

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Инженерно-строительный институт
Кафедра «Строительных материалов и технологии строительства»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ И.Г. Енджиевская
«_____» _____ 2020г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**Разработка методов контроля и диагностики технического
состояния сварных соединений**

08.04.01 "Строительство"

08.04.01.007 "Комплексная механизация и автоматизация
строительства"

Научный руководитель _____ д-р техн. наук, профессор С.П. Амельчугов
Выпускник _____ В.В. Чечумаков
Рецензент _____ д-р техн. наук, профессор В.И. Иванчура
Нормоконтролер канд. техн. наук, доцент Е.С. Турышева

Красноярск 2020

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Разработка методов контроля и диагностики технического состояния сварных соединений» содержит 91 страниц текстового документа, 19 иллюстраций, 15 формул, 50 использованных источника.

Ключевые слова: СТРОИТЕЛЬСТВО; МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ; МОДЕЛИРОВАНИЕ; ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА.

Цель работы – совершенствование методов контроля и диагностики технического состояния сварных соединений.

Объект исследования – процесс сварки строительных металлоконструкций.

Предмет исследования – ультразвуковой контроль сварных соединений.

Задачи работы:

- анализ методов контроля качества сварных соединений;
- теоретическое и математическое описание контроля качества сварных соединений;
- разработка имитационной модели контроля качества сварных соединений в среде MATLAB&Simulink;
- компьютерный эксперимент и анализ полученных данных;

Актуальность и необходимость совершенствования контроля качества сварных соединений определяется тем, что использование ультразвукового контроля сварных соединений позволит уменьшить количество производственных отходов, снизить материальные, энергетические и трудовые затраты на строительство.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	6
1.1 Проблемы выявления дефектов и характеристики методов НК...	6
1.2 Эффективность комплексного применения методов НК.....	10
1.3 Методы и значение неразрушающего контроля качества продукции.....	14
1.4 Дефекты металлов, их виды и возможные последствия.....	17
1.5. Обзор предшествующих исследований.....	27
1.6 Рабочая гипотеза.....	43
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ.....	44
2.1 Ультразвуковой контроль трубного стыкового сварного соединения.....	44
2.2 Ультразвуковой контроль полых цилиндрических литых заготовок из алюминия.....	57
2.3 Настройка дефектоскопа.....	63
2.4 Настройка системы ВРЧ.....	65
2.5 Моделирование процесса сварки	68
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	75
3.1 Ультразвуковой контроль сварного соединения.....	75
4 РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ.....	76
4.1 Метод контроля сварных соединений на платформе Ардуино.....	76
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	81
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	82

ВВЕДЕНИЕ

Качество – совокупность параметров, обеспечивающих надежность, работоспособность и долговечность оборудования.

Контроль качества - геометрические параметры, структура и сплошность материала. Контроль качества может быть: разрушающий, повреждающий и неразрушающий.

Неразрушающий контроль – это контроль качества продукции без нарушения ее пригодности к использованию.

В зависимости от физических явлений, положенных в основу методов неразрушающего контроля, они подразделяются на следующие основные виды: магнитный, вихретоковый, проникающими веществами, радиационный, акустический.

Магнитный метод неразрушающего контроля - вид контроля, основанный на анализе взаимодействия магнитного поля с контролируемым объектом.

В магнитный вид неразрушающего контроля входят: магнитопорошковый, феррозондовый, магнитографический и другие методы.

Вихретоковый метод неразрушающего контроля основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объект контроля этим полем.

Вихретоковые методы имеют два основных ограничения: во-первых, их применяют только для контроля электропроводящих изделий; во-вторых, они имеют малую глубину контроля, связанную с особенностями проникновения электромагнитных волн в объект контроля.

Капиллярный контроль - метод неразрушающего контроля, основополагающим принципом которого является проникновение специальных жидкостей в несплошности на поверхности объекта контроля в целях их обнаружения. Капиллярный контроль позволяет контролировать

объекты любых размеров и форм из ферромагнитных и неферромагнитных, черных и цветных металлов и их сплавов, пластмасс, стекла, керамики и других твердых конструкционных материалов, которые не растворяются и не теряют своих свойств в дефектоскопических материалах, применяемых при данном виде контроля. Не проводится контроль пористых материалов.

Радиационные методы контроля основаны на регистрации и анализе ионизирующего излучения при его взаимодействии с контролируемым изделием. Наиболее часто применяются методы контроля прошедшим излучением, основанные на различном поглощении ионизирующих излучений при прохождении через дефект и бездефектный участок сварного соединения. Интенсивность прошедшего излучения будет больше на участках меньшей толщины или меньшей плотности, в частности в местах дефектов - несплошностей или неметаллических включений.

Акустический вид неразрушающего контроля - вид, основанный на регистрации параметров упругих колебаний, возбуждаемых и (или) возникающих в контролируемом объекте.

В акустическом виде неразрушающего контроля чаще всего применяют звуковые и ультразвуковые частоты приблизительно от 0,5 кГц до 30 МГц. В случае, когда при контроле используют частоты свыше 20 кГц, допустимо применение термина «ультразвуковой» вместо термина «акустический».

Следует отметить, что ни один из перечисленных методов не дает 100% выявления дефектов. В настоящее время основным методом контроля сварных соединений является ультразвуковой эхо - импульсный метод.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Проблемы выявления дефектов и характеристики методов НК

Металлоконструкции (МК) работают на сосредоточенную ударную кратковременную нагрузку, при этом возникают продольные усилия обоих знаков и изгибающие моменты.

Все основные МК создаются с помощью сварных соединений. Это, пожалуй, самый распространенный способ изготовления металлоконструкций в современной промышленности. Такая популярность объясняется тем, что сварка проста, не сильно увеличивает итоговую массу конструкций, обладает высоким потенциалом к механизации и автоматизации, имеет малые трудовые и временные затраты. Но при этом, сварка имеет и свои «болезни». В зоне термического воздействия возникает сильное изменение физико-механических свойств металла, в соединениях возникают остаточные напряжения и деформации.

При проведении мониторинга технического состояния (ТС) сложных систем и агрегатов одной из наиболее актуальных является задача объективного своевременного обнаружения дефектов различной природы и организация контроля за развитием дефектов из-за старения элементов при эксплуатации.

Одним из путей предотвращения нежелательных последствий от эксплуатации изделий с дефектами является систематичное использование методов НК. Дефектом, согласно нормативно-технической документации (НДТ) (ГОСТ 17–102), называется каждое отдельное несоответствие продукции требованиям. Однако в практике применения средств неразрушающего контроля нет полного соответствия понятия «дефект» определению по ГОСТ. Обычно под дефектом понимают отклонение параметра от требований проектно-конструкторской документации, выявленное средствами неразрушающего контроля. Связь такого понятия с

определением по ГОСТ устанавливается путем разделения дефектов на допустимые требованиям НТД и недопустимые.

Обобщая, здесь и далее под дефектом будем понимать физическое проявление изменения характеристик объекта контроля с параметрами, превышающими нормативные требования. По происхождению дефекты подразделяют на производственно-технологические, возникающие в процессе проектирования и изготовления изделия, его монтажа и установки, и эксплуатационные, возникающие после некоторой наработки изделия в результате процессов деградации, а также в результате неправильной эксплуатации и ремонтов.

В дальнейшем, говоря о дефектах, выявляемых средствами и методами НК, будем иметь в виду эксплуатационные и производственно-технологические дефекты, не выявленные при изготовлении и сдаче систем в эксплуатацию.

Так, например, (в зависимости от объекта) вся совокупность объектов и систем может быть разбита на группы, для которых характерны однотипные дефекты:

- силовые металлоконструкции (стрелы грузоподъемных машин, установщиков, несущие форменные конструкции, силовые элементы агрегатов обслуживания);

- сосуды, теплообменные аппараты, трубопроводы (сосуды и емкости, влагомаслоотделители и холодильники компрессорных установок, теплообменные аппараты, камеры нейтрализации, магистрали газов и жидкостей и др.);

- механизмы и машинное оборудование (гидроприводы, редукторы, насосы, компрессоры, вентиляторы и приводные электродвигатели, дизельные электро станции);

- трубопроводы, корпуса систем под давлением, парогенераторы, системы жидко-снабжения;

- контрольно-измерительные приборы (КИП) и автоматика, оборудование систем управления;
- кабельное оборудование (силовые кабели, измерительные кабели, кабели систем управления, кабели связи);
- электронное оборудование;
- оборудование электроснабжения (трансформаторы, коммутационная аппаратура);
- объекты, содержащие радиоактивные вещества, активность которых определяется без разрушения исходных матриц;
- конструкции строительных сооружений.

Чувствительность методов неразрушающего контроля при определении несплошностей в металле представлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Чувствительность методов неразрушающего контроля при определении несплошностей в металле

Метод	Минимальные размеры выявляемых несплошностей, мкм		
	Ширина раскрытия	Глубина	Протяжённость
Визуально-оптический	5...100	10...30	100
Цветной	1...2	10...30	100...300
Люминесцентный	1...2	10...50	100...300
Магнитопорошковый	1	150...200	30
Вихретоковый	0,5...1	-	600...2000
Ультразвуковой	1...30	2...3% толщины	-
Радиографический	100	изделия	-

Применение каждого из методов в каждом конкретном случае характеризуется вероятностью выявления дефектов. На вероятность выявления дефектов влияют чувствительность метода, а также условия проведения процедуры контроля. Определение вероятности выявления дефектов является достаточно сложной задачей, которая еще более

усложняется, если для повышения достоверности определения дефектов приходится комбинировать методы контроля. Комбинирование методов подразумевает не только использование нескольких методов, но и чередование их в определенной последовательности (технологии). Вместе с тем, стоимость применения метода контроля или их совокупности должна быть по возможности ниже. Таким образом, выбор стратегии применения методов контроля основывается на стремлении, с одной стороны, повысить вероятность выявления дефектов и, с другой стороны, снизить различные технико-экономические затраты на проведение контроля.

К примеру, вероятность обнаружения дефектов в сварных соединениях приведена в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Относительная определимость дефектов сварки различными методами дефектоскопии в % от общего числа дефектов

Метод контроля	Поверхностные трещины	Неметаллические включения	Раковины	Непровары	
				По скосам	В корне шва
Просвечивание рентгеновское	2	100	100	65	65
Просвечивание гамма-лучами	0	85	90	28	30
Ультразвуковой	10	45	85	95	45
Магнитопорошковый	98	0	0	0	0
Капиллярный (цветной)	100	0	0	0	0

Однако, несмотря на значительные успехи в развитии методов НК и применяемые меры по контролю ТС различных систем, отдельные дефекты остаются не выявленными и становятся причинами и результатами аварийных ситуаций и больших катастроф.

1.2 Эффективность комплексного применения методов НК

Объективный анализ применения различных методов привел к целесообразности применения комплексных систем контроля, которые используют разные по физической природе методы исследования, что, в свою очередь, позволит исключить недостатки одного метода, взаимодополнить методы и реализовать тем самым принцип «избыточности» для повышения надежности контроля систем и агрегатов.

Различные методы НК характеризуется разными значениями технико-экономических параметров: чувствительностью, условиями применения, типами контролируемых объектов и т.д. Поэтому при формировании комплекса методов НК разной физической природы возникает проблема оптимизации состава комплекса с учетом критериев их эффективности и затрат ресурсов.

Комплексное использование наиболее чувствительных методов не означает, что показатели достоверности будут соответственно наибольшими, а в свою очередь, учет первоочередности технических показателей может привести к противоречиям с экономическими критериями, такими как трудозатраты, стоимость, время контроля и т.д., что, в свою очередь, может привести к тому, что выбранный комплекс методов НК может оказаться с экономической точки зрения неэффективным.

Для реализации различных методов НК разработаны различные приборы: дефектоскопы, толщиномеры, тепловизоры для разных дефектов (трещин, негерметичностей), электронное оборудование (для нахождения ослабления электрических контактов), механическое оборудование, которое имеет различные технико-экономические характеристики и технологии использования для различных типов дефектов и др.

Из анализа имеющихся характеристик вытекает необходимость решения задачи выбора состава (комплекса) методов НК как задачи в оптимизационной постановке.

Комплексное применение методов НК для диагностики и обнаружения дефектов в агрегатах и системах направлено на обеспечение увеличения эффективности и достоверности контроля, продления работоспособности и ресурса.

Задача формирования комплекса различных методов НК для обнаружения совокупности возможных (наиболее опасных дефектов) в системе может быть сформулирована как оптимизационная многоуровневая однокритериальная (многокритериальная) задача дискретного программирования.

Решение задачи – оптимальное сочетание различных методов НК, применение которых наиболее эффективно при эксплуатации и анализе ресурса дорогостоящих систем.

Актуальными при проведении НК являются также задачи оптимального распределения объемов контроля на всех этапах жизненного цикла объекта, оптимизации мест и параметров контроля, планирования технического обслуживания системы с учетом экономических показателей.

Совершенствование опыта в области системного анализа, развитие научно-методической базы и накопление статистической информации позволили подойти к формулировке и обоснованию концепции «абсолютной надежности» ответственных систем, которая базируется на результатах использования вероятностных методов анализа безопасности и прочности, анализа критичности и оптимального резервирования, совершенствования и широкого применения методов НК, автоматизированных систем НК, количественного учета влияния НК на прочность и долговечность систем, компьютерном анализе и оценке результатов расчетов и измерений.

Большие объемы проведения работ по выявлению дефектов в системах и катастрофические последствия, которые могут быть причиной некачественного его проведения, ставят задачу по индустриализации применения методов НК с использованием математических моделей, методов

и современных информационных технологий для организации мониторинга при эксплуатации систем.

Индустриализация применения методов НК и организации работ на ответственных объектах и системах требуют больших материальных и временных затрат, сравнимых со всеми остальными расходами на эксплуатацию объекта.

При проведении мониторинга, исследования систем (элементов) и применения методов НК с целью продления ресурса важными являются данные, получаемые в результате решения задач:

- прогнозирования вероятности безотказной работы (ВБР) элементов и систем. Прогнозирование может, осуществляется отдельно по постепенным и внезапным отказам, с использованием моделей полиномиальной регрессии, моделей анализа цензурированных выборок;

- составление (или использование готовой) обобщенной структурной схемы надежности системы и ее узлов и элементов. Обобщенная структурная схема надежности может содержать помимо основных и резервных элементов, элементы из состава ЗИПа. Структурная схема надежности представляет собой такую совокупность функционально подобных основных и резервных элементов, отказ которых вызывает неустранимый отказ всей системы;

- формирование критериев предельного состояния для системы. Предельным состоянием элемента является его неустранимый отказ. Отказ элемента неустраним, если, например, исчерпан резерв и ЗИП. Неустранимый отказ элемента, который вызывает отказ системы, означает переход системы в ее предельное состояние;

- прогнозирование остаточного ресурса узлов и системы в целом. Показатели остаточного ресурса определяются по эмпирической зависимости ВБР узла (по отношению к неустранимым отказам) от наработки. Остаточный ресурс системы может прогнозироваться двумя способами: по результирующей зависимости ВБР системы от наработки, рассчитываемой на

основе аналогичных функций узлов, либо по остаточному ресурсу наиболее «слабого» в смысле долговечности узла. В качестве количественных оценок показателей остаточного ресурса используются средний и гамма-процентный остаточные ресурсы.

Для эффективного решения задач прогнозирования ТС и остаточного ресурса систем, повышения их долговечности актуальными являются:

- совершенствование приборного контроля, повышение точности, применение передовых методов контроля технического состояния и методов НК;

- автоматизация сбора обработки и хранения эксплуатационной информации на базе универсальных измерительных аппаратно-программных комплексов, разработка и ведение базы данных мониторинга ТС систем, разработка форм эксплуатационных документов для сбора данных, необходимых для прогнозирования остаточного ресурса систем, формирование перечня критичных с точки зрения надежности элементов исследуемых систем для контроля;

- детальная проработка перечня контролируемых параметров, мест, методов и технологий измерений, приборов для контроля и их класс точности, периодичность контроля.

В качестве базового средства измерения при мониторинге ТС необходимо использовать аппаратно-программные комплексы по сбору и обработке измерительной информации на базе персональных компьютеров, которые дают высокую точность и оперативность измерений, предоставляют широкие возможности при обработке и хранению результатов, многофункциональность, высокую мобильность, относительно низкую стоимость (по сравнению с общей стоимостью заменяемых приборов).

Результаты применения НК могут быть полезными при обосновании оптимальных объемов ремонтно-восстановительных работ, обеспечивающих

заданное (или максимально возможное при выделенном количестве средств на ремонт) продление технического ресурса анализируемых систем.

1.3 Методы и значение неразрушающего контроля качества продукции

Все основные элементы машин рассчитываются на одинаковый срок службы, по истечении которого наступает их физический износ. На практике часто приходится встречаться с тем, что отдельные части изделий выходят из строя раньше этого срока. Причиной этого, как правило, являются дефекты, не обнаруженные в процессе их изготовления и контроля качества.

В целях обеспечения требуемого качества конечного продукта (законченного производством изделия) необходимо вести контроль не только качества материала, но и соблюдения режимов технологических процессов, «контролировать геометрические параметры, качество обработки поверхности деталей и др. Технические измерения, оценка качества обработанной поверхности (овальность, конусность, цилиндричность, шероховатость и др.) несут информацию о внешней стороне дела, Это очень важно, но еще более важно проникнуть в материал, знать его структуру, химический состав, качество и глубину термической обработки. распределение внутренних напряжений, характер и распределение возможных внутренних и поверхностных металлургических дефектов. Существуют различные методы контроля, их можно разделить на две большие группы: контроль качества с разрушением и без разрушения материала (заготовки, детали).

Контроль качества с разрушением, который проводится методами химического, спектрального, рентгеноструктурного и металлографического анализа, позволяет обнаружить отклонения от заданных параметров состава и структуры металла, но требует, как правило, взятия проб, изготовления образцов. Это трудоемкие и дорогостоящие операции. Нередко на них уходит

столько же или больше металла, чем на изготовление самой детали. В особо ответственных производствах, например, при изготовлении летательных аппаратов, помимо образцов изготавливают «свидетели» процесса. Этот технический термин означает, что для изучения контролируемой детали специально изготавливается ее дубликат. Например, чтобы проверить глубину цементированного слоя в шестерне, вытачивают одну шестерню сверх предусмотренного заданием количества или взамен ее вытачивают дополнительную деталь упрощенной формы, скажем, кольцо, которое вместе с партией шестерен загружают в термическую печь. Затем проводят металлографические исследования «свидетеля», по результатам которых судят о качестве цементирования всей партии этих деталей. Большая трудоемкость, затраты металла, топливно-энергетических ресурсов обусловили использование названных разрушающих методов контроля только в виде выборочного контроля качества. Однако в современный период, когда техника становится все более сложной, выборочный контроль ответственных деталей, работающих в тяжелых эксплуатационных условиях, становится недостаточным, он не может гарантировать высокую работоспособность и надежность. Более эффективный контроль дефектов, нарушающих сплошность, однородность макроструктуры металла, отклонений химического состава следует проводить с помощью физических методов неразрушающего контроля-дефектоскопии, основанных на исследовании изменений физических характеристик металла. В соответствии с ГОСТ 18353–73 методы неразрушающего контроля в зависимости от физических явлений, на которых они основаны, подразделяются на 10 основных видов: акустический, капиллярный, магнитный, оптический, радиационным, радиоволновый, тепловой, течеисканием, электрический. электромагнитный (вихревых токов). При использовании не разрушающих методов контроля устанавливаются нормы браковки, в противном случае изделия могут незаслуженно выбраковываться или, наоборот, проникать в эксплуатацию с дефектами,

применять методы неразрушающего контроля необходимо с учетом их возможности, чувствительности, производительности, эффективности.

