

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 125 с., 24 рис., 31 табл., 54 источников, 1 прил.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, электромагнитно–акустический метод, ультразвуковая дефектоскопия, контроль литья, электромагнитно–акустический преобразователь, магнитная система, режим излучения и приёма, диаграмма направленности.

Объектом исследования являются: электромагнитно–акустический преобразователь (ЭМАП) с повышенной эффективностью преобразования, магнитное поле его магнитной системы и форма акустического поля в режимах излучения и приёма

Цель работы состоит в разработке ЭМА преобразователя, обладающего высокой эффективностью преобразования при достаточно малых габаритах и изучение его формы магнитного поля его магнитной системы и диаграмм направленности в режимах излучения и приёма.

В процессе работы проводились:

- исследование основных проблем и трудностей, возникающие при УЗ контроле литья и методы УЗ контроля для их преодоления;
- разработка конструкции магнитной системы электромагнитно–акустического преобразователя с концентрацией силовых линий в узкой зоне;
- разработка конструкции индуктора, обеспечивающего высокую эффективность преобразования в режимах излучения и приёма;
- проведены теоретические расчеты параметров индуктора в режимах излучения и приёма;
- проведены экспериментальные исследования формы магнитного преобразователя и его диаграммы направленности.

В результате исследования реализован электромагнитно–акустический преобразователь, являющегося основой для электромагнитно–акустического метода контроля.

Область применения: компании, занимающиеся неразрушающим контролем, в частности акустическим контролем; так же можно использовать в учебных заведениях.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ ..	9
1.1 Место электромагнитно–акустического метода контроля в УЗ дефектоскопии	9
1.2 Проблемы контроля литья в УЗ дефектоскопии.....	11
1.3 Электромагнитно–акустический метод УЗ контроля.....	15
2 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ И ИНДУКТОРА ЭМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ.....	24
2.1 Основные типы магнитных систем ЭМА преобразователей	24
2.2 Разработка конструкции магнитной системы с малыми габаритами и высокой концентрацией магнитного поля.....	28
2.3 Разработка конструкции индуктора ЭМА преобразователя с повышенной эффективностью преобразования и расчёт параметров магнитной системы и индуктора	30
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ.....	33
3.1 Исследование пространственного распределения магнитного поля малогабаритного ЭМА преобразователя повышенной эффективности.....	33
3.2 Акустическое поле УЗ преобразователей.....	40
3.2.1 Особенности расчета ЭМАП	42
3.3. Исследование диаграммы направленности преобразователя в режиме излучения и приёма.....	44
3.4 Исследование оптимального соотношения числа витков индуктора в режимах излучения и приёма.....	49_Тос452598332
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Ошибка! Закладка не определена.
4.1. Потенциальные потребители результатов исследования	Ошибка! Закладка не определена.

4.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции
ресурсоэффективности и ресурсосбережения **Ошибка! Закладка не
определена.**

4.3 SWOT–анализ **Ошибка! Закладка не определена.**

4.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации **Ошибка! Закладка не
определена.**

4.5 Инициация проекта **Ошибка! Закладка не определена.**

4.5.1 Цели и результат проекта **Ошибка! Закладка не определена.**

4.5.2 Организационная структура проекта **Ошибка! Закладка не определена.**

4.6. Планирование управления научно–техническим проектом **Ошибка!
Закладка не определена.**

4.6.1 Иерархическая структура работ проекта **Ошибка! Закладка не
определена.**

4.6.2 Матрица ответственности **Ошибка! Закладка не определена.**_Тос452598345

4.6.3 Контрольные события проекта **Ошибка! Закладка не определена.**

4.6.4 План проекта..... **Ошибка! Закладка не определена.**

4.7 Бюджет научного исследования **Ошибка! Закладка не определена.**

4.7.1 Расчет затрат на сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты
..... **Ошибка! Закладка не определена.**

4.7.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ **Ошибка!
Закладка не определена.**

4.7.3 Расчет основной заработной платы.. **Ошибка! Закладка не определена.**

4.7.4 Расчет дополнительной заработной платы **Ошибка! Закладка не
определена.**

4.7.5 Расчет отчислений на социальные нужды **Ошибка! Закладка не
определена.**

4.7.6 Расчет накладных расходов **Ошибка! Закладка не определена.**

4.7.7 Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями
..... **Ошибка! Закладка не определена.**

4.7.8 Оценка экономической выгоды проекта **Ошибка!** **Закладка** **не определена.**

4.7.9 Оценка сравнительной эффективности исследования **Ошибка!** **Закладка** **не определена.**

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ **Ошибка!** **Закладка не определена.**

5.1 ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ **Ошибка!** **Закладка** **не определена.**

5.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования..... **Ошибка!** **Закладка не определена.**

5.1.2 Анализ вредных и опасных факторов при проведении исследований **Ошибка!** **Закладка не определена.**

5.1.3 Метеорологические условия **Ошибка!** **Закладка не определена.**

5.1.4 Недостаточная освещенность **Ошибка!** **Закладка не определена.**

5.1.5 Повышенный уровень шума **Ошибка!** **Закладка не определена.**

5.1.6 Электрический ток **Ошибка!** **Закладка не определена.**

5.2 Экологическая безопасность..... **Ошибка!** **Закладка не определена.**

5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях **Ошибка!** **Закладка** **не определена.**

5.3.1 Порядок действий при пожаре..... **Ошибка!** **Закладка не определена.**

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: **Ошибка!** **Закладка не определена.**

5.4.1 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны . **Ошибка!** **Закладка не определена.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 51

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА... **Ошибка!** **Закладка не определена.**

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 51

Приложение А **Ошибка!** **Закладка не определена.**

ВВЕДЕНИЕ

Неразрушающие методы контроля (НК) качества нашли широкое применение в металлургической, металлообрабатывающей, машиностроительной промышленности. Большое значение приобретает задача разработки новых методов контроля, расширяющих область применения средств НК.

Перспективным направлением исследований в этой области является разработка методов УЗ дефектоскопии с использованием электромагнитно–акустического способа возбуждения и приёма акустических волн, то есть с использованием электромагнитно–акустических преобразователей (ЭМАП). Основные преимущества такого метода состоят в следующем:

- для создания акустического контакта не требуется применение контактных жидкостей (бесконтактность);
- ЭМА способ позволяет возбуждать и принимать любые типы волн: продольные, поперечные, поверхностные и другие;
- бесконтактность позволяет избегать демпфирования изделия в зоне контроля прижимаемым преобразователем;
- отсутствует износ преобразователя;
- контроль можно производить при высоких температурах контролируемого изделия;
- отсутствие механического контакта между преобразователем и изделием не ограничивает скорость сканирования (скорость перемещения преобразователя относительно изделия)

Возможность использования электромагнитно–акустического метода УЗ дефектоскопии подключением к УЗ дефектоскопу ЭМА преобразователя предусмотрена в ГОСТе – 14782–86. Однако широкого распространения электромагнитно–акустический метод в практической дефектоскопии пока не получил. Главными причинами этого является малый коэффициент преобразования по сравнению с пьезоэлектрическими преобразователями и

отсутствие в литературе данных по характеристикам акустического поля, создаваемого ЭМАП в металлах.

Актуальность. Широкий класс изделий в машиностроении изготавливаются методом литья с обработкой давлением, температурой и т.д. Как правило, поверхность таких изделий имеет большую шероховатость поверхности, что препятствует использованию пьезоэлектрических преобразователей, но не снимает необходимости их контроля. Поэтому исследования по разработке электромагнитно–акустического метода контроля литья являются актуальными.

Предмет диссертационных исследований – электромагнитно–акустический метод контроля литых изделий, в частности, авиационной подвески, изготовленной методом литья из легированной стали.

Объект исследований – электромагнитно–акустический преобразователь (ЭМАП) с повышенной эффективностью преобразования, магнитное поле его магнитной системы и форма акустического поля в режимах излучения и приёма

Цель данной работы состоит в разработке ЭМА преобразователя, обладающего высокой эффективностью преобразования при достаточно малых габаритах и изучение его формы магнитного поля его магнитной системы и диаграмм направленности в режимах излучения и приёма.

Для реализации указанной цели работы решаются следующие **основные задачи:**

- исследовать основные проблемы и трудности, возникающие при УЗ контроле литья и методы УЗ контроля для их преодоления;
- разработать конструкцию магнитной системы электромагнитно–акустического преобразователя с концентрацией силовых линий в узкой зоне;
- разработать конструкцию индуктора, обеспечивающего высокую эффективность преобразования в режимах излучения и приёма;
- провести теоретические расчеты параметров индуктора в режимах излучения и приёма;

– провести экспериментальные исследования формы магнитного преобразователя и его диаграммы направленности.

Методы исследования: Для решения поставленных задач использовались расчётные и экспериментальные исследования.

Научная новизна:

– разработан электромагнитно–акустический преобразователь для излучения и приёма продольных волн, отличающийся повышенной эффективностью преобразования в режимах излучения и приёма;

– получены оптимальные численные характеристики для изготовления индуктора преобразователя;

– экспериментально определены параметры магнитного поля преобразователя и характеристики диаграмм направленности в режимах излучения и приёма.

Практическая значимость работы состоит в том, что исследования доведены до стадии практического изготовления. Разработанный будет использован при контроле авиационной подвески.

Реализация результатов работы. Результат работы реализован в виде конкретного ЭМАП, являющегося основой для электромагнитно–акустического метода контроля.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались на VI–й Всероссийской научно–технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность», которая проходила на базе Института неразрушающего контроля Национального исследовательского Томского политехнического университета. А также Основные положения диссертации опубликованы в VII международной студенческой электронной научной конференции «Студенческий научный форум 2015»

Основные положения, выносимые на защиту:

- электромагнитно–акустический преобразователь продольных волн с повышенной эффективностью преобразования в режимах излучения и приёма;
- пространственные характеристики магнитного поля преобразователя и акустических диаграмм направленности;
- электромагнитно–акустический метод УЗ контроля литья.

