВЧ сенсора регистрировался сигнал, уровень которого зависел от места установки источника ультразвука.

Наибольшие показания СВЧ прибора получены при установке ультразвукового датчика в точках 2 (8 дБ) и 3 (10 дБ). Это объясняется расположением дефекта сварного шва рядом с точкой 3, в результате чего происходило изменение амплитуды ультразвукового воздействия на область дефекта, аналогично процессу изменения уровня сигнала при ультразвуковом методе зондирования.

Изменение показаний СВЧ прибора контроля при перемещении места установки ультразвукового излучателя позволяет приближенно определить место расположения дефекта.

#### **4.3.4 Восстановление активности образцов**

Одним из опасных видов разрушений является разрушение старых конструкций, не обнаруживаемых при небольших нагрузках на конструкцию.

Разрушения происходят из-за нарушений защитных покрытий, в местах сварки, «усталости» металла, локальных перегрузок конструкций и других процессов. Особенно опасными являются мелкие, «незначительные» дефекты, в том числе не обнаруженные при начале эксплуатации.

Из-за воздействия времени происходит снижение активности дефектов со временем, воспринимаемое как «залечивание» дефектов. При увеличении нагрузки на конструкции с подобными дефектами появляются «внезапные», катастрофические разрушения.

Основным методом предотвращения разрушений старых конструкций является капитальный ремонт с заменой несущих конструкций после определенного срока эксплуатации. Срок эксплуатации определяется на основе опыта, в том числе печального.

Для восстановления «активности» дефектов необходимо обеспечить значительное ударное воздействие на зону дефекта.

Было высказано теоретическое предположение, что «залечивание» дефектов возникает из-за перемещения дислокаций из точки своей концентрации в точки с меньшей концентрацией, что иногда наблюдалось

на практике. После теплового удара (нагрев с последующим охлаждением) дислокации возвращаются к прежним точкам своей концентрации. Активность дефектов должна восстанавливаться.

Автором совместно с С.А. Бричковым были проведены исследования эффекта восстановления активности дефектов в металлах путем нагрева и последующего быстрого охлаждения образцов [32].

Для экспериментального подтверждения возможности восстановления активности дефектов использовались образцы из различных металлов с дефектами, ранее обнаруженными СВЧ сенсором и после периода длительного хранения утратившими свойство активности. После длительного хранения образцов дефекты не обнаруживались ультразвуковым методом и СВЧ сенсором.

Поскольку эта гипотеза требовала своего подтверждения, была выполнена серия измерений на образцах из различных типов металла (магнитных, немагнитных). Решение сложной задачи восстановления активности образцов потребовало значительных усилий, в том числе теоретических обоснований обнаруженного эффекта.

Первая серия измерений проводилась на образцах без воздействия реактивации, вторая – после нагревания определенной точки (1,2,3,4) образца газовой горелкой до температуры 200-250°C и быстрого охлаждения проточной водой до температуры 20°C.

#### **Тепловые испытания алюминиевого бруска.**

Эксперимент был проведен на образце из алюминия, потерявшем свойство «активности». Старые испытания, проведенные год назад, указывали на явный дефект (сигнал превышал шум на 7-8 дБ). Предварительная проверка перед испытаниями прибором ДИАД показала отсутствие полезного сигнала. На рисунке 4.10 приведен спектр сигнала при отсутствии теплового воздействия, перед началом эксперимента.

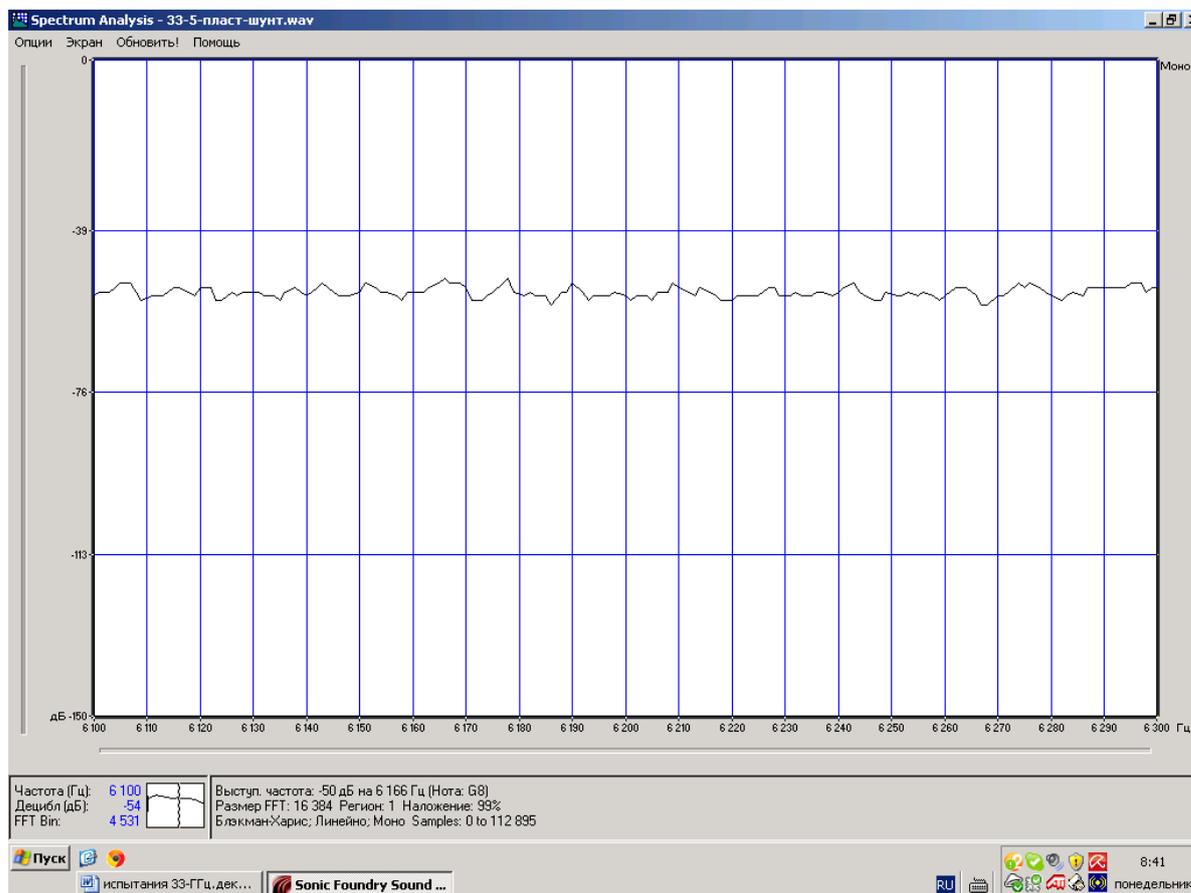


Рисунок 4.10 Спектр сигнала перед началом эксперимента

Уровень шума составляет минус 53,5 дБ/мвт.

С целью теплового воздействия на металлический объект (брусok алюминия с дефектом) выполнен нагрев горелкой ( $250^0$ ) с последующим быстрым охлаждением проточной водой.

После теплового воздействия появился сигнал на частоте гармоники ультразвука (40кГц), превышающий шум на 7,5-8 дБ. Уровень шума остался прежним (53,5 дБ).

На рисунке 4.11 показан вид зарегистрированного сигнала.

После остывания алюминиевого образца в течении 5 минут испытания были продолжены. Результаты испытаний показаны на рисунке 4.12. Уровень сигнала увеличился до 9,0-9,5дБ.

Увеличение уровня сигнала на 1,5- дБ относительно начала испытаний объясняется продолжением процесса остывания образца.

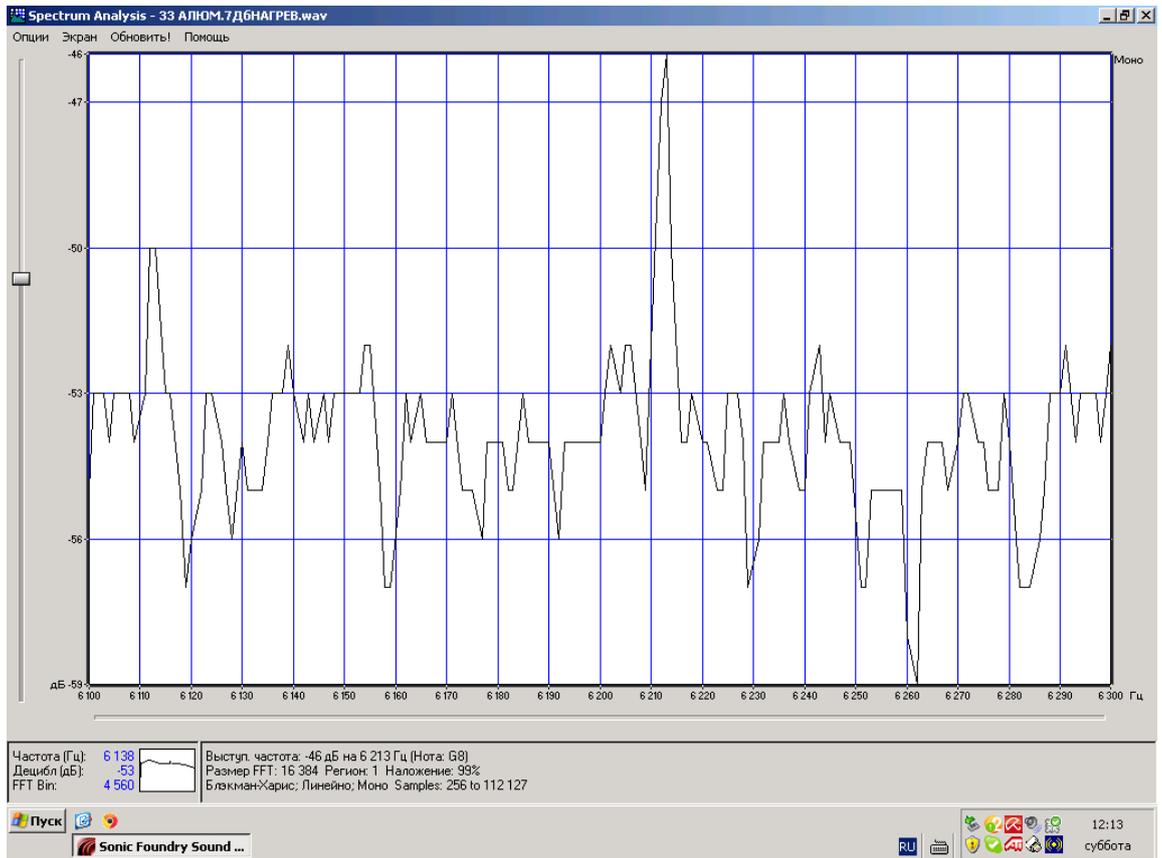


Рисунок 4.11 Спектр сигнала после теплового воздействия, На частоте 40кГц полезный сигнал выше уровня шума на 7,5-8 дБ