В контроль без разрушения контролируемого объекта входят: внешний осмотр невооруженным глазом или с помощью оптических приборов; испытание агрегатов и машин на стендах, установках, в приспособлениях для определения степени соответствия фактических рабочих характеристик проектным, выявления причин, породивших отклонения; контроль качества поверхности визуально, с помощью измерительных средств и приборов; контроль формы и геометрических параметров деталей, узлов, агрегатов, изделий в целом путем обмера; определение толщины металлических и неметаллических листов, труб, профилей проката, тонкостенных деталей, металлических и неметаллических покрытий физическими методами контроля: обнаружение несплошности материала деталей и узлов (трещин, раковин, неметаллических включений и т. доопределение структуры металла, его твердости, прочности, электропроводности, коэрцитивной силы, ферромагнитных металлов, правильности выполнения процесса термической обработки сплавов; сортировка сплавов по маркам с помощью физических методов контроля.

Неразрушающий контроль качества весьма эффективен. Он позволяет снижать трудоемкость контрольных операций, резко повышать производительность труда контролеров. Так, например, металлографический анализ структуры образца занимает 2–3 ч, автоматические средства контроля (АСК) за 1–2 с выявляют аналогичные дефекты. Применение методов неразрушающего контроля качества дает весомую экономию средств за счет отбраковки недоброкачественного металла, заготовок перед дорогостоящей механической обработкой,

Неразрушающий контроль дает возможность проверить качество деталей до вовлечения их в сборку и тем самым не допустить использования дефектных деталей в конструкциях машин а, следовательно, предотвратить

аварии и катастрофы. Данные о дефектах, полученные на ранних стадиях производства, позволяют техническим службам предприятия совершенствовать технологические процессы, улучшать режимы обработки металла в горячем и холодном состоянии. Применяя методы неразрушающего контроля, можно уменьшить вес деталей и всего изделия в целом путем уменьшения коэффициентов запаса прочности.

Замена громоздкого испытательного и вспомогательного оборудования, используемого для разрушающих методов контроля, малогабаритными приборами и АСК экономит производственные площади. Машины, собранные из деталей, прошедших контроль неразрушающими способами, гораздо реже выходят из строя и, соответственно, реже требуют ремонта, замены частей и деталей. Чтобы более наглядно представить себе, какую от этого выгоду получает народное хозяйство, скажем, что себестоимость запасных частей к тракторам составляет 80% стоимости самих тракторов. Если мобилизовать усилия и средства на создание комплекса автоматических средств неразрушающего контроля качества всех материалов, выпускаемых промышленностью, то потенциал металлургической, химической промышленности, машиностроения и приборостроения возрастет. Широкое внедрение во все области промышленности методов и автоматических средств неразрушающего контроля позволит повысить надежность, долговечность, качество изделий, улучшить использование трудовых, материальных и финансовых ресурсов.

1.4 Дефекты металлов, их виды и возможные последствия

Дефекты металла – это такие отклонения от нормального, предусмотренного стандартами качества, которые ухудшают рабочие характеристики металла и приводят к снижению сортности или отбраковке. По ГОСТ 15467–79 дефектом называется каждое отдельное несоответствие

продукции установленным требованиям, Термин «дефект» не следует отождествлять с термином «отказ». По ГОСТ 13377–75 отказом называется событие, заключающееся в нарушении работоспособности изделия вследствие дефекта. Однако появление дефектов не всегда приводит к отказу.

Дефекты в зависимости от причин их появления могут быть конструктивными, производственными (ремонтными), эксплуатационными. Мы ограничимся рассмотрением производственных дефектов, образующихся в процессе плавления металла, заливки его в изложницы, кристаллизации, охлаждения; изготовления отливок; обработки металлов давлением; в результате термической, химико-термической, механической обработки; в сварных, паяных, клепаных соединениях металлов. Причинами возникновения дефектов являются: несовершенство технологических процессов производства или восстановления деталей, нарушение режимов обработки, неэффективность методов контроля качества, несоблюдение режимов и условий эксплуатации, регламентированных нормативно-технической документацией. Дефекты в полуфабрикатах и готовых изделиях могут образоваться при хранении, транспортировке вследствие нарушения правил упаковки, укупорки, консервации и т.д.

Не всякий дефект металла является дефектом изделия. Отклонения от установленного качества металла, которые не существенны для работы данного технического устройства, не должны считаться для него дефектами. Отклонения от заданного качества, являющиеся дефектами для изделий, работающих в одних условиях (например, усталостные при динамическом нагружении), могут не иметь значения при других условиях работы (например, при статическом нагружении). Допустимые дефекты металла в зависимости от назначения изделия должны оговариваться в ГОСТ, ОСТ, СТП, конструкторской документации, в технических условиях.

Высокое качество металла и изготавливаемых из него изделий обеспечивается многими путями, главными из которых являются; постоянное

совершенствование технологических процессов, строгое соблюдение режимов плавки, внедрение прогрессивного оборудования, повышение эффективности методов контроля качества металла, активное внедрение комплексной системы управления качеством продукции, постоянное повышение трудовой, производственной и исполнительской дисциплины.

Дефектоскопия—комплекс методов и средств неразрушающего контроля материалов и изделий с целью обнаружения дефектов, Дефектоскопия включает разработку методов и аппаратуру (дефектоскопы и др.), составление методик контроля, анализ и обработку показаний дефектоскопов. В основе методов дефектоскопии лежит исследование физических свойств материалов при воздействии на них рентгеновских, инфракрасных, ультрафиолетовых лучей, гамма-лучей, радиоволн, ультразвуковых упругих колебаний, магнитного и электрического полей и др.

Дефектоскоп устройство для обнаружения дефектов в изделиях методами неразрушающего контроля. Различают дефектоскопы магнитные, рентгеновские, ультразвуковые, электроиндуктивные и др. Они выполняются в виде переносных, лабораторных приборов или стационарных установок. Переносные дефектоскопы обычно имеют простейшие индикаторы для обнаружения дефектов (стрелочный прибор, световой или звуковой сигнализатор и т. Д.); лабораторные дефектоскопы более чувствительны, часто оснащаются осциллоскопическими и цифровыми индикаторами, В стационарных дефектоскопах – наиболее универсальных – предусмотрены самозаписывающие устройства для регистрации показаний и их объективной оценки.

Более широкое распространение получил метод *оптического контроля* в связи с созданием оптического квантового генератора (ОКГ). С его помощью можно производить контроль геометрических размеров изделий со сложной конфигурацией, несплошностей, неоднородностей, деформаций, вибраций, внутренних напряжений прозрачных объектов, концентраций, чистоты газов

и жидкостей, толщины пленочных покрытий, шероховатости поверхности изделий, Первым ОКГ был рубиновый генератор, активным элементом которого являлся цилиндрический стержень из кристалла рубина с внедренными в его решетку ионами хрома. Возбуждение активных частиц в ОКГ осуществлялось воздействием на активный элемент светового излучения высокой интенсивности с помощью газоразрядных ламп-вспышек и ламп непрерывного горения серийного производства (оптическая накачка). Управление излучением частиц (создание обратной связи) производилось с помощью зеркал, одно из которых полупрозрачно на длине волны генерации. В резонаторе (системе из двух зеркал и помещенного между ними активного элемента) устанавливаются стоячие волны. Типы колебаний (или моды) отличаются друг от друга,

Рентгенодефектоскопия основана на поглощении рентгеновских лучей, которое зависит от плотности среды и атомного номера элементов, образующих материал среды. Наличие таких дефектов, как трещины, раковины и инородные включения, приводит к тому, что проходящие через материал лучи ослабляются в различной степени. Регистрируя распределение интенсивности проходящих лучей, можно определить наличие и расположение различных неоднородностей материала.

Чувствительность методов рентгенодефектоскопии определяется отношением протяженности дефекта в направлении просвечивания к толщине детали в этом сечении и для различных материалов составляет 1 – 10%. Применение рентгенодефектоскопии эффективно для деталей сравнительно небольшой толщины, так как проникающая способность рентгеновских лучей с увеличением их энергии возрастает незначительно. Рентгенодефектоскопию применяют для определения раковин, грубых трещин, ликвационных включений в литых и сварных стальных изделиях толщиной до 80 мм и в изделиях из легких сплавов толщиной до 250 мм. Для этого используют промышленные рентгеновские установки с энергией излучения от 5–10 до

200*400 кэВ (1 эВ = 1,60210⁻¹⁹ Дж). Изделия большой толщины (ДО 500 мм) просвечивают сверхжестким электромагнитным излучением с энергией в десятки МэВ, получаемым в бетатроне,

Гамма-дефектоскопия имеет ту же физическую сущность основы, что и рентгенодефектоскопия. но при этом используются гамма-лучи, испускаемые искусственными радиоактивными изотопами различных металлов (кобальта, иридия, европия, тантала, цезия, туллия и др.). При гамма-дефектоскопии используют энергию излучения от нескольких десятков кэВ до 1–2 МэВ для просвечивания деталей большой толщины. Этот метод имеет существенные преимущества перед рентгенодефектоскопией: аппаратура для гамма-дефектоскопии сравнительно проста, источник излучения компактный, что позволяет обследовать труднодоступные участки изделий. Кроме того, этим методом можно пользоваться в том случае, когда применение рентгенодефектоскопии затруднено (например, в полевых условиях). При работе с источниками рентгеновского и гамма-излучения должна быть обеспечена эффективная биологическая защита.

Радиодефектоскопия, основанная на проникающих свойствах микрорадиоволн, позволяет обнаруживать дефекты главным образом на поверхности изделий обычно из неметаллических материалов. Радиодефектоскопия металлических изделий из-за малой проникающей способности микрорадиоволн ограничена. Этим методом определяют дефекты в стальных листах, проволоке в процессе их изготовления, а также измеряют их толщину или диаметр, толщину диэлектрических покрытий и т.д. От генератора, работающего в непрерывном или импульсном режиме, микрорадиоволны через рупорные антенны проникают в изделие и, пройдя усилитель принятых сигналов, регистрируются приемным устройством.

При инфракрасной дефектоскопии используются инфракрасные (тепловые) лучи для обнаружения непрозрачных для видимого света включений. Инфракрасное изображение дефекта получают в проходящем, отраженном

или собственном излучении исследуемого изделия. Этим методом контролируют изделия, нагревающиеся в процессе работы. Дефектные участки в изделии изменяют тепловой поток. Поток инфракрасного излучения пропускают через изделие и регистрируют его распределение теплочувствительным приемником. Неоднородность строения материалов можно исследовать и методом ультрафиолетовой дефектоскопии.

Инфракрасная интроскопия дословно означает тепловое внутривидение и позволяет видеть внутреннюю структуру таких важных для радиоэлектроники материалов, как полупроводники. Наличие в полупроводниках мельчайших примесей резко ухудшает их свойства. Интроскопы позволяют точно контролировать монокристаллы полупроводников, находить нарушения структуры и микротрещины.

Магнитная дефектоскопия основана на исследовании искажений магнитного поля, возникающих в местах дефектов в изделиях из ферромагнитных материалов. служить магнитный порошок (закись – окись железа) или его суспензия в масле с дисперсностью частиц 5–10 мкм. При намагничивании изделия порошок оседает в местах расположения дефектов (метод магнитного порошка). Методом магнитного порошка можно обнаружить трещины и другие-дефекты на глубине до 2 мм.

Чувствительность метода магнитной дефектоскопии зависит от их магнитных характеристик-материалов, применяемых индикаторов, режимов намагничивания изделия и др.

Поле рассеяния можно фиксировать на магнитной ленте, которую накладывают на исследуемый участок, намагниченного изделия (магнитографический метод). Этим методом контролируют главным образом сварные швы трубопроводов толщиной до 10–12 мм и обнаруживают на них тонкие трещины и непровар.

Используют на практике малогабаритные датчики (феррозонды), которые при движении по изделию в месте дефекта указывают на изменение

импульса тока, что регистрируется на экране осциллографа (феррозондовый метод). Феррозондовый метод наиболее целесообразен для обнаружения дефектов на глубине до 10 мм и в отдельных случаях до 20 мм в изделиях правильной формы. Этот метод позволяет полностью автоматизировать контроль и разбраковку.

Намагничивание изделий производится магнитными дефектоскопами, создающими магнитные поля достаточной напряженности. После проведения контроля изделия тщательно размагничивают,

Методы магнитной дефектоскопии применяют для исследования структуры материалов (магнитная структурометрия) и измерения толщины (магнитная толщинометрия).

Магнитная структурометрия построена на определении основных магнитных характеристик материала (коэрцитивной силы, индукции, остаточной намагниченности, магнитной проницаемости). Эти характеристики, как правило, зависят от структурного состояния сплава, подвергнутого различной термической обработке. Магнитную структурометрию применяют для определения структурных составляющих сплава, находящихся в нем в небольшом количестве и по своим магнитным характеристикам значительно отличающихся от основы сплава, для измерения глубины цементации, поверхностной закалки и т.п.

Магнитная толщинометрия основана на измерении силы притяжения постоянного магнита или электромагнита к поверхности изделия из ферромагнитного материала, на которую нанесен слой немагнитного покрытия, и позволяет определить толщину этого покрытия.

Электроиндуктивная (токовихревая) дефектоскопия основана на возбуждении вихревых токов переменным магнитным током датчика дефектоскопа. Вихревые токи создают свое поле, противоположное по знаку возбуждающему. В результате взаимодействия этих полей изменяется полное сопротивление катушки датчика, что и отмечает индикатор. Показания

индикатора зависят от электропроводности и магнитной проницаемости металла, размеров изделия, а также от изменений электропроводности из-за структурных неоднородностей или нарушений сплошности металла. Датчики токовых вихревых Дефектоскопов изготавливают в виде катушек индуктивности, внутри которых помещают изделие (проходные датчики) или которые накладывают на изделие (накладные датчики).

Применение токовых вихревой дефектоскопии позволяет автоматизировать контроль качества проволоки, прутков, труб, профилей, движущихся в процессе их изготовления со значительными скоростями, вести непрерывное измерение размеров. Токовыми вихревыми дефектоскопами можно контролировать качество термической обработки, оценивать загрязненность высокоэлектропроводных металлов (меди, алюминия), определять глубину слоев химико-термической обработки с точностью до 3%, сортировать некоторые материалы по маркам, измерять электропроводность неферромагнитных материалов с точностью до 1%, обнаруживать поверхностные трещины глубиной в несколько микрон при протяженности их в несколько десятых долей миллиметра.

Термоэлектрическая дефектоскопия основана на измерении электродвижущей силы (термо эдс), возникающей в замкнутой цепи при нагреве места контакта двух разнородных материалов. Если один из этих материалов принять за эталон, то при заданной разности температур горячего и холодного контактов величина и знак термо эдс будут определяться химическим составом второго материала. Этот метод обычно применяют в тех случаях, когда требуется определить марку материала, из которого состоит полуфабрикат или элемент конструкции (в том числе готовой конструкции).

Трибоэлектрическая дефектоскопия основана на измерении электродвижущей силы, возникающей при трении разнородных материалов. Измеряя разность потенциалов между эталонными и испытуемыми материалами, можно различить марки некоторых сплавов.

Электростатическая дефектоскопия основана на использовании электростатического поля, в которое помещают изделие. Для обнаружения поверхностных трещин в изделиях из неэлектропроводных материалов (фарфора, стекла, пластмасс), а также из металлов, покрытых теми же материалами, изделие опыляют тонким порошком мела из пульверизатора с эбонитовым наконечником (порошковый метод). При этом частицы мела получают положительный заряд. В результате неоднородности электростатического поля частицы мела скапливаются у краев трещин. Этот метод применяют также для контроля изделий из изоляционных материалов. Перед опылением их необходимо смочить ионогенной жидкостью.

Капиллярная дефектоскопия основана на искусственном повышении свето- и цветового контраста дефектов относительно неповрежденного участка. Методы капиллярной дефектоскопии позволяют обнаруживать невооруженным глазом тонкие поверхностные трещины и другие несплошности материала, образующиеся при изготовлении и эксплуатации деталей машин.

Метод капиллярной дефектоскопии может быть применен для контроля качества заготовок и деталей, изготовленных из любых немагнитных материалов: аустенитных сталей, цветных сплавов, пластмасс, керамики, – кроме материалов, обладающих пористой структурой. Он основан на принципах капиллярного проникновения индикаторной жидкости (пенетранта) в полость дефекта, адсорбции ее проявляющим составом и люминесценции индикаторного состава в лучах ультрафиолетового света (УФС). В качестве источника УФС используется ртутно-кварцевая лампа типа ДРШ-1000, помещенная в защитный кожух с параболическим рефлектором.

Ультразвуковая дефектоскопия основана на использовании упругих колебаний, главным образом ультразвукового диапазона частот. Нарушения сплошности или однородности среды влияют на распространение упругих волн в изделии или на режим колебаний изделия. Если, *например*, внутри

отливки находится газовая раковина, то колебания, распространяясь по металлу, доходят до нее и меняют свое направление. Индикатор, уловив это изменение, мгновенно показывает, что в отливке дефект.

Ультразвуковому контролю можно подвергать крупногабаритные детали и заготовки, так как глубина проникновения ультразвука в металл может достигать 8–10 м. Аппаратура для ультразвуковой дефектоскопии сравнительно проста и не требует специальных мер по технике безопасности. Поэтому этот вид контроля очень широко распространяется в самых различных областях народного хозяйства, может использоваться в лабораториях, производственных и полевых условиях.

Для реализаций всех методов анализа распространения упругих колебаний необходимо иметь излучатель механических колебаний (вибратор) и индикатор, воспринимающий механические колебания испытываемой среды. Ультразвуковые колебания излучаются и принимаются от испытываемого объекта при помощи пьезоэлектрических пластин из кварца, титаната бария, сульфата лития и других материалов, преобразующих электрические колебания в упругие колебания той же частоты и обратно.

Излучатель и индикатор могут быть совмещены в одном датчике, работающем в импульсном режиме, чередуя свои функции, т.е. работая подобно радиолокатору вначале как излучатель, а затем как индикатор.

Таким образом, основой ультразвукового дефектоскопа является комплекс электронной аппаратуры, которая посылает высокочастотный импульс тока в пьезокристаллы; последние, в свою очередь, преобразуют электрический импульс в механические колебания высокой частоты – ультразвук. Колебания, проходя сквозь деталь, могут отразиться от ее противоположной стенки. Если в отливке есть дефекты к ним попадает луч ультразвука, то он меняет свое направление на дефекте.