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Место электромагнитно–акустического метода контроля в УЗ дефектоскопии

Ультразвуковая дефектоскопия используется в промышленности вот уже более 60 лет. С 40–х годов прошлого века законы физики о распространении высокочастотных звуковых волн используются для обнаружения скрытых трещин, полостей, пористости и прочих внутренних несплошностей в металлах, композитах, пластике и керамике, а также для измерения толщины и анализа свойств материалов. Ультразвуковой контроль не требует разрушения inspected материала и является совершенно безопасным. Он широко применяется в основных областях производства, обрабатывающей промышленности и в отраслях инфраструктуры, особенно там, где большую роль играют металлические конструкции и сварные швы.

Ультразвуковой контроль развивается параллельно с электронной и, позднее, компьютерной промышленностью. В ранних работах физиков в Европе и США в 30–х годах демонстрируется, что высокочастотные звуковые волны отражаются от скрытых дефектов или границ материалов в определенных направлениях, производя отчетливые эхо–сигналы, которые отображаются на экране осциллоскопа. Достижения в гидроакустике во время Второй Мировой войны дали стимул для новых исследований в области ультразвуковых технологий. В 1945 г. американский исследователь Флойд Файрстоун запатентовал прибор, который он назвал ультразвуковым рефлектоскопом. Данный прибор считается первым серийным дефектоскопом на основе широко используемого сегодня метода импульс–эхо. Среди компаний–лидеров производства ультразвуковых дефектоскопов, измерительных устройств и преобразователей в 60–70–х годах можно выделить Panamentrics, Stavely и Harisonic, которые сегодня являются частью компании Olympus NDT.

В 70–х появление толщиномеров расширило область применения ультразвука в производстве. В частности, толщиномеры стали применяться для измерений толщины объектов, доступ к которым имеется всего с одной стороны. Коррозиометры стали широко использоваться для измерения остаточной толщины стенок металлических труб и резервуаров.

Начиная с 80–х годов большинство достижений в области неразрушающего контроля связаны с развитием и усовершенствованием цифровой обработки сигнала и с появлением недорогих микропроцессоров. С тех пор измерительное оборудование значительно уменьшилось в размерах и стало более надежным. На рынке предлагается большое количество приборов – от легких портативных дефектоскопов до комплексных систем промышленного контроля для обнаружения дефектов, измерений толщины и визуализации акустических изображений.

Ультразвуковая дефектоскопия основана на способности УЗ волн проходить через упругие среды, взаимодействуя с материалом (поглощаясь), рассеиваясь на границах несплошностей, отражаясь от границ изделия. Законы распространения, отражения, преломления УЗ колебаний аналогичны законам геометрической оптики, что позволяет разрабатывать методы и схемы УЗ контроля для изделий практически любых размеров и форм. При этом УЗ контроли позволяют выявлять дефекты в металлах (раковины, трещины, расслоения, поры и т.д.), расположенных в толще металла и не всегда обнаруживаемых другими видами контроля. Ультразвуковую дефектоскопию (УЗД) широко применяют для контроля литых слитков, сложного литья, поковок, листов, прутков, труб, сварных соединений.

В зависимости от вида физического поля и явлений его взаимодействия с материалом контролируемого изделия все методы неразрушающего контроля (МНК), в соответствии с ГОСТ 18353–79, делят на 9 основных видов: электрический, магнитный, тепловой, радиационный, оптический, акустический, вихретоковых, радиоволновый, проникающими веществами. Возможность каждого из этих видов контроля определяется состоянием науки

и техники соответствующего вида. При этом дефекты выявляются косвенным путём, то есть через результат взаимодействия используемого физического поля с материалом контролируемого изделия. В литературе имеется информация о применимости каждого вида контроля к обнаружению основных типов дефектов [1]

Таблица 1.1 – Виды контроля НК в зависимости от типа дефекта

Тип дефекта		Методы НК					
		акусти- ческий	капил- лярный	магнит- ный	радиа- ционный	течеис- канием	вихре- токовый
Нарушение сплошности отливок	поверхностные	+	+	+	–	–	+
	подповерхност- ные	+	–	+	–	–	+
	внутренние	+	–	–	–	–	–
	сквозные	+	+	–	–	+	–
Несоответ- ствие ТУ	химического состава	–	–	+	–	–	+
	структуры	+	–	+	–	–	+
	физико- механических свойств	+	–	+	–	–	+
Дефекты поверхности отливки		–	–	–	–	–	–
Дефекты геометрии отливки		+	–	–	+	–	–

Из таблицы видно, что акустический контроль обладает наибольшей, по сравнению с другими видами, возможностью обнаружения дефектов. Как внутренней структуры, так и других отклонений от стандарта.

1.2 Проблемы контроля литья в УЗ дефектоскопии

В настоящее время принято считать, что УЗ дефектоскопия мало эффективна для контроля фасонного литья. Литые изделия отличаются сложной формой, плохим качеством поверхности, крупно – зернистой структурой, различием размером зерна в центре отливки и по краям и другими характеристиками. Особенную трудность представляют стальные и чугунные отливки больших размеров, так как они не просвечиваются рентгеновским или гамма излучением.

Ультразвуковой контроль литых изделий осуществляется эхо- и зеркально-теневыми методами обычно при помощи нормальных преобразователей. Литейные дефекты (шлаковые включения, поры) бывают объемными и обнаруживаются при контроле с разных мест. Следовательно, контроль проводят обычно в одном направлении, по самому близкому расстоянию к поверхности и удобной для ввода ультразвуковых волн.

Однако есть опасные места, которые обязаны быть прозвучены в направлении, перпендикулярном к поверхности более вероятного появления трещин. Тем более в литых изделиях встречаются волосовидные дефекты, которые плохо отражают ультразвуковой сигнал. Ослабление донного сигнала говорит о том, что имеются такие дефекты. Для контроля шероховатой поверхности, уместно использовать специальные преобразователи. К таким преобразователям относятся ЭМА преобразователи. Очень часто стальные отливки подвергают высокотемпературной обработке, измельчающей структуру, и их целесообразно контролировать после такой обработки, при этом чувствительность повышается в 2 - 4 раза. Частоту УЗ колебания берут 1 - 2 МГц.

Чугун контролируется хуже, чем сталь из-за больших размеров зерна. Это требует снижения частоты ультразвукового колебания.

Эхо-метод используют для выявления грубых дефектов в слитках из различных сплавов и металлов, предназначенных для изготовления изделий ответственного назначения. Не сложная форма слитка благоприятствует контролю. Однако слитки имеют крупнозернистую структуру, что требует снижения частоты и снижает чувствительность метода контроля. Слитки из углеродистой стали могут быть прозвучены на толщину до 1 м при частоте 0,25 – 1 МГц. Значительно хуже прозвучиваются слитки из легированной стали. Слитки из титановых и алюминиевых сплавов могут быть проконтролированы на глубину более 1 м при частоте 1 – 1,5 МГц. Вдоль боковых поверхностей слитка зачищают полосы шириной 50 - 70 мм от окалины и других неровностей, чтобы обеспечить акустического контакта. Попытки контроля литых изделий с шероховатостью поверхности Rz320 пьезоэлектрическими

преобразователями предпринимаются [2]. Так в ОАО «Центролит» разработан раздельно–совмещенный преобразователь П112–5–20·6–П–004 отличающийся наличием эластичного протектора, прижимаемого к поверхности изделия. Опыт работы с этим преобразователем показал, при контроле изделий толщиной до 40 мм уверенно выявляются дефекты с эквивалентной площадью от 2 до 5 мм². Однако такой преобразователь имеет сменный протектор, требующий постоянной замены. Кроме того, невозможно непрерывное сканирование изделия из – за необходимости прижатия преобразователя к поверхности.

Типичным примером литых изделий является литые детали тележек грузовых вагонов. Опыт НК этих изделий представлен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнение методов дефектоскопии литых деталей тележек грузовых вагонов

Наименование деталей, узлов тележки	Метод контроля	Подготовка поверхности	Время Дефектоскопии, мин.	Достоверность контроля %	Зависимость от квалификации специалиста	Особенности контроля
1	2	3	4	5	6	7
Рамы боковые (две) Надрессорная балка	Визуальноизмерительный (штатны)	Зачистка проверяемых поверхностей	Примечания	15...20	зависит	Позволяет выявлять только поверхностные дефекты в видимых для контроля зонах, что составляет не более 20% от всех возможных в детали дефектов.

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3	4	5	6	7
Рамы боковые (две) Надрессорная балка	Магнито-порошковый (штатный)	Зачистка и зашлифовка проверяемых поверхностей до металла	–II–	–II–	–II–	–II–
Рамы боковые (две) Надрессорная балка	Ферро-зондовый (штатный)	Зачистка проверяемых поверхностей	–II–	–II–	–II–	Позволяет выявлять дефекты с глубиной залегания не более 3–5мм, что составляет лишь 20% от толщины контролируемой детали. При контроле часто происходит ложное срабатывание (перебраковка).
Рамы боковые (две) Надрессорная балка	Акусто-эмульсионный (штатный)	Зашлифовка поверхности до металла и нанесение иммерсионной жидкости в местах установки датчиков (от 10 до 12 шт.)	$>40 \times 2 > 45$	60... 70	не зависит	Контроль производится по особому требованию: либо для продления срока службы детали, либо по телеграфному указанию для деталей конкретного производителя в случае ЧП.
Рамы боковые (две) Надрессорная балка	Затухающих свободных колебаний	Поверхностная очистка от грязи	$< 15 \times 2 < 18$	85	не зависит	Выявляет как поверхностные, так и внутренние дефекты вне зависимости от глубины залегания.

Технология их контроля оставляет необходимость подготовки поверхности под контроль.

В настоящей работе ставшийся цель – разработать метод УЗ контроля литой авиационной подвески из легированной стали.