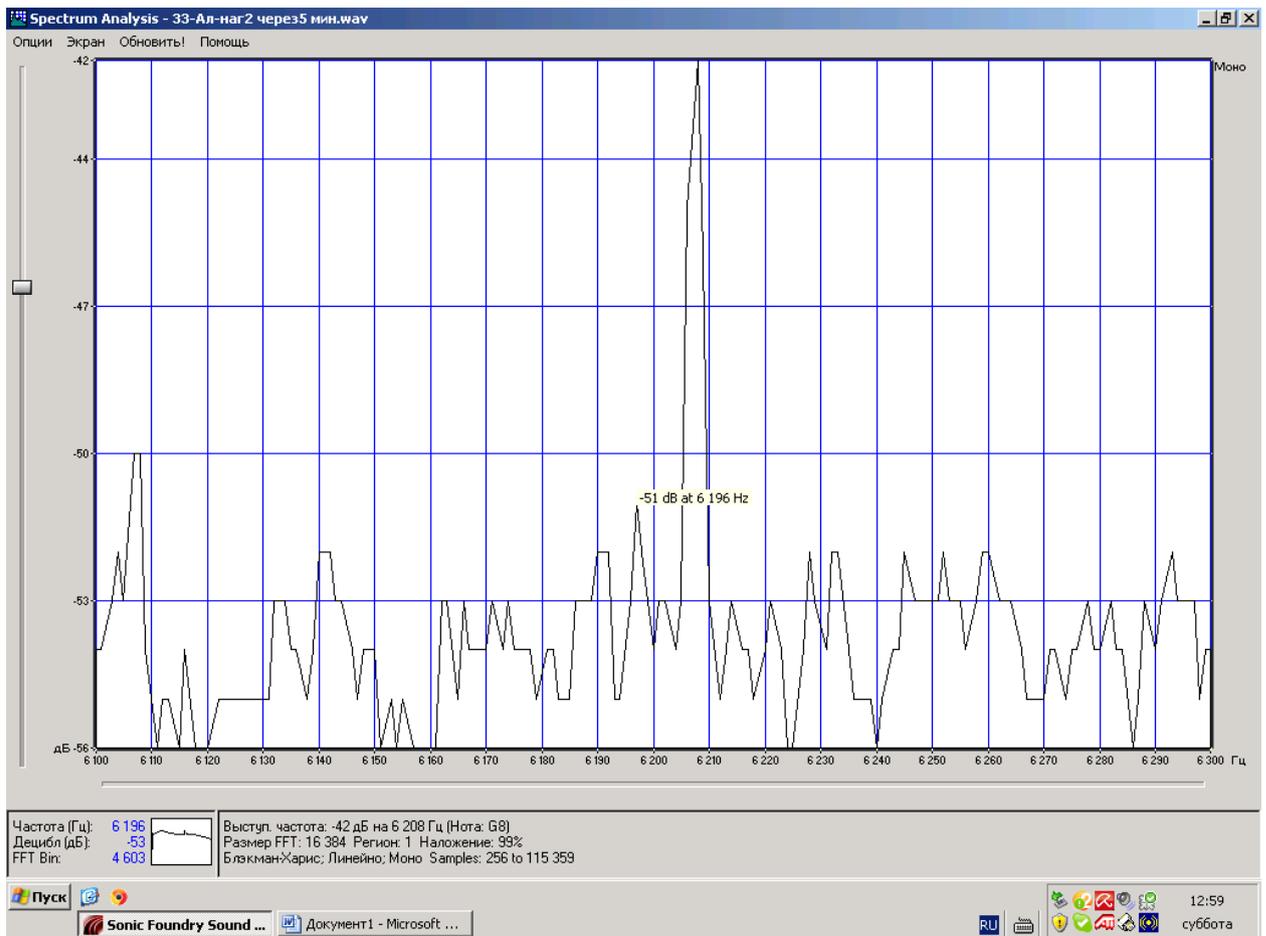


Рисунок 4.12. Спектр сигнала при тепловом воздействии, после остывания в течении 5 минут. Увеличение сигнала до 9,0 дБ

После 7 минут остывания испытания были продолжены, результаты показаны на рисунке 4.13.

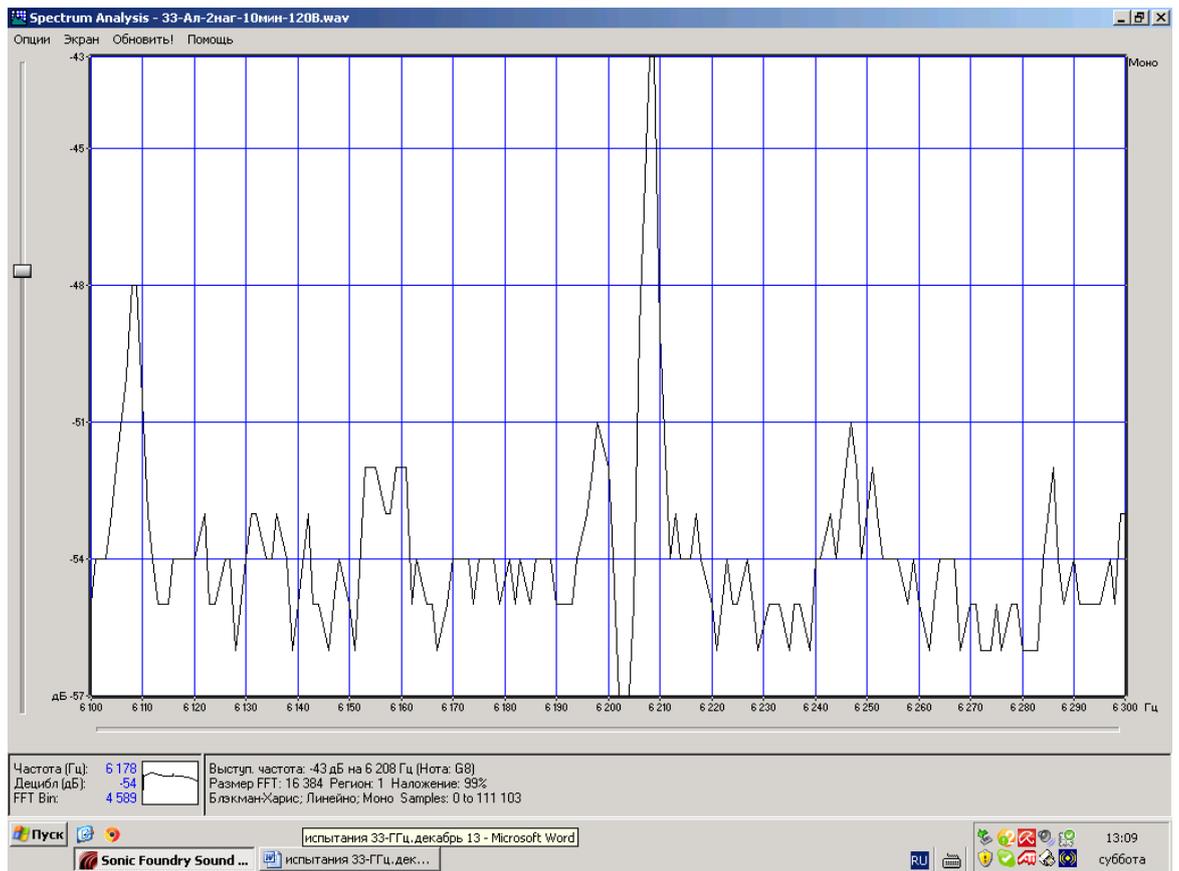


Рисунок 4.13. Спектр сигнала после теплового воздействия, остывание в течении 7 минут. Увеличение сигнала до 10 дБ

После остывания образца в течении 15 мин испытания были продолжены, результаты показаны на рисунке 4.14.

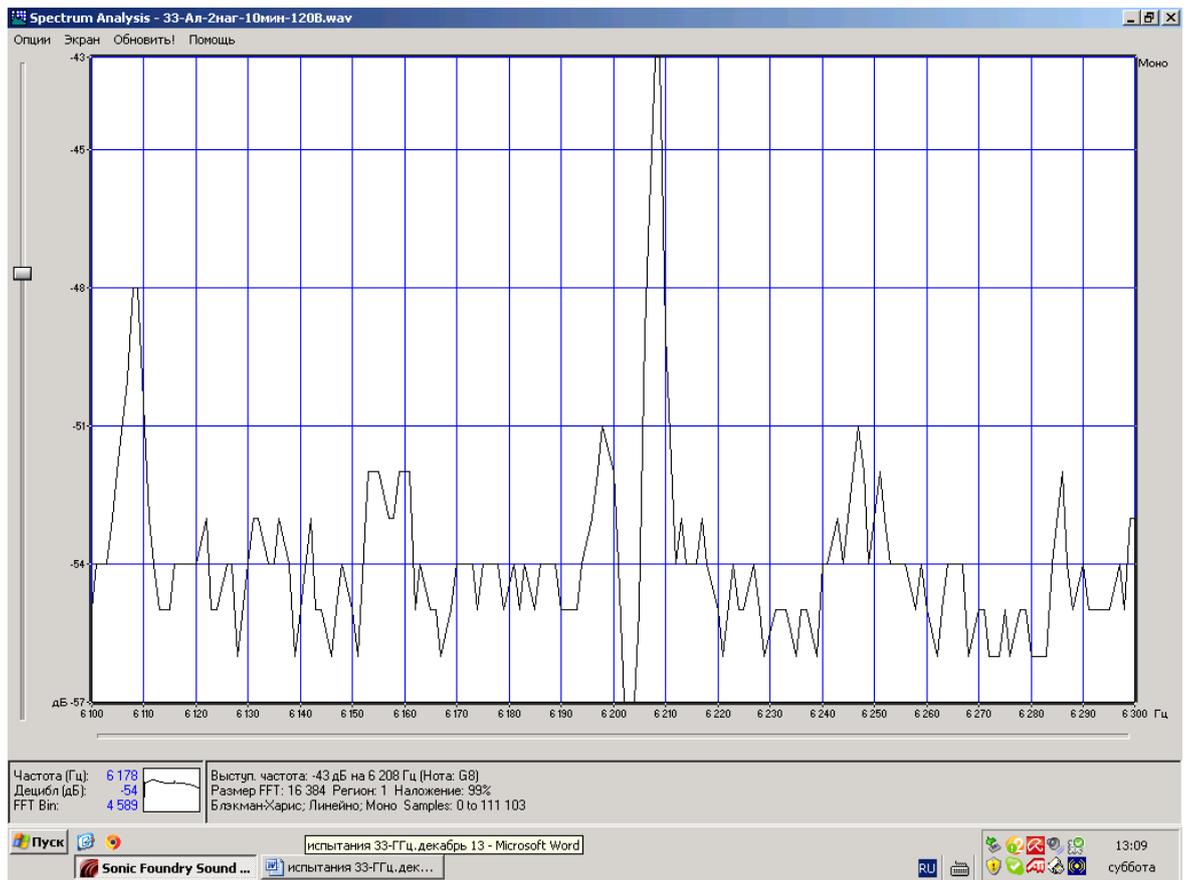


Рис.4.14. Спектр сигнала при тепловом воздействии, после остывания в течении 15 минут. Повторение прежнего уровня сигнала (10 дБ)

Результаты испытаний после остывание алюминиевого бруска в течении 25 минут показаны на рисунке 4.15.