1.5. Обзор предшествующих исследований

Рассматриваемый вопрос находится на изучении и разработке большого количества институтов и предприятий по всему миру. На практике известны многие способы контроля сварных соединений. Наиболее часто применяют способ ультразвукового контроля сварных соединений.

Фундаментальные расчетно-конструкторские и технологические разработки и оценку эксплуатационной надежности сварных конструкций в широком объеме проводили в Институте электросварки им. Е.О. Патона, МВТУ им. Н.Э. Баумана, ЦНИИТМАШе, Институте металлургии им. А.А. Байкова, Ленинградском политехническом институте им. М.И. Калинина и ряде других организаций.

Грандиозные задачи создания материально-технической базы коммунизма требуют дальнейшего быстрого развития машиностроения в направлении роста мощностей машин, повышения скоростей, увеличения давлений. При этом в ряде случаев размеры и масса отдельных современных деталей машин и элементов конструкций достигают десятков метров и сотен тонн. Это делает зачастую невозможным их монолитное изготовление. Перед конструкторами и технологами поставлены сложные задачи создания крупных деталей и конструкций путем соединения сваркой прокатных, кованных и литых элементов больших сечений при высоких требованиях к их прочности при статических, ударных и переменных нагрузках. К таким уникальным деталям и конструкциям относятся, например, рамы и архитравы сверхмощных гидравлических прессов, станины прокатных станов, валы мощных гидравлических и паровых турбин и турбогенераторов, корпуса атомных реакторов, ахтерштевни ледоколов и супертанкеров и др. Именно поэтому контролю сварных соединений уделяют особое внимание.

Обзор патента на изобретение - дефектоскоп для сварных швов
[Патент №2639592 RU, МПК G01N 27/90. Заявл.31.12.2015, опубл.

21.12.2017] Автор(ы): Дмитриев Сергей Федорович, Ишков Алексей Владимирович, Маликов Владимир Николаевич, Катасонов Александр Олегович.

Изобретение относится к методам неразрушающего контроля и позволяет обнаруживать дефекты малых размеров и глубокого залегания в сварных швах, соединяющих, преимущественно, ферромагнитные материалы. Дефектоскоп для сварных швов включает в себя аппаратную и программную части. Дефектоскоп содержит дополнительные рабочие блоки: генерации, фильтрации, обработки сигнала. Блок генерации управляет генератором и передает интегрированные и усиленные сигналы на возбуждающие катушки вихретоковых преобразователей, которые создают электромагнитное поле, индуцирующее вихревые токи в электропроводящем объекте контроля. При обнаружении дефекта поле изменяется и меняет напряжение и разность выходных напряжений измерительных катушек преобразователей. Разность напряжений в виде сигнала несет информацию о дефектах объекта контроля. Сигнал проходит через блок усиления и блок фильтрации, которые управляются программным блоком фильтрации, связанным с программным блоком генерации. Изменение частоты фильтрации происходит одновременно с изменением частоты генерации. Сигнал передается на амплитудный детектор, через аналого-цифровой преобразователь в программный блок обработки сигнала и результаты измерений выводятся на экран персонального компьютера. Технический результат заключается в определении дефектов сварных швов малых размеров на большой глубине залегания в металле на фоне сигнала от естественных макроструктурных неоднородностей, результаты измерений выводятся на экран персонального компьютера в режиме реального времени.

Технической задачей предлагаемого изобретения является повышение уровня сигнала от дефектов сварного шва малого размера на

большой глубины залегания на фоне сигнала от его естественных макроструктурных неоднородностей, а также повышение правильности и достоверности дефектоскопии за счет повышения защищенности сигнала от дефектов от помех.

Осуществление изобретения

Дефектоскоп для сварных швов работает следующим образом, принципиальная схема датчика приведена на рисунке 1.1.

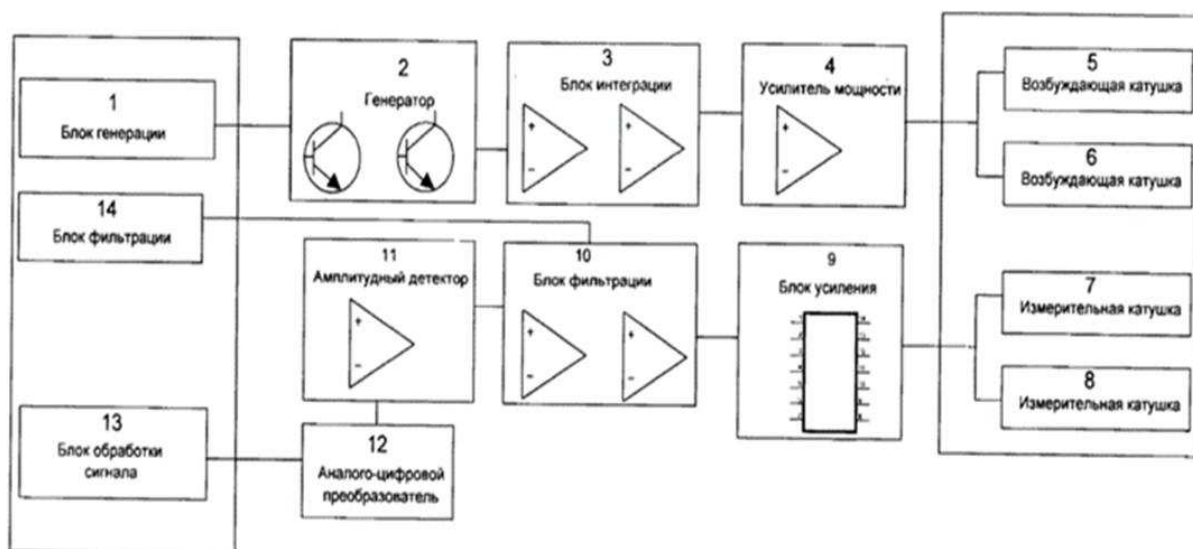


Рисунок 1.1 - Схема дефектоскопа

Персональный компьютер с программным обеспечением включает в себя дополнительные рабочие блоки: генерации 1, фильтрации 14, обработки сигнала 13. Блок 1 управляет генератором 2, сигнал f_1 передается на блок интеграции 3, на усилитель мощности 4, усиленные сигналы передают на возбуждающие катушки индуктивности вихретоковых преобразователей 6, 7 и создают электромагнитное поле, индуцирующее вихревые токи в электропроводящем объекте контроля, расположенном под возбуждающими катушками 5, 6. Затем вихревые токи создают противоположное по направлению электромагнитное поле, которое наводит напряжение в измерительных катушках 7 и 8. При обнаружении дефекта, поле изменяется и меняет напряжение на

измерительных катушках. Разность выходных напряжений в измерительных катушках 8 и 9 в виде сигнала несет информацию о дефектах объекта контроля. Сигнал проходит через блок усиления 9 и блок фильтрации 10, которые управляются программным блоком фильтрации 14, связанным с программным блоком генерации 1. Изменение частоты фильтрации происходит одновременно с изменением частоты генерации. Сигнал передается на амплитудный детектор 11, через аналого-цифровой преобразователь 12 в программный блок обработки сигнала 13 и результаты измерений выводятся на экран персонального компьютера. Таким образом, заявляемое устройство соответствует критерию изобретения - новизна.

В ходе сканирования датчика располагаются над объектом контроля в соответствии с рисунком 1.2.

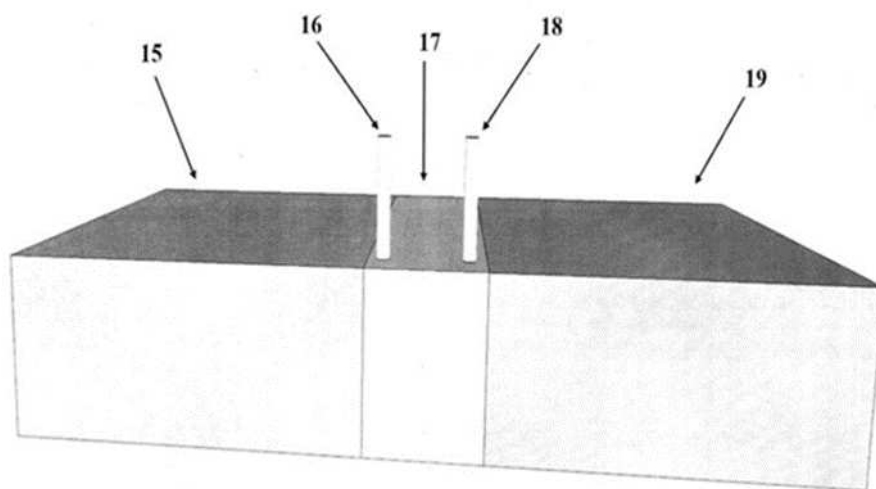


Рисунок 1.2 - Схема сканирования образца

Материал 15 и материал 19 соединены сварным швом 17. На сварном шве размещается датчик 16 и датчик 18.

Возможность технической реализации изобретения иллюстрируется следующими примерами осуществления изобретения.

Таким образом, за счет одновременного управления частотой генерируемого сигнала на возбуждающей катушке и частотой среза

системы фильтрации и селективного усиления измерительного сигнала в предлагаемом дефектоскопе повышается помехозащищенность сигнала, несущего информацию о параметрах дефектов объекта контроля .

Программное управление также позволяет быстро изменять рабочую частоту и амплитуду измерительной системы так, чтобы информативность сигнала, получаемого с измерительной обмотки, была максимальной, что позволяет определить размеры и глубину залегания дефекта после калибровки дефектоскопа по стандартным образцам.

Формула изобретения

Дефектоскоп для сварных швов, включающий в себя вихретоковый преобразователь, аппаратную и программную части, персональный компьютер, отличающийся тем, что вихретоковый преобразователь выполнен в виде двух индуктивно несвязанных датчиков с одинаковым импедансом, разнесенных друг от друга на расстояние, равное или меньшее ширине шва, с регулировкой, причем измерительные катушки датчиков соединены встречно, аппаратная часть дополнительно содержит блоки: интеграции, фильтрации, усиления, амплитудной детекции, а программное обеспечение - блок управления аппаратной частью, при этом сигнал с измерительных катушек индуктивности датчиков, несущий информацию о дефектах, поступает на блок усиления, фильтрации, рабочая частота которого меняется одновременно с частотой генерации, а затем через АЦП звуковой карты поступает в программный блок обработки сигнала, усиливается и отображается на мониторе персонального компьютера в режиме реального времени (рисунки 1.3,1.4).

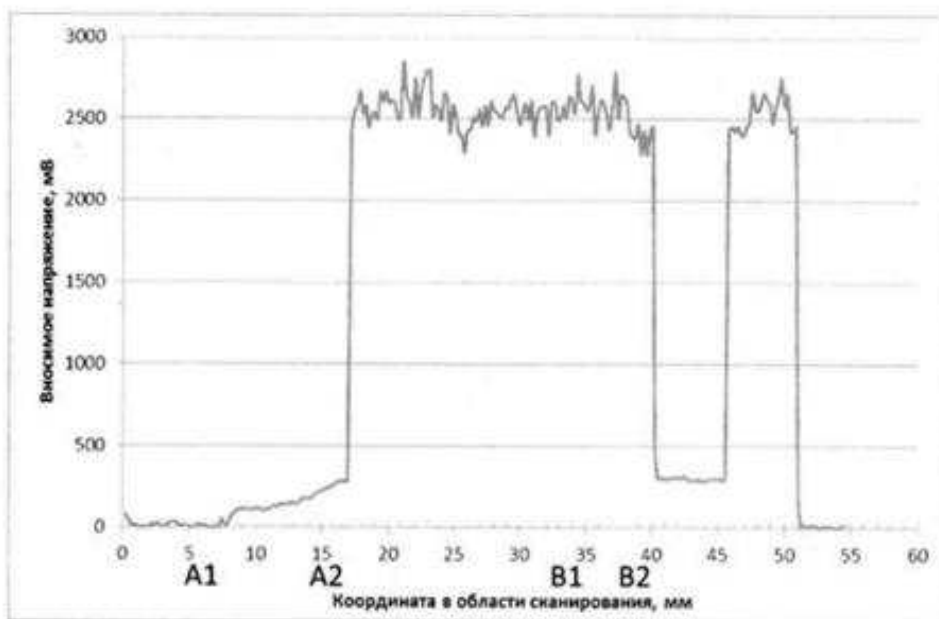


Рисунок 1.3 - Величина вносимого напряжения на измерительную обмотку преобразователя в области сварного шва при сканировании вдоль пластины

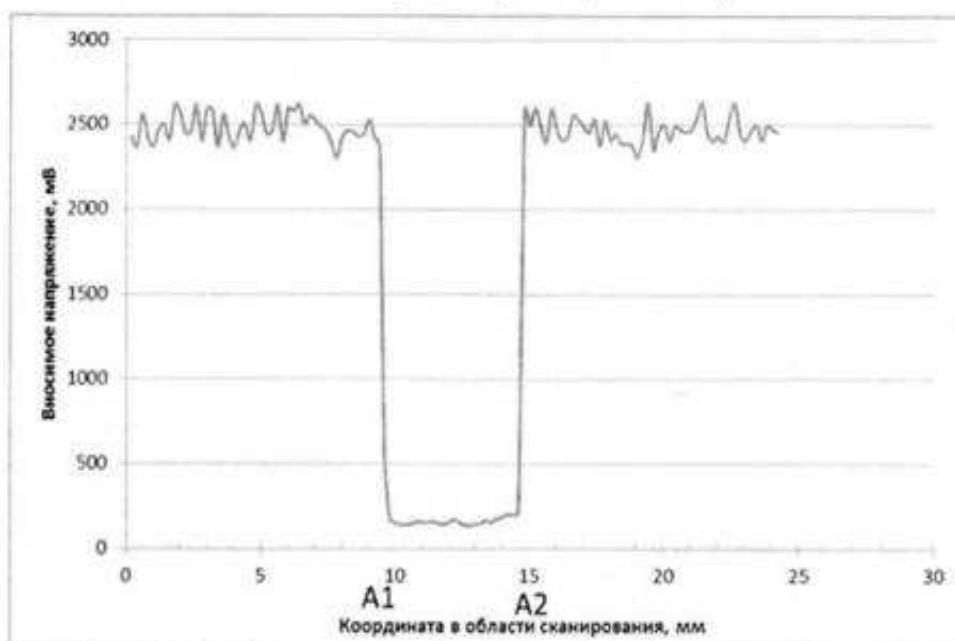


Рисунок 1. 4 - Величина вносимого напряжения на измерительную обмотку преобразователя в области сварного шва при сканировании поперек пластины

Обзор патента на изобретение - способ контроля сварных соединений и система, его реализующая.

[Патент №2718514 RU, МПК G01N 23/04. Заявл.12.11.2019, опубл.

08.04.2020] Автор(ы): Никитин Михаил Геннадьевич, Суворов Александр Николаевич.

Использование: для контроля сварных соединений. Сущность изобретения заключается в том, что способ контроля сварных соединений включает размещение с одной стороны от сварного соединения объекта контроля источника рентгеновского излучения с возможностью перемещения относительно сварного соединения, размещение с другой стороны от сварного соединения объекта контроля приемника рентгеновского излучения с возможностью перемещения относительно сварного соединения, получение от приемника рентгеновского излучения изображения, сформированного при прохождении рентгеновского излучения от источника рентгеновского излучения через сварное соединение объекта контроля, построение диаграммы распределения интенсивности рентгеновского излучения на изображении и определение по ней положения максимума интенсивности рентгеновского излучения на изображении, последующую корректировку положения приемника рентгеновского излучения таким образом, чтобы максимум интенсивности рентгеновского излучения на изображении совпадал с центром изображения приемника рентгеновского излучения. Технический результат: повышение автоматизации и производительности процесса контроля сварных соединений.

Заявляемая группа изобретений относится к области контрольно-измерительной техники, а именно, к способам и средствам для контроля сварных швов трубных и иных соединений рентгенографическим способом контроля, и может быть

использована для обнаружения дефектов сварных соединений на объектах контроля.

Задачей заявляемой группы изобретений является создание универсального способа и системы для контроля сварных соединений на объектах контроля с достижением технического результата, заключающегося в повышении автоматизации и производительности оборудования.

Возможны варианты реализации основного технического решения, заключающиеся в том, что:

- ходовые части блоков позиционирования источника рентгеновского излучения и приемника рентгеновского излучения снабжены магнитными колесами, выполненными с возможностью удержания блоков позиционирования на поверхности объекта контроля;

- соединения блоков выполнены посредством беспроводной связи.

Таким образом, благодаря реализации автоматизированного совмещения положения источника и приемника рентгеновского излучения, удалось повысить автоматизацию и производительность оборудования, поскольку существенно сократилось время на осуществление контроля, появилась возможность дистанционно контролировать различные объекты, в том числе, больших размеров (например, трубы больших диаметров), значительно увеличилась производительность оборудования, в том числе, за счет исключения человеческого фактора.

На рисунке 1.5 приведена блок-схема системы контроля сварных соединений. Система контроля сварных соединений включает источник 1 рентгеновского излучения, установленный на блоке 2 позиционирования источника рентгеновского излучения, содержащем ходовую часть с приводом 3 и выполненном с возможностью своего удержания на поверхности объекта 7 контроля и перемещения по ней, и приемник 4

рентгеновского излучения, установленный на блоке 5 позиционирования приемника рентгеновского излучения, содержащем ходовую часть с приводом 6 и выполненном с возможностью своего удержания на поверхности объекта 7 контроля и перемещения по ней.

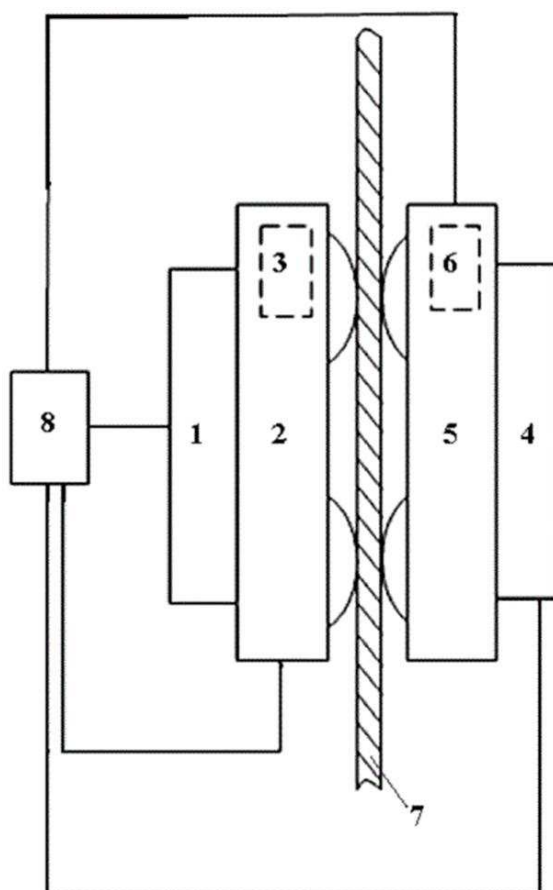


Рисунок 1.5 - Блок схема системы контроля сварных соединений

Порядок работы системы.