Рисунок 1.1 – Авиационная подвеска из легированной стали

Ввиду высокой нагруженности и высокой ответственности контролю подлежит весь объем металла. Отдельные зоны могут быть проконтролированы стандартным пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП), но большая часть объема (80%) имеет шероховатость поверхности Rz320 и контроль ПЭП невозможен.

1.3 Электромагнитно–акустический метод УЗ контроля

В последнее время очень часто возникает необходимость контролировать состояние металла оборудования, которое применяется в промышленных производствах, в строительстве и в машиностроении и требует непрерывного контроля неразрушающими методами. Главная причина такой ситуации – это то, что у действующего оборудование после того, как оно отработает свой ресурс, начинается другой жизненный цикл, при котором для обеспечения безопасности самых напряженных и ответственных узлов и

деталей требуется периодический индивидуальный контроль. Поэтому очень важное место занимают вопросы использования элементов оборудования, имеющего внутренние дефекты и трещины.

По ГОСТ 18353–73 способы НК делятся на виды: проникающими веществами, магнитный, акустический, радиоволновой, радиационный, тепловой, оптический и вихревой.

Таблице 1.3 – методы НК, основанные на использовании акустических полей

Вид контроля	Классификация методов неразрушающего контроля		
	по характеру взаимодействия физических полей с контролируемым объектом	по первичному информативному параметру	по способу получения первичной информации
Акустический	Прошедшего излучения. Отраженного излучения (эхо–метод). Резонансный. Импедансный. Свободных колебаний. Акустико–эмиссионный	Амплитудный. Фазовый. Временной. Частотный. Спектральный	Пьезоэлектрический Электромагнитно–акустический. Микрофонный. Порошковый

Из выше рассмотренных методов для контроля изделий с шероховатой поверхности может быть использован электромагнитно–акустический метод (ЭМА). Электромагнитно – акустический методы возбуждения и приёма ультразвуковых колебаний основаны на трех эффектах взаимодействия электромагнитного поля с объектом контроля (ОК): магнитострикции, магнитного и электродинамического взаимодействия. Электродинамическое взаимодействие состоит в возбуждении в токопроводящем материале вихревых токов, которые взаимодействуют с постоянным магнитным полем и вызывают колебания, а это в свою очередь приводит к возбуждению колебаний атомов, то есть кристаллической решетки материала (появляются механические напряжения, которые впоследствии приводят к возникновению упругих акустических колебаний).

Бесконтактные методы возбуждения ультразвуковых волн по средствам электромагнитно–акустического преобразователя существенно расширяют возможности акустического контроля. Благодаря такой характеристике электромагнитно–акустический метод выделяется более высокой производительностью. Он также подходит для выполнения контроля крупных изделий ультразвуковыми волнами при больших скоростях их прохождения, а также при наличии высокой температуры и давления. Отсутствие необходимости использовать ультразвуковой гель при осуществлении электромагнитного возбуждения ультразвука в металлических материалах способствует устранению целого ряда существенных мешающих факторов, которые связаны с нестабильным акустическим контактом и влиянием свойств контактных жидкости и масла.

ЭМА–преобразования понимают как явления взаимного превращения электромагнитных и упругих волн в металлах, имеющих хорошую проводимость или ферромагнитных свойств. В настоящий момент, силами зарубежных и отечественных ученых были созданы основы физических представлений о формировании и действии наиболее существенных механизмов ЭМА–преобразования в металлах с учетом различия в физических параметрах проводящих сред, уровнях магнитного поля, а также других особенностей [3 – 6].

Прямым электромагнитно – акустическим преобразованием принято считать преобразование электромагнитных волн в упругие колебания, обратным явлением будет преобразование упругих волн в электромагнитные волны. А преобразование электромагнитное поле – упругие колебания – электромагнитное поле – будет считаться двойным ЭМА преобразованием [5 – 7]. Изменение линейных или объемных размеров элементарного объема под действием электромагнитного поля обусловлено магнитострикционным взаимодействием. Взаимодействие вихревых токов с индукцией поля подмагничивания B_0 , приводящее к появлению силы Ампера F_A обусловлено возникновением акустических колебаний при электродинамическом механизме:

$$F_A = i_e [dl \cdot B_0], \quad (1)$$

где i_e – вихревой ток длиной участка dl .

Упругие силы возникают в приповерхностном слое ОК, определяемом глубиной скин-слоя δ :

$$\delta = \sqrt{2/\omega\mu_0\mu\sigma}, \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м,

μ – относительная магнитная проницаемость,

σ – электропроводность,

ω – круговая частота колебаний.

Приём акустических волн за счет электродинамического механизма обусловлен электромагнитными полями, порождаемыми вихревыми токами, возникающими в приповерхностном слое ОК, колеблющегося со скоростью V в поле подмагничивания с индукцией B_0 , что в свою очередь приводит к возникновению в индукторе ЭДС индукции ε_i :

$$\varepsilon_i = (V \cdot B_0) dl. \quad (3)$$

В качестве источника электромагнитных колебаний используются индуктивные преобразователи различной формы. На рисунке 2 приведена схема возбуждения упругих поперечных и продольных волн с позиции электродинамического механизма.

ЭМА–преобразователи имеют ряд существенных преимуществ перед пьезо-электрическими [6-13]:

- контроль ведется через воздушный зазор без применения контактных жидкостей;
- отсутствует износ ЭМА – преобразователя;
- результаты контроля не зависят от наличия на поверхности изделия ржавчины, окарины, краски, загрязнений;
- на результаты контроля незначительно влияют перекосы преобразователей относительно поверхности объекта контроля;

- возможен контроль объектов с любой температурой поверхности, которую может выдержать сам преобразователь;
- достаточно высокая производительность контроля;

Возможность возбуждения и приема любых типов волн, в том числе поперечных с горизонтальной поляризацией, которые практически невозможно возбудить и принять контактным способом.

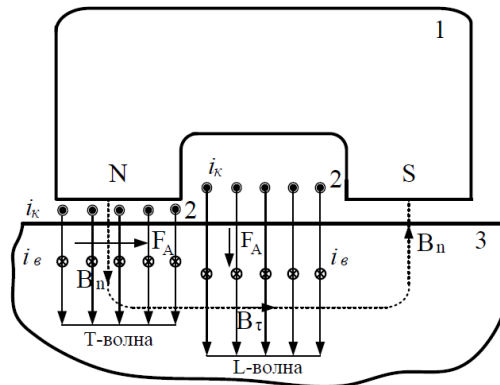


Рисунок 1.2 – Возбуждение поперечных T и продольных L волн ЭМА–преобразователем: 1– магнитная система; 2 – индуктор; 3 – объект контроля

Существует огромное количество публикации по применению уже известных фактов и явлений при ЭМА преобразовании для усовершенствования существующих и разработке новых средств неразрушающего контроля. В последние десятилетия развитие методов и средств ЭМА–преобразования происходит применительно к практическим задачам неразрушающего контроля материалов.

Возвышенный интерес к электромагнитно – акустическому методу в значительной степени определяет актуальность заявленных исследований.

Главными ограничивающими факторами использования ЭМА–метода для промышленного использования являются низкие коэффициенты преобразования. Поэтому одним из направлений развития современных средств НК и методов диагностики, основанных на применении ЭМА – преобразования, является повышение эффективности ЭМАП за счет оптимизации систем подмагничивания [21 – 24], разработки мощных генераторов, малошумящих усилителей [9, 10, 25, 26] и разработки новых

методов цифровой обработки сигналов [27], что позволяет существенно поднять уровень полезных информативных сигналов над уровнем шумов и повысить эффективность работы ЭМА – устройств.

Другими причинами ограниченности широкого использования ЭМА технологий в УЗК являются:

- недостаточная теоретическая база об основных механизмах и эффективности ЭМА–преобразования в различных материалах [5, 28 – 30];
- сложность практической реализации ЭМАП для волн некоторых типов [25, 31, 32];
- сложность реализации высокой чувствительности метода к основным информативным параметрам акустических волн (скорость и затухание) [9, 10, 22, 27, 33 – 35,].

Одним из ограничений является отсутствие данных по влиянию основных конструктивных параметров ЭМАП на формирование их ДН для разработки методов расчета и проектирования элементов ЭМАП, построения ЭМА – трактов и разработки методик для реальных практических приложений.

При проектировании ЭМА следует иметь в виду, что при электродинамическом взаимодействии $T J \sim \{ \times B \}$, то есть направление колебаний в волне перпендикулярно векторам J так и B . Продольные и поперечные волны можно возбуждать отдельно, располагая катушки под участками магнитного поля с единственной нормальной или касательной составляющей по отношению к поверхности объекта контроля.

Чтобы возбудить волну под углом α к поверхности объекта, необходимо обеспечить сдвиг фаз между проводниками катушки. Если m — расстояние между витками, ток в которых находится в одинаковой фазе, то

$$m \sin \alpha = \lambda_t \quad (4)$$

где λ_t — длина поперечной волны.

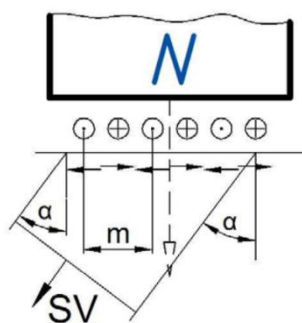


Рисунок 1.3 – Возбуждения волны под углом к поверхности объекта

Кроме того, ЭМА – преобразователи позволяют возбуждать волны Рэлея и Лэмба, если расстояние между проводниками с одинаковой фазой тока сделать равным соответствующим длинам волн.

Оценки чувствительности показывают, что чувствительность ЭМА–преобразователей примерно в 100 раз меньше чувствительности пьезопреобразователей. Поэтому ЭМА используются там, где нет необходимости в высокой чувствительности контроля.

В литературе приводятся данные о максимальной чувствительности установок с ЭМА – преобразователями, позволяющими выявлять искусственные дефекты диаметром 3 мм на глубине 150...200 мм от поверхности объекта контроля.

