

## Введение

На сегодняшний день развитие новых материалов и компонентов создает трудности для проведения контроля. Материалы с сильными анизотропическими свойствами используются для дизайна компонентов и деталей со сложной формой, такие материалы особенно распространены в авиастроении. Такие материалы обладают высокой резистивностью к нагрузкам и росту усталостных трещин. Несмотря на преимущества таких материалов, они по-прежнему не защищены от возникновения дефектов. Однако, использование материалов с сильной анизотропией в компонентах сложной формы зачастую делает данные компоненты не возможным к проведению контроля (из-за сложной формы осложнено обнаружение дефектов). Данная проблема создает спрос на поиск альтернативного способа и средства для успешного проведения контроля и обнаружения дефектов в деталях сложной формы. Использование данного альтернативного средства может помочь производителям создавать детали, форма которых не осложняет проведения контроля и индикацию присутствующих дефектов.

Этим альтернативным средством может стать программы симуляции, позволяющие симулировать распространение ультразвуковой волны в различных материалах различной формы. Подобные программы могут использоваться для симуляции автоматизированного сканирования, спрос, на который очень велик. Данные программы симуляции позволяют проводить “тестирование”, имея в распоряжении лишь компьютер и установленную программу, без какого-либо оборудования связанного с ультразвуковым контролем и образца для контроля. Симуляция может использоваться как для предсказания результатов контроля, так и для проверки результатов контроля.

Одним из самых распространенных методов неразрушающего контроля является ультразвуковой контроль. Ультразвуковой контроль может быть использован как для дефектоскопии, так и для определения характеристик материала. Для крупных объектов и объектов сложной формы используются роботизированные системы для автоматизации процесса контроля в промышленных масштабах. Большим преимуществом роботизированных систем является возможность программирования маршрутов сканирования согласно форме объекта. Такая возможность роботизированных систем делает их незаменимыми для проведения серийного контроля в производстве, связанном с большими объемами производства и контроля соответственно. Автоматизация проведения контроля становится одной из стратегических задач многих предприятий. Автоматизация контроля может повысить точность контроля и ускорить проведение контроля, также снизить затраты по проведению контроля и снизить риски для персонала. Несмотря на

преимущества данных систем, не обходится и без недостатков и полное внедрение таких систем осложнено в связи с возникающими трудностями. Трудности в основном связаны с трудностью программирования маршрута сканирования для сложных форм. Эти трудности относятся к роботизированным рукам, при частой смене плоскости сканирования может возникнуть проблема, называемая сингулярность робота.

Однако, детали сложной формы и знание о поведении ультразвука в таких объектах делает системы симуляции ультразвукового контроля очень важными для использования не только для проверки или сравнения результатов контроля, но и в качестве средства, способного предсказать какова будет индикация того или иного типа дефекта расположенного в объекте контроля, где при реальном контроле данный дефект не подлежит обнаружению.

Согласно возникшему спросу на использование средств симуляции, способные повысить вероятность обнаружения дефектов можно сформировать следующие задачи:

- Сравнить данные эксперимента с данными, полученными после симуляции
- Доказать эффективность использования симуляции для оптимизации маршрутов сканирования и проверить или доказать надежность симуляции для объектов сложных форм
- Создать оптимальные маршруты сканирования

## **2. Прогресс в ультразвуковом контроле**

### **2.1. Автоматизированные системы**

#### **2.1.1. Введение**

Как правило ультразвуковой контроль проводится вручную, но для повышения эффективности, снижение затрат и человеческого труда на сегодняшний день разрабатываются автоматизированные системы контроля. В данной главе будут представлены различные системы автоматизированного контроля, существующие на сегодняшний день.

Сегодня различные направления промышленности ищут способ полностью автоматизировать производство. Некоторые уже автоматизированы, прогресс дошёл и до попыток автоматизировать процесс управления качеством. Почти все методы неразрушающего контроля возможны для автоматизации. Автоматизированные системы вихретокового, радиографического, ультразвукового, магнитопорошкового и визуального контроля уже существуют и доступны на рынке. Системы делятся на статические (роботизированные руки для ультразвукового контроля) и динамические (различные роботы и машины, используемые для внутритрубной инспекции).

Также различные программы симуляции играют все большую роль в современном мире. Возможность предсказывать результаты тестирования дает огромную возможность уменьшить расходы и время, связанные с контролем. Использование программ симуляции также позволяет уменьшить объем контроля. Различные варианты применения симуляции будет представлено в данной главе.

#### **2.1.2. Автоматизированные системы вихретокового контроля.**

Вихретоковый метод контроля для определения поверхностных дефектов наиболее подходит для автоматизации, по сравнению с магнитопорошковым методом. Также метод в целом быстрее и более продуктивен.

Группа авторов из Физико-Математического Института имени Карпенко разработали систему и программное обеспечение «SANK-3» для автоматизированного вихретокового контроля. Прибор состоит из 32 вихретоковых преобразователя, разделенных между собой на 2 группы. Каждая группа содержит 16 датчиков, управляемая одним коммутатором. Каждый преобразователь закреплен с зазором равным 0,2 мм для сканирования осей железнодорожных вагонов. Рис. 1 презентует автоматизированную систему «САНК-3».

Рис. 1. Автоматизированная система «САНК-3» для вихретокового контроля осей железнодорожных вагонов [1].

Рис. 2. Интерфейс программного обеспечения автоматизированной системы «САНК-3» [1].

Интерфейс системы автоматизированного вихретокового контроля изображён на Рис. 2. Программа осуществляет включения и считывание данных каждого канала. В программе задаются следующие параметры сканирования: частота сигнала сканирования, амплитуда сигнала, напряжение, чувствительность и прочие параметры. Все параметры могут быть сохранены и использованы в дальнейшем для подобных образцов.

В статье [2] группа авторов из украинского исследовательского института неразрушающего контроля разработала систему «КРАБ». Система предназначена для обнаружения и оценки дефектов на внутренней и внешней стенках печных труб, используемых в химической промышленности.

Рис. 3. Система контроля с четырьмя вихретоковыми преобразователями закрепленная на инспектируемой трубе [2].

Разработанная система (Рис. 3) обеспечивает 4-канальный двухчастотный вихретоковый контроль труб в процессе эксплуатации. Система состоит из 4 идентичных вихретоковых преобразователей, соединенных четырьмя идентичными каналами. Сканирующий механизм проводит одновременное обследование вдоль поверхности трубы всеми четырьмя вихретоковыми преобразователями. Каждый канал считывает сигнал с вихретокового датчика на двух рабочих частотах: 1,4 и 5 кГц необходимых для обнаружения дефекта. Программное обеспечение системы способно сохранять считанные данные для последующего анализа и документации.

### **2.1.3. автоматизированные системы внутритрубного контроля.**

На данный момент существуют системы автоматизированного внутритрубного контроля. Такие системы часто используются для детального анализа внутренней поверхности трубопровода, позволяют оценить коррозию, присутствующие изгибы и деформации и потерю металла. Для предотвращения поломки трубопровода вследствие наличия критических дефектов такие дефекты требуют обнаружения (существующие системы также осуществляют дефектоскопию). Поскольку многие трубопроводы покрыты защитным покрытием или находятся под землей полный контроль трубопровода может

осуществляться только изнутри, подобные системы также используются для очистки внутренней поверхности трубопровода. Подобные системы позволяют использовать несколько методов неразрушающего контроля одновременно. В данном разделе представлены несколько существующих систем внутритрубного контроля.