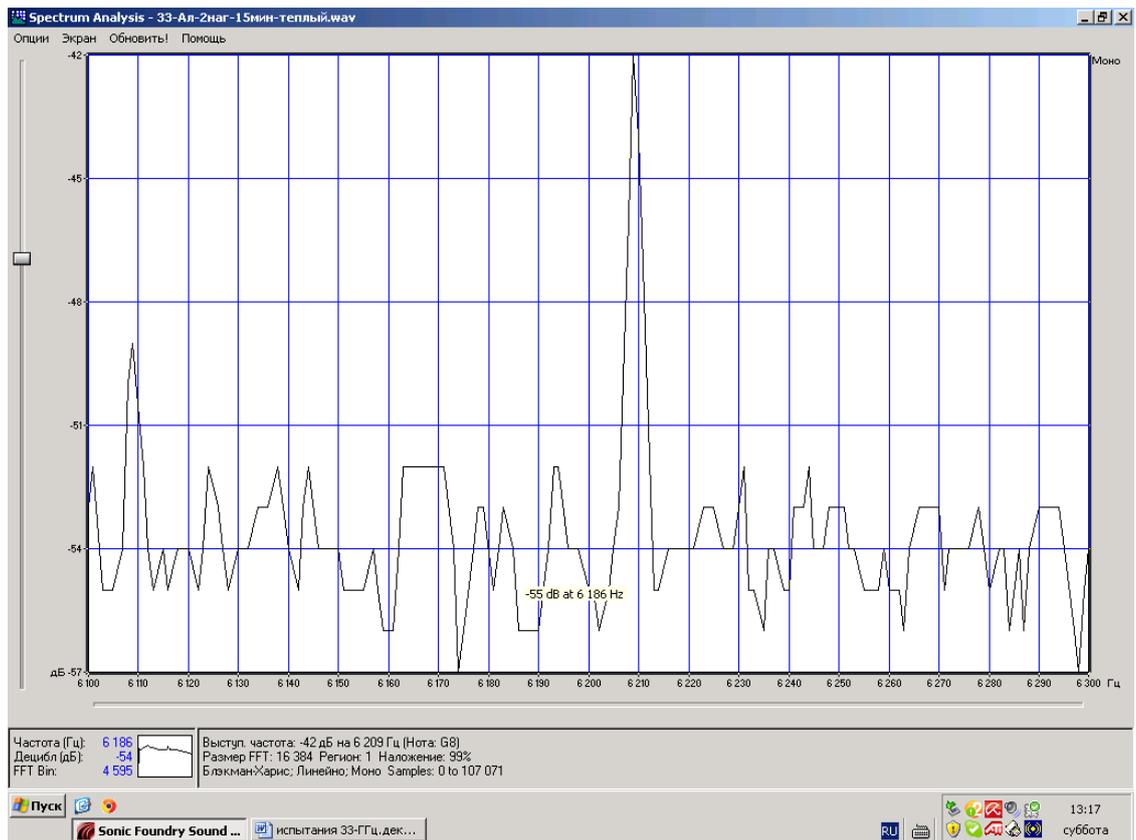


Рисунок 4.15. Спектр сигнала после теплового воздействия, остывание в течении 25 минут. Незначительные изменения уровня сигнала

Испытания были закончены после остывания образца в течении 60 минут, результаты испытания показаны на рисунке 4.16.

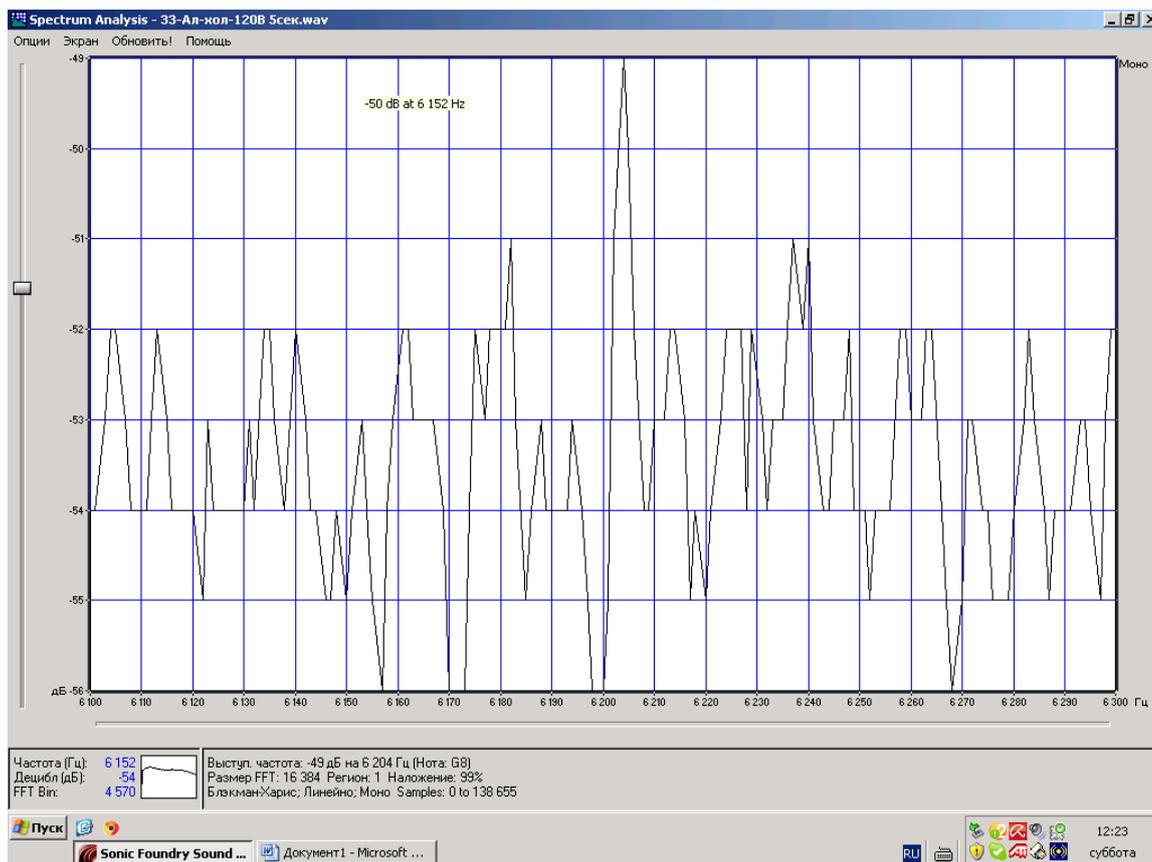


Рисунок 4.16. Спектр сигнала после теплового воздействия, остывание в течении 60 минут. Уровень сигнала не меняется.

В дальнейшем, в течении нескольких дней, уровень сигнала в пределах погрешности измерений (1,5 дБ) не изменялся, что свидетельствует о восстановлении активности образца и возможности обнаружения дефекта.

### **Восстановление активности стального образца**

Исследовался образец из стали Ст-45, толщиной 5мм, образец имел застарелый дефект в виде усталостной трещины.

Цель исследования образца, частично утратившего активность в результате длительного хранения – проверка степени повышения активности при тепловом нагреве и быстром охлаждении.

Сначала исследовался образец до нагрева, проводилась серия из 10 измерений для четырех мест установки источника ультразвука. После измерений образец нагревался до 200 градусов Цельсия и быстро охлаждался водой. Затем проводились повторные измерения, источник ультразвука устанавливался в те же точки.

Соответствующие усредненные результаты измерений мощности спектральной составляющей регистрируемого СВЧ сигнала на образце до применения реактивации и после реактивации 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 активность дефектов на образце после реактивации увеличились на 4-10 дБ. Наибольший эффект реактивации проявился при расположении источника ультразвука в точке 3, наиболее близко расположенной к области дефекта, после нагрева и охлаждения образца изменение уровня сигнала составило 10 дБ.

Затем была проведена серия измерений по исследованию динамики процесса восстановления активности по мере остывания образца. Измерения проводились на образце, утратившем свойство активности (дефект не обнаруживался ультразвуковым методом и с помощью СВЧ сенсора) после нагревания зоны предполагаемого дефекта газовой горелкой до температуры 200-250°С и последующего быстрого охлаждения проточной водой.

Испытания проводились на стальном образце (Ст4) толщиной 5 мм. Спектр сигнала сразу после нагрева показан на рисунке 4.17.

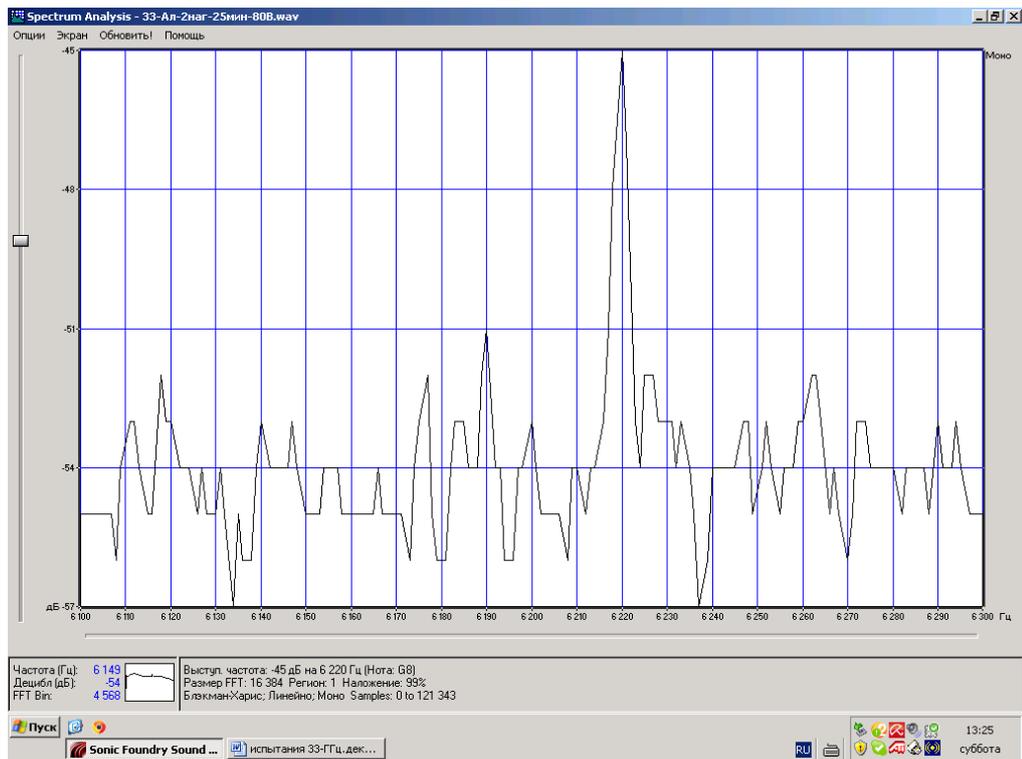


Рисунок 4.17. Спектр сигнала сразу после нагрева, на частоте гармоники ультразвука сигнал выше уровня шума на 8 дБ.