Для развития промышленности необходимы новые и более совершенные методы контроля качества продукции. Одним из них является бесконтактный электромагнитно–акустический метод.

В работе [36] предлагается методика расчета частотных искажений ультразвукового тракта неразрушающего контроля поверхности листового металлопроката, в котором реализуется электромагнитный способ возбуждения и приема осесимметричных, радиально распространяющихся, поверхностных волн Рэлея.

Оптимизация конструкции катушек ЭМАП для контроля ферромагнитных листов является вполне очевидным фактом. Это требует качественной теоретической проработки данного вопроса, что и было сделано в [37]. Начальным этапом этих исследований является, очевидно,

надежное определение спектральных искажений, которые вносятся самими преобразователями в режиме излучения и приема ультразвуковых волн. Определение этих искажений позволяет исключить из результатов наблюдений те искажения, которые вносятся измерительным прибором, т. е. ультразвуковым трактом состоящим, как минимум из излучателя и приемника ультразвуковых волн. Понимание роли измерительного прибора в формировании результатов измерения позволит существенно повысить надежность и достоверность результатов неразрушающего контроля промышленных изделий.

В работе [38] рассматривается использование электромагнитно–акустического метода совместно с методом динамической идентификации напряженно–деформированного состояния и уровня поврежденности металла оборудования и применение интегральных критериев для комплексной оценки текущего технического состояния технологического оборудования.

Расчеты на устойчивость конструктивных деталей и оценка работоспособности длительно используемого технологического оборудования, и продление его жизненного цикла с определенным сроком безопасного использования, выполняется по методикам, которые не принимают во внимание объективные изменения механических свойств и изменения в структуре конструкционных материалов в ходе эксплуатации, что уменьшает достоверность результатов. Это создает условия для появления аварийных ситуаций, сопровождаемых существенным экономическим и экологическим убытком.

Для оценки фактических изменений в конструкционных материалах, определения реального технического состояния и ресурса безопасной эксплуатации конструктивных деталей технологического оборудования советуется использовать ЭМА – преобразователь. Принцип действия преобразователя основан на бесконтактном возбуждении в металле ультразвуковых волн с помощью вихревых токов, генерируемых специальной обмоткой, а также источника магнитного поля. ЭМА метод позволяет

обнаруживать участки аномальных концентраций механических напряжений в деталях крупногабаритных оболочковых конструкций, в таких зонах появляются дефекты металла и впоследствии развиваются крупные дефекты, приводящие к разрушению оборудования.

2 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ И ИНДУКТОРА ЭМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ

2.1 Основные типы магнитных систем ЭМА преобразователей

Магнитная система электромагнитно – акустического преобразователя (ЭМАП) [39] содержит постоянный магнит в форме цилиндра с направлением намагничивания вдоль оси, концентратор из магнитомягкого материала, дополнительный магнит, полюсный наконечник, магнитопровод и вставку из немагнитного металла, при этом концентратор установлен на торцевой части магнита, дополнительный магнит выполнен с направлением намагничивания по нормали к боковым граням концентратора и с обеспечением одинаковой полярности всех примыкающих к концентратору полюсов, полюсный наконечник расположен на противоположном от концентратора торце магнита, а магнитопровод расположен между дополнительным магнитом и полюсным наконечником, причем вставка установлена между полюсным наконечником и магнитопроводом. Технический результат: расширение функциональных возможностей и области применения за счет повышения чувствительности аппаратуры для обнаружения дефектов и измерения толщины деталей, а также снижение уровня рассеянного магнитного поля на боковых поверхностях ЭМАП, что обеспечивает выполнение санитарных требований и позволяет использовать ЭМАП без вреда для оператора – дефектоскописта.

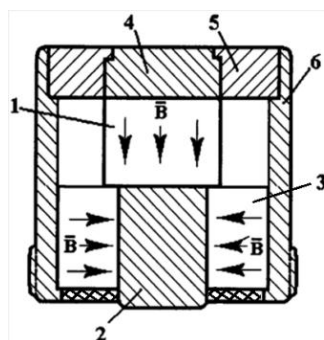


Рисунок 2.1 – общий вид магнитной системы ЭМАП для возбуждения сдвиговых (поперечных) и продольных ультразвуковых объемных волн
1 – постоянный магнит, 2 – концентратор, 3 – дополнительный магнит, 4 – полюсный наконечник, 5 – вставка из немагнитного металла, 6 – магнитопровод.

Магнитная система ЭМАП содержит постоянный магнит в форме цилиндра с направлением намагничивания вдоль оси, концентратор из магнитомягкого материала, установленный на торцевой части магнита, дополнительный магнит с направлением намагничивания по нормали к боковым граням концентратора, обеспечивающим одинаковую полярность всех примыкающих к концентратору полюсов, полюсный наконечник, расположенный на противоположном от концентратора торце магнита, вставку из немагнитного металла и магнитопровод, устанавливаемый между дополнительным магнитом и вставкой [39].

Сущность состоит в том, что в магнитную систему электромагнитно–акустического преобразователя, содержащую постоянный магнит в форме цилиндра с направлением намагничивания вдоль оси, введены концентратор из магнитомягкого материала, дополнительный магнит, полюсный наконечник, магнитопровод и вставка из немагнитного металла, при этом концентратор установлен на торцевой части магнита, дополнительный магнит выполнен с направлением намагничивания по нормали к боковым граням концентратора и с обеспечением одинаковой полярности всех примыкающих к концентратору полюсов, полюсный наконечник расположен на противоположном от концентратора торце магнита, а магнитопровод расположен между дополнительным магнитом и полюсным наконечником, причем вставка установлена между полюсным наконечником и магнитопроводом.

ЭМА – преобразователь с предлагаемой магнитной системой для возбуждения УЗ колебаний располагают над поверхностью контролируемого изделия или конструкции. На индуктор ЭМА преобразователя подают импульсы высокочастотных колебаний, наводящие в поверхностном слое конструкции или проката вихревые токи. Для возбуждения сдвиговых волн магнитная система ЭМАП создает магнитный поток с нормальной составляющей магнитного поля в области проекции концентратора 2 на поверхность контролируемого изделия. Под действием сил Лоренца в поверхностном слое объекта контроля возникает сдвиговая объемная волна,

распространяющаяся вглубь металла в направлении, соответствующем нормали к поверхности изделия. Прием импульсов ультразвуковых колебаний и их преобразование в электрические сигналы обеспечивает этот же ЭМАП. Для измерения толщины стенки изделия используются эхосигналы, многократно переотражающиеся от поверхностей стенки изделия, для обнаружения дефектов - эхосигналы от дефектов (эхометод) или противоположной поверхности стенки изделия (зеркально-теневой метод).

При этом учитывается тот факт, что скорость распространения продольных волн примерно в два раза больше скорости сдвиговых волн. Достоинством ЭМАП для возбуждения продольных волн с предлагаемой магнитной системой является независимость от положения ЭМАП относительно направления прокатки металла контролируемой конструкции. При использовании комбинированного индуктора возможно одновременное или поочередное возбуждение сдвиговых и продольных волн.

Техническим результатом применения предложенной магнитной системы ЭМАП является то, что она позволяет расширить функциональные возможности (наряду с возбуждением сдвиговых волн с радиальной поляризацией обеспечивается возбуждение сдвиговых волн с линейной поляризацией и продольных волн, а также их одновременное возбуждение) и области применения аппаратуры, работающей совместно с предложенной магнитной системой ЭМАП, за счет повышения отношения сигнал/шум и чувствительности аппаратуры при обнаружении дефектов в изделиях с различной степенью криволинейности поверхности из углеродистой и нержавеющей сталей, сплавов алюминия, титана и других электропроводящих материалов и измерения толщины деталей из упомянутых металлов и сплавов как в состоянии поставки, так и в процессе работы в агрессивной среде при наличии коррозионных повреждений. Другим результатом является снижение уровня рассеянного магнитного поля на боковых поверхностях ЭМАП, что обеспечивает выполнение санитарных требований и позволяет использовать ЭМАП без вреда для оператора–дефектоскописта.

Известен электромагнитно-акустический преобразователь (ЭМАП) [40], включающий магнитную систему, состоящую из постоянных магнитов, концентратора и катушки индуктивности, в которой постоянные магниты с рабочей поверхностью полюса одинаковой полярности повернуты друг к другу и прилегают к концентратору, а катушка находится на поверхности концентратора, прилегающей к верхней поверхности объекта контроля (ОК).

К недостатку известного ЭМАП относится невозможность быстрого отключения магнитной системы по технологическим причинам, например, при необходимости отвода ЭМАП от поверхности ОК или при необходимости удаления с рабочей поверхности ЭМАП окалины, притянутой к ней магнитным полем.

Известен электромагнитно-акустический преобразователь (ЭМАП) [41], который снабжен, по меньшей мере, двумя кольцевыми постоянными магнитами, плотно прилегающими друг к другу с расположением полюсов на наружной и внутренней боковой поверхности, по меньшей мере, одним круглым постоянным магнитом, смонтированным с одной стороны на их торцевой поверхности и обращенным к их внутренним полюсам одноименным полюсом и цилиндрическим концентратором, выполненным из ферромагнитного материала и установленным на одной оси с круглым постоянным магнитом внутри кольцевых магнитов с возможностью фиксации по высоте относительно катушки индуктивности.

К недостаткам известного ЭМАП относится невозможность быстрого отключения магнитной системы по технологическим причинам, например, при необходимости отвода ЭМАП от поверхности ОК или при необходимости удаления с рабочей поверхности ЭМАП окалины, притянутой к ней магнитным полем, а также наличие большого количества ненадежных в работе концентраторов, выполненных из порошка карбонильного железа на клее.

Общим недостатком известных ЭМАП является необходимость отвода от ОК всей конструкции ЭМАП (или блоков ЭМАП) для быстрого отключения магнитной системы, что усложняет их эксплуатацию.