1) Установить с наружной стороны объекта 7 контроля напротив сварного шва источник 1 рентгеновского излучения, а с внутренней стороны объекта 7 контроля приемник 4 рентгеновского излучения, при этом центр изображения приемника 4 рентгеновского излучения должен располагаться напротив фокусного пятна источника 1 рентгеновского излучения. Точное позиционирование осуществляется по команде “УСТАНОВКА” с блока 8 обработки и управления.

2) Установить на источнике 1 рентгеновского излучения необходимые параметры рентгена (напряжение, ток).

3) Установить связь между приемником 4 рентгеновского излучения и блоком 8 обработки и управления.

4) Отойти на безопасное расстояние.

5) Дать с пульта дистанционного управления рентгена команду “РЕНТГЕН”.

6) Через программу управления приемником 4 рентгеновского излучения с пульта дать команду “УСТАНОВКА” на приемник 4 рентгеновского излучения. Приемник 4 рентгеновского излучения должен отработать команду, осуществив точную установку, напротив фокусного пятна. Для отработки этой команды используется распределение интенсивности рентгеновского излучения на активной области матричного цифрового детектора приемника 4 рентгеновского излучения и возможность позиционирования приемника 4 рентгеновского излучения на четырех независимых ведущих колесах.

7) Результат отработки команды “УСТАНОВКА” оператор видит на экране компьютера (блока 8 обработки и управления).

8) Через программу управления источником 1 рентгеновского излучения с компьютера дать команду “СТАРТ”.

9) Отслеживание движения источника 1 рентгеновского излучения осуществляется по распознаванию изображения шва, получаемого с видеокамеры, есть возможность корректировать вручную командами.

10) Отслеживание движения приемника 4 рентгеновского излучения осуществляется по распределению интенсивности рентгена на активной поверхности детектора.

11) Рентгеновское изображение шва передается на монитор пульта управления (промышленного компьютера).

Таким образом, заявляемые технические решения позволяют в автоматизированном режиме обеспечивать эффективный контроль вертикальных, горизонтальных и других сварных швов в резервуарах большого объема за счет автоматизированного позиционирования компонентов системы, расположенных на внешней и внутренней стороне объекта контроля, как относительно сварного шва, так и относительно друг друга.

Формула изобретения

1) Способ контроля сварных соединений включает размещение с одной стороны от сварного соединения объекта контроля источника рентгеновского излучения с возможностью перемещения относительно сварного соединения, размещение с другой стороны от сварного соединения объекта контроля приемника рентгеновского излучения с возможностью перемещения относительно сварного соединения, получение от приемника рентгеновского излучения изображения, сформированного при прохождении рентгеновского излучения от источника рентгеновского излучения через сварное соединение объекта контроля, построение диаграммы распределения интенсивности рентгеновского излучения на изображении и определение по ней положения максимума интенсивности рентгеновского излучения на изображении, последующую корректировку положения приемника рентгеновского излучения таким образом, чтобы максимум интенсивности рентгеновского излучения на изображении совпадал с центром изображения приемника рентгеновского излучения.

2) Система контроля сварных соединений включает источник рентгеновского излучения, установленный на блоке позиционирования источника рентгеновского излучения, содержащем ходовую часть с приводом и выполненном с возможностью своего удержания на поверхности объекта контроля и перемещения по ней, и приемник

рентгеновского излучения, установленный на блоке позиционирования приемника рентгеновского излучения, содержащем ходовую часть с приводом и выполненном с возможностью своего удержания на поверхности объекта контроля и перемещения по ней, блок обработки и управления, соединенный с источником рентгеновского излучения, блоком позиционирования источника рентгеновского излучения, приемником рентгеновского излучения, блоком позиционирования приемника рентгеновского излучения и выполненный с возможностью получения от приемника рентгеновского излучения изображения, сформированного при прохождении рентгеновского излучения от источника рентгеновского излучения через объект контроля и построения диаграммы распределения интенсивности рентгеновского излучения на изображении и определения по ней положения максимума интенсивности рентгеновского излучения на изображении, а также корректировки положения приемника рентгеновского излучения таким образом, чтобы максимум интенсивности рентгеновского излучения на изображении совпадал с центром изображения приемника рентгеновского излучения.

3) Система контроля сварных соединений по п. 2, в которой ходовые части блоков позиционирования источника рентгеновского излучения и приемника рентгеновского излучения снабжены магнитными колесами, выполненными с возможностью удержания блоков позиционирования на поверхности объекта контроля.

4) Система контроля сварных соединений по п. 2, в которой соединения блоков выполнены посредством беспроводной связи.

Обзор полезной модели к патенту - сканирующее устройство для проведения ультразвукового контроля.

[Модель №195253 RU, МПК G01N 29/00. Заявл. 04.07.2019, опубл. 21.01.2020] Автор(ы): Андерсон Эдуард Валерьевич, Кочергин Дмитрий

Валерьевич, Садкин Кирилл Евгеньевич, Сужаева Анна Сергеевна, Топинко Алексей Юрьевич, Шарапова Татьяна Юрьевна.

Полезная модель относится к неразрушающему акустическому виду контроля, применяемому в любой отрасли, например в судостроении. Сущность полезной модели состоит в том, что конструкция сканирующего устройства (рисунок 1.6) выполняется с использованием двух независимых несущих конструкций (на одной из которых закреплен датчик пути или положения, на другой - ультразвуковые преобразователи), соединенных между собой одним элементом, позволяющим обеспечивать их разворот (или установку) друг относительно друга под углом.

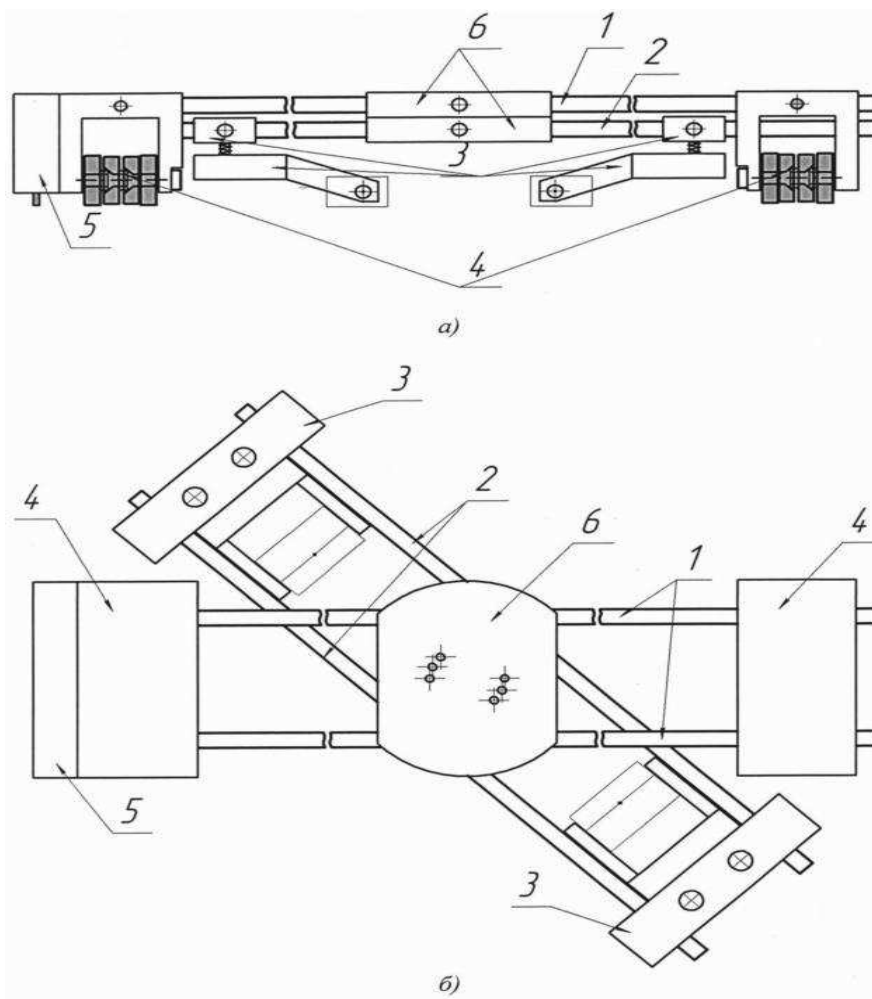


Рисунок 1.6 – Способ реализации сканирующего устройства:

а - вид сбоку, б – вид сверху

Технический результат достигается за счет возможности поиска и идентификации дефектов, расположенных под разными углами к оси перемещения устройства, с использованием одного набора ультразвуковых преобразователей без необходимости проведения дополнительной процедуры настройки чувствительности контроля и развертки дефектоскопа. Полезная модель относится к неразрушающему акустическому виду контроля, применяемому в любой отрасли, например в судостроении. Техническим результатом заявленного изобретения является создание устройства, обеспечивающего возможность поиска дефектов, расположенных под разными углами к оси перемещения устройства. Технический результат достигается за счет использования двух независимых несущих конструкций (на одной из которых закреплен датчик пути или положения, на другой - ультразвуковые преобразователи), соединенных между собой одним элементом, позволяющим обеспечивать их разворот (или установку) друг относительно друга под углом.

Сущность сканирующего устройства поясняется рисунком 6, на которой показан способ реализации сканирующего устройства, имеющего:

- 1, 2 - две независимые между собой несущие конструкции;
- 3 - крепления преобразователей;
- 4 - опора с магнитными колесами;
- 5 - датчик пути;
- 6 - элемент, обеспечивающий установку несущих конструкций под заданным углом друг относительно друга.

Устройство работает следующим образом. Преобразователи закрепляются на необходимом расстоянии друг от друга, затем проводится сканирование по заданной траектории с записью результатов по данным с датчика пути, после чего производится поворот осей друг относительно друга на заданный угол и выполняется повторное сканирование по

первоначальной траектории. После чего при необходимости обеспечивается возможность сравнения разницы параметров записанных сигналов с точной привязкой координат. Сканирующее устройство обеспечивает возможность поиска дефектов, расположенных под разными углами к оси перемещения устройства при ультразвуковом контроле .

Сканирующее устройство было реализовано при выполнении работ по ультразвуковому контролю с применением дифракционно-временного метода (TOFD) образцов, представляющих собой сварные соединения , содержащие реальные и реалистичные дефекты. Реализация сканирующего устройства представлена на фиг. 2 и 3. Применение сканирующего устройства позволило обеспечить выявление плоскостных поперечных дефектов, что в свою очередь повысило надежность ультразвукового контроля дифракционно-временным методом (TOFD). Среди наиболее существенных экономических эффектов разработки и реализации сканирующего устройства для ультразвукового контроля дифракционно-временным методом (TOFD) можно выделить следующие:

- снижение себестоимости сканирующего устройства для ультразвукового контроля дифракционно-временным методом (TOFD) по сравнению с аналогами;
- рост производительности труда;
- улучшение качества проведения ультразвукового контроля дифракционно-временным методом (TOFD);
- импортозамещение.

Формула полезной модели

Сканирующее устройство для проведения ультразвукового контроля , состоящее из двух независимых между собой несущих конструкций, на одной из которых закреплены

датчик пути и опоры с магнитными колесами, на другой - ультразвуковые преобразователи, соединенных между собой одним элементом, позволяющим обеспечивать их установку друг относительно друга под углом (рисунок 1.7).

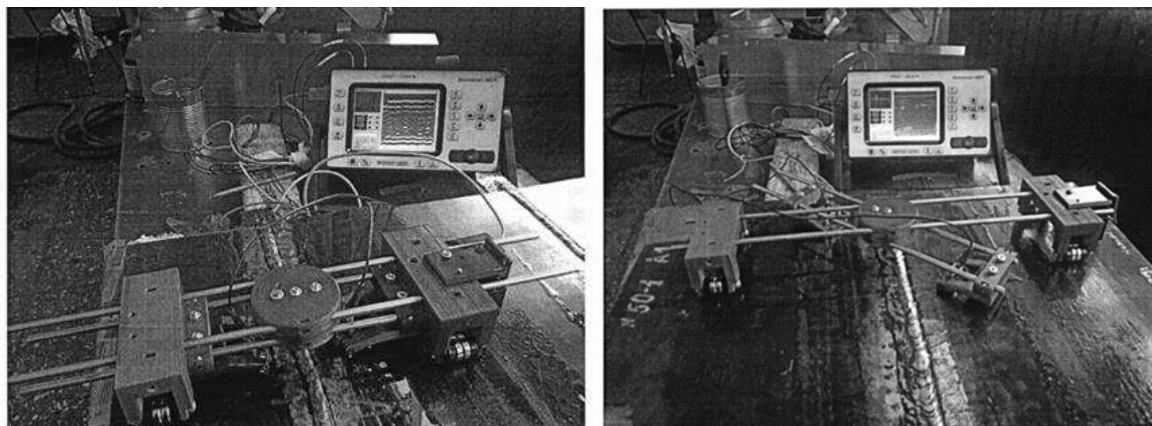


Рисунок 1.7 - Сканирующее устройство для проведения ультразвукового контроля

Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов успешно используется для выявления изъянов сварных соединений, начиная с 1930 года. За столь длительный период времени учеными совместно с практикующими специалистами были разработаны разные методики эхолокации. С их помощью несложно выявить нарушения в целостности диффузного слоя, отклонения в химическом составе наплавки, обнаружения шлаков, примеси оксидов. Ультразвуковая диагностика (УЗД) по точности не уступает рентгену или радиолокации. Прибор выявляет даже самые мелкие дефекты, отрицательно влияющие на прочность стыка.

Среди используемых сегодня неразрушающих методов определения дефектов сварного шва УЗД стал наиболее эффективным и одним из самых доступных, которые поставлены на поток. Диагностике подвергаются сварочные швы трубопроводов, которые испытывают высокое давление.

Ультразвуковая диагностика выполняется в широком диапазоне частот: от 20 кГц до 500 МГц. Волны, направленные от излучателя в какую-либо сторону, распространяются с одинаковой скоростью при условии однородности среды. При изменении среды они преломляются или отражаются, подобно лучу света. Скорость продольной волны практически в два раза больше, чем поперечной.

Результаты оцениваются по нескольким критериям. В журнале фиксируются основные показатели:

- 1) длина проверяемого сварного стыка;
- 2) параметры обнаруженных дефектов – размеры и форма;
- 3) диапазон излучаемой волны.

Перед диагностикой исследуемая область зачищается. Чтобы ультразвук проходил лучше на поверхности металла следует образовать маслянистую пленку. В зависимости от требований точности процедура проводится один или два раза.

Из изложенного следует, что ультразвуковой контроль доступный и качественный способ проверки сварных соединений.

1.6 Рабочая гипотеза

Неразрушающий контроль дает возможность проверить качество деталей до вовлечения их в сборку и тем самым не допустить использования дефектных деталей в конструкциях машин, следовательно, предотвратить аварии и катастрофы.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

2.1 Ультразвуковой контроль трубного стыкового сварного соединения

Основные понятия о волнах. Длина волны. Скорость перемещения волн.

Волны - процесс перемещения (последовательной передачи) по материалу колебательного воздействия на частицы.

Продольные - волны, при прохождении которых частицы совершают колебание по линейной траектории, ориентация которой совпадает с направлением перемещения волны. Могут распространяться в любых веществах (газ, жидкость, твердые материалы). Характеристики продольных волн помечаются символом "l".

Поперечные (сдвиговые) - волны, при прохождении которых частицы совершают колебание по линейной траектории, ориентация которой перпендикулярна направлению перемещения волны. Могут распространяться только в твердых веществах.

Продольные и поперечные волны называют объемными, так как они распространяются в глубине (объеме) материала независимо от его поверхностей.

Поверхностные (волны Рэлея) - волны, при прохождении которых частицы поверхности твердого вещества совершают колебание по эллиптической траектории, плоскость которой совпадает с направлением перемещения волны. Могут распространяться только в твердых веществах. Характеристики волн Рэлея помечаются символом "R".

Частота упругих колебаний - количество циклов колебаний в единицу времени.

Обозначение в формулах - "f". Размерность: Герц (Гц, Hz), килогерц (КГц, KHz), мегагерц (МГц, MHz), гигагерц (ГГц, GHz).

Длина волны упругих колебаний - измеренное вдоль направления распространения волны расстояние между двумя ближайшими точками, колеблющимися в одной фазе. Обозначение: "λ" ("лямбда"). Размерность, принятая в дефектоскопии: мм. Математическое выражение (*I):

$$\lambda = C / f \quad (2.1)$$

где C - скорость распространения волны.

Скорость распространения упругих колебаний (волн) - расстояние, пройденное волной за единицу времени. Обозначение: "C". Размерность, принятая в дефектоскопии: мм/мкс (км/с). Соответственно сказанному выше, скорость, а следовательно - и длина волны разделяются по типам волн.

В упругих материалах скорость продольной волны:

$$C_l \propto \sqrt{\frac{E}{\rho}}; \quad (2.2)$$

где E - Модуль упругости (Модуль Юнга);

ρ - плотность вещества.

В твердых материалах скорость поперечной волны определяется по формуле

$$C_t \propto \sqrt{\frac{G}{\rho}}; \quad (2.3)$$

Так как для одного и того же материала модуль сдвига G и плотность ρ - константы, то и скорость поперечной волны также - постоянная величина.

Поскольку в одном и том же материале всегда $E > G$, то:

В одном и том же материале скорость продольной волны всегда больше скорости поперечной. Приблизительно $C_l \approx 0,55C_t$.

На поверхности твердых материалов скорость волны Рэлея является производной от продольной и поперечной скоростей и составляет примерно $C_R \approx 0,9C_t$.

Значение C_R для углеродистой стали 3,03 км/с (мм/мкс).

Соотношение скоростей в одном и том же материале:

$$C_l > C_t > C_R \quad (2.4)$$

При равной частоте:

$$\lambda_l > \lambda_t > \lambda_R \quad (2.5)$$

Амплитуда упругих колебаний - величина, характеризующая разбег (расстояние между крайними точками) в траектории колебания частиц. Непосредственно связана с акустической силой (усилием, вызывающим колебательное движение). Размерность: в механике - мм; в электротехнике - V (вольты); в акустике - дБ (децибелы). Обозначаются: U (V) или A (дБ). Математическое выражение связи децибелов и относительных единиц, определяется по формуле

$$A - A_0 = 20 \lg(U / U_0), \quad (2.6)$$

где $A - A_0$ - разность амплитуд интересующего (A) и опорного (A_0) сигналов, дБ;

U - амплитуда интересующего сигнала, V;

U_0 - амплитуда опорного сигнала, V.

Модуль упругости (модуль Юнга) - отношение нормального механического напряжения к величине упругой деформации растяжения-сжатия, вызванной этим напряжением. Является физической константой любого упругого материала. Обозначение: "E".

Плотность - количество вещества в единице объема материала (кг/м³). Является физической константой материала. Обозначение: "ρ" ("rho").