Повторные измерения проведены через пять минут после нагрева, спектр сигнала показан на рисунке 4.18.

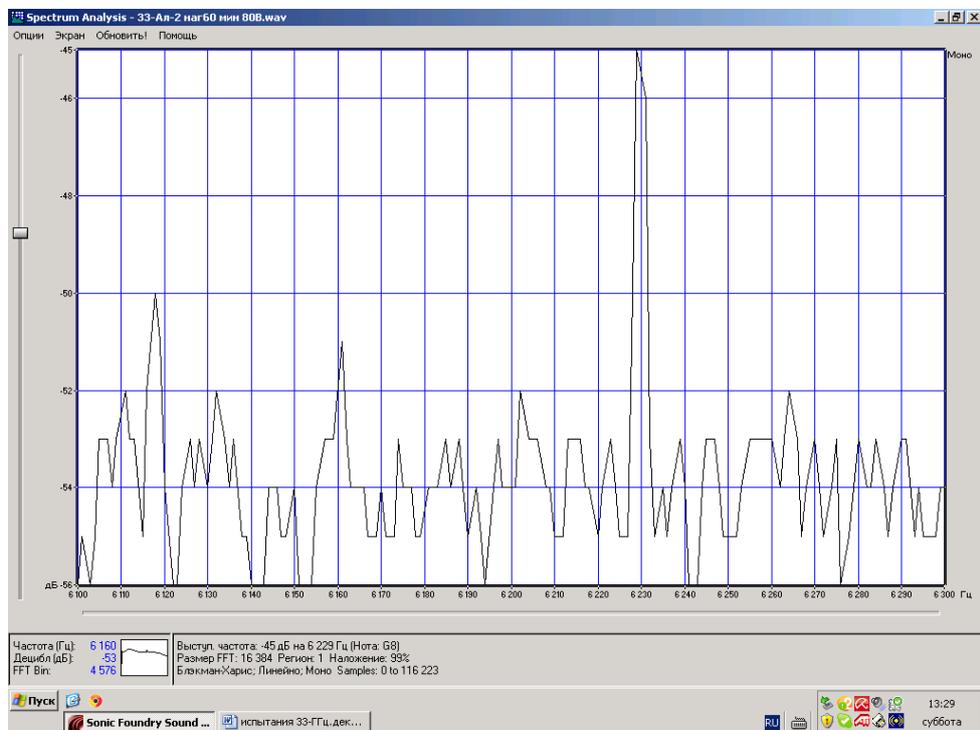


Рисунок 4.18. Спектр сигнала через 5 минут после нагрева. Максимальный уровень сигнала выше уровня шума на 12 дБ.

Наблюдается значительное, на 4 дБ, увеличение уровня сигнала.

После часа остывания проведены новые измерения, результат которых показан на рисунке 4.19.

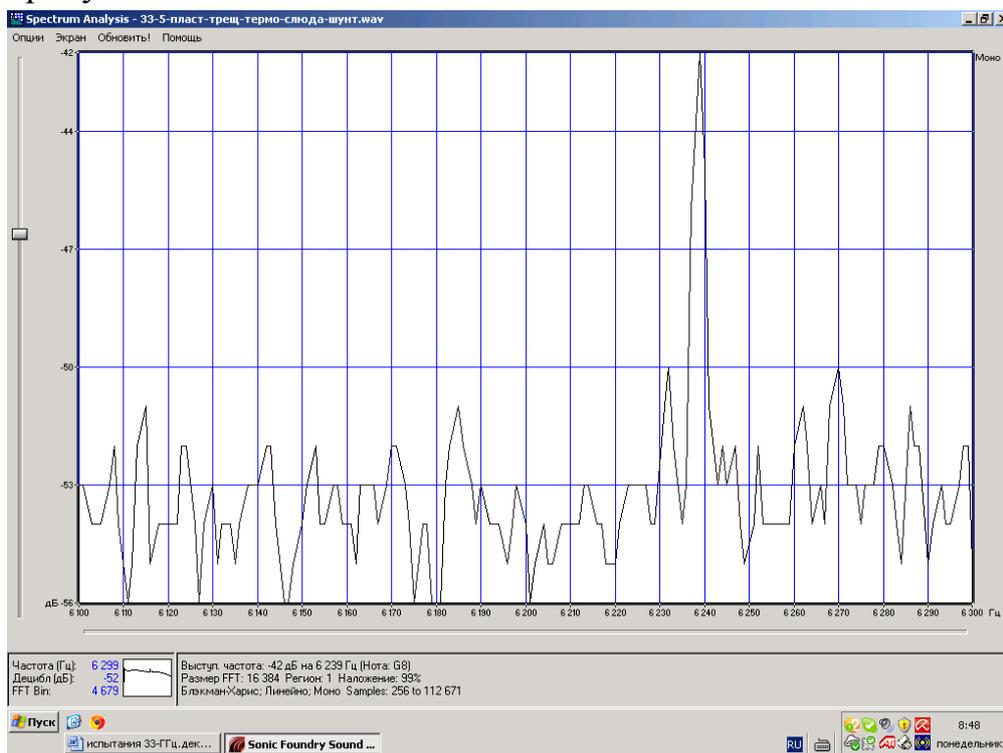


Рисунок 4.19 Спектр сигнала через час после нагрева. Максимальный уровень сигнала выше уровня шума на 10 дБ.

После остывания в течении часа, когда температура образца практически сравнялась с температурой среды, уровень сигнала уменьшился на 2 дБ и дальше оставался на этом уровне.

Далее был произведен повторный нагрев и охлаждение образца для определения возможности дальнейшего повышения активности дефекта, результат эксперимента показан на рисунке 4.20.

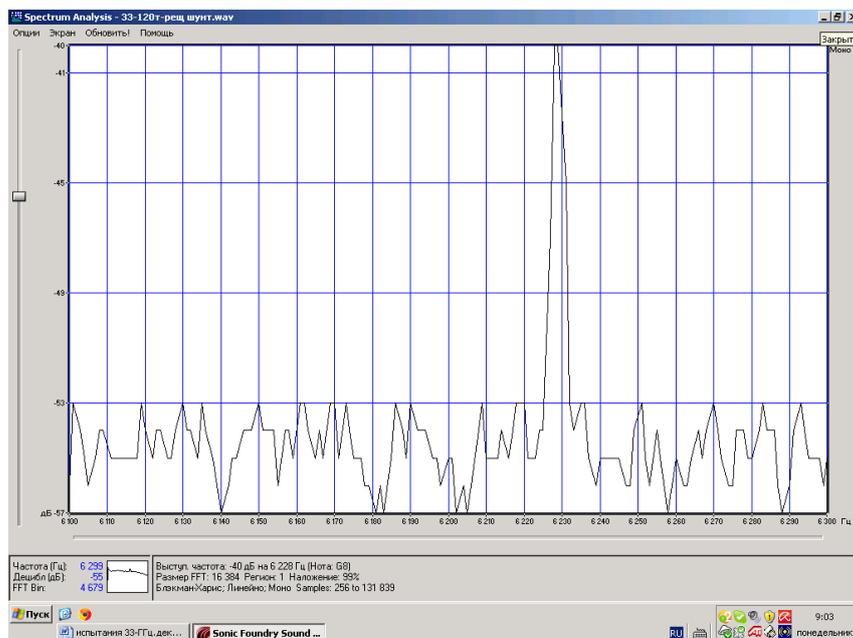


Рисунок 4.20 Спектр сигнала после повторного нагрева и охлаждения, через час после нагрева. Максимальный уровень сигнала выше уровня шума на 13 дБ

Повторный нагрев дал значительное увеличение уровня сигнала активность дефекта полностью восстановилась.

### **Выводы по результатам восстановления активности**

Дефекты металлов могут со временем снижать или терять активность и не обнаруживаться с помощью СВЧ сенсора. В результате проведенных исследований подтвержден эффект повышения уровня полезного сигнала для образцов из алюминия и стали. После нагрева образцов (до 120-200 градусов Цельсия) с последующим быстрым охлаждением на выходе СВЧ сенсора появляется сигнал, превышающий шум на 4-12 дБ, показывающий наличие дефекта.

Возможность восстановления активности дефектов позволяет проводить исследование элементов конструкции, длительное время находящихся в эксплуатации, с целью их повторного использования в случае отсутствия дефектов.

#### 4.3.5 Испытания на усталостную прочность бигармоническим ультразвуковым сигналом

С целью исследования процессов, происходящих в металле на границе упругой и пластической деформации металлов, была проведена серия испытаний при импульсном и при бигармоническом ультразвуковом воздействии на образцы.

Согласно программе испытаний, были проведены серии измерений при воздействии на образцы двухчастотным (бигармоническим) ультразвуковым сигналом частотой 47 и 107 кГц. Бигармонический сигнал формировался подачей одинаковых амплитуд (110-120 Вольт) на ультразвуковые излучатели, нагрузка на образцы выходе плавно увеличивалась. При наличии упругой деформации образца, на выходе СВЧ сенсора появлялся сигнал на частотах 47 и 107 кГц, практически при одной и той же нагрузке, на обеих частотах.

При увеличении нагрузки образцов и возникновении пластической деформации на выходе СВЧ сенсора в спектре сигнала, кроме частот 107 и 47 кГц появились новые составляющие (13, 60, 28,...кГц), которые являются комбинациями подаваемых частот. Вид сигнала показан на рисунке 4.21.

Сумма полученных комбинационных составляющих значительно (на 6дБ) превышает уровень сигналов.

Нелинейные преобразования спектра при фазовой модуляции хорошо известны [96]. В отличии от амплитудных методов модуляции, для которых характерно появление гармоник третьего порядка, появление суммарно-разностных гармоник характеризует именно фазовый метод модуляции.

Обнаруженный эффект на границе упругой и пластической деформации металлов требует дополнительного изучения с целью оценки предельной нагрузочной способности образцов.

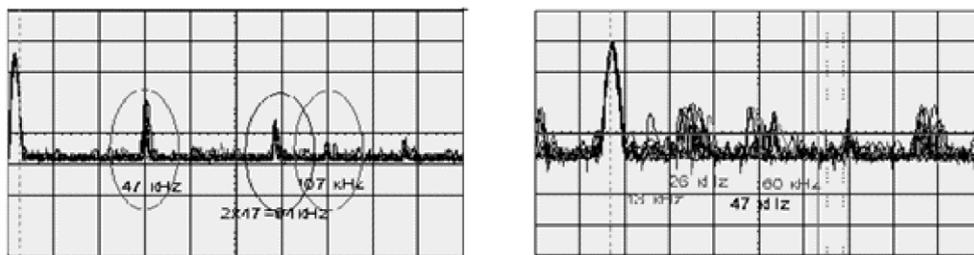


Рисунок 4.21. Форма спектра при двухсигнальном ультразвуковом воздействии в начале (контроль контактным сенсором). Появление комбинационных составляющих для СВЧ сенсора

#### 4.4 Исследование дефектов различных объектов СВЧ методом.

Новый прибор разрабатывался с учетом удобства работы и унификации для проведения испытаний в различных сферах применения, обнаружения различных видов дефектов. С помощью этого прибора были исследованы образцы стали Ст45, Ст4, специальной стали для железнодорожных колес и колес локомотивов, алюминия. Проведены испытания на изгиб, в условиях медленного растяжения на разрывных машинах и испытания без нагружения конструкций.