2.2 Разработка конструкции магнитной системы с малыми габаритами и высокой концентрацией магнитного поля

Неразрушающие методы контроля качества (НК) нашли широкое применение в металлургической, металлообрабатывающей, машиностроительной промышленности. Большое значение приобретает задача разработки новых методов контроля, расширяющих область применения средств НК. Относительно новым направлением является ультразвуковая дефектоскопия с использованием электромагнитно–акустических преобразователей ЭМАП [39]. Несмотря на то, что в ГОСТе – 147882–86 прописана возможность подключение ЭМАП к стандартному УЗ дефектоскопу, широкого распространения пока практической дефектоскопии этот метод не получил.

Главными причинами этого является малый коэффициент преобразования, по сравнению с пьезоэлектрическим преобразователем и отсутствие в литературе данных по характеристикам акустического поля, создаваемого ЭМАП в металлах. Но у ЭМАП есть очень существенное преимущество перед ПЭП – бесконтактность, что позволяет контролировать изделия с широкатовной поверхностью, а именно литьё. Во многих случаях зачистка поверхности до Rz40 невозможно.

Поэтому проблема повышения эффективности ЭМАП и исследование магнитной системы является актуальной.

Изучением этих вопросов занимается разные исследователи. Имеется много информации о различных конструкциях магнитных систем ЭМАП, способов изготовления и размещения рабочих обмоток, схем питания преобразователей [42–44].

За основу конструкции преобразователя принята магнитная система по [39], обеспечивающая при небольших габаритах достаточную напряженность магнитного поля в изделии и замкнутость магнитного потока, обеспечивающую безопасность работы с ЭМАП.

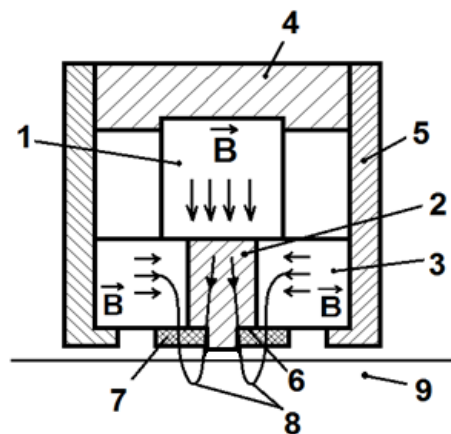


Рисунок 2.2 – Схема преобразователя с проточкой на рабочем торце
 1–постоянный магнит, 2–концентратор, 3–кольцевой магнит, 4–полюсный наконечник, 5–магнитопровод, 6–проточка, 7–катушка, 8–силовые линии магнитного поля, 9–ОК.

Магнитная система содержит постоянный магнит в форме цилиндра с направлением намагничивания вдоль оси, концентратор из них магнитномягкого металла, кольцевой магнит с направлением намагничивания по нормали к боковым граням концентратора и с обеспечением одинаковой полярности всех примыкающих к концентратору полюсов, полюсный наконечник, расположенный на противоположном от концентратора торце магнита, магнитопровод, расположенный между дополнительным магнитом и полюсным наконечником, индуктор для возбуждения и приёма продольных волн. В отличие от преобразователя без проточки с цилиндрической конструкции концентратора, на рабочем конце концентратора выполнена проточка, диаметр которой меньше внешнего диаметра концентратора, а катушка индуктора для возбуждения и приёма продольных волн располагается между магнитопроводом и концентратором, причём внутренний диаметр катушки равен диаметру проточки, а внешний диаметр катушки находится между внутренним диаметром магнитопровода и внешним диаметром концентратора.

2.3 Разработка конструкции индуктора ЭМА преобразователя с повышенной эффективностью преобразования и расчёт параметров магнитной системы и индуктора

Исходя из конструкции ЭМАП, индуктор располагается в магнитном зазоре между концентратором и кольцевым магнитом. Основное требование, предъявляемое к индуктору – возможность подключения к гнёздам «выход» и «вход» любого дефектоскопа. Так как дефектоскопы работают в основном с пьезопреобразователями, необходимо согласование электрических параметров индуктора ЭМАП с электрическими параметрами ПЭП. Для частоты 2,5 МГц в ПЭП использована пластина из пьезокерамики ЦТС–19 диаметром 12 мм, толщиной 0,72 мм и относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon=1870$. По формуле (5) определяется длина волны:

$$\lambda_{пл} = \frac{c_{пл}}{f} \quad (5)$$

где, $c_{пл}$ – скорость звука в пьезопластине, 3600 м/с;

f – частота, 2,5 МГц.

$$\lambda_{пл} = \frac{3600}{2,5 \cdot 10^6} = 1,44 \text{ мм}$$
$$h = \frac{\lambda_{пл}}{2} = 0,72 \text{ мм}$$

Ёмкость такой пластины определяется по следующей формуле (6):

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{h} \quad (6)$$

где, ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость;

S – площадь пластины;

h – толщина пластины.

$$C = \frac{1870 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 113 \cdot 10^{-6}}{0,72} = 1300 \text{ пФ}$$

Индуктивность катушки рассчитывается, если преобразовывать формулу (7) в формулу (8):

$$f^2 = \frac{1}{4\pi^2 LC} \quad (7)$$

$$L = \frac{1}{f^2 4\pi^2 C} \quad (8)$$

$$L = \frac{1}{6,25 \cdot 10^{12} \cdot 40 \cdot 1300 \cdot 10^{-12}} = 3,1 \text{ мкГн}$$

Конструкция индуктора приведена на рисунке 6. Индуктор представляет собой цилиндрическую катушку диаметром 10 мм, толщиной намотки 2 мм и длина намотки 3 мм.

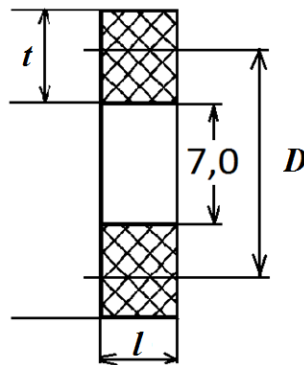


Рисунок 2.3 – Конструкция индуктора

Для индуктивности 3,1 мкГн в соответствии с [45] число витков определяется формулой (9), при заданных параметрах получается $n=17$ витков.

$$L = \frac{0,008 \cdot D^2 \cdot n^2}{3D + 9l + 10t} \quad (9)$$

где, D – средний диаметр катушки;

n – число витков;

t – толщина намотки;

l – длина намотки.

$$3,1 = \frac{0,008 \cdot 1^2 \cdot n^2}{3 \cdot 1 + 9 \cdot 0,2 + 10 \cdot 0,3}$$

$$3,1 \text{ мкГн} \rightarrow 1000 \text{ см}$$

$$3100 \text{ см} = 10,25 \cdot n^2$$

$$n = 17 \text{ витков}$$

Для экспериментальных исследований, для опытного подбора оптимального числа витков в режимах излучения и приёма было разработано и изготовлено приспособления, представленное в рисунке 2.4.

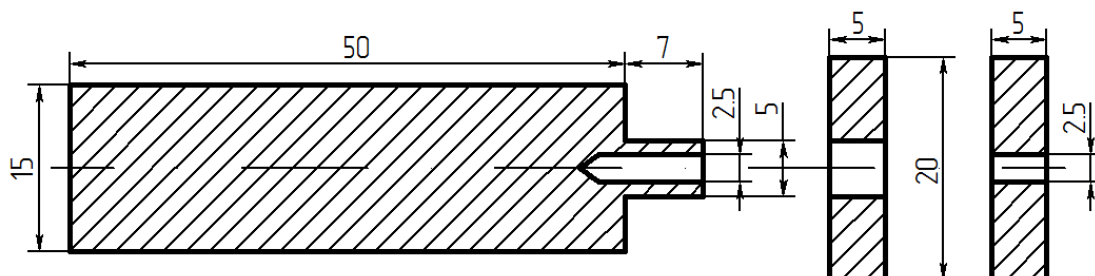


Рисунок 2.4 – Устройство для изготовления индуктора.

Катушка индуктора наматывалась на устройстве, пропитывалась парафином и затем устанавливалась в рабочий зазор ЭМАП.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

3.1 Исследование пространственного распределения магнитного поля малогабаритного ЭМА преобразователя повышенной эффективности

Для определения конфигурации магнитного поля электромагнитно–акустического преобразователя был проведен теоритический расчет поля с помощью программы COMSOL. Рассчитывались напряженности поля от поверхности ЭМА – преобразователя на расстояниях $h=0$ мм, $h=3$ мм и $h=6$ мм и рассчитывалось Z – я составляющая этого поля. Типичный вид для разработанной конструкции преобразователя приведен на рисунке 3.1.