Распределение энергии продольной волны на прохождение и отражение определяется соотношением характеристик материалов, называемых удельным волновым сопротивлением (характеристическим импедансом):

$$Z=C\rho. \quad (2.7)$$

Это распределение выражается через коэффициенты отражения (R) и прохождения (D). При анализе колебаний по энергии коэффициент отражения вычисляется по формуле

$$R^2 = [(Z_1-Z_2)/(Z_1+Z_2)]^2 \quad (2.8)$$

где Z_1 и Z_2 - импедансы первой и второй среды.

Коэффициент прохождения по энергии определяется по формуле

$$D^2 = 1-R^2 \quad (2.9)$$

Явление на границе раздела двух сред

Угол падения (угол призмы) - угол между перпендикуляром к границе раздела сред и направлением падения продольной волны. Обычно обозначается "β" ("бета").

Угол ввода - угол между перпендикуляром к границе раздела сред и направлением прошедшей границу ультразвуковой волны после преломления. Обычно обозначается " α " ("альфа") с индексом типа волны.

Угол отражения - угол между перпендикуляром к границе раздела сред и направлением отраженной в ту же среду ультразвуковой волны. Обычно обозначается " γ " ("гамма") с индексом типа волны.

Отражение - изменение направления луча на границе раздела сред, равным углу падения.

Преломление - изменение направления луча при прохождении границы раздела.

Трансформация волн - преобразование одного типа волн в другой (например, продольной в поперечную).

Если направление падающей на границу раздела твердых сред продольной волны постепенно отклонять от перпендикуляра (т.е. увеличивать угол падения β), то уже при малых β на границе начнется частичная трансформация продольной волны в поперечную. При этом как прошедшие, так и отраженные волны разных типов пойдут в разных направлениях (рисунок 2.1).

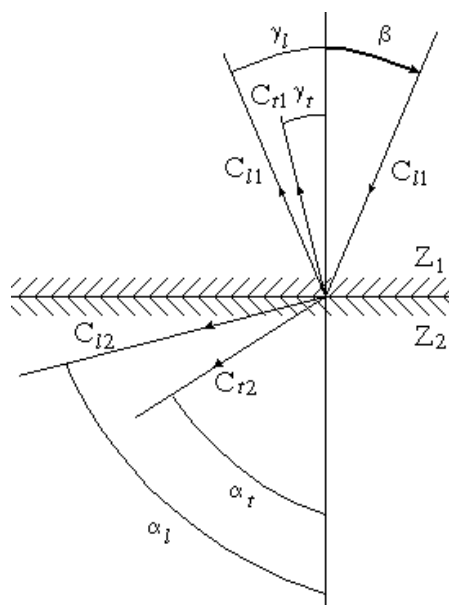


Рисунок 2.1 - Закон преломления, закон синусов

Эти направления определяются скоростями волн и связаны между собой ЗАКОНОМ СНЕЛЛИУСА (законом преломления, законом синусов):

$$\sin\beta/C_{l1}=\sin\gamma_l/C_{l1}=\sin\gamma_t/C_{t1}=\sin\alpha_l/C_{l2}=\sin\alpha_t/C_{t2} \quad (2.10)$$

Следствия из закона Снеллиуса.

1) Так как в одном и том же материале всегда $C_l > C_t$ (см. формулу 2.3), то всегда и $\gamma_l > \gamma_t$, $\alpha_l > \alpha_t$, то есть продольные волны идут ближе к поверхности, чем поперечные, как при прохождении, так и при отражении.

2) Так как у первых двух элементов знаменатели одинаковы (C_{l1}), то и числители будут равны, т.е. $\beta = \gamma_l$ ("угол падения равен углу отражения").

3) Преломление характеризуется отношением угла ввода к углу падения. Но углы могут взаимосвязанно меняться, а скорости всегда постоянны. Поэтому коэффициенты преломления проще выразить через отношение скоростей:

$$K_{ll} = C_{l2}/C_{l1}; K_{lt} = C_{t2}/C_{l1} \quad (2.11)$$

При $K > 1$ преломление устремлено к поверхности (положительное), а при $K < 1$ - к нормали (отрицательное).

4) Если скорости распространения волн в граничащих средах одинаковы, то преломление отсутствует ($K=1$).

5) Значения скоростей звука в материалах всегда известны (есть в справочниках). Поэтому если известен угол падения (угол призмы), то легко вычислить угол ввода продольной или поперечной волны:

$$\alpha_l = \arcsin(\sin\beta \times C_{l2}/C_{l1}) = \arcsin(K_{ll}\sin\beta), \quad (2.12)$$

$$\alpha_t = \arcsin(\sin\beta \times C_{t2}/C_{l1}) = \arcsin(K_{lt}\sin\beta)$$

или наоборот:

$$\beta = \arcsin(\sin\alpha_l \times C_{l1}/C_{l2}) = \arcsin(\sin\alpha_l \times C_{l1}/C_{l2}) \quad (2.13)$$

Если первая среда - жидкость, то отражение в виде поперечной волны отсутствует.

Когда в объекте (вторая среда) присутствуют две разнотипных волны, идущие в разных направлениях с разными скоростями, его контроль невозможен. Поэтому необходимо исключить одну из волн.

Легче всего исключить прошедшую продольную волну, как более близкую к поверхности. Это достигается при дальнейшем увеличении угла призмы.

Первый критический угол - угол призмы, при котором угол ввода продольной волны становится равным 90° , а сама эта волна распространяется под поверхностью в виде быстро вырождающейся головной волны.

$\sin 90^\circ = 1$, поэтому из формулы (2.13) нетрудно получить выражение для первого критического угла:

$$\beta_1^{\text{кр}} = \arcsin(C_{11}/C_{12}) \quad (2.14)$$

т.е. постоянная величина для пары материалов. Для границы "оргстекло-сталь" этот угол составляет $28,5^\circ$. Свыше этого угла продольные волны во второй среде отсутствуют. Туда проникают только поперечные волны. При этом расчетное значение угла ввода поперечных волн $\alpha_t = 33,2^\circ$.

Достоинство исключения именно продольной волны в том, что из двух типов волн сохранен более чувствительный к отражению от дефектов (чем меньше длина волны, тем более мелкие дефекты ею ощутимы).

Однако при дальнейшем увеличении β наступает момент, когда и поперечные волны покидают объем второй среды.

Понятие:

Второй критический угол - угол призмы, при котором угол ввода поперечной волны становится равным 90° , а сама эта волна распространяется по поверхности в виде волны Рэлея.

Аналогично формуле (2.13):

$$\beta_2^{\text{кр}} = \arcsin(C_{11}/C_{12}) \quad (2.15)$$

Для границы "оргстекло-сталь" этот угол составляет 57° .

Необходимость применения углов призмы между I и II критическими.

Распределение энергии между отражением и прохождением и по типам волн происходит по законам, более сложным, чем выражения (2.6) и (2.7). Оно зависит не только от импедансов, но и от угла падения β . Эти зависимости приведены в учебной и справочной литературе. Так как закон Снеллиуса преимущественно актуален в смысле перехода энергии из призмы наклонного преобразователя в металл, то полезно рассмотреть вопрос о коэффициентах прохождения на границе "оргстекло-сталь".

График зависимости коэффициентов прохождения на границе "оргстекло-сталь" от угла призмы β показан на рисунке (2.2). Здесь: D_l , D_t , D_R - соответственно коэффициенты прохождения продольных, поперечных и поверхностных волн.

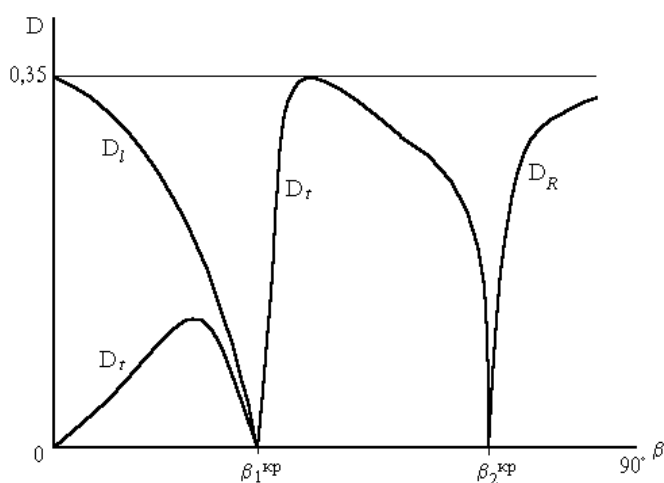


Рисунок 2.2 - График зависимости коэффициентов прохождения на границе "оргстекло-сталь" от угла призмы β показан

При $\beta=0$ (нормальное падение продольных волн на границу):

а) коэффициенты прохождения поперечной D_t и поверхностной D_R волн равны 0, так как трансформации нет;

б) коэффициент прохождения продольной волны D_l максимален (0,35).

При малейшем увеличении β :

а) поверхностная волна по-прежнему отсутствует ($D_R=0$);

б) коэффициент прохождения продольной волны D_l начинает падать, а коэффициент прохождения поперечной волны D_t - возрастать вследствие частичной трансформации продольной волны в поперечную.

При достижении β первого критического:

а) поверхностная волна по-прежнему отсутствует ($D_R=0$);

б) коэффициент прохождения продольной волны D_l обращается в 0 (переход в подповерхностную головную волну);

в) коэффициент прохождения поперечной волны D_t должен был бы выйти в максимум, но "внезапно" также обращается в 0 (парадокс первого критического угла).

При дальнейшем увеличении β :

а) поверхностная и продольная волны отсутствуют ($D_R=0, D_l=0$);

б) коэффициент прохождения поперечной волны D_t резко возрастает до максимума, затем нелинейно падает.

При достижении β второго критического:

а) продольная волна отсутствует ($D_l=0$);

б) коэффициент прохождения поперечной волны D_t обращается в 0 (переход в поверхностную волну);

в) коэффициент прохождения поверхностной волны D_R резко возрастает, приближаясь к максимуму.

Парадокс первого критического угла состоит в том, что в нем вся падающая энергия переходит в подповерхностные головные волны, в том

числе и та, которая "предназначена" для трансформации в поперечные колебания.

Поршневой преобразователь. Основной лепесток диаграммы направленности.

Поршневой преобразователь - источник акустических колебаний в виде круглого диска, все точки поверхности которого колеблются синфазно (т.е. поверхность не изгибается).

Период упругих колебаний - продолжительность одного цикла колебаний. Размерность, принятая в дефектоскопии: мкс. Математическое выражение (*II):

$$T = 1 / f \quad (2.16)$$

Акустическое давление - усилие звуковой волны, приходящееся на единицу площади ее фронта. Обозначение: "P". Обычно употребляется в безразмерном соотношении с давлением на поверхности источника (P/P₀).

Акустическое поле источника - совокупность всех точек пространства, прилегающего к источнику колебаний, которые в той или иной мере испытывают его воздействие.

Если поместить поршневой источник акустических колебаний в жидкость, то благодаря этим явлениям колебания будут исходить от него в виде расходящегося (конического) пучка, имеющего вначале форму цилиндра, приблизительно повторяющую в сечении контуры источника. Полный угол расхождения пучка (*I), определяется по формуле

$$\theta = \arcsin(0,61\lambda/a) = \arcsin(0,61C/af) \quad (2.17)$$

где a - полуразмер (радиус) источника в плоскости рисунка.

Скорость C - постоянна. Поэтому при увеличении частоты и неизменном размере источника пучок сужается (становится более направленным), а при уменьшении - более рассеянным. При увеличении размера источника и неизменной частоте пучок исходно (в ближней зоне) становится шире, но далее расходится в меньшей степени, а при уменьшении - становится более рассеянным. (Физический смысл: если уменьшать радиус источника до нуля, то он постепенно превратится в точечный источник, излучающий одинаково во всех направлениях пространства, т.е. с бесконечно большим углом расхождения).

Пьезоэлектрическое преобразование.

Это – наиболее распространенный способ. Он характеризуется малыми габаритами преобразователей и нечувствительностью к электромагнитным свойствам контролируемых материалов.

Пьезоэффект – свойство некоторых материалов преобразовывать электрическую энергию в механическую и наоборот. Природные материалы, обладающие этим эффектом, называют пьезоэлектриками, а искусственные пьезоэлектрики – пьезокерамиками.

Обратный пьезоэффект – это возникновение колебаний растяжения-сжатия кристаллов пьезоэлектрика при подаче на его грани переменного электрического напряжения.

Прямой пьезоэффект – это возникновение электрических зарядов на гранях пьезоэлектрика при приложении к нему упругой деформации растяжения-сжатия.

Коэффициент двойного электромеханического преобразования $K_{дп}$ – это доля полученной полезной энергии, сохранившаяся после обратного и прямого преобразования некоторой приложенной энергии, принятой за 1. $K_{дп}$ представляет собой своеобразный КПД пьезоматериала (таблица 2.1).

Точка Кюри – температура, по мере достижения которой материал безвозвратно теряет пьезоэлектрические свойства.

Таблица 2.1 Свойства пьезоматериалов

Наименование пьезоматериала	Коэффициент двойного электромеханического преобразования $K_{дп}$	Точка Кюри, °С
Природные пьезоэлектрики		
Сегнетова соль	0,9	28
Кварц	0,09	560
Пьезокерамики		
Титанат бария кристаллический ТБК-3	0,6	90
Цирконат-титанат свинца ЦТС-19	0,45	240

Из числа показанных пьезокерамик более эффективна ТБК-3, но относительно низкая точка Кюри сокращает долговечность пьезоэффекта. Поэтому наиболее широкое применение сегодня находит ЦТС-19.

Толщина пластины $h_{пп}$ назначается по условию резонанса, так как номинальная частота колебаний ПЭП – это есть резонансная частота $f_{рез}$ пьезопластины (*I):

$$h_{пп} = C^{пм} / 2f_{рез} \quad (2.19)$$

Устройство наклонного совмещенного преобразователя (рисунок 2.3).

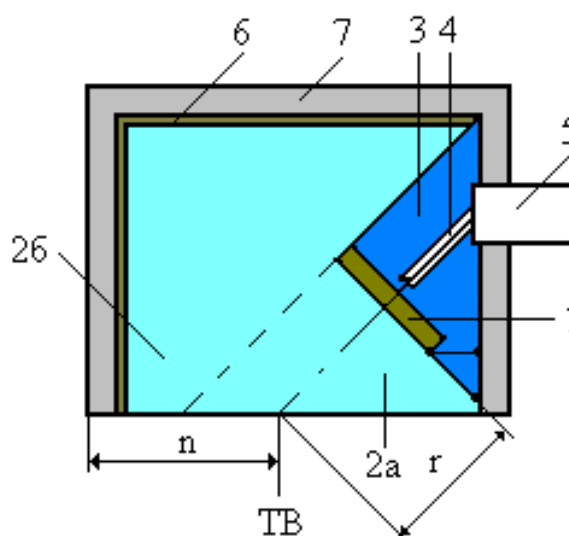


Рисунок 2.3 - Устройство наклонного совмещенного преобразователя

В таблице 2.2 приведена характеристика устройства наклонного совмещенного преобразователя

Таблица 2.2 - Устройство наклонного совмещенного преобразователя

Поз.	Наименование	Материал	Назначение
	Пьезопластина	ЦТС-19	Прямой и обратный пьезоэффект
А	Рабочая зона призмы	Оргстекло	Обеспечение наклонного ввода сигнала с трансформацией типов волн, поглощение ближней зоны Френеля, механическая защита рабочей поверхности пьезопластины
Б	Вспомогательная зона призмы – акустическая ловушка		Отвод отраженных волн из рабочей зоны
	Демпфер	Эпоксидный компаунд с добавлением цемента, эбонитовой крошки, древесных опилок	Сокращение длительности зондирующего импульса, расширение частотной полосы пропускания
	Коаксиальный кабель	Типовой	Помехозащищенная связь пьезопластины с разъемом
	Коаксиальный разъем	Типовой	Помехозащищенное подключение соединительного кабеля
	Волногасители	Оребренные передняя и верхняя грани призмы или пластины из пробкового дерева	Гашение отраженных волн
	Корпус	Алюминий	Общая механическая защита и экранирование

Окончание таблицы 2.2

Поз	Наименование	Материал	Назначение
В	Точка выхода	-	Опорный элемент оценки геометрических параметров ПЭП и координат дефекта
	Размерный показатель линии акустической задержки	-	Элемент расчета уравнений акустического тракта
	Стрела преобразователя	-	Полное размещение проекции звукового пучка в пределах рабочей грани призмы

2.2 Ультразвуковой контроль полых цилиндрических литых заготовок из алюминия

Исходя из геометрической конфигурации заготовок, представляется целесообразным осуществлять контроль изделий как объемными, так и подповерхностными дифракционными волнами. Схема для расчета параметров такого метода показана на рисунке 2.4. Адаптер, на котором установлен ПЭП, выполнен из оргстекла.

По такой схеме предполагается, что контроль основного объема металла будет осуществляться объемными продольными волнами (луч ВК), а поверхность полости – обтекающими головными волнами, в которые вырождаются продольные волны в точке касания К. Для этого необходимо найти связь величины b смещения ПЭП, потребного для запуска продольных волн по касательной к полости, с наружным диаметром D и диаметром полости d .

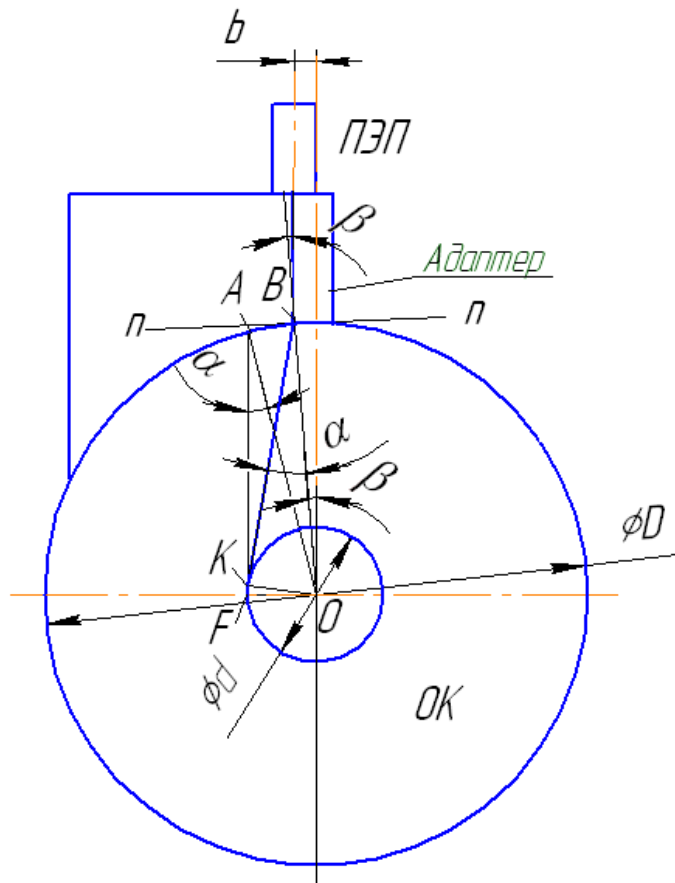


Рисунок 2.4 - Схема для расчета параметров метода

Для определения требуемого угла ввода α продольной волны рассмотрим прямоугольный треугольник AFO. Здесь катеты $FO = d/2$, $AF \perp FO$, гипотенуза $AO = D/2$. Отсюда требуемый угол ввода, определяется по формуле

$$\alpha = \angle FAO = \arcsin (FO/AO) = \arcsin (2d / 2D) = \arcsin (d / D) \quad (2.20)$$

Угол призмы β для требуемого угла ввода α найдем из закона Снеллиуса:

$$\beta = \arcsin (\sin \alpha \times C^{oc} / C^{ал}), \quad (2.21)$$

где C^{oc} и $C^{ал}$ – соответственно скорости продольных волн в оргстекле и алюминии (определяются по справочнику или предварительно измеряются на образцах).