Цель проведенных исследований – продемонстрировать возможности применения бесконтактного СВЧ сенсора для поиска дефектов металлов специалистам в различных областях. При исследованиях проводилось сравнение возможностей предлагаемого бесконтактного сенсора с контактными, используемыми при испытаниях методом Акустической Эмиссии.

Были проведены серии испытаний ДИАД на железнодорожных колесах [6], циркониевых трубках диаметром 9 мм, сварных швах [42].

Часть различных видов дефектов, которые уверенно обнаруживались прибором, показаны на рисунках 4.22 – 4.26



Рисунок 4.22. Дефект обода колеса

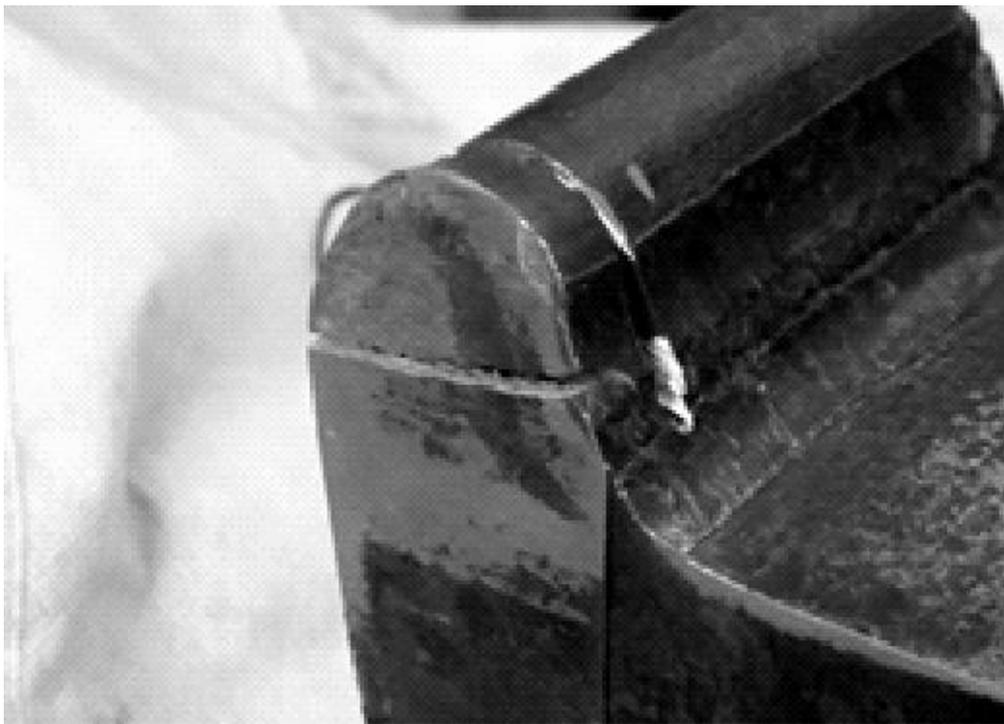


Рисунок 4.23. Искусственные дефекты

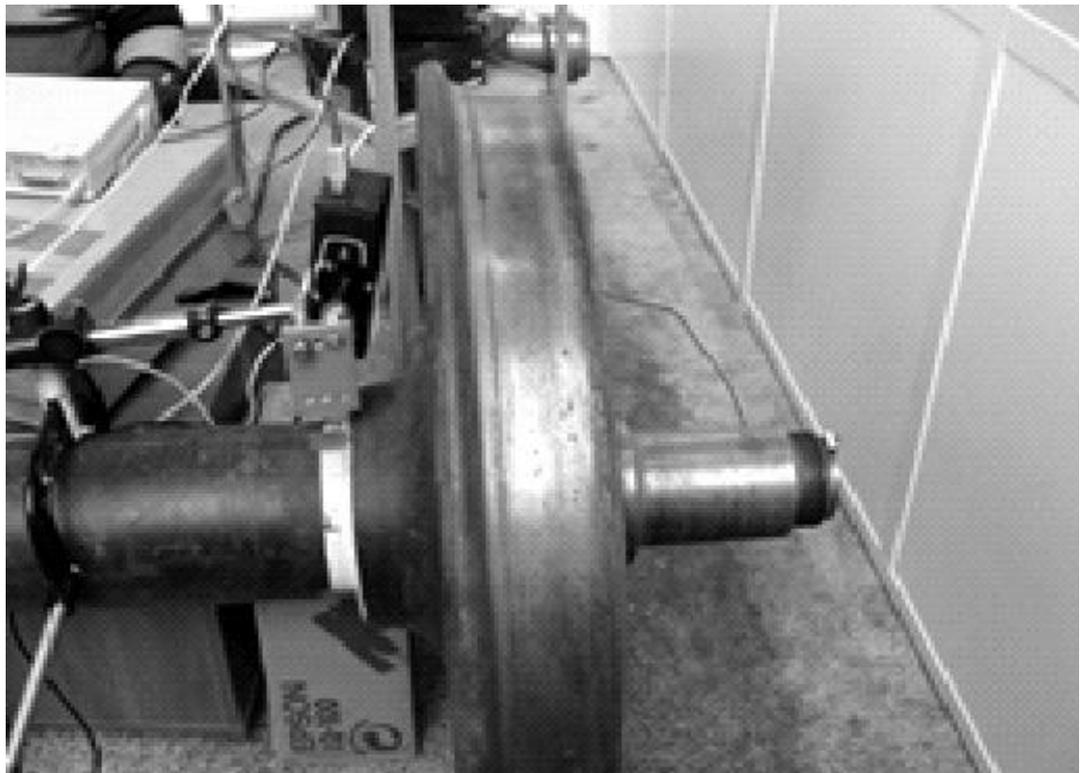


Рисунок 4.24.Прокручивание диска в ступице

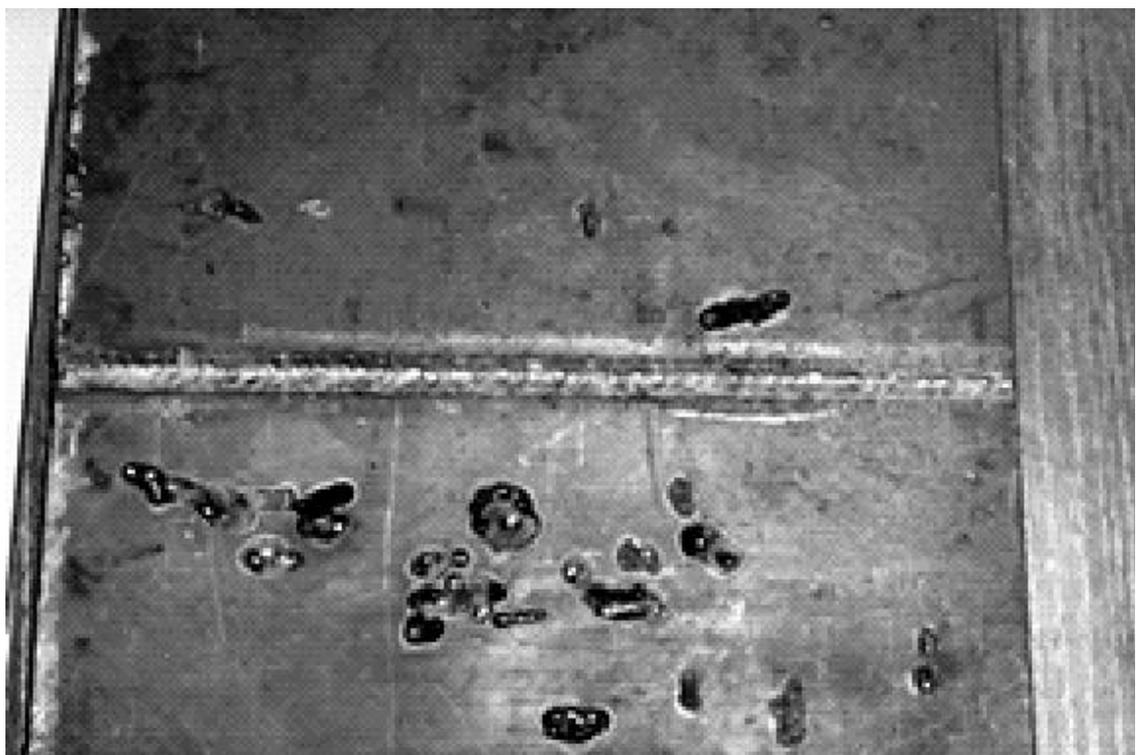


Рисунок 4.25 Внутренний дефект сварного соединения

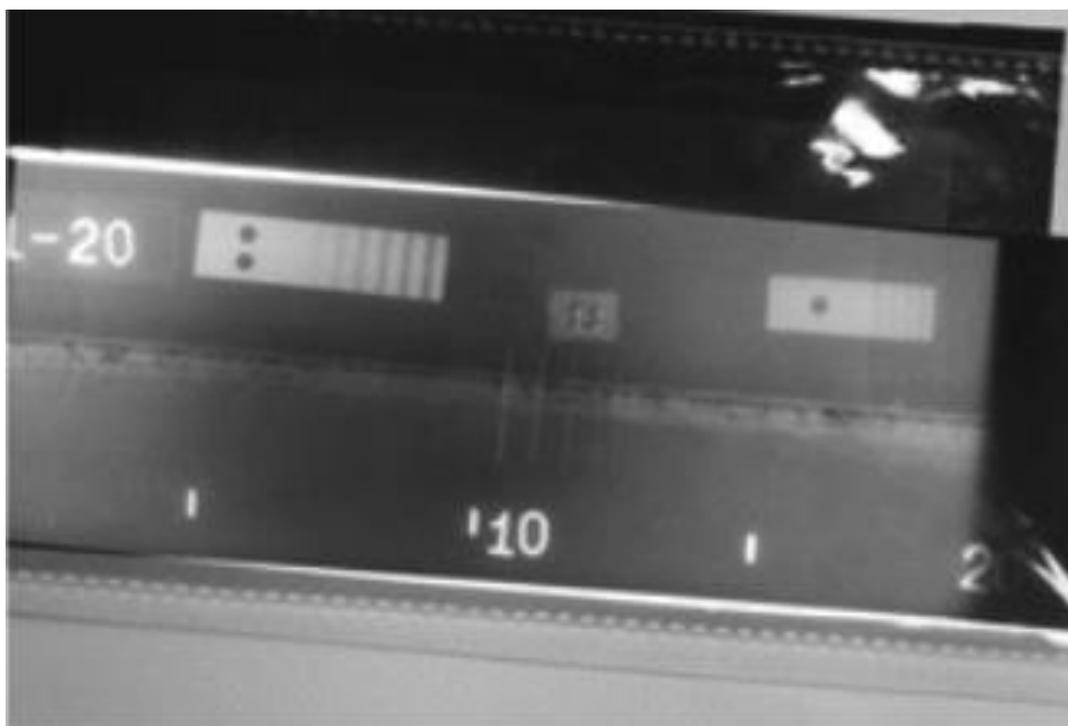


Рисунок 4.26. Рентгеновский снимок дефектов сварного соединения

Большое внимание уделялось внутренним дефектам, которые не удавалось обнаруживать методом АЭ. На рисунке 4.25 показан дефект, который можно обнаружить только при использовании рентгеновского излучения. На разработанном приборе этот дефект был уверенно обнаружен[42], показав наличие гармоник ультразвука, на 14 дБ превышающий уровень шума.