В статье [3] представлен принцип измерения толщины стенки трубопровода с использованием электромагнитного акустического преобразователя. Данный преобразователь способен использовать вихретоковый, магнитный и акустический методы контроля. Обычный пьезоэлектрический преобразователь используется для контроля толщины стенки трубопровода с применением смачивающей жидкости (масла или воды) для ввода акустического сигнала в материал трубопровода, однако, такой метод не может быть использован для контроля газопроводов, так как газ не является проводником акустического сигнала. Для контроля трубопроводов с невозможностью доступа к трубопроводу с внешней стороны используется электромагнитный акустический преобразователь. Преобразователь использует вихретоковый, магнитный и акустический методы контроля, которые не требуют наличия проводящей жидкости.

Данный преобразователь имеет ограничения, в частности, когда присутствует потеря металла в стенке трубопровода, толщина оставшей стенки уже не может быть оценена из-за зазора между преобразователем и поверхностью трубопровода, в такой ситуации акустический сигнал не может быть передан поверхности трубопровода. Для таких случаев применяется вихретоковый метод. Вихретоковый метод способен обнаруживать потерю металла путем измерения толщины зазора между поверхностью трубопровода и преобразователем. Вихретоковый и акустический метод используются одновременно для оценки толщины стенки трубопровода.

Рис. 4. Результаты использования электромагнитного акустического преобразователя с внешней стороны [3].

Результаты измерения толщины стенки представлены на рис. 4, где толщина стенки была рассчитана путем измерения времени прохождения акустического сигнала. На рис. 5 показано расположение дефектов со стороны расположения преобразователя. Из рисунка видно, что акустический метод не обнаруживает дефекты (применение ультразвука более невозможно из-за зазора между преобразователем и поверхностью образца).

Fig. 5. Результаты использования электромагнитного акустического преобразователя с внутренней стороны [3].

Датчик, разработанный авторами, позволяет оценить остаточную толщину трубопровода и обнаружить положение места где присутствует потеря металла.

Компания NDT Systems & Services в сотрудничестве с Fraunhofer IZFP разработала систему, основанную на применении электромагнитного акустического преобразователя, для контроля трубопроводов с использованием нескольких методов неразрушающего контроля для дефектоскопии, оценки потери металла и толщинометрии [4]. На рис. 6 показана собранная система LineExplorer 3T-tool. LineExplorer 3T-tool состоит из 400 датчиков, каждый из которых применяет ультразвуковой, магнито-порошковый и вихретоковый методы контроля.

Рис. 6. LineExplorer 3T-tool [4].

Для оценки эффективности работы LineExplorer 3T-tool был проведен эксперимент на образце, содержащим 180 искусственно созданных дефектов, дефекты расположены как на внешней, так и на внутренней стенках трубопровода.

На рис. 6 представлены результаты тестирования. Результаты представлены в виде группы С-сканов примененных методов контроля секции тестового образца. Магнитопорошковый метод использовался для обнаружения дефектов, вихретоковый метод для обнаружения дефектов внутренней стенки. Также присутствуют индикации с внешней стенки, но они слишком слабы.

Рис. 7. С-сканы проведенного эксперимента [4].

После анализа результатов авторы сделали выводы о преимуществах использования многофункциональной системы, в числе которых возможность применять несколько методов неразрушающего контроля одновременно, что повышает возможность обнаружения дефектов, возможность обнаружения дефектов, как на внешней, так и на внутренней стенках трубопровода. Также использование подобных многофункциональных систем способно снизить расходы на проведение операций оценки качества трубопроводов.

#### **2.1.4. Карабкающиеся роботы**

Вертикально карабкающиеся роботы разрабатываются с целью контроля объектов, расположенных на большой высоте или расположенных в труднодоступных местах, также с целью минимизации рисков получения травм персонала. Примеры применения подобных систем встречаются в аэрокосмической и строительной отраслях. Возможность автоматизации контроля является огромным преимуществом подобных систем контроля.

Вертикально карабкающийся робот (Рис. 8) был разработан в Bhabha Atomic Research Centre (BARC) [5]. Данный робот предназначен для проведения контроля вертикальных котловых труб. Робот имеет определенную грузоподъемность, способен работать с заданной оператором скоростью и способен работать на кривых поверхностях котловых труб. Робот состоит из двух наборов ременных шкивов, соединённых между собой ремнем таймера и управляется двигателем постоянного тока через редуктор. Постоянные магниты служат в качестве крепления с поверхностью трубы.

Рис. 8. Электромагнитный акустический преобразователь, интегрированный с роботом во время полевых испытаний [5].

Робот, представленный в данной статье, интегрирован с электромагнитный акустическим преобразователем и предназначен для труб толщиной от 5 до 8 мм. Авторы успешно провели испытание разработанного ими карабкающегося робота для измерения толщины стенки труб. Распределение толщин труб представлено на рис. 9. Распределение толщин труб было проведено для установки из 5 труб длиной более 3 метров.

Рис.9. Результаты измерения толщины труб [5].

В статье [6] авторы разработали роботизированную систему способную осуществлять контроль вертикальных поверхностей солнечных энергетических установок. Авторы статьи презентуют новую модель робота, использующую адгезивный механизм. Робот разработан для контроля вертикальных строений различных зон энергетической установки. Прототип, представленный в статье используется для контроля приемника центральной башни энергостанции, работающей на концентрированной солнечной энергии.

Задачи робота:

- Безопасное и автономное передвижение и навигация по горизонтальным и вертикальным конструкциям зон контроля,
- применение оборудования контроля для осуществления процесса контроля,
- сбор и хранение данных для качественной оценки состояния конструкции.

Главная функция робота – транспортировка и расположения системы контроля на поверхности объекта контроля. Роботизированная система закрепляется к поверхности

объекта контроля при помощи вакуумных присосок. Архитектура робота представлена на рис. 10.

Рис. 10. Архитектура робота [6].

Рис. 11. Прототип [6].

Прототип робота, представленный на рис. 11, включает в себя карабкающийся механизм с переменным шагом, нагрузка робота переносится краном по поверхности башни.

Робот, представленный авторами, использует два метода неразрушающего контроля: визуальный (по средствам камеры) и вихретоковый. Визуальный метод используется для определения оценки качества покрытия и обнаружения следов коррозии, ведущих к уменьшению толщины трубы.

Также авторы разработали программное обеспечение для калибровки системы контроля, сбора данных, синхронизированных с движением робота и автоматическим выявлением дефекта и его классифицированием, комбинируя визуальный и вихретоковый методы контроля.