Для отыскания потребной точки ввода на призме (точка В) откладываем угол β из центра О от вертикальной оси влево и проводим этот луч в область тела адаптера. Он перпендикулярен касательной n-n в точке ввода В и поэтому представляет собой «вертикальную» ось для данного участка адаптера, от которой акустическая ось ПЭП отклонена на потребный угол призмы β . Отсюда величина смещения b определяется по формуле

$$b = OB \times \sin \beta = 0,5D \times \sin \beta . \quad (2.22)$$

Из точки В проведем касательную ВК к полости (путь волн) и соединим точку касания К с центром О. Очевидно, что треугольники ВКО и АФО равны.

С учетом выражений (2.21) и (2.22) получаем:

$$b = 0,5D \times \sin \alpha \times C^{oc} / C^{ал} = 0,5d \times C^{oc} / C^{ал} . \quad (2.23)$$

Поскольку наружный диаметр D сократился, а отношение скоростей есть коэффициент преломления волнового потока на границе «адаптер – объект контроля (ОК)», то отсюда следует, что потребное смещение b определяется произведением радиуса полости на коэффициент преломления. В этом случае в точке касания К непременно возникнет первый механизм дифракции: на оси ультразвукового пучка вся энергия продольных волн преобразуется в обтекающие поверхность полости головные волны, которые непрерывно отбрасывают в окружающий металл поперечные волны «соскальзывания» под третьим критическим углом (см. рисунок 2.5). Если на поверхности полости имеется прорезь, имитирующая радиальную трещину, то обтекающие головные волны всегда будут отражаться от нее в обратном направлении по контуру полости, и часть отбрасываемых ими волн соскальзывания попадет в точку ввода В.

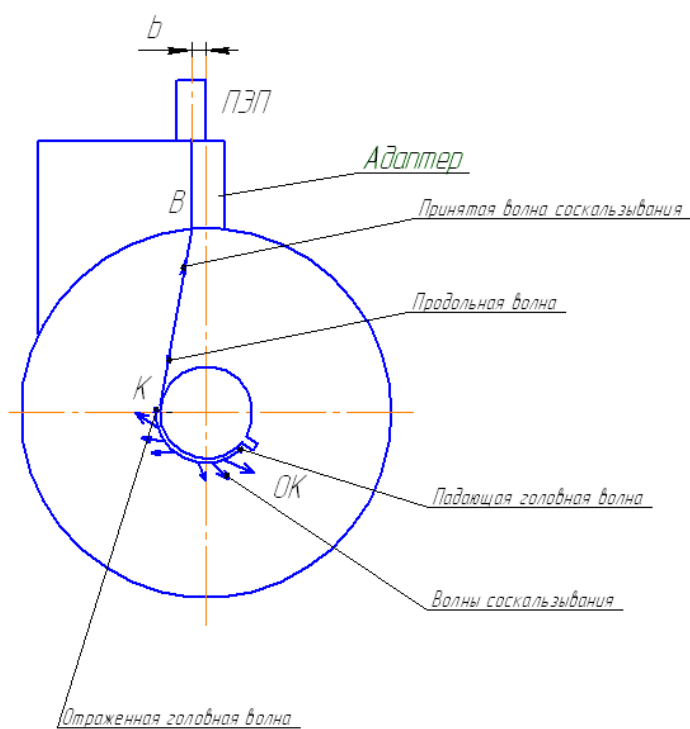


Рисунок 2.5 - Схема контроля полости с применением дифракции

Этим объясняется эффект «убегающего» эхосигнала: при повороте в адаптере образца с такой прорезью (по рисунку 2.5 против часовой стрелки) эхосигнал от прорези не исчезает, а удаляется по экрану вправо, уменьшаясь по амплитуде. Это исключительно ценно с точки зрения разработки весьма экономичной методики контроля таких изделий: если стоит задача отыскания радиальных трещин от полости, то при достаточно малом ее диаметре, достаточно мощном излучении и использовании системы временной регулировки чувствительности (ВРЧ) можно обследовать мгновенно всю окружность полости с одной установки ПЭП и призмы без проворота изделия в ней.

Поскольку угол призмы β больше 0° , то в точке В происходит частичная трансформация продольных волн в поперечные, уходящие в металл под углом менее α . Поэтому здесь необходимо проверить, насколько возможно влияние этого потока как фактора погрешности оценки координат дефекта. Для этого обратимся к графику коэффициента прохождения границы «оргстекло – алюминий» по поперечным волнам (рисунок 2.6), воспроизведен из

справочника [1]). Из графика видно, что для значений угла призмы $7,3 \div 12,4^\circ$, полученных для контроля полостей типовых заготовок (см. таблицу 2.1), доля трансформации энергии в поперечный тип волн составляет $3 \div 7\%$. В сравнении с долей энергии прошедших продольных волн это по максимуму приблизительно составит:

$$100\% \times 7\% / (D_t^{\max} - 7\%) = 100\% \times 7\% / (62\% - 7\%) = 13\%, \quad (2.24)$$

что несущественно, и поэтому погрешность от влияния поперечной волны пренебрежимо мала.

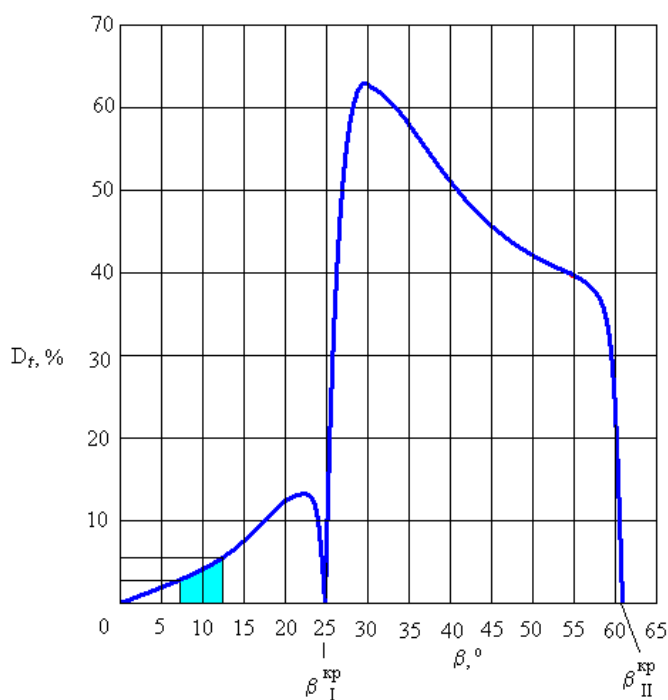


Рисунок 2.6 - Коэффициент прохождения границы «оргстекло – алюминий» по поперечной волне

Головные волны могут быть использованы также и для контроля на предмет дефектов, выходящих на наружную поверхность. Для этого следует с помощью того же адаптера создать угол призмы, равный первому критическому для границы «оргстекло – алюминий». При значениях скоростей продольных волн $C^{\text{oc}} = 2730$ и $C^{\text{ал}} = 6380$ м/с этот угол составит:

$$\beta_{кр1} = \arcsin (C^{oc} / C^{ал}) = \arcsin (2730 / 6380) = 25^\circ . \quad (2.25)$$

Такой способ будет осуществляться по схеме, показанной на рисунке 2.7. Здесь необходимое смещение ПЭП b_1 определяется по формуле

$$b_1 = 0,5D \times \sin \beta_{кр1} = 0,5D \times \sin 25^\circ = 0,2D. \quad (2.26)$$

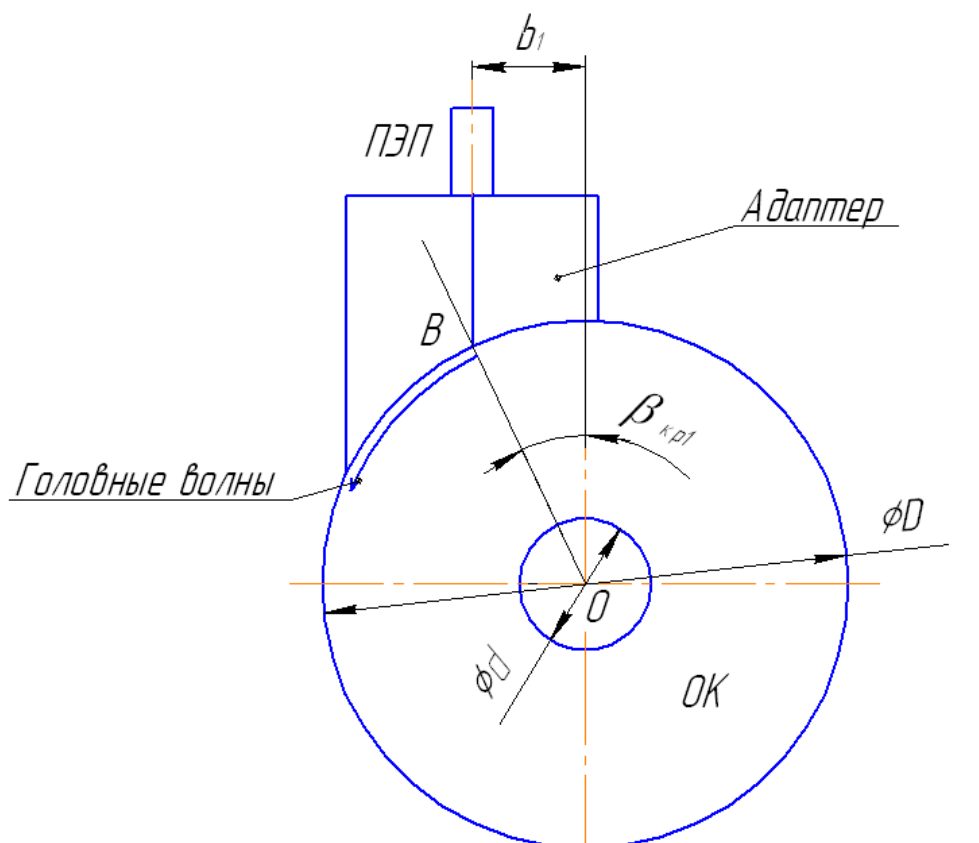


Рисунок 2.7 - Схема контроля наружной поверхности с применением ГОЛОВНЫХ ВОЛН

Как альтернативный вариант контроля полости можно было бы использовать в качестве запускающих волн поперечные, которые при дифракции будут трансформироваться в обтекающие поверхностные. В этом случае в формулах (2) и (4) в качестве $C^{ал}$ следует употреблять скорость поперечных волн в алюминии, значения β и b увеличатся, но эта методика эффективна только если β превысит первый критический для границы

«оргстекло – алюминий». Как показали расчеты по типовым заготовкам (см. таблицу 1) в предположении значения скорости поперечных волн в алюминии $3080 \div 3130$ м/с (данные справочника [1]), из 12 представленных вариантов этому удовлетворяют только 2, относящиеся к одному типоразмеру ($D = 162$, $d = 80$) и различающиеся по марке материала. Обратим внимание, что в этом случае позиция ПЭП (смещение b) практически одинакова для контроля полости дифрагированными поверхностными волнами и для контроля наружной поверхности головными волнами. Если не ставится задача определения координат дефекта, то такое совпадение позволяет вести контроль поверхности и полости одновременно; в противном случае это сильно усложняет задачу определения глубиномером местоположения дефекта.

Если координаты дефекта необходимо определять, то установка ПЭП в какую-либо позицию между значениями b по формуле (4) и b_1 по формуле (7) противопоказана, так как в этом случае возникнет ярко выраженная двойственность трактовки эхосигналов: принят ли сигнал продольной волной в одном направлении или поперечной волной в другом направлении в объеме металла, но ни наружная поверхность, ни поверхность полости облучаться ультразвуком не будут. Особенно эта двойственность проявится при такой позиции ПЭП на адаптере, когда угол призмы соответствует локальному максимуму левой части графика рис. 3 (около 22°), так как здесь коэффициенты прохождения объемных продольных и поперечных волн практически равны между собой и составляют по 12%, а прочие 76% переходят в головную волну, и все эти волны следуют в разных направлениях с разными скоростями.

2.3 Настройка дефектоскопа

Расчет диапазона контроля для установления масштаба развертки.

Следует учитывать то, что высоту h адаптера сигнал проходит в прямом и обратном направлении со скоростью продольных волн в оргстекле C^{oc} , отрезок ВК в прямом направлении – со скоростью продольных волн в алюминии $C^{ал}_l$, поверхность полости (в предельно удаленной позиции отражателя) в прямом и обратном направлении – со скоростью головных («ползучих») волн в алюминии $C^{ал}_n = 0,95$, отрезок ВК в обратном направлении – со скоростью поперечных волн в алюминии $C^{ал}_t$.

Поэтому время задержки наиболее удаленного эха составит:

$$T = 2h / C^{oc} + 0,5(D^2 + d^2)^{0,5}(1/ C^{ал}_l + 1/ C^{ал}_t) + 2\pi d/ C^{ал}_n \quad (2.27)$$

Рассчитав T , развертку легко откалибровать на стандартном образце СО-2, учитывая, что его высоту 59 мм сигнал проходит в прямом и обратном направлении за 20 мкс. Установив ПЭП на поверхность СО-2, следует регулировкой ширины развертки сдвинуть первый донный сигнал на позицию от левого края, соответствующую доле $(20 \text{ мкс} / T)$ ширины экрана. Поскольку проход сигнала по адаптеру не интересует, при контроле начало развертки можно совместить с «входным эхо» - сигналом, отраженным от границы «адаптер – металл». Стробом следует охватить зону между входным эхо и правым краем экрана.

Глубиномер можно использовать в режиме Н, настроив его по стандартной методике на образце СО-2 или СО-2А (алюминиевом). Но в этом случае при обработке показаний потребуется введение поправок:

а) на несоответствие скорости продольных волн в стали и в алюминии (только в случае настройки по СО-2):

$$\Delta_1 = C^{ал}_l / C^{ст}_l . \quad (2.28)$$

б) на неоднородность типов волн, участвующих в процессе:

$$\Delta_2 = T / \{[2h + (D^2 + d^2)^{0.5} + 2\pi d] / C_{стl}\}. \quad (2.29)$$

(Здесь знаменатель отображает время, за которое сигнал прошел бы то же расстояние только со скоростью продольных волн в стали).

Далее при обработке результатов контроля показания глубиномера следует умножать на эти поправки, а позицию дефекта определять на рабочем эскизе, выполненном в известном масштабе, отмеряя эти показания вдоль изображения акустического тракта сигнала с учетом масштаба

2.4. Настройка системы ВРЧ

- Установить адаптер с ПЭП в положение максимума амплитуды эхо-сигнала от надпила в его ближней позиции (прямое отражение продольных волн, см. рисунок 2.8-а слева);

- Ручкой "А" блока А8 установить начало строба ВРЧ (верхняя развертка) у переднего фронта эхоимпульса (рисунок 2.9-а справа).

- Органами усиления подвести вершину эхо-сигнала на уровень средней горизонтальной линии экрана.

- Провернуть образец в адаптере против часовой стрелки (по рисунку) до исчезновения прямого эхосигнала от надпила. При достаточном горизонтальном масштабе развертки и высокой мощности излучения на правом краю экрана может появиться эхосигнал от надпила, полученный волнами обегания (рисунок 2.9-б).

Ручкой "Б" блока А8 установить конец строба ВРЧ у заднего фронта эхоимпульса.

Ручкой "В" блока А8 подвести вершину эхо-сигнала на уровень верхней горизонтальной линии экрана (рисунок 2.9-в).

Кнопки "М" блока А6 и "АСД/ ВРЧ" блока А10 могут быть отжаты.

Если настройка ВРЧ не требуется, то ручки "У", "Х", "А" и "Б" блока А8 должны находиться в крайнем левом положении.