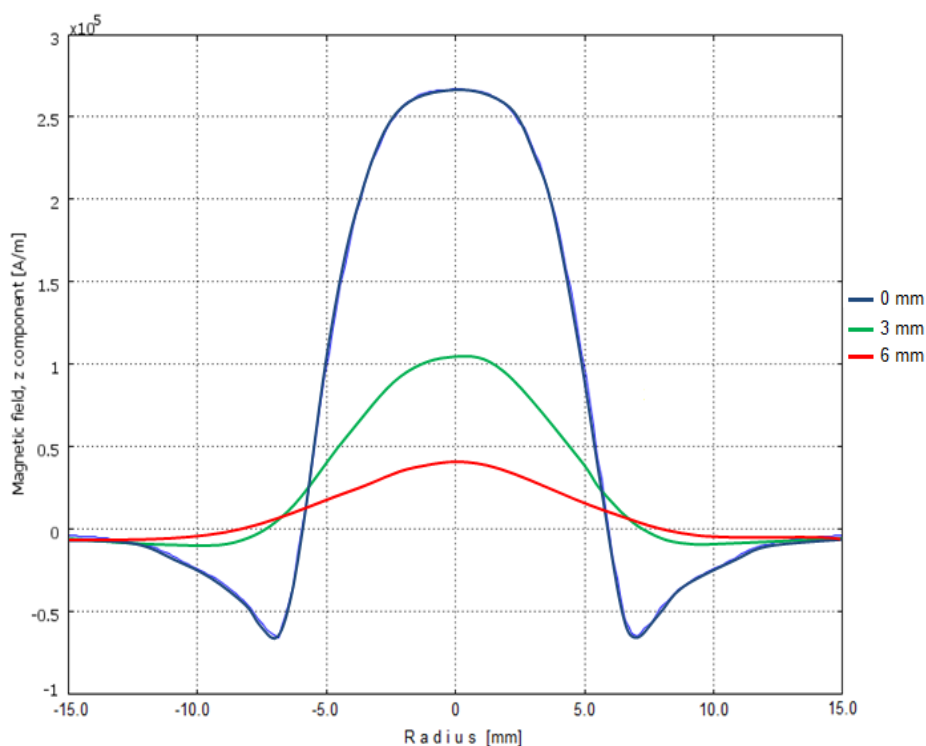


Рисунок 3.1 – Напряженности магнитного поля преобразователя.

По результатам расчетов напряженность максимально в центре и падает при отклонении от центра до 0 на расстоянии 6 мм. Особенностью конструкции является инверсия напряженности поля после 6 мм. Это можно объяснить взаимодействием вертикального поля от главного магнита и вертикальной составляющей аксиальной составляющей кольцевого магнита. С увеличением

расстояния от поверхности напряженность уменьшается. На расстоянии $h=6$ мм инверсии поля практически не происходит, т.е. она имеет место в ближней зоне поля.

Экспериментальное измерение напряженности поля проводились с помощью прибора тесламетра ТПУ–05.



Рисунок 3.2 – Тесламетр ТПУ – 05

Тесламетры серии ТПУ предназначены:

- для исследований магнитных систем различного назначения, в т.ч. магнитотерапевтических аппаратов и устройств;
- для измерений намагниченности образцов и деталей из магнитомягких и магнитотвердых материалов;
- для контроля режимов намагничивания, размагничивания и так же определений остаточной намагниченности в магнито–порошковой дефектоскопии;
- при контроле характеристик магнитных полей разных объектов на разных местах на соответствие с требованием СанПиН 2.2.4.1191 – 03.

Экспериментально измерялись X-я, Y-я и Z-е компоненты напряженности магнитного поля. Так как геометрия датчика аксиально симметрично, X-вые и Y-вые компоненты имеют одинаковый вид. Численные значения напряженностей для них намного меньше Z-ой компоненты. Поэтому основные исследования проводились для Z-ой компоненты.

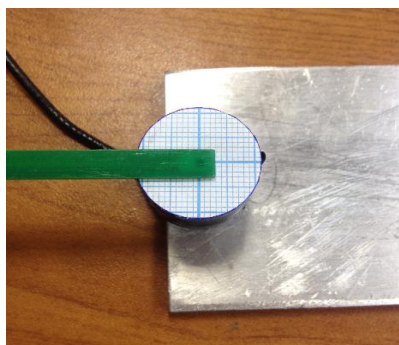


Рисунок 3.3 – Измерение магнитного поля преобразователя для Z–ой компоненты

Экспериментально измерены поля от поверхности ЭМАП на расстояниях 0 мм, 3 мм и 6 мм для двух конструкции концентратора: 1) цилиндрической (без проточки) и 2) с проточкой на рабочем торце. Для цилиндрического концентратора напряженность поля имеет максимум не в центре, а на расстоянии от центра 3мм.

Таблица 3.1 – Экспериментальные измерения для цилиндрической конструкции концентратора, без проточки, 0 мм.

R, мм	Z–я комп. H, мТ	H (в отн.ед.)		R, мм	Z–я комп. H, мТ	H (в отн.ед.)
0	133,3	0,70		0	133,3	0,70
–1	134,4	0,71		1	135,1	0,71
–2	137,5	0,72		2	137,5	0,72
–3	142,8	0,75		3	139,6	0,73
–4	93,0	0,50		4	90,3	0,47
–5	19,8	0,10		5	19,3	0,10
–6	–12,2	–0,06		6	–17,7	–0,09
–7	–28,5	–0,15		7	–26,3	–0,14
–8	–18,8	–0,10		8	–16,8	–0,09
–9	–12,9	–0,07		9	–10,6	–0,06
–10	–9,8	–0,05		10	–7,7	–0,04
–11	–4,7	–0,02		11	–5,2	–0,03

Таблица 3.2 – Экспериментальные измерения для цилиндрической конструкции концентратора, без проточки, 3 мм.

R, мм	Z–я комп. H, мТ	H (в отн.ед.)		R, мм	Z–я комп. H, мТ	H (в отн.ед.)
0	56,7	0,30		0	56,7	0,30
–1	54,9	0,29		1	54,8	0,29
–2	50,5	0,26		2	50,4	0,26
–3	38,3	0,21		3	38,1	0,20
–4	24,8	0,13		4	25,4	0,13
–5	15,9	0,08		5	15,1	0,08
–6	6,4	0,03		6	6,6	0,03
–7	1,9	0,01		7	1,3	0,007
–8	–1,7	–0,009		8	–1,6	–0,009
–9	–2,8	–0,015		9	–3,0	–0,016
–10	–2,6	–0,013		10	–2,8	–0,014
–11	–2,2	–0,011		11	–2,1	–0,011

Таблица 3.3 – Экспериментальные измерения для цилиндрической конструкции концентратора, без проточки, 6 мм.

R, мм	Z–я комп. H, мТ	H (в отн.ед.)		R, мм	Z–я комп. H, мТ	H (в отн.ед.)
0	23,3	0,12		0	23,3	0,12
–1	22,3	0,11		1	22,0	0,12
–2	20,1	0,10		2	20,7	0,11
–3	16,2	0,08		3	18,6	0,10
–4	12,1	0,06		4	16,6	0,09
–5	8,7	0,05		5	11,8	0,06
–6	6,5	0,03		6	9,2	0,05
–7	3,9	0,02		7	5,9	0,03
–8	2,1	0,01		8	3,1	0,01
–9	0,8	0,004		9	1,1	0,006
–10	–0,2	0		10	0,1	0
–11	0,3	0		11	–0,3	0

Таблица 3.4 – Экспериментальные измерения для конструкции концентратора с проточкой на рабочем торце, 0 мм

R, мм	Z–я комп. H, мТ	H (в отн.ед.)		R, мм	Z–я комп. H, мТ	H (в отн.ед.)
1	2	3		4	5	6
0	178,5	0,94		0	178,5	0,99
–1	190,3	1,00		1	188,8	1,00
–2	177,5	0,93		2	177,1	0,93

Продолжение таблица 3.4

–3	121,8	0,64		3	122,2	0,64
–4	31,9	0,17		4	33,1	0,17
–5	–8,8	–0,05		5	–11,0	–0,05
–6	–19,1	–0,10		6	–18,8	–0,09
–7	–16,4	–0,08		7	–16,8	–0,08
–8	–14,0	–0,07		8	–14,1	–0,07
–9	–9,7	–0,05		9	–9,9	–0,05
–10	–6,8	–0,036		10	–6,5	–0,03
–11	–3,9	–0,020		11	–4,2	–0,02

Таблица 3.5 – Экспериментальные измерения для конструкции концентратора с проточкой на рабочем торце, 3 мм

R, мм	Z–я комп. H, мТ	H (в отн.ед.)		R, мм	Z–я комп. H, мТ	H (в отн.ед.)
0	60,9	0,32		0	60,9	0,32
–1	58,7	0,30		1	58,1	0,30
–2	48,8	0,25		2	48,4	0,25
–3	36,3	0,19		3	35,8	0,18
–4	24,1	0,12		4	24,1	0,12
–5	10,9	0,05		5	10,8	–0,05
–6	5,3	0,02		6	5,1	–0,02
–7	0,8	–0,004		7	0,4	–0,002
–8	–1,6	–0,008		8	–1,7	–0,009
–9	–3,3	–0,018		9	–3,7	–0,020
–10	–2,2	–0,011		10	–2,4	–0,013
–11	–1,0	–0,005		11	–1,7	–0,009

Таблица 3.6 – Экспериментальные измерения для конструкции концентратора с проточкой на рабочем торце, 6 мм

R, мм	Z–я комп. H, мТ	H (в отн.ед.)		R, мм	Z–я комп. H, мТ	H (в отн.ед.)
1	2	3		4	5	6
0	21,7	0,11		0	21,7	0,11
–1	20,2	0,10		1	19,9	0,10
–2	18,0	0,09		2	17,6	0,09
–3	16,8	0,08		3	14,4	0,07
–4	14,4	0,07		4	10,7	0,05
–5	10,7	0,05		5	7,6	0,04
–6	6,9	0,03		6	4,6	0,02

Продолжение таблицы 3.6

1	2	3	4	5	6
-7	4,1	0,02	7	2,8	0,01
-8	2,3	0,01	8	1,4	0,007
-9	1,1	0,006	9	0,5	0,003
-10	0,3	0	10	0,1	0
-11	-0,2	0	11	-0,2	0