Статья [7] рассказывает о применении карабкающегося робота для контроля бетонных сооружений. Система закрепляется к поверхности объекта контроля посредством 4 рядов присосок и карабкается по бетонной конструкции, пока 2 ряда совершают движение, 2 остаются неподвижными, осуществляя удержание на поверхности. Робот также способен передвигаться по диагонали. Прототип представлен на Рис. 12.

Рис. 12. Прототип карабкающегося робота [7].

Робот состоит из удерживающего механизма, механизма, осуществляющего движение и механизма контроля, в данном прототипе это acoustic impact mechanism (tapping mechanism), архитектура представлена на рис. 13. Механизм удерживания на поверхности основан на методе пассивного присасывания, поскольку другие методы (магнитное, клешневое) не годятся для использования на бетонных конструкциях. Механизм, осуществляющий передвижение, основан на передвижении ряда присосок. Два ряда присосок движутся относительно друг друга для создания вращательного движения одним приводом и линейного движения двумя линейными приводами.

Рис. 13. Архитектура карабкающегося робота [7].

Контроль осуществляется tapping mechanism, состоящим из двух вращающихся стальных шарика диаметром 16 мм каждый и двух редукторов. Редукторы запускает постукивания металлических шариков по объекту контроля.

В процессе испытания разработанной установки все искусственные дефекты были обнаружены в бетонном образце. В последующем авторы планируют развивать систему и вводить в производство.

#### **2.1.5. Автоматизированные системы ультразвукового контроля.**

На сегодняшний день автоматизированные системы ультразвукового контроля представлены в основном роботизированными системами (роботизированная рука представлена на рис. 14). Система может быть запрограммирована на прохождение определенного маршрута сканирования. Автоматизация процесса контроля очень выгодна для интеграции в процесс автоматизированного производства.

Помимо преимуществ, использование подобных роботизированных систем создает ряд трудностей, связанных с трудностью программирования маршрута сканирования, особенно образцов сложной формы.

Рис. 14. Роботизированная рука.

Автоматизированные ультразвуковые системы широко используются в инспекции ядерных электростанций, в местах, где инспекция может быть вредна для персонала, например, подверженных радиоактивному излучению.

В статье [8] презентован метод использования подобных роботизированных систем в паре, используя сквозной метод в иммерсионной среде. Также авторы оценивают вероятность обнаружения дефекта используя специальное программное обеспечение CATIA (рис. 15). Данная программа позволяет симулировать движение робота для определения наиболее подходящего маршрута сканирования.

Рис. 15. Интерфейс программы FASTSERF CATIA для офлайн сканирования [8].

Возможности роботизированных систем и использование программ симуляции роботизированного сканирования делает подобные системы пригодными для использования для контроля объектов сложной формы.

Также компания TECNATOM разработала промышленную роботизированную систему для [9] поточного контроля в процессе производства, включая инструменты для симуляции роботизированного сканирования (GENTRAY 3). Также авторы используют лазерный сканер FALCOM 3D.

Лазерный прибор FALCOM 3D (Рис. 16) используется для точного воссоздания формы контрольного образца, используется в случае, если CAD-модель детали не имеется в наличии. Он создает электронную копию образца с высоким разрешением и часто используется для реконструкции сложных форм.

Рис. 16. FALCON 3D [9].

Пример использования системы GENTRAY 3 представлен на рис. 17. На левой стороне представлен реальный образец контроля, необходимый для импорта в CAD-модель, на правой стороне представлена модель, сканированная системой FALCON 3D.

(a)

(б)

Fig. 17. CAD файл, реконструированный системой GENTRAY 3 использующее облако точек, созданного системой FALCOM 3D: (a) реальный образец и (б) реконструированная модель. [9].

GENTRAY 3 высоко-технологичная система, предназначенная для проектирования траектории сканирования объектов сложной формы. После импорта CAD-модели в программу различные траектории могут быть смоделированы с учетом ультразвукового преобразователя и держателя. Программа используется для симуляции и оценки оптимального маршрута сканирования для избежания ошибок в процессе реального сканирования. После оценки оптимальности маршрута сканирования, он импортируется в машинный язык, и сканирование осуществляется согласно траектории спроектированной в симуляции GENTRAY 3. На рис. 18 показаны интерфейс системы с этапами проведения роботизированного контроля: (a) реконструированный объект сканирования, (б) траектории сканирования, (в) показана зона сканирования.

(a)

(б)

(в)

Рис. 18. Реконструированный объект контроля (а), три различных траектории (б), зона сканирования (в) [9].

TECNATOM создали полный пакет программ автоматизированного ультразвукового контроля, включая программы для сбора данных и оценки результата.

Ультразвуковой контроль с применением роботизированных установок также часто используется для контроля композитных материалов. Одной из проблем автоматизированного контроля являются поддержание постоянной частоты сбора данных и скорость сканирования. Частота сбора данных достаточно хорошо контролируется в большинстве систем, в то время как, скорость сканирования зависит от сложности формы контрольного образца. Фактор формы, влияющий на скорость сканирования, может ухудшить результаты контроля. Группа ученых из [10] успешно решили проблему скорости сканирования для объектов сложной формы, используя промышленного робота с шестью степенями свободы. Робот, использованный в работе, представлен на рис. 19.

Рис. 19. Sysaxe® Single 850 [10].

Для определения подходящего маршрута сканирования ученые использовали программу симуляции роботизированного сканирования, разработанную компанией Applied Computing Engineering (ACE). Симуляция помогла оптимизировать маршрут сканирования и избежать недопустимых позиций для робота. Оператор загружает файл объекта контроля, задает параметры сканирования, размер шага, проверяет на наличие недостижимых для робота позиций, зоны сингулярности и т.д. и после оценки всех параметров и симуляции сканирование, сканирование по заданным параметрам может быть проведено над реальным объектом контроля. На рис. 20 показан снимок экрана программы симуляции.

Рис. 20. Программа симуляции роботизированного сканирования [10].

Для создания САД-модели объекта контроля был применен лазерный сканер, подобный сканер описан в статье [9]. Созданная САД-модель используется для симуляции роботизированного сканирования.

## **2.2. Использование CIVA в промышленности.**

Сегодня на рынке доступны различные программы симуляции, основанные на различных принципах работы, таких как ray tracing, метод конечных элементов, упругие методы конечных интегралов. Программы симуляции ультразвука подразделяются на аналитические и числовые, также существуют гибриды. Преимуществом программ симуляции неразрушающего контроля является возможность пользователя пронаблюдать результаты контроля без применения какого либо реального оборудования контроля, а имея лишь компьютер и установленную программу симуляции. Подобные программы позволяют пользователю виртуально определить подходящие параметры контроля и предсказать результаты.

Одной из самых эффективных программ симуляции неразрушающего контроля является программа CIVA, разработанная французской компанией EXTENDE. CIVA - это программа, предназначенная для симуляции ультразвукового, радиографического и вихретокового контроля. В основе CIVA лежит на полу-аналитическом принципе с графическим интерфейсом. Время расчетов в CIVA значительно меньше, чем в программах, основанных на принципе конечных элементов, таких как COMSOL, ANSYS or ABAQUS. Также в CIVA доступен raytracing метод и модель узкого пучка. Одной из важных черт CIVA являются возможность пользователя моделировать различные типы дефектов в объектах сложной формы.