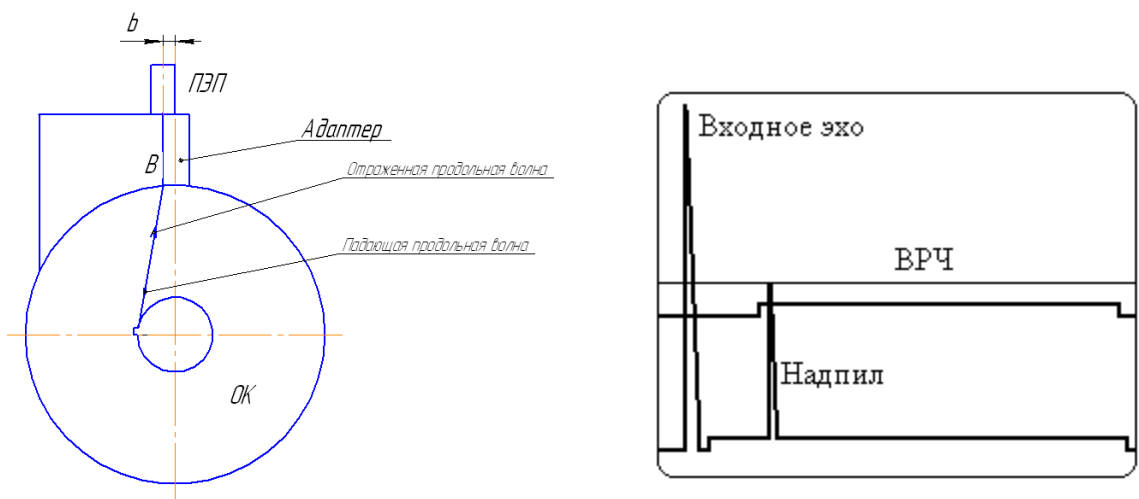


Рисунок 2.8 – Установка адаптера с ПЭП

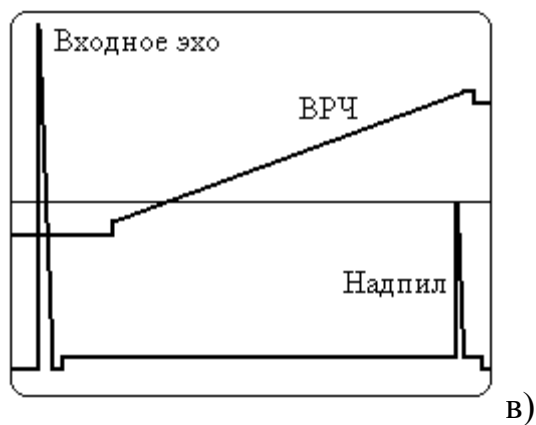
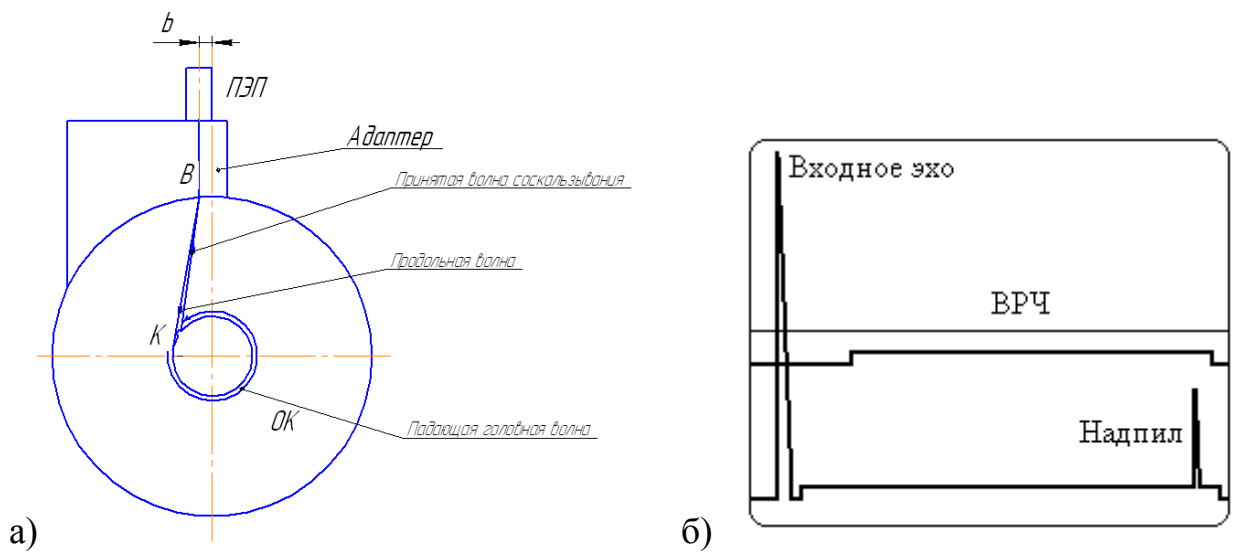


Рисунок 2.9 - К настройке ВРЧ

Калибровка чувствительности должна производиться по стандартному образцу предприятия (СОП), в котором выполнены контрольные отражатели – модели дефектов предельно допустимых размеров. Если эти размеры не

заданы руководящей, нормативной или конструкторской документацией на контролируемые объекты, то они могут быть рассчитаны и назначены исходя из высокой ответственности контролируемого объекта и предельных возможностей надежного выявления ультразвуковым методом отражателей (дефектов) малых размеров. Эти возможности определяются соотношением длины волны λ и минимального габарита d отражателя. В учебном пособии [2] представлена диаграмма зависимости амплитуды отражения от такого соотношения (рисунок 2.10). Из диаграммы видно, что по мере уменьшения отношения d/λ амплитуда A отражения от дефекта убывает монотонно только до значения $d/\lambda = 2$, а далее появляются осцилляции, вызванные дифракцией волн на дефекте.

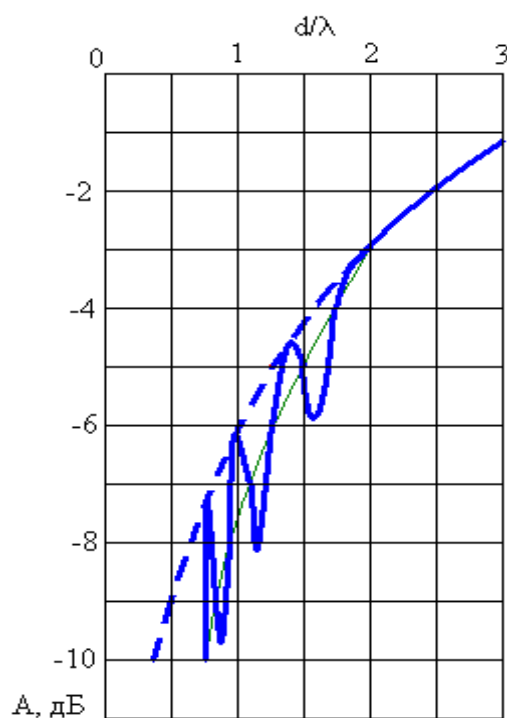


Рисунок 2.10 - Нелинейность зависимости амплитуды отражения от соотношения «диаметр дефекта – длина волны»

Таким образом, минимальный габарит дефекта, при котором отражение волн от него еще гарантировано, составляет удвоенную длину волны. Но поскольку график был разработан авторами для бокового цилиндрического отверстия, то при переходе к плоскому отражателю этот результат следует

умножить на отношение коэффициентов осевой концентрации отражения, которые составляют для круглых отражателей 0,3, для плоских 0,7:

$0,3/0,7 = 0,43$ На частоте $f = 2,5$ МГц, принятой в данной методике, длина продольной волны в алюминии составляет:

$$\lambda = C_{\text{ал}} / f = 6380 \times 0,001 / 2,5 = 2,55 \text{ мм} \quad (2.30)$$

Таким образом, глубина контрольных надпилы в СОП должна составлять $2,55 \times 2 \times 0,43 = 2,2$ мм. Амплитуда отражения от таких надпилы указывает браковочный уровень.

2.5 Моделирование процесса сварки

Физические и химические процессы, протекающие при сварке, можно моделировать различными методами. Проведение математических расчетов для реального сварочного процесса достаточно трудная задача. Решения можно получить только для отдельных простейших задач, с использованием ряда упрощающих допущений. Для решения вопросов, актуальных для современной промышленности, необходимо совместное рассмотрение целого комплекса физико-химических процессов при сварке. При этом необходимо учитывать процессы, протекающие в источнике энергии для сварки, источнике питания, протекание электрического тока через соединение, распространение теплоты при нагреве и охлаждении, структурные, фазовые и химические превращения, плавление, кристаллизацию шва, изменение свойств материала в шве и зоне термического влияния, диффузию примесей, а так же сварочные деформации и напряжения [1].

Часть этих процессов, возникающих при сварке и родственных ей технологиях (нагрев – охлаждение, агрессивные среды, деформации), может присутствовать и в эксплуатационных нагрузках, т. е. действовать на готовую конструкцию, влияя на ее работоспособность. Достоверность и точность

оценки воздействия на сварную конструкцию комплекса процессов, протекающих в ней при ее изготовлении и эксплуатации, обеспечивают натурные эксперименты на реальных изделиях или компьютерное моделирование на основе численных методов.

Этапы моделирование сварки, наплавки или термической обработки для всех программных комплексов, основанных на методе конечных элементов (КЭМ) имеют общий вид. На основе КЭМ работают программные комплексы: MSC.Mark; SYSWELD; ABAQUS; Ansys; MSC. Nastran и др. Они имеют разный уровень специализации для моделирования процессов сварки. Интересным примером, с точки зрения круга решаемых задач, является программный комплекс «СВАРКА». Он реализует МКЭ при расчете тепловых и деформационных задач [2]. Программный комплекс SYSWELD разработан специально для процессов сварки, он позволяет моделировать металлургическую задачу, в нем заложены аналитические модели, которые позволяют задавать распределение теплового потока [3].

На примере моделирования дуговой сварки неплавящимся электродом в среде аргона (ТИГ) стыкового соединения, собираемого из штампованных заготовок сплава системы Al- Mg-Si рассмотрим основные этапы решения в программе SYSWELD.

- Построение геометрической модели стыкового соединения. Ввод размеров для построения модели с использованием 3D-графики. Использован Autodesk Inventor.

- Импортирование геометрической модели в программный пакет Visual Weld.

- Построение КЭ, генерация сетки конечных элементов с их сгущением в зоне предполагаемой сварки.

- Назначение материала конструкции. Материал - алюминиевый сплав системы Al-Mg-Si взят из базы данных Visual Weld.

- Определение модели нагрева. В программе нам доступно несколько аналитических моделей нагрева для описания сварочной ванны. Граничное

условия может быть задано изотермической или адиабатической границей, или условием полного теплообмена: конвекцией и излучением из сварочной ванны расплавленного металла. В данном случае используем аналитическую модель объемного тепловыделения двойного эллипсоида Голдака.

Для определения сварочного тока, напряжения, скорости сварки, которые обеспечат равномерное плавление и отсутствие прожога основного металла используется специальный инструмент SYSWELD – heat input fitting, позволяющий задать граничные условия для тепловой задачи и аналитическую модель распределения тепловой мощности источника энергии. Для решения задачи теплопроводности вводятся физические свойства сплава: теплопроводность, плотность; теплоемкость в виде кусочно-линейных функций.

– Определение граничных условий для теплообмена – охлаждение на воздухе (см. рисунок 2.11, а).

– Определение граничных условий для механической задачи – условия закрепления деталей (см. рисунок 2.11, б).

– Настройка решателя программы и расчёт. Одновременно с тепловой решаем металлургическую задачу. Решение основано на модели Леблонда, описывающей процесс превращения одной фазы в другую, в зависимости от времени превращения, скорости охлаждения и нагрева материала. Модель подходит для описания любого диффузионного металлургического процесса [1].

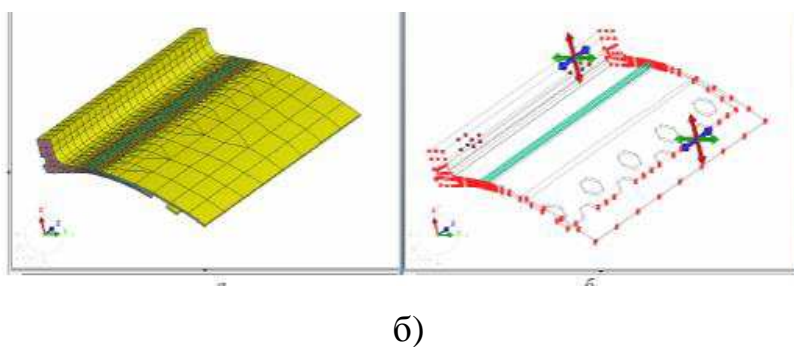


Рисунок 2.11 - Граничные условия теплообмена и механической задачи:

а - КЭМ для расчёта; б – условия закрепления детали

Распределение тепловых полей показано на рисунке 2.12

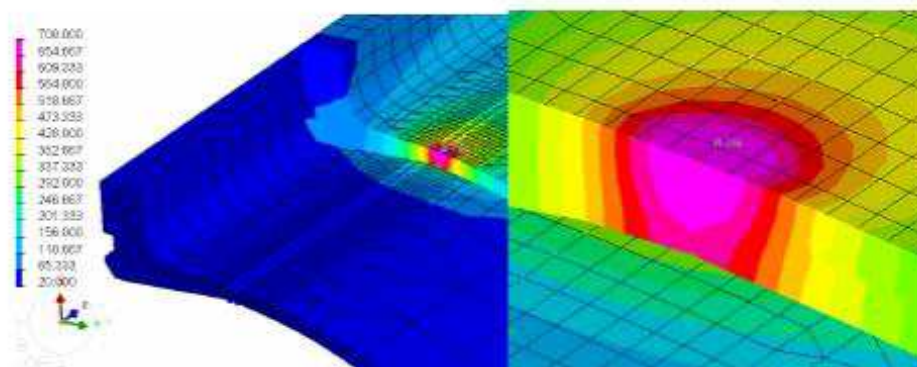


Рисунок 2.12 - Распределение тепловых полей ($^{\circ}\text{C}$)

Таким образом, рассмотренный метод подходит для описания любого термомеханического и диффузионно-металлургического процессов. Решая такого рода задачи можно оптимизировать процесс сварки и родственных технологий прибегая к натурным испытаниям лишь для определения свойств материала и проверки модели.

Моделирование процесса сварки проводилось Matlab&Simulink. На рисунке 2.13 приведена схема замещения сварочного трансформатора. Схема замещения трансформатора, моделируемая блоком Linear Transformer, принятая в программе MATLAB, показана на рисунке 2.13. Здесь приведена схема замещения трехобмоточного трансформатора, соответствующая условным графическим изображениям элементов на пиктограммах блоков и в поле «Help» программы MATLAB.

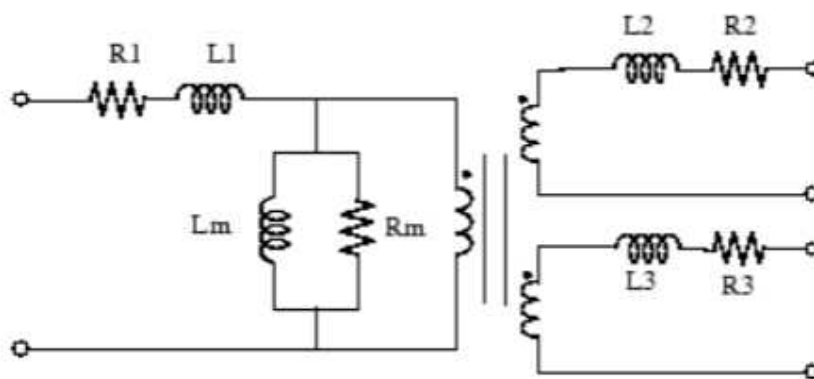


Рисунок 2.13- Схема замещения сварочного трансформатора

Характеристика насыщения трансформатора, моделируемого блоком Saturable Transformer приведена на рисунке 2.14.

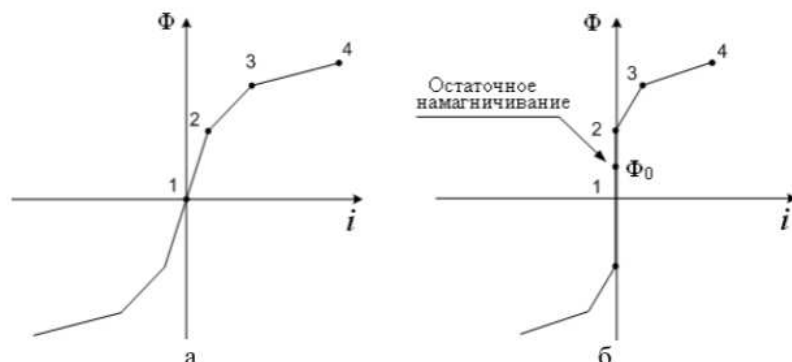


Рисунок 2.14 – Характеристика насыщения трансформатора, моделируемого блоком Saturable Transformer

В соответствии со схемой 2.12 разработана Simulink модель сварочного трансформатора, приведенная на рисунке 2.15. Для получения результатов моделирования в схеме применяется графический виртуальный осциллограф и дисплей.

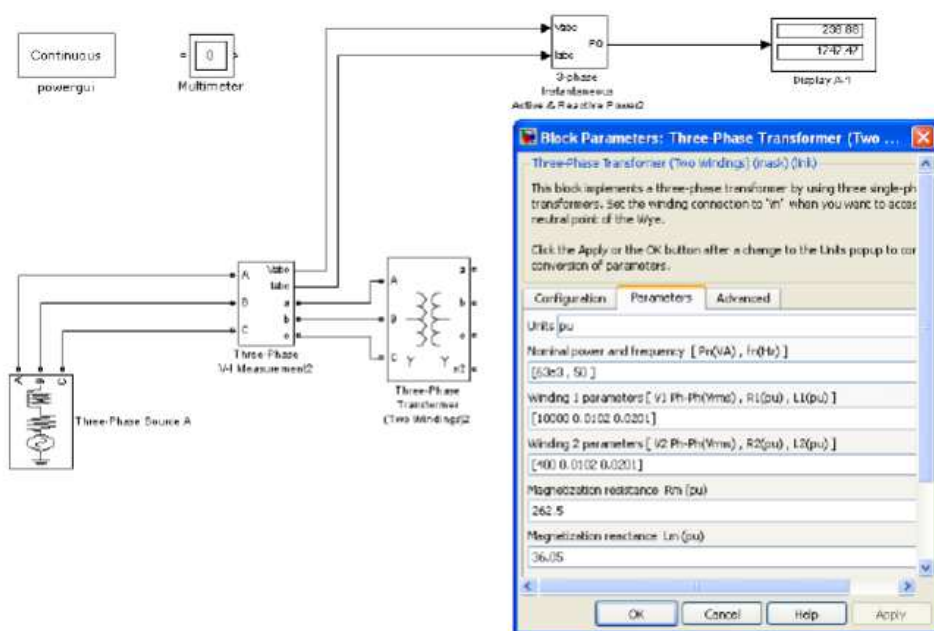
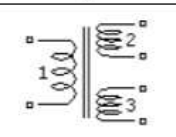
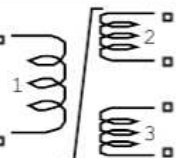
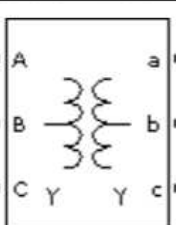
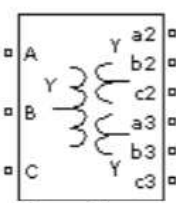


Рисунок 2.15 - Симулинк модель сварочного трансформатора

Как видно из сравнения рисунков 2.12 и 2.15, кроме условных изображений отличие схемы, принятой в программе MATLAB, от схемы замещения, принятой в отечественной литературе, состоит в том, что поперечная ветвь, моделирующая магнитную систему трансформатора, в англоязычной литературе моделируется не проводимостями, а активным сопротивлением и индуктивностью цепи намагничивания. Поэтому для обмоток трансформатора и цепи намагничивания необходимо определять не индуктивное сопротивление, а индуктивности.

В таблице 2.3 приведены Пиктограммы, название и назначение блоков для моделирования трансформаторов.

Таблица 2.3 – Пиктограммы, название и назначение блоков для моделирования трансформаторов

№	Пиктограмма	Название и назначение блока
1	2	3
1	 <p>Linear Transformer</p>	<p>Linear Transformer Линейный трансформатор – моделирует трех- или двухобмоточный однофазный трансформатор без учета насыщения стали сердечника</p>
2	 <p>Saturable Transformer</p>	<p>Saturable Transformer Нелинейный трансформатор – моделирует трех- или двухобмоточный однофазный трансформатор. В модели учитывается нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника.</p>
3	 <p>Three-Phase Transformer (Two Windings)</p>	<p>Tree-Phase Transformer (Two Windings) Моделирует двухобмоточный трансформатор с учетом насыщения стали сердечника</p>
4	 <p>Three-Phase Transformer (Three Windings)</p>	<p>Tree-Phase Transformer (Three Windings) Моделирует трехобмоточный трансформатор с учетом насыщения стали сердечника</p>

Расчетные выражения приведены в таблице 2.4. Здесь в качестве U_6 должно приниматься номинальное напряжение обмотки трансформатора, к напряжению которой приводятся все сопротивления. Чаще всего при моделировании электрических сетей за базисное напряжение принимают напряжение той обмотки, которая непосредственно присоединена к линии. Значения сопротивлений, приведенные к напряжению высшей обмотки, будут в $(U_{вн}/U_{нн})$ раз большими, чем если бы параметры схемы замещения были приведены к обмотке низкого напряжения.