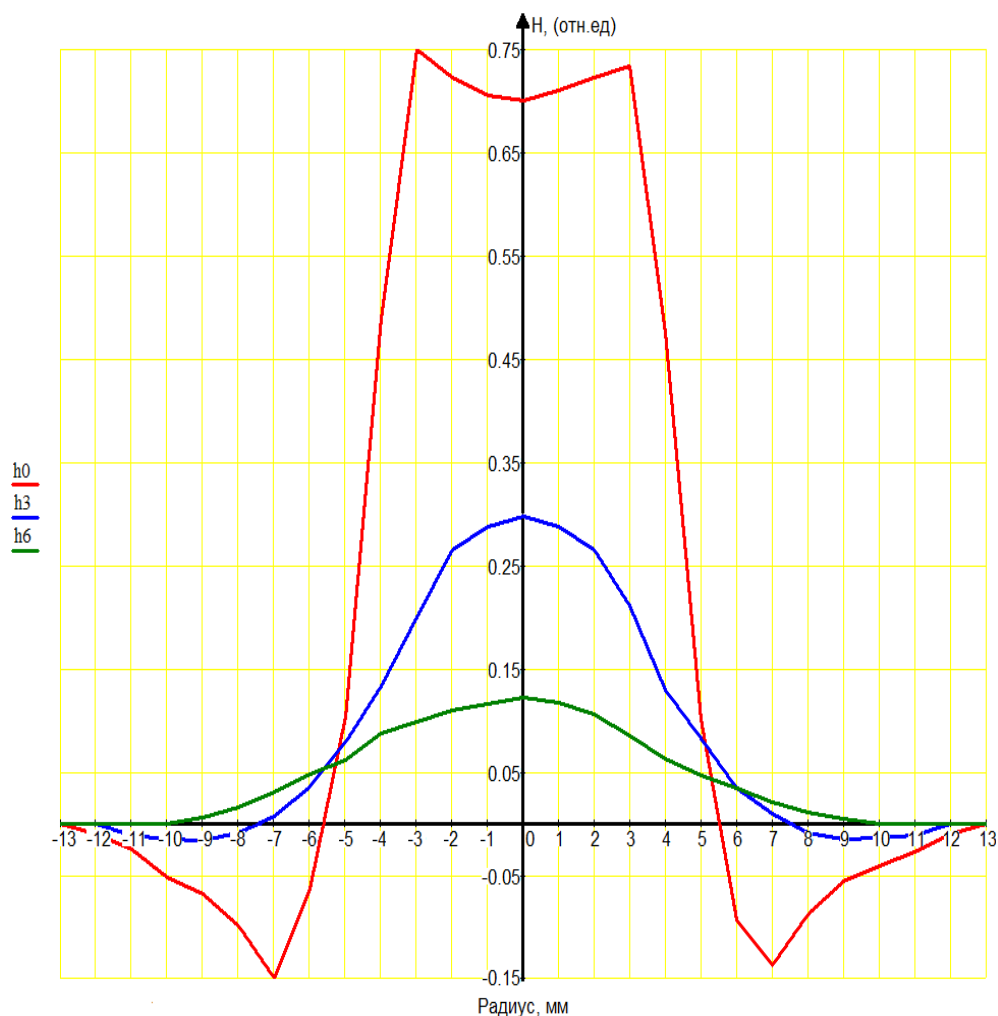


Рисунок 3.4 – Напряженность поля ЭМАП с цилиндрической конструкции концентратора на расстояниях 0 мм, 3 мм и 6 мм

То есть, напряженность поля максимальна на границе концентратора. Из этого следует, что рабочая обмотка в режиме излучения и в режиме приема должна располагаться на внешней поверхности концентратора. Для возможности технической реализации такой геометрии на рабочем торце концентратора была выполнена проточка с внутренним диаметром 4 мм.

Проведены экспериментальные измерения – насколько эта проточка деформирует магнитное поле. Измерения показали в рисунке 3.5, что магнитное поле сузилось, однако максимум также смещен от центра не на 3 мм, (как это было для цилиндрического концентратора) а на 1 мм. Z-я компонента также имеет инверсию, но не на 5,5 мм (как для цилиндрического концентратора), а на 4,5 мм.

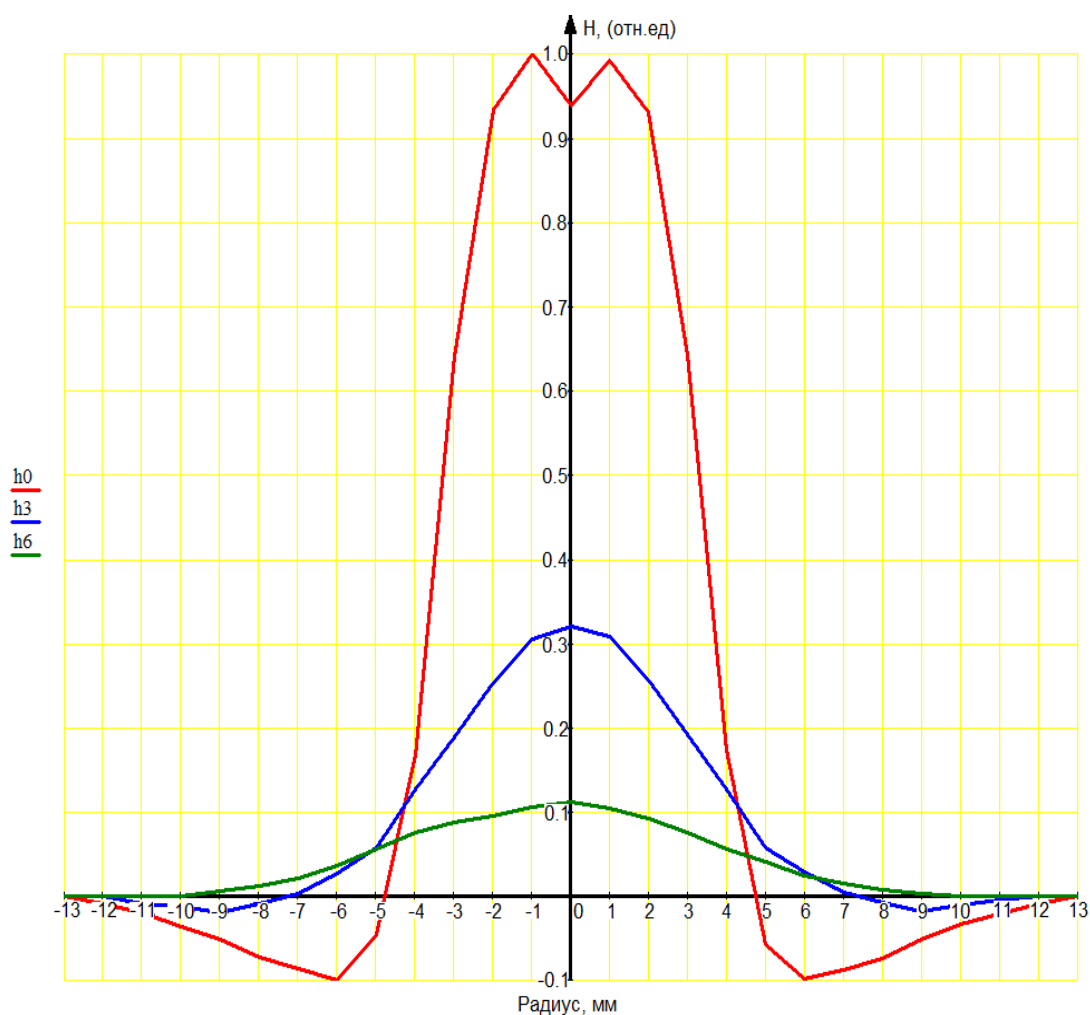


Рисунок 3.5 – Напряженность поля ЭМАП с проточкой на рабочем торце концентратора на расстояниях 0 мм, 3 мм и 6 мм

Намагниченность дополнительного магнита нормальна к внешней поверхности концентратора, силовые линии магнитного поля основного магнита и кольцевого магнита будут иметь встречное направление и будут выпираться контролируемое изделие. Максимальная концентрация силовых

линий имеет место на границе между боковой поверхностью концентратора и внутренней поверхностью кольцевого магнита.

Максимальная эффективность преобразования при излучении и приёме продольных волн будет иметь место в том случае, если витки катушки индуктора будут охватывать зону максимальной концентрации силовых линий, т.е. внутренний диаметр катушки должен быть меньше внешнего диаметра концентратора, а внешний диаметр катушки должен быть больше внешнего диаметра концентратора.

3.2 Акустическое поле УЗ преобразователей

Общепринятые понятия акустического поля – поле излучения, поле приема, зона Френеля или ближняя зона преобразователя, зона Фраунгофера или дальняя зона преобразователя, акустические центр и ось преобразователя, диаграмма направленности (ДН) преобразователя – приведены в работе.

Акустическое поле преобразователя чаще всего рассчитывают, считая, что последний состоит из большого числа элементарных излучателей–приемников, действие которых суммируют (интегрируют). Общепринято также, что направленность акустического поля сосредоточенного при излучении в жидкость описывается функцией $\chi(\theta) = 1$ (ненаправленный сферический излучатель), либо $\chi(\theta) = \cos(\theta)$ (дипольный излучатель) в зависимости от условий работы.

Отметим, что реальные функции направленности сосредоточенного источника в твердом теле удовлетворительно описываются указанной функцией лишь для продольной волны в диапазоне малых углов и не удовлетворяют описанию поперечной волны. В последнее время появились подходы, позволяющие учитывать реальные функции направленности сосредоточенного источника в твердом теле при расчете преобразователей [3, 46].

Имеются основные рабочие формулы для расчета основных параметров акустического поля круглого излучателя, схематично представленного на

рисунке 3.6. Граница между ближней и дальней зонами определяется последним максимумом амплитуды акустического поля вдоль акустической оси преобразователя и приближенно описывается выражением [7]:

$$L_{бз} = \frac{S}{\pi\lambda} = \frac{a^2}{\lambda}, \quad (10)$$

где $L_{бз}$ – протяженность ближней зоны по акустической оси преобразователя,

S – площадь пьезоэлемент,

a – радиус пьезоэлемента,

λ – длина волны.