CIVA, как и любая программа симуляции ультразвукового контроля, отвечает двум главным требованиям: моделирование прохождения ультразвуковой волны в материале и симуляция отклика сигнала от дефекта.

Применение CIVA может помочь в понимании поведения ультразвуковой волны в материале и позволяет наблюдать результат на различных типов сканов, таких как А-скан, В-скан, С-скан и секторный (S-скан).

В CIVA можно создать модель объекта сложной формы и пронаблюдать влияние формы объекта на отклик сигнала и возможность обнаружения в целом. Уникальные возможности CIVA и прочих программ симуляции делают их важными и обоснованными средствами, которые следует задействовать в производственном цикле для избежания невозможности детектирования дефектов в объектах сложной формы, при роботизированном контроле в частности. В последствии применение CIVA может помочь в оптимизации маршрута сканирования с точки зрения более высокой вероятности обнаружения дефектов.

В данной главе описаны различные применения ультразвукового модуля CIVA в промышленности для объектов сложной формы.

CIVA применяется исследовательским центром NASA для симуляции контроля фланцевых соединений барокамер и сосудов под давлением [12]. Контроль таких соединений осложнен положением сварного шва. В данном месте затруднено расположение ультразвукового преобразователя и результат контроля может быть ложным, недопустимые дефекты шва останутся незамеченными. На рис. 23 показано фланцевое соединение, использованное в публикации.

Рис. 23. Фланцевое соединение, использованное в качестве образца [12].

(а)

(б)

Рис. 24. Положение преобразователя (а), прямо отраженный сигнал с (б) [12].

На рис. 24 показано положение ультразвукового преобразователя на образце и прямо отраженный сигнал от бокового цилиндрического отверстия. При передвижении преобразователя в другую позицию индикация дефекта также меняет свое положение или даже исчезает. Данный эффект возникает из-за отражения бегущей волны от стенок, затем от дефекта, и на преобразователь. Траектория сигнала представлена на рис. 25.

Рис. 25. Траектория движения волны [12].

В итоге на дисплее отображаются несколько различных сигналов, отраженных от различных мест в образце. Учеными в публикации был обнаружен и изучен данный эффект. Как видно, симуляция помогает изучить распространение ультразвуковой волны в материале и графически изобразить эффекты распространения.

Также CIVA применяется Китайским исследовательским институтом атомной энергетики (China Nuclear Power Technology Research Institute) [13]. Публикация посвящена контролю объектов сложной формы, особенно сварных швов патрубков. Рис. 26 демонстрирует влияние сложной геометрии объекта контроля на эхо сигнала от дефекта. Три плоских дефекта были размещены в образце, каждый 5 мм высотой и 0.2 мм длиной, под углом  $45^\circ$ . Дефекты расположены как под плоской, так и неровной плоскостями образца (рис. 26 а). В-сканы симуляции представлены на рисунке 26 (б). На рис. 26 (в) представлены суперпозиции совмещения эхо динамических кривых сигналов двух режимов. Как видно сложная форма объекта имеет влияние на эхо сигналы.

(a)

(б)

(в)

Рис. 26. Образец сложной формы с искусственными дефектами, симулированный в CIVA (a), В-сканы дефектов (b), сравнение эхо динамических кривых (в) [13].

Авторы также исследовали неоднородный сварной шов, наличие неоднородности материала сварных швов создает анизотропию и ведет к проблемам выявления дефектов из-за разности акустических импедансов. Такие неоднородные швы применяются в ядерных реакторах, особенно в патрубках корпусов реакторов. Поскольку, патрубки изготовлены из низко углеродистых сталей, а трубы, обычно, из аустенитной стали, то только неоднородная сварка может соединить эти два материала. Контроль таких соединений затруднителен из-за высокого отношения сигнала к шуму, вызванного множеством отражений волны в полости шва.

Исследованный авторами образец показан на рис. 27.

(a)

(б)

Рис. 28. Микроструктура сварного соединения (a), геометрия объекта контроля, симулированного в CIVA (б) [13].

Согласно результатам симуляции авторы сделали вывод о влиянии анизотропии сварного соединения и исследовали какой наклонный преобразователь наиболее годен для контроля подобных сварных соединений. Также был сделан вывод, как применение симуляции способно найти наиболее подходящие параметры контроля и оптимизировать тем самым параметры контроля.

### **3. Ультразвуковой контроль.**

#### **3.1. Общая информация об ультразвуковом контроле.**

Неразрушающий контроль представляет собой группу методов анализа, используемых в науке и технике, для оценки качества материала, компонента или системы на наличие дефектов без причинения вреда материалу, компоненту или системе.

Сегодня методы неразрушающего контроля используются производителем при поточном контроле для улучшения надежности продукта, уменьшения производственных затрат и поддержки качества продукта. В процессе производства неразрушающий контроль используется для оценки и улучшения качества производимой продукции.

Одним из наиболее распространённых методов неразрушающего является ультразвуковой метод контроля. Для контроля используется высокочастотная звуковая волна. Она вводится в материал посредством пьезоэлектрического преобразователя, и при наличии в материале среды с отличным акустическим импедансом, часть ее отражается и возвращается назад на преобразователь. Чем больше различаются акустические сопротивления, тем большая часть звуковых волн отражается от границы раздела сред. Отраженный сигнал выводится на дисплей прибора и, зная скорость звука в материале и измеряя время прохождения отраженного сигнала, можно вычислить расстояние до дефекта (среды с отличным акустическим импедансом).

Рис. 29. Принцип ультразвукового контроля

Наиболее часто применяемые в контроле частоты находятся между 1.0 и 10.0 МГц, данные частоты не слышны человеческим ухом. Чем меньше частота звука, тем он глубже проникает в материал, но не настолько чувствителен к наличию дефекта. Два наиболее часто используемые типа звуковых волн, используемых в промышленном контроле, называются продольными (волны сжатия) и поперечными (волны сдвига). В продольной волне вибрирует назад и вперед, вдоль распространения волны. В поперечной перпендикулярно (из стороны в сторону) к направлению распространения. Поперечные волны движутся приблизительно вдвое медленнее продольных волн.

Звуковая волна вводится в материал посредством ультразвукового преобразователя, который преобразует электрический сигнал в звуковую волну, благодаря пьезоэлектрическому эффекту. Акустический сигнал, преобразованный обратно в

электрически, показывается на LCD экране прибора. При должной калибровке прибора, оператор может измерить расстояние до дефекта. Зачастую тип дефекта может быть определен по его глубине и размеру.

### **3.2. Фазированная Решетка**

В ультразвуковом контроле применяется особенный преобразователь, называемый фазированной решеткой. Данный преобразователь широко применяется в медицине. Обычный ультразвуковой преобразователь излучает луч в фиксированном направлении, для контроля больших объемов, преобразователь должен быть физически передвинут по поверхности объекта контроля, но фазированная решетка способна электронно менять направления звуковой волны, без механического передвижения преобразователя. Данное свойство полезно при контроле больших объемов.