Таблица 2.4 – Расчетные выражения для определения приведенных значений параметров двухобмоточных трансформаторов по каталожным данным отечественных производителей

Параметр трансформатора	Именованные единицы		Относительные единицы, о.е.
	Формула	Размерность	
Активное сопротивление обмоток	$R_{16} = R_{26} = \frac{\Delta P_{кз} U_6^2}{2 \cdot S_{HT}^2}$	Ом	$R_{1*} = R_{2*} = \frac{\Delta P_{кз}}{2 \cdot S_{HT}}$
Полное сопротивление обмоток	$Z_{16} = Z_{26} = \frac{U_{к\%} U_6^2}{100 \cdot 2 \cdot S_{HT}}$	Ом	$Z_{1*} = Z_{2*} = \frac{U_{к\%}}{200}$
Индуктивное сопротивление обмоток	$X_{16} = X_{26} = \sqrt{Z_{16}^2 - R_{16}^2}$	Ом	$X_{1*} = X_{2*} = \sqrt{Z_{1*}^2 - R_{1*}^2}$
Индуктивность обмоток	$L_{16} = L_{26} = \frac{X_{16}}{2 \cdot \pi \cdot f}$	Гн	$L_{1*} = L_{2*} = X_{1*}$
Полные потери мощности в режиме холостого хода трансформатора	$\Delta S_x = \frac{I_{x\%}}{100} \cdot S_{HT}$	кВА	$\Delta S_{x*} = \frac{I_{x\%}}{100}$
Намагничивающая мощность трансформатора	$\Delta Q_x = \sqrt{\Delta S_x^2 - \Delta P_x^2}$	квар	$\Delta Q_{x*} = \sqrt{\Delta S_{x*}^2 - \Delta P_{x*}^2}$
Активное сопротивление цепи намагничивания	$R_\mu = \frac{U_6^2}{\Delta P_{xx}}$	Ом	$R_{\mu*} = \frac{S_{HT}}{\Delta P_{xx}}$
Индуктивное сопротивление цепи намагничивания	$X_\mu = \frac{U_6^2}{\Delta Q_x}$	Ом	$X_{\mu*} = \frac{1}{\Delta Q_{x*}}$
Индуктивность цепи намагничивания	$L_\mu = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f}$	Гн	$L_{\mu*} = X_{\mu*}$

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Ультразвуковой контроль сварного соединения

1) *Аппаратура (тип, номер, поверка):* УД2В-П45lite, №204

2) *ПЭП:* угол ввода $\alpha = 70^\circ$, частота $f = 5\text{МГц}$

3) $S_{\text{э}} = 1,2\text{мм}$ по РД 153-34.1-003-01 (РТМ-1с)

4) *Контрольный отражатель (тип, № СОП, поверка):* зарубка $1,5 \times 1,1$ на СОП-ОК-5,0/плоск-70-5.0 №593 $1,5 \times 1,1$ Ст20.

5) *Установка переднего фронта строга:*

Передний фронт строга устанавливаем чуть правее заднего фронта зондирующего импульса функцией «НАЧАЛО».

6) *Настройка глубиномера (для больших толщин):*

Не настраивается, т.к. $h=5\text{мм}$

7) *Настройка ВРЧ (если не используется АРД – шкала):*

Не используется

8. Настройка чувствительности:

Браковочный уровень выставляем 90% функцией «ПОРОГ». Находим максимальный эхо-импульс однократно отраженным лучом от зарубки и функцией «УСИЛЕНИЕ» регулируем максимум до браковочного уровня.

9) *Установка заднего фронта строга:*

Задний фронт строга устанавливаем функцией «ШИРИНА» чуть дальше эхо-импульса, полученного от зарубки однократно отраженным лучом. Функцией «РАЗВЕРТКА» настраиваем развертку так, чтобы задний фронт строга немного не доходил до края экрана.

10) *Сканирование:*

При поперечно-продольном сканировании шаг продольного перемещения не превышает половины ширины пьезопластины ПЭП, скорость сканирования не выше 50 мм/сек. Зона сканирования рассчитывается по формуле

$$2Htg\alpha + \frac{B}{2} + A;$$

где $H=5\text{мм}$; $tg\alpha=2,7$; $B=8\text{мм}$; $A=5\text{мм}$.

$$2 \cdot 5 \cdot 2,7 + \frac{8}{2} + 5 = 36\text{мм}.$$

Необходимо проверить пригодность стрелы ПЭП по толщине изделия:

$$Htg\alpha - \frac{B}{2} > n = 5 \cdot 2,7 - \frac{8}{2} = 9,5; \quad 9,5 > 9 \Rightarrow \text{соответствует.}$$

11) Оценка качества сварного соединения:

Проводится по РД 153-34.1-003-01 (РТМ-1с). Результаты сканирования указаны в протоколе.

4 РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

4.1 Метод контроля сварных соединений на платформе Ардуино

Для реализации системы «неразрушающий контроль сварных соединений» была изготовлена трубная модель (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 - Трубная модель

Для создания модели была использована печатная плата *Arduino Uno*. *Arduino* – это марка аппаратно-программных средств, которая предназначена для выстраивания незамысловатых систем робототехники и автоматике, для всех пользователей. Так же *Arduino* представляет из себя электронный конструктор для быстрой и удобной разработки электронных устройств, благодаря таким преимуществам платформа является очень популярной во всем мире.

Arduino состоит из макетной платы и программной части. Программная часть представлена в виде бесплатной программной оболочки (*IDE*), которая имеется в свободном доступе на официальном сайте *Arduino* [11].

В программе содержится текстовый редактор, компилятор, инструменты с помощью которых можно загрузить программу в микроконтроллер, менеджер проектов, препроцессор. Оболочка языка написана на языке *Java* и работает на различных ОП, таких как: *Windows, Mac OS X и Linux*. Написание программы *Arduino* осуществляется на языке *C++*, с определенными облегчающими особенностями, которые позволяют новичкам создание первой работающей программы без особых затруднений.

Программы, которые были написаны на *Arduino* называют скетчи и сохраняются в файлах с расширением *.ino*. Файлы перед компиляцией (загрузкой) обрабатывает препроцессор *Arduino*.

Характеристика печатной платы *Arduino Uno* приведена в таблице 4.1. Самым главным плюсом этой платы является то, что на «борту» платы уже находится регулятор питания, микроконтроллер, программатор, интерфейс для подключения устройств и программная библиотека. Нет никакой необходимости задумываться о программировании микроконтроллера или способах подключения. Микроконтроллер *Atmel AVR ATmega328* с частотой тактирования 16 или 8 МГц уже предварительно прошит загрузчиком (*bootloader*). *AVR* – лучший из свободно-распространяемых компиляторов для контроллеров *AVR*, построенный на базе *GCC* – одного из наиболее совершенных *C*-компиляторов, широко используемого и постоянно улучшаемого на протяжении уже двадцати лет. С помощью загрузчика программа загружается в микроконтроллер без каких-либо программаторов. Через интерфейс *USB* загрузчик соединяется с компьютером.

На платформе *Arduino Uno* (рисунок 4.2), имеется 14 цифровых вход/выходов (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 6 аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем *USB*, силовой разъем, разъем *ICSP* и кнопку перезагрузки. Для работы необходимо

подключить платформу к компьютеру посредством кабеля *USB*, либо подать питание при помощи адаптера *AC/DC* или батареи.



Рисунок 4.2 – Платформа *Arduino Uno*

Таблица 4.1 – Характеристики платы

<i>Arduino Uno</i> Параметр	Значение
Микроконтроллер	ATmega 328
Рабочее напряжение	5 В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7-12 В
Входное напряжение (предельное)	6-20 В
Цифровые входы/выходы	14 (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ)
Аналоговые выходы	6
Постоянный ток через вход/выход	40 мА
Постоянный ток для вывода 3.3В	50 мА
Флэш-память	32 Кб (ATmega328) из которых 0,5 Кб используется для загрузчика
ОЗУ	2Кб (ATmega328)
EEPROM	1 Кб (ATmega328)
Тактовая частота	16 МГц

Токовая защита разъема *USB*. В *Arduino Uno* предусмотрена встроенным самовосстанавливающимся предохранителем (автомат), защищающим порт *USB* компьютера от токов короткого замыкания и сверхтоков. Данный предохранитель обеспечивает дополнительным барьером. Предохранитель срабатывает при прохождении тока более 500 мА через *USB* порт и размыкает цепь до тех пока нормальные значения токов не будут восстановлены.

При создании модели были подключены датчики, к плате *Arduino Uno*. Ультразвуковой датчик расстояния *JSN-SR04T* с водозащитой (рисунок 4.3).



Рисунок 4.3 - Ультразвуковой датчик расстояния

На рисунке 4.4 приведен дисплей *LCD 1602A*



Рисунок 4.4 – Дисплей *LCD 1602A*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1) Выполнен анализ методов контроля качества сварных соединений;
- 2) Проведены теоретическое и математическое описание контроля качества сварных соединений;
- 3) Разработана имитационная модель контроля качества сварных соединений в среде MATLAB&Simulink;
- 4) Проведен компьютерный эксперимент и анализ полученных данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 ГОСТ 14782-86 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые»;
- 2 ГОСТ 16037-80 «Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры»;
- 3 ПБ-03-440-02 «Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля»;
- 4 РД 153-34.1-003-01 (РТМ-1с) «Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте энергетического оборудования»;
- 5 РД 34.17.302-97 (ОП 501 ЦД - 97) «Котлы паровые и водогрейные. Трубопроводы пара и горячей воды, сосуды. Соединения сварные. Контроль качества. Ультразвуковой контроль. Основные положения»;
- 6 б. А.А. Сельский. Конспект лекций по ультразвуковому контролю материалов и изделий. Красноярск 2011.
- 7 Гетьман А.Ф., Козин Ю.Н. Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления – М.: Энергоатомиздат, 1997.–288 с.
 - 8 Клюев В.В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. – М.: Машиностроение. – 1986.-488 с.
 - 9 Лопаткин В.И. Методы неразрушающего контроля за рубежом // Проблемы безопасности полетов -1986. №6. 58–65 с.
 - 10 ASNT Central Certification Program (ACCP) // The American Society for Nondestructive Testing, Inc. Revision 3 (November, 1997)
 - 11 European Standart norme, EN 473:1993, January, 1993.-36p.
- 12 Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник. Пер. с нем. М: Металлургия, 1991 - 752 с.

- 13 И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов. Акустический контроль. В сб. "Неразрушающий контроль". В 5 кн. Кн.2. Под ред. В.В. Сухорукова. - М.: "Высшая школа", 1991, - 288 с.
- 14 ISO 9712 «Квалификация и сертификация персонала в области неразрушающего контроля» / В сборнике: «Измерения. Контроль. Качество». 276. Неразрушающий контроль. - М.: РШК Издательство стандартов, 2002. - С. 543-555.
- 15 Сагалевиц В. М., Аверин А. С. Методы стабилизации размеров сварных конструкций из низкоуглеродистой стали послесварочной вибрационной обработкой. – М.: МВТУ им. Баумана. Деп. НИИмаш, 1982. – № 19. – 14 с.
- 16 Семенов В. М., Соломатин В. Е., Новоселова Т. М. Виброобработка крупных сварных конструкций тяжелого машиностроения // Сварочное производство. – 1981. – № 8. – С. 15–26.
- 17 Мрыка Е. Устранение остаточных напряжений с помощью нагружения и вибрации // Сб. науч. статей: Современные проблемы сварки и специальной электрометаллургии. – К.: Наукова думка, 1980. – 65–84 с
- 18 Сутырин Г. В. Снижение остаточных напряжений сварных соединений низкочастотной вибрационной обработкой // Сварочное производство. – 1983. – № 2. – С. 22–24.
- 19 А.С.Драгунов. Влияние атомной структуры на механизмы самодиффузии по границам зерен наклона в алюминии // Автореферат диссерт. на соиск. ученой степени. – С.: 2010. – 125 с.
- 20 Сутырин Г. В. Снижение остаточных напряжений сварных соединений низкочастотной вибрационной обработкой // Сварочное производство. – 1983. – № 2. – С. 22–24.
- 21 Янус Ю. Р. Исследование влияния вибрационного воздействия на релаксацию остаточных напряжений, структуру и свойства конструкционных сталей и алюминиевых сплавов // Автореферат диссерт. на соиск. ученой степени. – С.: 1988. – 21 с.

- 22 Sedek P., Rawicz F. WplywdrgannastabilizacjewymiarowaKonstrukcjispawanych // Przegladsprawalnictwa – 1980. – № 2.– S. 7–11.
- 23 Скаковский В. Д. Разработка технологии вибрационной обработки сварных конструкций рамного типа// Автореферат диссерт. на соиск. учен.степени. – К.: Издательство ИЭС им. Е. О. Патона, 1987. – 16 с.
- 24 Лашенко Г. И. Вибрационная обработка сварных конструкций. – К.: Сварщик. – 2000. – № 5. – С. 6–7.
- 25 Лашенко Г. И. Структура технологических процессов изготовления сварных конструкций // Автоматическая сварка. – 1996. – № 4. – С. 32–35.
- 26 Грузд А. А. Исследование деформации сварных конструкций во времени и изыскание способов их учета и стабилизации. – К.: 1973. – 193 с.
- 27 Махненко В. И., Пивторак Н. И. Перераспределение остановочных напряжений в сварных балках при вибрационной обработке // Автоматическая сварка. – 1978. – № 9. – С. 28–31.
- 28 Применение метода вибростабилизации при изготовлении сварных деталей металлорежущих станков / В. И. Алилуев, Г. П. Демьяненко, Г. И. Лашенко и др. // Технология производства, научная организация труда и управления. – 1977. – № 11. – С. 5–9.
- 29 Аснис А. Е., Иващенко Г. А. Повышение прочности сварных конструкций. — К.: Наукова думка, 1978. — 192 с.
- 30 Влияние вибраций низкой частоты на величину остаточных напряжений и деформаций при сварке /Г. В. Сутырин, Н. Э. Банцерж, В. С. Белосельский и др. // Сварочное производство. — 1973. — № 6. — С. 31–32.
- 31 Сутырин Г. В. Технологические основы повышения качества металла при наложении на электрическую дугу и изделие низкочастотных вибраций. — Т.: Тульский политехнический институт, 1984. — 35 с.
- 32 Сутырин Г. В. Влияние вибраций низкой частоты на технологическую прочность сварных соединений // Механизация и автоматизация сварочного производства. — Т.: ТПИ. — 1977. — С. 97–99.

- 33 Ощепков Ю. П., Кузнецов В. В., Ощепкова Н. В. Выбор оптимальных режимов вибрации при индукционном нанесении покрытий из хромоникелевых сплавов // Сварочное производство. — 1979. — № 8. — С. 17–18.
- 34 Гозман Я. Б. Вибрационная обработка деталей для стабилизации их размеров // Станки и инструментарий. — 1985. — № 4. — С. 29–31.
- 35 Гозман Я. Б. Контролируемая вибростабилизация размеров деталей // Станки и инструментарий. — 1990. — № 4. — С. 29–32.
- 36 Писаренко В. С., Вержбинская И. И. Снижение остаточных напряжений вибрационной обработкой // Обзорная информация. — М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1972. — 38 с.
- 37 Полнов В. Г., Могильнер М. Н. Определение режимов вибрационной обработки сварных конструкций с целью снижения остаточных напряжений // Сварочное производство. — 1984. — № 2. — С. 3–32.
- 38 Даусон Р., Моффат Д. Г. Вибрационное снятие напряжений и исследование его эффективности // Труды американского общества инженеров механиков. Теоретические основы инженерных расчетов. — 1980. — № 2. — С. 1–9.
- 39 Сагалевич В. М., Аверин А. С. Выбор режимов для вибрационной обработки сварных конструкций из низкоуглеродистой стали с целью стабилизации их размеров. — М.: 1982. — 12 с. — Деп. НИИМаш, 153–82.
- 40 Судник В. К., Ярлыков А. П. Механизм релаксации остаточных напряжений при циклическом нагружении (виброобработке) // Научные труды Тульского политехнического института. — Т.: Управление сварочными процессами, 1980. — 62–68 с.
- 41 Анкирский Б. М. Влияние вибрационной и термической обработки на механические свойства металла и сварного соединения стали 20 К // Сварочное производство. — 1985. — № 3. — С. 19–21.
- 42 Влияние вибрационной обработки на механические свойства сварных соединений низкоуглеродистой стали 09Г2С / В. Г. Полнов, О. Г. Чикалиди, Г. Н. Иванова, М. Н. Могильнер // Сварочное производство. — 1991. — № 6. — С. 20–21.

- 43 Сагалеви́ч В. М., Савельев В. Ф. Стабильность сварных соединений и конструкций. — М.: Машиностроение, 1986. — 264 с.
- 44 Соломатин В. Е., Изюрьев И. М., Бабина Н. Ф. Влияние низкочастотной виброобработки на свойства сварных соединений стали 16Д // Автоматическая сварка. — 1984. — № 2. — С. 72–73.
- 45 Рагульскис К. М., Ступильнас Б. Б., Толутис К. Б. Вибрационное старение. — Л.: Машиностроение, 1987. — 72 с.
- 46 Шухостанов В. К., Галяш А. А., Ильичев А. А. Виброобработка крупногабаритных сварных конструкций из титановых сплавов // Автоматическая сварка. — 1993. — № 2. — С. 39–42.
- 47 Дрыга А. И. Вибрационная обработка сварного корпуса концевой части турбогенератора для снижения остаточных напряжений // Сварочное производство. — 1990. — № 6. — С. 10–11.
- 48 Дрыга А. И. Виброкомплексы для стабилизирующей обработки литых и сварных деталей // Станки и инструментарий. — 1990. — № 6. — С. 28–29.
- 49 Применение вибрационного нагружения для снятия остаточных напряжений в сварных рамах / О. И. Зубченко, А. А. Грузд, Г. Т. Орехов и др. // Автоматическая сварка. — 1974. — № 9. — С. 64–66.
- 50 Vibration Stress REDUCTION and Metall Stabilization — “Martin Engineering”, 6996 Harheum Nordbaden, 1969.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Инженерно-строительный институт
Кафедра «Строительных материалов и технологии строительства»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 И.Г. Енджиевская

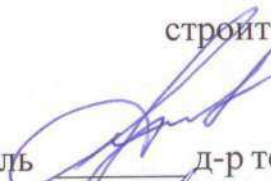
« 09 » 07 2020г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ


«Разработка методов контроля и диагностики технического
состояния сварных соединений»

08.04.01 "Строительство"

08.04.01.007 "Комплексная механизация и автоматизация
строительства"

Научный руководитель  д-р техн. наук, профессор С.П. Амельчугов

Выпускник  В.В. Чечумаков

Рецензент  д-р техн. наук, профессор В.И. Иванчура

Нормоконтролер  канд. техн. наук, доцент Е.С. Турышева

Красноярск 2020