Во всех испытаниях новый метод с использованием СВЧ сенсора продемонстрировал свое преимущество – высокую чувствительность при отсутствии контакта с поверхностью, высокий динамический диапазон (выше 55 дБ) регистрируемых сигналов.

#### 4.5 Выводы по четвертой главе

Выполненные экспериментальные исследования подтвердили возможности обнаружения начального процесса усталостного разрушения металлов дистанционно, с помощью СВЧ излучения.

При исследованиях различных образцов было обнаружено несколько

новых, перспективных особенностей регистрируемых сигналов:

- благодаря высокой чувствительности прибор позволяет обнаруживать наличие напряженностей внутри металла при упругой деформации, еще до начала пластических деформаций;
- прибор работает как чувствительный сенсор при испытаниях нагруженных образцов и образцов без нагрузки, без применения дополнительных механических усилий;
- время регистрации сигналов при наличии дефектов в несколько раз (2-1000) меньше времени индикации традиционными методами ультразвуковой дефектоскопии и акустической эмиссии.

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

При испытаниях был обнаружен известный ранее эффект [96] появления на выходе СВЧ сенсора комбинационных составляющих при бигармоническом воздействии, который полностью отсутствует при индицировании контактным сенсором, что доказывает регистрацию не амплитудных, но фазовых составляющих отраженного сигнала. Эффект резкого увеличения амплитуды комбинационных составляющих при переходе от упругой к пластической деформации возможно использовать для оценки предельной индивидуальной нагрузки на образцы.

## **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. В основу прибора положена регистрация изменений поверхностной проводимости, возникающей при взаимодействии ультразвукового излучения с дефектами металлов с помощью СВЧ зондирования.

Получены следующие новые практические результаты:

1. Использование СВЧ зондирования позволило существенно повысить чувствительность ультразвукового метода вплоть до определения нарушений в кристаллических решетках.

2. Обнаружение наличия механических напряженностей внутри металлов и локализация мест напряженностей под нагрузками позволяет оптимизировать размеры конструкций, уменьшать их габариты, вес и стоимость.

3. Разработаны, практически проверены и используются приборы для бесконтактного обнаружения динамических дефектов металла на основе СВЧ сенсора с использованием контактного возбуждения ультразвуковых волн

В результате проведенных исследований получены новые научные результаты:

1. Обнаружен и исследован эффект высокой чувствительности бесконтактных СВЧ сенсоров при воздействии ультразвуком в области расположения дефектов исследуемых 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 дефекта с ультразвуком мощностью 10-20 Вт/см<sup>2</sup> 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 восстановленной активности дефектов.

Разработка прибора явилась результатом участия автора в государственных программах «Разработка СВЧ сенсора для контроля параметров акустической эмиссии для объектов министерства энергетики» (1992-1998 г), и в федеральной программе «Старт 10» (2011 г) [24]

## Список литературы

1. Ivanov V.I. About criteria of the estimation degree to dangers of the defect on parameter of the acoustic emission/ Oxen SP., Ripples A.N. 1985, 2, P. 62- 65
2. Ant V.V. Study of the structure signal to acoustic emission for the reason increasing of accuracy to localizations defect, / Ant V.V, Ant M.V., Beher A.. // Works russian scientific conferences "Nerazrushayuschiy checking and diagnostics" SPB 2002.- Kiev, P. 67-70
3. Ультразвук. Глав.ред. И.П. Голямина.// -М.-/Советская энциклопедия, - 1970,400
4. Лапшин Б.М. Овчинников А.Л., Применение акустической эмиссии для контроля прохождения по магистральным нефтепроводам скребков и поршней /Контроль. Диагностика, №9, 2013, с.126-128
5. LaserUltrasound ,  
<http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/physics/research/ultra/researchlase/r/> (дата обращения 12.09.2017)
6. Свинолупов Ю.Г., Кулешов В.К., Чухланцева М.М., Учайкина Е.С., Корнев В.А./АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПОВЕРОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ЭЛЕМЕНТАМИ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ//Тезисы докладов.- Первая Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция по инновациям в неразрушающем контроле «SIBTEST-2011», озеро АЯ.- 25 июля 2011 г.
7. David W. Blodgett ,Laser-Based Ultrasonics: Applications at APL/ David W. Blodgett and Kevin C. Baldwi  
<http://techdigest.jhuapl.edu/TD/td2601/Blodgett.pdf/,2006>. (дата обращения 12.09.2017)
8. Волковец А.И., Радиоволновый бесконтактный метод измерения параметров движения и вибраций Волковец А.И., Руденко Д.Ф, Гусинский А.В, Кострикин// доклады БГУИР, Минск, 2007, с.58-64.

9. Руденко Д.Ф., Тезисы докладов II МНК по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения/ Руденко Д.Ф., Волковец А.И., Гусинский А.В.,// "MILEX 2005". Минск, 18–19 мая 2005 г. С. 103–104
10. Misra A. theoretical model for the electromagnetic radiation emission during plastic deformation and crack propagation in metallic materials/ Misra A., Chandra Prasad R., Vishal Singh Chauhan V. and Bodduluru Srilakshmi [International Journal of Fracture](#)/Springer Netherlands/[Volume 145, Number 2, Mai 2007 г.](#),P. 99-121
11. Misra A, Some basic aspects of electromagnetic radiation during crack propagation in metals./ Misra A., & Kumar A./ Intern. J. Fracture, V. 127, No. 4. 2004, P.387-401.  
<http://dx.doi.org/10.1023/B:FRAC.0000037676.32062.cb>(дата обращения 3.07.2016)
12. Misra, A., Electromagnetic radiation characteristics during fatigue crack propagation and failure/ Misra, A. and Gosh, S.,//, Appl. Phys., 23,P. 387–390, 1980.
13. Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П., Чахлов В.Л., и др. Электромагнитная эмиссия диэлектрических материалов при статическом и динамическом нагружении //Журнал технической физики, 1994. Т. 64. № 4. С. 57
14. Mori, Y. Electromagnetic emission and AE Kaiser effect for estimating rock in-situ stress / Mori, Y. and Obata, Y // Report of the Research Institute of Industrial Technology.- Nipon University, 2008.
15. Radar Doppler, <http://ebookbrowse.net/radardoppler-pdf-d429387559> (дата обращения 14.04.2017)
16. Классическая Электродинамика. Бредов М.М., Румянцев В.В., Топтыгин И.Н./под ред. И.Н.Топтыгина.- М.- Наука, 1985 . 400с
17. Ghodgaonkar DK,. Microwave nondestructive testing of coatings and paints using free-space microwave measurement system/ Ghodgaonkar DK, HJ Hamzah.// Browse Conference Publications// Published in Telecommunication Technology, 2003. P.71.

18. -Kerouedan J, Detection of micro-cracks on metal surfaces using near field microwave dual-behavior resonator filters / Kerouedan J, Queffelec P // Measurement Science and Technology. 2008 Vol. 19(10). P.54.
19. Ju Y. NDE of Closed Fatigue Crack on the Metal Surface by Microwaves Ed/ Ju Y, M. Saka,D. Luo// Department of Mechanical Engineering, Tohoku University, Aoba 01, Aramaki, Aoba-ku, Sendai Japan. 2000 , P. 980-8579.
20. Kim Y, Microwave sub-surface imaging technology for damage detection of concrete structures, / Kim Y, Jofre L, //Journal of Engineering Mechanics/ DFF, FMQ, SCE 130. 2004. P.1298-1303.
21. Мищенко С. В., Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля материалов , / Мищенко С. В, . Малков Н. А. учебное пособие, Тамбов, ТГТУ, 2003, 128 с
- 22.Korannt A.J. Fatigue crack analysis using acoustic mission/IRJET,volume:04,jan-2017, [www.irjet.net](http://www.irjet.net)
- 23.Gholizadeh S.,Areview of the application of acousticvemission technique in engineering/Structural Engineering and Mechanics, Vol. 54,No 6 2015 pp.1075-1095.
- 24.ОТЧЕТ о выполнении НИОКР по теме: "Разработка, исследование, испытания дистанционных индикаторов активных дефектов (ДИАД) на образцах и железнодорожных колесах в статическом режиме."(государственный контракт №7901р/11410 от 15.04.2010) (заключительный),/ Регистрационный № 01201058172, Томск 2011, 52 с.
- 25.Васильев Б.В., Теорема вириала и некоторые свойства электронного газа в металлах /. Васильев Б.В., Любошиц В.Л.//(Сессия РАН 23.02.1994 г.)/ Успехи Физических Наук, 4,(164), 1994, С. 367-374
- 26.Капанов В.И., AvdochenkoB.I. Sutorikhin V.A., Investigation of the remote experiments on the Gorbunov effect /IJOER, Vol.3, Sep. 2017 pp. 67-89
- 27.Горбунов В.И., Бесконтактный преобразователь акустической эмиссии / Горбунов В.И., Суторихин В.А., и др, Ред. журнала " Известия ВУЗов".- Томск 1995.- Деп. в ВИНТИ 26.06.95 №1868-Б95.