Луч преобразователя может менять направление благодаря тому, что фазированная решетка состоит из нескольких относительно небольших пьезоэлектрических элементов. Задавая момент излучения каждого элемента можно направить луч всего преобразователя в определенное направление, другими словами сигнал направляется посредством электронного манипулирования, а не перемещением преобразователя. Свойство поворота луча фазированной решетки позволяет увидеть срез зоны интереса объекта контроля, такое изображение называется секторный скан (S-скан). Пример секторного скана представлен на рис. 30.

Принцип секторального сканирования построен на задании определенной задержки каждого элемента фазированной решетки. Для распространения волны под углом в  $90^\circ$  все элементы решетки должны излучать в одно время, для поворота же луча один элемент должен начать излучать раньше, следующий с определенной задержкой и так далее. Угол поворота зависит от закона задержки решетки. Сегодня оборудование, для проведения контроля используя метод фазированной решетки запрограммировано и пользователю нужно задать только интересующие его углы. Данное свойство делает метод незаменимым для использования в контроле больших конструкций.

Рис. 29. Принцип работы фазированной решетки

Рис. 30. Секторный скан, выполненный в программе CIVA

### **3.3. Sampling Phased Array Technique**

Sampling phased array это особый принцип применения обычной фазированной решетки, разработанный в Fraunhofer IZFP [14, 15, 16]. Sampling phased array позволяет более точно определять и характеризовать дефект в материале. Принцип работы отличен от традиционного, в Sampling phased array каждый элемент излучает по отдельности, остальные элементы решетки только принимают отраженный сигнал (в традиционной фазированной решетке каждый элемент излучает и принимает одновременно). Полученный сигнал служит для реконструкции А-сканов одного или нескольких углов. Сигнал собирается и сохраняется в каждой позиции преобразователя для каждого элемента решетки и служит в качестве входных данных для построения изображения. Построение строится на основе алгоритма синтетической апертуры (Synthetic aperture focusing technique).

Рис. 31. Процесс сбора данных sampling phased array [16].

На рис. 31 представлен алгоритм работы sampling phased array. Каждый элемент поочередно излучает сигнал, остальные принимают. В таком случае дефект служит вторичным источником сигнала.

Данный метод имеет несколько преимуществ, таких как более высокая чувствительность метода, разрешение изображения тоже выше, нет слепой зоны в ближнем поле (near-field).

#### **3.4. Роботизированная система сканирования**

Эксперимент был проведен компанией I-deal Technologies GmbH, используя роботизированную установку KR 10 R1100 sixx (KR AGILUS), изготовленную компанией KUKA Roboter GmbH [17,18]. Данная модель робота водонепроницаема и пригодна для использования в иммерсионной среде. Роботизированная установка показана на рис. 32. Робот годится для переноски объектов, подачи инструментов, но также может быть использован для проведения ультразвукового контроля. Ультразвуковой преобразователь закрепляется на конце робота.

Fig. 32. Роботизированная установка [17].

Система состоит из:

1. Манипулятора
2. Панели управления
3. Соединительного кабеля

4. Контролера
5. Кабеля данных
6. Кабеля управления
7. Программного обеспечения

Манипулятор представляет собой роботизированную руку с 6 степенями свободы, изготовленный из легких стальных сплавов. Манипулятор способен работать в объеме  $5.20 \text{ m}^3$ , производитель называет этот параметр рабочей зоной. Форма и размеры рабочей зоны представлены на рис. 33.

Рис. 33. Рабочая зона [17].

Как показано на рис. 33 робот имеет достаточно большую зону для перемещения и соответственно в этой зоне может быть проведен контроль. Возможность вращения, сгибов, 6 степеней свободы делают такие системы незаменимыми для проведения роботизированного ультразвукового контроля объектов сложной формы. Единственным ограничением использованием подобных роботов является проблематичность программирования маршрута сканирования для объектов сложной формы. Для каждого сложного объекта могут быть различные недостижимые позиции сканирования. Также существует проблема сингулярности робота, вызванная неправильным маршрутом или неправильный выбор начальной позиции сканирования. Для оптимизации маршрута сканирования применяются программы симуляции автоматизированного сканирования.

### **3.5. Симуляция CIVA**

CIVA - программа симуляции неразрушающего ультразвукового, радиографического и вихретокового контроля. Используя симуляцию пользователь имеет возможность проведения контроля и выбора параметров контроля не имея в наличии объект контроля и оборудование, а имея в наличии только компьютер с установленной на нем программой. Каждый модуль контроля включает в себя симуляцию, изображения результатов контроля и средства анализа результатов. Данная программа позволяет пользователю выбрать оптимальные параметры контроля и виртуально пронаблюдать результаты контроля с выбранными параметрами. CIVA основана на полу-аналитическом методе расчета в уникальном графическом интерфейсе, делающий использование CIVA достаточно понятным и простым для пользователя. Полу-аналитический метод расчета делает симуляцию в CIVA значительно быстрее, сравнивая с другими программами симуляции.

Для контроля сложных форм пользователь может импортировать чертеж в формате .DXF или нарисовать образец используя встроенный в CIVA модуль чертежей.

CIVA дает пользователю возможность симулировать параметры материала объекта контроля, наблюдать результаты контроля и возможность применять различные графические средства обработки изображений. Пользователь может симулировать образец различной формы, из различного материала и размера. В CIVA доступна большая база данных материалов, которые могут быть выбраны, пользователь тоже способен добавить в базу данных материал, задав его параметры и сохранив его в базу данных. В базе данных также доступны различные материалы с анизотропными свойствами, многослойные структуры также могут быть симулированы. Различные параметры преобразователя (размеры, формы, фазированные решетки различных форм и размеров с различным количеством элементов) могут быть выбраны пользователем, также пользователь способен сам задать параметры преобразователя и добавить его в базу данных. Параметры и материал призмы преобразователя также доступны и могут задавать и сохраняться в базу данных.

Множество различных типов дефектов могут быть выбраны и помещены произвольно в образец, также пользователь может сам создавать и сохранять ветвистые трещины.

Отклик сигнала от дефекта представлен в виде различных сканов, как это происходит в ходе реального эксперимента. Для ультразвукового контроля это А-скан, В-скан, С-скан и т.д. Также пользователь может симулировать и графически наблюдать параметры луча преобразователя, с показанными параметрами ближнего поля и прочее.

Рис. 34. Параметры луча фазированной решетки

Преимущества CIVA:

- Различные параметры объекта контроля, его материала и формы могут быть заданы пользователем
- Анизотропные и многослойные структуры доступны
- Разнообразие различных параметров
- Различные типы контроля доступны к симуляции: контроль наклонным преобразователем, контроль двумя преобразователями, фазированная решетка, full matrix capture и т.д.
- Маршрут сканирования по различным траекториям
- Контактный и иммерсионный контроль
- Модуль расчета параметров луча (рис. 34)
- Все виды сканов доступны
- Raytracing method

- Симуляция значительно быстрее и дружелюбный интерфейс

Подробнее о всех возможностях CIVА можно узнать из инструкции для пользователя [19, 20].

#### 4. Симуляция в CIVА и результаты эксперимента

##### 4.1. Описание объекта контроля

В качестве объекта контроля для оценки достоверности симуляции был выбран калибровочный блок для фазированных решеток. Данный блок изготовлен из сплава алюминия и имеет 18 сквозных боковых отверстий, каждое 2 мм диаметром.

(а)

(б)

Рис. 35. Калибровочный блок (а), калибровочный блок симулированный в CIVА (б)  
Как видно из рис. 35 9 отверстий расположены вертикально и 9 по диагонали. 9 диагональных отверстий наиболее интересны для контроля, используя фазированную решетку в качестве преобразователя, поскольку расположены на разных глубинах. Используя данный калибровочный блок можно оценить вероятность обнаружения дефектов данным преобразователем.

##### 4.2. Симуляция в CIVА

Перед началом симуляции пользователь должен задать все параметры контроля. Прежде всего, были заданы параметры объекта контроля.

Рис. 36. Меню геометрии образца

В меню геометрии образца были заданы размеры объекта контроля. Как показано на рис. 36 длина составляет 385 мм, ширина 50 мм и толщина 120 мм.

В меню материала параметры алюминиевого сплава были заданы. Материал алюминий, скорость распространения продольной волны составляет 6350 м/с.

Рис. 37. Меню материала образца

Параметры затухания волн также были заданы.

В качестве преобразователя была выбрана фазированная решетка производства компании Olympus. Подробнее о параметрах преобразователя можно прочитать в каталоге преобразователей компании Olympus [21].

Рис. 38. Меню формы преобразователя

Рис. 38 презентует меню формы преобразователя, где указаны размер апертуры, зазор между элементами. Призма не применялась и преобразователь был применен без фокусирования.

Рис. 39. Параметры сигнала

Рис. 39 показывает параметры сигнала: частота сигнала составляет 5 МГц, частота сбора данных (sampling frequency) составляет 80 МГц, данная частота показывает, как часто преобразователь собирает данные сигнала. Данная частота непосредственно влияет на результаты.

В меню фазированной решетки указаны параметры решетки. Симуляция (и эксперимент, в ходе эксперимента были применены те же параметры контроля) была проведена используя секторальное сканирование  $-90^{\circ}/+90^{\circ}$ , шаг составляет  $1^{\circ}$ . На рис. 40 представлено меню фазированной решетки.

Рис. 40. Параметры секторного сканирования.

При секторном сканировании каждый элемент излучает и принимает сигнал, каждый элемент излучает с определенной задержкой. В итоге в каждой позиции преобразователь делает 180 выстрелов, картина секторного скана сформирована из 180 полученных А-сканов.

В меню опций контроля были заданы параметры сканирования. Преобразователь движется вдоль прямой линии длиной 144 мм, шаг 1 мм, преобразователь излучает на каждом миллиметре сканирования, в результате будут сформированы 145 секторных сканов каждого миллиметра пути преобразователя. Параметры сканирования показаны на рис. 41.

Рис. 41. Параметры сканирования

В качестве контактной жидкости была применена вода, данная жидкость уже имеется в базе данных CIVA.

В меню опций симуляции были заданы параметры симуляции, такие как количество мод, вид взаимодействия волны с дефектом (данный пункт определяет какие моды волны принимаются в учет в ходе симуляции), размер зоны в которой происходит расчет и параметры точности.

В конфигурации расчетов был выбран режим “прямой”, расчеты включают только продольные волны (рис. 42).

Рис. 42. Меню параметров симуляции.

В меню “взаимодействия” во вкладке “образец” фронтальное и донное взаимодействие было выбрано, соответственно фронтальный и донный сигналы будут браться в учет в ходе симуляции и соответственно будут показаны на секторном скане. Эхо с боковых стенок не было выбрано, так как может создать на скане ненужный шум.

Рис. 43. Взаимодействия с образцом

Размер (рис. 44 а, б) зоны чувствительности был выбран исходя из размеров калибровочного блока, так чтобы были видны эхо-сигналы от отверстий, расположенных вдоль вертикали.

(а)

(б)

Рис. 44. Меню зоны чувствительности (а), зона чувствительности (серый цвет) (б).

После указания всех параметров симуляции, симуляция может быть начата. После расчетов пользователь может наблюдать результаты симуляции. Одним из сканов, полученных в результате симуляции, является В-скан (рис. 45), на котором длина маршрута сканирования относительно времени. Данный В-скан является суперпозицией всех 145 секторных сканов. Данный В-скан не зависит от позиции преобразователя, так как это суперпозиция всех секторных сканов, но поменяв курсор угла на секторном скане, изменится и В-скан. Данный В-скан может быть использован для оптимизации маршрута сканирования и выбора начальной точки сканирования. Как видно из скана,

представленного на рис. 45 (а), эхо сигналы видны примерно на середине выбранного маршрута.

(а)

(б)

(в)

Рис. 45. В-скан  $90^\circ$  (а), В-скан  $+30^\circ$  (б), секторный скан (S-скан) (в).

Как видно из рис. 45 в почти все отверстия видны на скане, кроме двух первых, поскольку они находятся в ближнем поле и на углах близких к  $90^\circ$  не так высока вероятность обнаружения. При другой позиции преобразователя (где они будут видны на других углах), они будут видны лучше. Из рис.45 в видно преимущества использования фазированной решетки и секторного сканирования. При использовании классического преобразователя невозможно достичь подобного изображения.

#### 4.3. Результаты эксперимента

Эксперимент был проведен в компании I-DEAL Technologies GmbH, используя робота KR 10 R1100 sixx (KR AGILUS). Сканирование было проведено с теми же параметрами: секторный скан  $-90^\circ/+90^\circ$ , маршрут с той же точки и длина маршрута та же самая, частота сигнала также 5 МГц.

После сбора данных в программе, разработанной компанией I-DEAL Technologies GmbH, пользователь может наблюдать секторные сканы всех позиций. На рис. 46 представлен секторный скан из программы I-DEAL Technologies GmbH.

Рис. 46. Секторный скан эксперимента.

Как видно из секторного скана, полученного в результате эксперимента, он значительно отличается от скана, симулированного в CIVA. Главными отличиями является наличие шума и присутствие повторных эхо-сигналов. Данные повторные индикации могут быть следствием преобразования мод волны и повторных отражений от стенок объекта контроля и дефектов. В симуляции данные повторные индикации не присутствуют, следовательно, параметры симуляции должны быть выбраны более тщательно, чтобы добиться наименьших различий результатов эксперимента и симуляции.

#### 4.4. Реконструирование Данных

Для сравнения симуляции и эксперимента недостаточно просто сравнивать изображение CIVA скриншота из программы I-deal Technologies GmbH. Для оценки достоверности симуляции данные эксперимента и симуляции должны быть реконструированы в сторонней программе. Для реконструкции была выбрана программа MATLAB. В программе MATLAB был написан код программы реконструкции сырых данных А-сканов эксперимента и симуляции. Получив реконструированные изображения эксперимента и симуляции, они могут быть сравнены, и оценка эффективности и достоверности CIVA может быть оценена для последующего использования в процессе оптимизации маршрута сканирования объекта сложной формы.