28. Горбунов В.И., Суторихин В.А. Возможность дефектоскопии металлических деталей СВЧ полем // Техническая акустика. 2010. <http://www.ejta.org> Т. 10. С. 16.
29. [СПОСОБ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В МЕТАЛЛАХ](#) Горбунов В.И., Суторихин В.А., Устинов Б.Ф. /патент на изобретение RUS 2372615, 22.07.2008
30. [УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АКТИВНЫХ ДЕФЕКТОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЯХ](#). Суторихин В.А., Устинов Б.Ф./ патент на полезную модель RUS 81577 04.08.2008
31. [УСТРОЙСТВО ПРЕЦИЗИОННОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ](#). Бричков С.А., Суторихин В.А. патент на полезную модель RUS 85390 01.12.2008
32. Суторихин В.А. Использование анализаторов спектра и микроволнового сенсора для определения усталостных трещин // Международная Научная Интернет-Конференция « Спектрометрические методы анализа». Казань, 2013. С. 106-118.
33. Суторихин В.А. Необычное взаимодействие ультразвука с дефектами металлов / Международная н.т. конференция « Современные тенденции в образовании и науке», часть 10. Тамбов 2014. с.138-139.
34. Суторихин В.А. Радар Доплера определяет дефекты металлических объектов / Материалы VII международной н-п конференции: // « Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия». №7, Часть 3, Новосибирск, 2014. с.88-91.
35. Суторихин В.А. Эффект Горбунова / Итоги Международного конкурса научного представления «Наукоград»!, Номинация: // "Креативная работа года", 3 место, 2014 г.
36. Суторихин В.А. Дефектоскоп металлов на основе открытия / Межотраслевой институт «Наука и образование» // Ежемесячный научный журнал № 19 5-6.02.2016, с.35-37.

37. Gorbunov V. I. Microwave Nondestructive Testing Method /. Gorbunov V. I., Sutorikhin V. A // Applied Physics Research, February 2012. Vol. 4. No. 1. P. 206-210
38. Sutorikhin V. Sophisticated Microwave Nondestructive Testing Method for Metals // Applied Physics Research., 2012. Vol. 4, No. 4. P. 56- 60.
39. Sutorikhin V. A. The Usage of the Microwave Crack Detector for Fatigue Cracks Detection//. Applied Physics Research, 2013; Vol. 5, No. 5, P. 60-66.
40. Sutorichin V, Dopler Radar in Crack Testing /. Sutorichin V., Brichkov S // British Journal of Applied Science & Technology, 2014, 4(23), BJASt/10159 P. 3315-3321
41. Sutorikhin V. A. The Effect Gorbunov In Practice /. Sutorikhin V. A., Shchedrivyi K. V // Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST), October - 2015, Vol. 2 Issue 10, P. 2826-2829
42. Капранов В., The Doppler Detection Fault / Капранов В., Sutorikhin V // Physical Science International Journal, SCIENCE DOMAIN international [www.sciencedomain.org](http://www.sciencedomain.org). 2017, 13(1): 1-5, Article no.PSIJ.30562 , P .5
43. Капранов Б.И., Суторихин В.А. Теоретические ограничения по измерению сигналов Акустической Эмиссии радаром Доплера // NORWEGIAN JOURNAL OF DEVELOPMENT OF THE INTERNATIONAL SCIENCE, 2017 . P.23-26
44. Классическая теория электропроводности металлов П. Друде/лекции Пермского НИПУ/сборник лекций/ [studfiles.net](http://studfiles.net) (время обращения 29.03.2015)
45. Tsifrovyie-datchiki/<https://zetlab.com/shop/tsifrovyie-datchiki/tsifrovyie-ustroystva-semeystva-zetsensor> (дата обращения 2.06.2015)
46. Шевченко В. В., Поверхностные электромагнитные волны на плоских границах электропроводящих сред с высокой проводимостью, Волны Ценака. //Журнал радиоэлектроники №7, - 2013.

47. Мартинсон Л.К., Методические указания к решению задач по курсу общей физики /раздел Квантовая статистика Ферми-Дирака, Электронный газ / . Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В. -//М.-МГТУ Н.Э.Баумана, 2004, 14 с.
48. Бадалян В. Г. Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов/ Бадалян В. Г. , Базулин Е. Г., Вовилкин А. Х. и др. / Под. ред. А. Х. Вовилкина. – М.- Машиностроение.- 2008. С. 368
49. Kim Y, Microwave sub-surface imaging technology for damage detection of concrete structures, / Kim Y, Jofre L, //Journal of Engineering Mechanics/ DFF, FMQ, SCE 130. 2004. P.1298-1303.
50. Писарев, Л. Т., Распространение поверхностных акустических волн в металлах, автореферат кандидатской диссертации по специальности ВАК 01.04.07, Донецк, 1984г, с.45
51. Азбель М.Я. Синхротронный резонанс на поверхности металла /. Азбель М.Я. и Канер Э.А. //ЖЭТФ, № 32 ,1956, С. 896.
52. Shubnikov-de Haas Effect ,  
<http://www.lanl.gov/orgs/mpa/nhmfl/users/pages/Shubnikov.htm>  
(дата обращения 6.04.2017)
53. Циклотронный резонанс <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/120/968.htm>/(дата обращения 12.06.2014)
54. Parmenter R. H., The acousto-electric effect, "Phys. Rev.", 1953, v. 89, № 5, P. 990
55. Гальперин Ю. М., Гуревич В. Л., Акустоэлектроника полупроводников и металлов, М., 1978.
56. Абрикосов А.А. Основы теории металлов.// М.- Наука.- 1987. 340 с.
57. Tupikin, Ph.D, Thermoelectric method to control the accumulation of damage in the metal at high-cycle fatigue, the example of aluminum topic dissertations on 05/02/11 Tupikin, Ph.D НАС,., 2011
58. Зуев Л.Б. Физика электропластичности щелочно-галлоидных кристаллов.// Новосибирск.- Наука.- 1990. 120 с.
59. Гегузин Я.Е. Очерки о диффузии в кристаллах//. М.- Наука.- 1970. 180 с.

60. Громов В.Е. Электростимулированная пластичность металлов и сплавов/ Громов В.Е. , Зуев Л.Б., Козлов Э.В., Целлермаер В.Я.// М.- Недра.- 1996. 270 с
61. Зуев Л.Б. Подвижность дислокаций в монокристаллах Zn при действии импульсов тока/ Зуев Л.Б, Громов В.Е., Курилов В.Ф. // Докл. АН СССР. 1978. Т. 239, С. 84-85.
62. Гегузин Я.Е. Живой кристалл.// М.- Наука.- 1981. 192 с.
63. Спицын В.И. Электропластическая деформация металлов/ Спицын В.И. , Троицкий //О.А.- М.- Наука.- 1985. 160 с
64. Лифшиц И.М. Электронная теория металлов /Лифшиц И.М, Азбель М.Я., Каганов М.И.- Электронная теория металлов.- М.- Наука, 1971.
65. Орлов А.Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах.// М.- Высш. Шк.- 1983. 144 с.
66. Крик олова /<http://chemijoste-lt.enacademic.com/4725> /, akusticheskaya-emissiya./ <http://www.zetlab.ru/support/publication/-/>режим доступа свободный
67. Трипалин А. Акустическая эмиссия. Физикомеханические аспекты./ Трипалин А. С Буйло СИ. Изд. Ростовского университета 1996. 160 с.
68. Плужникова Т. Н., Стимулирование залечивания микротрещин в ионных кристаллах воздействием рентгеновского излучения / Плужникова Т. Н.,Тялин Ю. И.,Чиванов А. В.//Вестник Тамбовского университета.- Серия: Естественные и технические науки.-№ 1, том 7, 2002
69. Кулешов В.Н. Генерирование колебаний и формирование радиосигналов/ Кулешов В.Н., Удалов Н.Н., Богачев В.М. и др. - М.- МЭИ, 2008. — 416 с.
70. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.- 1986.
71. Гуляев Ю.В., Распространение поверхностных акустических волн в периодических структурах, /Ю. В. Гуляев, В. П. Плесский.- УФН, Том 157, вып. 1, 1989, 126 с

- 72.Ландау Л.Д., Электродинамика сплошных сред. / Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. // М.- Наука.- 1982.
- 73.РАСЧЕТ ОБЪЕМА ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФЕКТА ЭФФЕКТА ГОРБУНОВА ,Суторихин В.А., Авдоченко Б.И. Евразийское Научное Объединение. 2018. Т. 1. № 6 (40). С. 45-49.
- 74.Горбунов В.И /Дистанционный преобразователь акустической эмиссии/ Горбунов В.И., Суторихин В.А., и др. Ред. журнала " Известия ВУЗов".- Томск 1995.- Деп. в ВИНТИ 26.06.95 №1869-Б95. 4 с.6
- 75.Горбунов В.И. Использование дистанционного СВЧ преобразователя акустической эмиссии при контроле качества сварных швов/ Горбунов В.И., Суторихин В.А./Заводская лаборатория.- Диагностика материалов. №10.том 65, 1999 С.36-38.
- 76.Горбунов В.И. Возможности контроля предела упругих деформаций СВЧ методом./ Горбунов В.И., Суторихин В.А./ Дефектоскопия. №7, 1999 С.75-80
- 77.Пустовойт В. И. Взаимодействие электронных потоков с упругими волнами решетки// "УФН", 1969, т. 97, в. 2, с. 257.
- 78.Гуревич В. Л., Теория акустических свойств пьезоэлектрических полупроводников// "ФТП", 1968, т. 2, С. 1557
- 79.Суторихин В.А. «Эффект Горбунова» расширил возможности акустической эмиссии / Международный научный журнал Scientia, техника,№1, 2016, С.19,20.
- 80.Гуревич В. Л., Теория акустических свойств пьезоэлектрических полупроводников// "ФТП", 1968, т. 2, С. 1557
- 81.Математический энциклопедический словарь. / Гл. ред. Ю.В. Прохоров//Ред. кол.: С.И. Адян, Н.С. Бахвалов, В.И. Битюцков и др. - М.- Сов. энциклопедия.-1988. - 847 с.
82. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. -2-е изд., перераб и доп, М., Высшая школа,1988, 448с.
- <http://www.findpatent.ru/patent/263/2634094.html> (датаобращения 16.04.2017)

83. Defined cascade Friis formula 144 decibel/mW to KHz
84. Signal and Spectrum Analyzer Specifications/ R&S®FSVA, Version 01.00, April , P. 27 2016.
85. .Электропроводность металлов <http://specural.com/articles/5/elektroprovodnost-metallov-tablica-i-raschety.html> /(свободный доступ 14.06.2017)
86. Исаков В.А. Квантовая электроника,/ Исаков В.А., Канавин А.П., Урюпин С.А.// М.- наука.- 2006.- С.928
87. Суторихин В.А., Обнаружение внутренних дефектов металлов при акустическом воздействии СВЧ сенсором на основе эффекта Горбунова/Суторихин В.А., Авдоченко Б.И., Абабков Н.В.//46 международная конференция ЕНО, технические науки , Москва 2018 с. 112-116.
- 88.Сергей Гаврилов Тензорное исчисление/ [http:// com/articles](http://com/articles) / (дата обращения 05.07.2016)
- 89.Bianchini M., Cole J. A Single-Resonator GaAs FET Oscillator with Noise Degeneration./ Bianchini M., Cole J R. Di Biase Galani,Z., Laton R. and Waterman R//.. – 1984 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, P. 270–273
- 90.Ерещенко Г. Е. О диапазонных характеристиках электрически перестраиваемого генератора на диоде Ганна / Ерещенко Г. Е., Кротов В. И., Петросян А. В.// Известия ЮФУ. Технические науки.-г. [г. Таганрог](http://www.taganrog.ru/). 2016, с.151
- 91.Советов Н.М. Техника СВЧ./ М.-" Высшая школа".- 1976, 184с.
- 92.СВЧдетектор <http://com/articles/2%20ДЕТЕКТОРНЫЙ%20СВЧ%20ДИОД> (доступ свободный)
- 93.Kaiser J., Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1953. Bd 24, N 1/2. P. 43–45.