Данные, полученные в ходе эксперимента представляет из себя матрицу значений амплитуды сигнала. Размер матрицы составляет 3302 строки (количество samples) и 181 столбец (углы от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$ ). Количество samples зависит от sampling frequency и толщины образца. Также размер sample зависит от частоты и толщины, в данных эксперимента размер sample равен 0.04 мм. Количество samples в эксперименте и симуляции разнится, в эксперименте оно 3302, а в симуляции 3190. Разница кажется не такой большой, но эта разница влияет на результаты реконструкции. Разница, возможно, вызвана смачивающей жидкостью: в CIVA пользователь не может задавать толщину контактной жидкости, однако, в реальном эксперименте смачивающая жидкость имеет значимую толщину, также разница может быть вызвана тем, что преобразователь находился в искривлённом контакте с поверхностью объекта контроля.

Как было упомянуто ранее данные эксперимента и симуляции были реконструированы в программе MATLAB для построения секторных сканов для последующей оценки их схожести. Результаты реконструкции данных эксперимента представлены на рис. 47, реконструированный секторный скан на рис. 48.

Рис 47. Реконструированный секторный скан данных эксперимента.

Сравнивая изображения реконструкции и эксперимента можно заметить небольшую разницу в уровне шума.

Рис. 48. Реконструированные данные симуляции.

Как видно из изображений реконструкции данных, они имеют большую разницу. В симуляции не присутствуют повторные эхо, шум отсутствует в симуляции. Отсутствие шума результат неприменения параметров шума и преобразования мод волны при

симуляции. Также отсутствует отражение сигнала от боковых стенок. Отсутствие всех этих параметров делают результаты симуляции слишком идеалистичными, что не достаточно для сравнения. Поскольку разница между симуляцией и экспериментом очень велика, было принято решение изменить параметры симуляции для достижения наиболее близких к реальности результатов.

Рис. 49. Симуляция с параметрами преобразования мод.

На рис. 49 представлен S-скан симуляции с параметрами преобразования мод волны и параметром отражения от боковых стенок. Как видно, секторный скан отличается от представленного ранее на рис. 45 в. В выделенных зонах видно присутствие вторичных эхо-сигналов, скорее всего, вызванного преобразованием мод волны (данный угол близок к критическому). Эхо-сигналы на правой стороне скана – это сигнал отраженный от боковой стенки. Эхо-сигналы в в нижней левой части изображения это сигналы от поперечной волны (они были проверены расчетом). Скорость поперечной волны вдвое меньше скорости продольной, поэтому они располагаются ниже, даже вне образца.

При реальном эксперименте данные моды не могут находиться за гранью образца и находятся в пределах секторного скана. При реальном эксперименте различные моды волны не могут быть отключены, они вызваны множественными отражениями сигнала.

Рис. 50 показывает gastracing метод и различные направления мод волны.

Рис. 50. Образец с показанными путями лучей.

Теперь данные новой симуляции с параметрами преобразования мод могут быть реконструированы для сравнения.

Рис. 51. Реконструированные данные CIVA с параметрами преобразования мод.

Поскольку, в данных симуляции не наблюдаются вторичные эхо-сигналы, и применение различных параметров симуляции не может достигнуть возникновения подобных эхо-сигналов, было принято решение провести эксперимент повторно. Возможно, наличие данных повторных эхо-сигналов вызвано неправильными параметрами программы оборудования в I-DEAL Technologies GmbH.

После повторного эксперимента (рис.52) вторичные эхо-сигналы не наблюдаются и теперь данные нового эксперимента могут быть сравнены между собой.

Рис. 52. S-скан повторного эксперимента.

Теперь данные эксперимента могут быть реконструированы. Далее будут представлены реконструированные в MATLAB S-сканы экспериментальных и данных симуляции. S-сканы представлены для позиций, когда преобразователь расположен непосредственно над боковым отверстием.

(а)

(б)

(в)

(г)

(д)

(е)

(ж)

Рис. 53. Реконструированные данные экспериментальных данных: 1<sup>ый</sup> дефект (а), 2<sup>ой</sup> дефект (б), 3<sup>ий</sup> дефект (в), 4<sup>ый</sup> дефект (г), 5<sup>ый</sup> дефект (д)\_ 6<sup>ой</sup> дефект (е) 7<sup>ой</sup> дефект (ж).

Как видно из реконструированных данных эксперимента, на S-сканах присутствует шум, на рис. 53 ж очень силен сигнал, отраженный от боковой стенки. Последние два отверстия находятся в зоне ближнего поля преобразователя и не очень отчетливо видно, что это два отдельных отверстия (расстояние между ними 5 мм).

Далее представлена реконструкция тех же позиций, симулированных в CIVA. Данная симуляция проведена уже с параметрами преобразования мод волны и влиянием боковых стенок.

(а)

(б)

(в)

(г)

(д)

(е)

(ж)

Рис. 54. Реконструированные S-сканы, симулированные в CIVA: 1<sup>ый</sup> дефект (а), 2<sup>ой</sup> дефект (б), 3<sup>ий</sup> дефект (с), 4<sup>ый</sup> дефект (д), 5<sup>ый</sup> дефект (е), 6<sup>ый</sup> дефект (ф), 7<sup>ый</sup> дефект (г).

Как видно из реконструированных S-сканов, представленных на рис. 54., параметры преобразования мод имеют сильное влияние на изображение. Видны искривлённые эхо-сигналы вокруг отверстий. Также присутствуют сигналы от боковых стенок, но эхо этих сигналов представляют собой одну тонкую линию, так как CIVA применяет метод усюго пучка. Данный метод применяется при расчете.

#### 4.5. Оценка/сравнение

S-сканы могут быть оценены на глаз, что не так точно, но пользователь не может оценить разницу в позиции индикации дефекта. Для достоверной оценки качества симуляции должен быть разработан критерий оценки. В качестве критерия было предложено вычесть реконструированные изображения симуляции и эксперимента. На изображении, полученного после вычитания будет видна разница в амплитуде, форме и положении индикации дефекта. Так как изображения были реконструированы в MATLAB, палитра цветов находится на одном уровне. Проблемой в ходе оценки может стать то, что индикации дефектов на изображениях симуляции и эксперимента могут не совпасть, это может быть вызвано как разницей в количестве samples, так и разницей позиций в ходе сканирования и эксперимента, для избежания подобной проблемы лучше расставить метки на объекте контроля.

Поскольку результаты симуляции и эксперимента имеют разное количество samples, индикации на реконструированных изображениях будут иметь небольшую разницу, насколько она значительна и насколько индикации не совпадают можно оценить на

изображения, полученных после вычитания изображений. Результат вычитания представлен на рис. 55.

(а)

(б)

(в)

(г)

(д)

(е)

(ж)

Рис. 55. Вычитание реконструированных изображений симуляции и экспериментальных данных.

Как видно из рис. 55 на изображениях присутствует не совпадение индикаций, вызванное разницей в количестве samples. Кроме того, видна разница в амплитуде. Также возможна разница в форме дефекта. Для более корректной оценки может быть выбрана зона интересов, например, могут быть сравнены изображения одного дефекта. При сравнение зоны одного дефекта может быть оценена разница формы индикации и разница в амплитуде будет видна отчетливее.

Рис. 56. Вычитание одного дефекта.

Как видно из рис. 56 форма индикации имеет небольшую разницу. В обоих изображениях видно эхо с нижней стороны дефекта, однако, в данных эксперимента оно видно более отчетливо. Самой главной разницей в реконструированных изображениях является разница в амплитудах, она составляет примерно 51 дБ. Сырые данные А-сканов в CIVA сохраняются без какого либо усиления, усиление применяется только на изображения. В ходе эксперимента усиление было 42 дБ, однако при реконструкции в MATLAB пришлось применить усиление 93 дБ для достижения примерно одинакового уровня усиления,

который был на картинке в CIVА при усилении 42дБ. Эта разница вызвана отсутствием калибровки в ходе симуляции.

В CIVА есть возможность провести калибровку, в ходе нее пользователь может провести дополнительные измерения и по ним подстроить результаты симуляции под эталонную величину. Применение калибровки не меняет результаты симуляции, но амплитуда отраженного сигнала будет выведена на эталонный уровень. Данная операция обязательна к применению перед проведением реального эксперимента.

## **5. Концепция использования симуляции для оптимизации маршрута роботизированного сканирования.**

Как было показано, программа симуляции CIVА может быть использована (и используется) для симуляции ультразвукового контроля. Возможности задания всех возможных параметров контроля, таких как:

- Возможность задания параметров материала
- Анизотропные и многослойные материалы доступны для симуляции
- Возможность создания сложной формы

- Все возможные параметры ультразвукового преобразователя доступны к использованию
- Различные виды инспекции,
- Различные маршруты сканирования доступны для симуляции
- Возможен контактный и иммерсионный контроль с применением различных контактных жидкостей
- Различные параметры симуляции
- Различные типы дефектов доступны к использованию, возможность создавать ветвистые трещины
- Все виды сканов доступны к использованию
- Возможность расчета параметров луча
- Быстрый расчет в сравнении с аналогичными программами

Все эти преимущества и возможности CIVА делают ее незаменимой к использованию в промышленности, разработке новых материалов и изучении поведения ультразвука в материале.

Основной принцип симуляции – это воспроизведение того, что будет показано в ходе реального контроля. Данное свойство программы симуляции дает возможность применять ее для оптимизации параметров эксперимента для увеличения вероятности обнаружения дефекта в материале, и избежание ситуаций, когда компонент становится невозможным к ультразвуковому контролю (вследствие сложной формы или анизотропии материалов).

Для объекта сложной формы использование программы симуляции позволит пронаблюдать различные варианты ситуаций с различными типами и размерами дефектов. Используя данный подход, контроль может быть осуществлен со знанием возможных вариантов результата, которые могут ожидать оператора контроля. Симуляция может предсказывать результаты и параметры контроля могут быть оптимизированы для повышения вероятности обнаружения дефектов.

CIVА может симулировать различные траектории маршрута сканирования, которые производятся роботизированной установкой. Объекты сложной формы могут вызвать проблему для роботизированной установки, названную сингулярностью робота. Она возникает при совпадении двух осей сканера и ведет к резкому ускорению движения роботизированной руки, что может привести к разрушениям и травмам персонала. Во избежание данной проблемы используются программы симуляции роботизированного сканирования, но данные программы оптимизируют маршрут только с позиции оптимального пути робота, но не с позиции оптимального маршрута для лучшего

обнаружения дефектов. Используя обе программы можно решить обе проблемы (сингулярности и наличия неконтролируемых мест в объекте сложной формы) и создать оптимальный маршрут для робота, который будет оптимальным и с точки зрения механического движения робота, и с точки зрения наилучших позиций для обнаружения дефектов.

Также для улучшения результатов симуляции и эксперимента можно применить технику синтетического фокусирования апертуры (Synthetic Aperture Focusing Technique SAFT). Результат применения данной техники представлен на рис. 57. Данная техника позволяет реконструировать S-скан так, чтобы дефект был представлен в форме точки, каким он и является в случае бокового сквозного отверстия, а не гиперболы. Применение данной техники облегчит сравнение результатов контроля и симуляции между собой, так как исчезнет проблема разницы формы дефекта. Также это может решить проблему несовпадения индикаций дефекта. Применение данной техники сократит разницу между изображениями.

Рис. 57. SAFT

Проделанная в диссертации работа была применена для калибровочного блока, данная процедура в последующем может быть проведена для объекта сложной формы, или материала с анизотропными свойствами.

## 6. Заключение

В данной магистерской диссертации была проведена оценка результатов симуляции и их сравнение с результатами эксперимента. Как было представлено программа симуляции CIVA обеспечивает достаточно точные результаты контроля. Форма и расположение дефектов индикации дефектов соответствуют результатам эксперимента. Разницей между симуляцией и экспериментом было количество samples. Также возникшая проблема повторных эхо-сигналов, была вызвана неправильными параметрами программного обеспечения. Отсутствие калибровки при симуляции привело к разнице в усилении, приложенному к S-скану. Проблему разницы амплитуды данных эксперимента и симуляции можно решить калибровкой. Примененная калибровка в процессе симуляции позволит точнее определить и оценить разницу между симуляцией и реальным экспериментом. Также для достижения наибольшей близости симуляции к эксперименту, параметры преобразования мод должны быть применены и количество отраженных мод от дефекта должно быть рассчитано. Параметры затухания также важны для точной оценки качества симуляции.

Большой разницей между симуляцией и экспериментом является уровень шума. В ходе реальных измерений всегда присутствует шум, в то время как параметры шума не были включены в симуляцию. Эхо-сигналы от боковых стенок в симуляции имеют не такую большую площадь как в эксперименте. Для достижения схожих с экспериментом эха от боковых стенок, параметры отражения сигнала должны быть изучены более тщательно. Для будущей симуляции и оценки ее качества все выше перечисленные параметры должны быть взяты в расчет. Изучение и применение всех параметров контроля минимизирует разницу симуляции и приблизит ее к реальному эксперименту. После этого могут быть подобраны оптимальные параметры контроля для данного образца и образца сложной формы в последующем.

Также применение SAFT позволит минимизировать разницу между результатами, исключив фактор формы индикации.

поскольку CIVA позволяет симулировать контроль, используя *sampling phased array technique*. Принцип сбора данных в нем отличается и метод является более точным для использования в случае объекта сложной формы. После проведения подобных операций, но используя *sampling phased array technique*, можно сделать вывод о том, какой метод более пригоден и продуктивен для контроля сложной формы.

В целом, CIVA показала достаточно точные результаты симуляции, сравнивая с экспериментом. Использование CIVA и прочих программ симуляции имеет огромный потенциал использования в индустрии и науке для понимания поведения ультразвуковой волны в материале и дает возможность предсказывать результаты контроля. Два этих

главных свойства программ симуляции дают возможность для оптимизации параметров контроля и создания оптимального маршрута сканирования для атомизированного ультразвукового контроля.