94. The large number of cycles of vibration strength curve (curve Weller)  
[\[http://matsopru.ru/lektsii-po-soprotivleniyu-materialov/183-krivaja-ustalosti-krivaja-vellera.html\]](http://matsopru.ru/lektsii-po-soprotivleniyu-materialov/183-krivaja-ustalosti-krivaja-vellera.html) (дата обращения 14.09.2017)
95. Sutorikhin V. A. , THE COMBINATION OF ACTIVE AND PASSIVE METHODS OF INTROSCOPY /Sutorikhin V. A. Kapranov B. I., Avdochenko, B. I / ISSN 1748-7110 /Magyar Tudományos Journal (Budapest, Hungary/ № 9 (2017) p,31-34
96. Тараканов, А.Н. Сигналы в радиотехнических и телекоммуникационных системах// Лабораторный практикум/ Ярославский гос. университет: ЯрГУ, 2007, 108 с.
97. Method for detection acoustic emission using a microwave Doppler radar detector./Inventor: Gregory C.Smith. /Patent No US 7.397.421.B2, Jul.8,2008

Приложение А. Патенты

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2372615

**СПОСОБ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ  
ЭМИССИИ В МЕТАЛЛАХ**

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной  
ответственностью "Дистанционные индикаторы активных  
дефектов" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2008130466

Приоритет изобретения **22 июля 2008 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре  
изобретений Российской Федерации **10 ноября 2009 г.**

Срок действия патента истекает **22 июля 2028 г.**

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной  
собственности, патентам и товарным знакам*



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 81577

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АКТИВНЫХ  
ДЕФЕКТОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЯХ**

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной  
ответственностью "Дистанционные индикаторы  
активных дефектов" (RU)*

Автор(ы): *Суторихин Владимир Анатольевич (RU), Устинов  
Борис Федорович (RU)*

Заявка № 2008132177

Приоритет полезной модели 04 августа 2008 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 20 марта 2009 г.

Срок действия патента истекает 04 августа 2018 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной  
собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 85390

**УСТРОЙСТВО ПРЕЦИЗИОННОГО  
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ  
ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ**

Патентообладатель(ли): *Учреждение Российской академии наук  
Институт физики прочности и материаловедения  
Сибирского отделения РАН (ИФПМ СО РАН) (RU)*

Автор(ы): *Бричков Сергей Анатольевич (RU), Суторихин  
Владимир Анатольевич (RU)*

Заявка № 2008147340

Приоритет полезной модели 01 декабря 2008 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 10 августа 2009 г.

Срок действия патента истекает 01 декабря 2018 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной  
собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

## Приложение Б. Документы по использованию и испытаниям

### Лаборатория ООО «дистанционных индикаторов активных дефектов»

---

В Диссертационный совет совета Д 212.268.04  
634050, Томск, Пр. Ленина 40.

#### Справка о внедрении

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Суторихина В.А. на тему: «ИНДИКАТОР ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ СВЧ КОЛЕБАНИЯМИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКА» обладают актуальностью, представляют практический интерес. Разработанный автором прибор был использован при выполнении оригинальных исследований по заказу Кузбасского Государственного Университета.

Результаты испытаний прибором ДИАД по надежности определения дефектов (микротрещин наводораживания, расслоений, переход в режим пластической деформации) впервые превышают надежность ультразвукового зондирования для частоты ультразвука 50 КГц.

Ранее такие испытания проводились с использованием ультразвукового зондирования и методов разрушающего контроля (полировка, визуализация места предполагаемого разрушения контрастным веществом). Новый прибор будет использоваться в последующих испытаниях лаборатории ДИАД.

Главный технолог ООО «ДИАД» ..... А.Н.Гаврилов  
м.п.



Утверждено:

Директор института  
независимого контроля  
С.В. КУЗЬМИНОВ, д.т.н.,



#### Заключение

По заявке на открытие под названием «эффект Горбунова»

**Сущность открытия** состоит в экспериментальном обнаружении аномального преобразования упругих колебаний металлов, вызванных ультразвуком, в колебания поверхностной проводимости при наличии активных дефектов.

**До недавнего времени считалось**, что упругие колебания в металлах сопровождаются лишь соответствующими колебаниями плотности металла и следовательно колебаниями вырожденного электронного газа. Было известно, что поверхностная проводимость металла может изменяться при воздействии магнитного поля в условиях сверх низких температур (Pustovoid V. I., 1969; Lifshitz I. M., et al., 1977; Schoenberg D., 1986; Tucker J., & Rampton

V., 1975; Tavger B.A., & Demikhovsky V. Ya., 1968; Ando T., Fowler A., & Stern F., 1985) Было известно, что электрический заряд, возникший внутри проводящего тела переходит на поверхность в течении короткого времени. Внутри металла электрическое поле существует только в это время.

**Однако**, авторами было обнаружено необычное явление связанное с неизвестным ранее взаимодействием особых зон металла, при воздействии на которые ультразвуковыми волнами возникают колебания поверхностной проводимости при обычных температурах (300–600 градусов Кельвина) и отсутствии переменного магнитного поля.

Была обнаружена разница в длинах волн ультразвука и волн поверхностной проводимости. Для исследованных объектов поверхностная проводимость испытывала колебания на всех участках, без проявления характерных минимумов и максимумов для ультразвуковых волн. Согласно известной гипотезе (Vasilyev B. V., & Lyuboshitz V. L. (1994). The Virial theorem and some properties of the electron gas in metals (RAS Session of February 23, 1994). *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 4(164), pp. 367-374.) такое изменение поверхностной проводимости характерно для переменного значения внутреннего заряда, рожденного упругими механическими силами. Но приведенная гипотеза не позволяет определить время существования такого процесса, не гарантирует возможность его обнаружения из за малого расчетного значения.

Экспериментально обнаруженное авторами явление хорошо согласуется с гипотезой возникновения заряда в металле (среде электронного газа) при механических деформациях. Подтверждена возможность обнаружения переменной поверхностной проводимости величиной 0,1–0,3 % от значения самой проводимости

(Sophisticated Microwave Nondestructive Testing Method for Metals. Sutorikhin V.A. *Applied Physics Research*; Vol. 4, No. 4; 2012). Кроме того, экспериментальное время наблюдения этого явления составляет промежуток от нескольких минут до десятка часов. Перечисленные факты вместе с выводами известной теории позволяют сделать вывод о достоверности открытия.

### Выводы экспертизы

Эксперименты на кафедре «физических методов и приборов контроля качества (ФМПК)» 11-февраля, 3-4 апреля 2014 года, выполненные с использованием прибора Дистанционного Индикатора Активных Дефектов, в составе:  
СВЧ сенсора частоты 33 ГГц,  
блока питания сенсора,  
генератора ультразвука (50 КГц, 60-80 В), совмещенного со смесителем переноса спектра из диапазона 44-50 КГц в спектр 4-8 КГц,  
пьезодиэлектрический передатчик (-МА40МФ14-5В с кабелем длиной 350 мм),  
персональный компьютер марки «ASER» (Product Key WXVW8-R30CR-FJD98-P3FFJ-6DY6K) с программным обеспечением «Sound Forge - 5».

разработанного авторами открытия, показали:

На всех тестируемых образцах из алюминия, и стали прибор фиксирует полезный сигнал (спектральную составляющую ультразвука) величиной более 6дБ над шумами (8-12 дБ сигнал/шум) при наличии в образцах опасных дефектов (трещин) видимых и не видимых. Образцы без трещин показали слабый сигнал помехи величиной 3-5 дБ над шумами.

Место установки СВЧ сенсора не влияет на величину полезного сигнала. Расстояние до образцов определялось по величине «оптимального» тока смесителя СВЧ сенсора.

Достоверность результатов подтверждается другими экспериментами, выполненными на известных ультразвуковых дефектоскопах (УИУ «Скаруч»).

Специалисты, принявшие участие в экспериментах, согласны с необычным явлением, положенным в основу работы нового прибора ДИАД-1. Они утверждают, что приоритет открытия обоснован.

Рекомендуемая формула открытия: аномальное увеличения коэффициента преобразования (связи) ультразвука с особыми зонами металлов (электронным газом вблизи трещин) краткое название «эффект Горбунова»

. Характеризуется:

-**высоким значением** амплитуды спектральных составляющих переменной поверхностной проводимости больше 6-12 дБ над шумом,

-**значительным временем** сохранения эффекта после появления дефекта (более часа).

-**Место установки** СВЧ сенсора не влияет на величину полезного сигнала, что характеризует явление связанное с волнами поверхностной проводимости

-Эффект наблюдается для металлов независимо от магнитных свойств.

**Значение открытия для науки** состоит:

**Получила подтверждение гипотеза** о рождении заряженных областей внутри электронного газа.

**Практически доказано значительное** превышение полезного сигнала (спектральной составляющей ультразвука) над шумами при наличии опасных дефектов металла.

**Установлено, что время «активности»** опасных дефектов, образующихся при медленных (усталость металла) и быстрых деформациях (опыты на разрывных машинах) вполне достаточно для их надежной фиксации существующей аппаратурой (компьютер с программой БПФ).

**Появился новый путь определения** действительной составляющей диэлектрической проницаемости в среде электронного газа.

**Рекомендации о путях возможного использования открытия.**

Следует внедрить новый прибор для контроля опасных дефектов в машиностроении, при эксплуатации подвижного состава ЖД, кораблестроении для контроля клепаных и сварных соединений, в нефтегазовой промышленности для контроля сварных швов в процессе эксплуатации (усталость металла), в строительстве (контроль стальной арматуры на появление опасных дефектов в процессе эксплуатации).

Новый прибор, при соответствующей доработке, в состоянии практически мгновенно определять появление опасных дефектов на работающем оборудовании, без остановки техпроцесса. По своей основе он объединяет в себе достоинства метода Акустической Эмиссии, Ультразвуковых активных дефектоскопов но вместе с тем не требует механических контактов при использовании генераторов ультразвука на лазерном излучении.

**Рекомендуемая форма информации о научном открытии.**

Полезность внедрения нового прибора очевидна. Небольшое число публикаций о новом методе, необычный вариант использования известных приборов для получения положительных результатов, создает перспективы для возможностей широкой практической реализации метода. Предлагаемая форма информации об открытии – перепечатка в журналах отечественных и зарубежных.

**Подписи экспертов:**

(с указанием ученых степеней и званий)

Капранов Борис Иванович д.т.н., ст.н.с.  
профессор кафедры ФМПК

Зыков Владимир Михайлович д.т.н., ст.н.с.  
профессор кафедры ФМПК

Лапшин Борис Михайлович к.т.н., н.с.  
зав.лаб ИНК

/  /  
/  /  
/  /