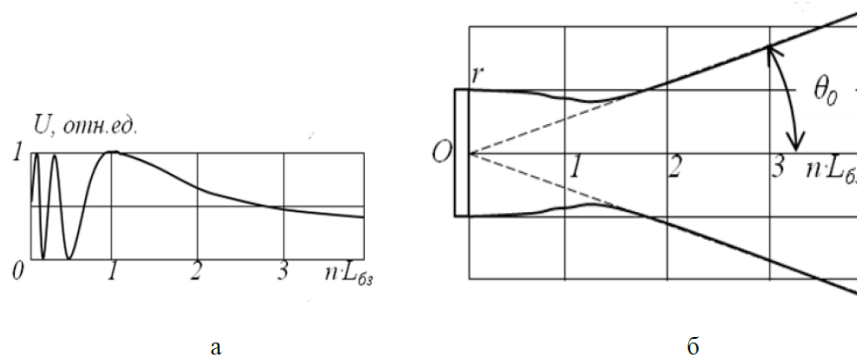


Рисунок 3.6 — Поле излучения на акустической оси (а), схематичное изображение УЗ поля (б): распределение акустического поля (сплошная линия); конус расхождения УЗ луча в дальней зоне (штриховая линия). θ_0 – угол раскрытия ДН

Для преобразователей прямоугольной формы для расчета протяженности ближней зоны используется корректирующий фактор k :

$$L_{бз} = \frac{ka_1^2}{4\lambda}, \quad (11)$$

где a_1 – меньшая из сторон пьезопластины;

k – корректирующий фактор.

В основном лепестке, как правило, сосредоточено ≈ 80 % энергии поля. Существующие за его пределами боковые лепестки являются источниками помех. Наибольший их уровень дает первый боковой лепесток. Угол раскрытия ДН определяется выражением:

$$\sin\theta_0 = n\lambda/r, \quad (12)$$

где, n – численный коэффициент, определяемый уровнем амплитуды основного лепестка и формой пьезопластины ($n = 0,61$ для уровня 0 дБ).

Для некоторого расстояния $x = r$ под углом θ к акустической оси амплитуда будет описывается некоторой функцией $\Phi(\theta)$, называемой ДН.

В общем случае ДН поле излучения и приема круглого преобразователя определяется формулами:

$$\Phi(X) = |2J_1(X)/X|, \quad (13)$$

где J_1 – функция Бесселя;

$X = ka\sin\theta$;

$k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

На рисунке 14 приведен пример ДН в относительных единицах и децибелах для пьезопластины круглой формы:

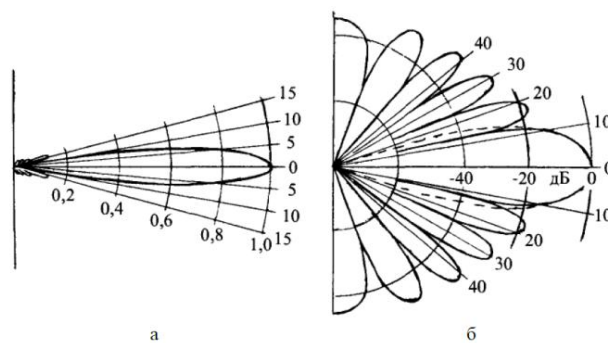


Рисунок 3.7 – ДН поля излучения круглой пьезопластины при отношении диаметра к длине волны $2a/\lambda = 5$: a – в относительных единицах; b – в децибелах

3.2.1 Особенности расчета ЭМАП

Применяемые на практике конструкции ЭМАП содержат высокочастотные индукторы в виде наборов тонких синфазных или противофазных (пространственно–периодические структуры типа меандр) лент

с током, наносимых на печатную плату или наматываемых вручную (Рисунок 3.8).

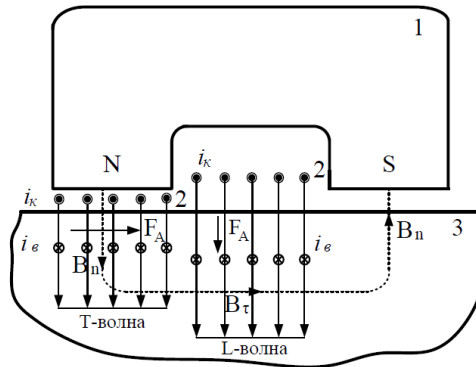


Рисунок 3.8 — Принцип действия ЭМАП продольных и поперечных волн за счет электродинамического механизма

Направление объемной плотности сил $\vec{F}_0$, определяется направлением плотности тока в индукторе $\vec{j}$, и направлением индукции поляризующего поля $\vec{B}_0$ (Рисунок 17). Если $\vec{j}$ направлен всегда параллельно поверхности металла (индуктор преобразователя параллелен поверхности), то $\vec{B}_0$ может иметь два крайних направления – параллельно поверхности (наблюдается преимущественное излучение (прием) продольных волн) или нормально к поверхности (наблюдается преимущественное излучение (прием) поперечных волн).

Амплитуда колебаний единичного элемента A_{nl} в случае ЭМАП на определяется формулами:

– для продольной волны при ориентации поля подмагничивания вдоль поверхности:

$$A_{nl} = \frac{jB_0 S_e \gamma^2}{8\pi\mu r} e^{-k_l h \sin \theta}, \quad (14)$$

– для поперечной волны при ориентации поля подмагничивания перпендикулярно поверхности:

$$A_{ntV} = \frac{jB_0 S_e}{4\pi\mu r} e^{-k_t h \sin \theta} \quad (15)$$

Формулы (14) и (15) справедливы для случая $k_2 \gg k_1$, часто имеющего место на практике (глубина скин-слоя значительно меньше длины акустической волны) и для плоскости $\alpha = 0$ (в направлении максимума излучения).

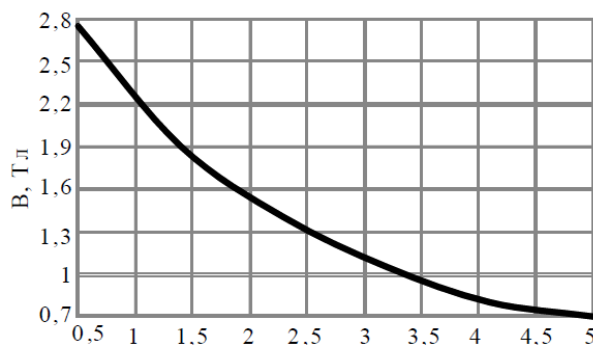


Рисунок 3.9 –Распределение магнитного поля B_0 на поверхности ОК с увеличением зазора между магнитопроводом и ОК

Формирование ДН ЭМАП в существенной мере определяется распределением вихревых токов, формируемых в приповерхностном слое электропроводящего объекта контроля. Взаимодействие вихревых токов с внешним магнитным полем приводит к возникновению в объекте контроля понедеромоторных сил F_0 и излучению упругих волн определенной поляризации в зависимости от соотношения направления магнитного поля и вихревых токов.

3.3. Исследование диаграммы направленности преобразователя в режиме излучения и приёма

Максимальная эффективность преобразования при излучении и приёме продольных волн будет иметь место в том случае, если витки катушки индуктора будут охватывать зону максимальной концентрации силовых линий, т.е. внутренний диаметр катушки должен быть меньше внешнего диаметра концентратора, а внешний диаметр катушки должен быть больше внешнего диаметра концентратора.

Для проверки эффективности работы ЭМАП были экспериментально исследованы диаграммы направленности в режимах излучения и приёма и

зависимость эффективности преобразования от величин зазора между изделием и преобразователя.

Для определения диаграммы следовало:

- закрепить ЭМА преобразователь на полуцилиндры с радиусами R30, 50, 70, 90 мм.
- подключить преобразователи к дефектоскопу.
- измерить амплитуды принятого сигнала для углов от минус 50° до плюс 50° .
- заполнить таблицы 10 и 11.
- построить зависимости амплитуды от угла в диаграмме направленности.

Для снятия диаграмм направленности был изготовлен образец из алюминия в виде набора полуцилиндров радиусами 30, 50, 70, 90 мм.

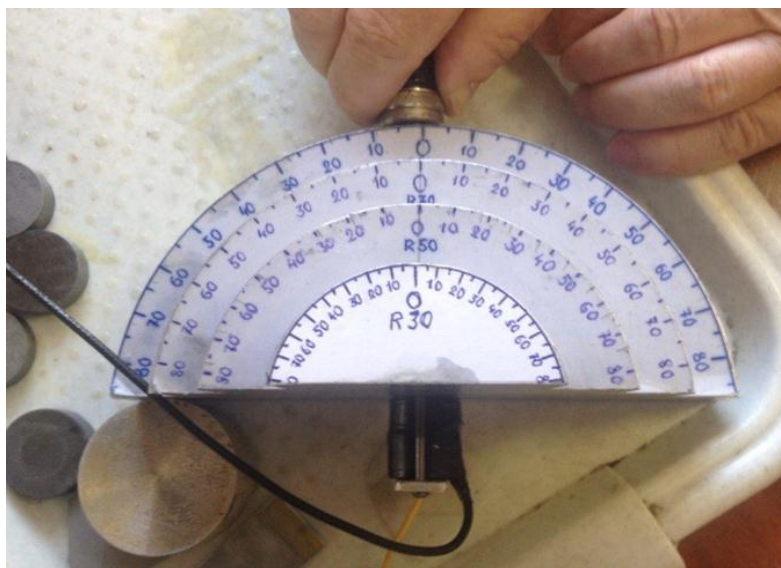


Рисунок 3.10 – Образец для снятия диаграмм направленности

Для измерений использовался стандартный дефектоскоп УСД–60. В режиме излучения ЭМАП подключался к гнезду генератора «выход», а приёмный ПЭП подключался к гнезду «вход». В режиме приёма подключалось все наоборот.



Рисунок 3.11 – Подключение ЭМА-преобразователя

Катушка индуктора в режиме излучения имела 17 витков провода диаметром 0,32 мм, в режиме приёма – 80 витков провода диаметром 0,24 мм. Элементы магнитной системы имеют следующие размеры: основной магнит: цилиндр 10x15 мм; дополнительный кольцевой магнит: наружный диаметр 15 мм; внутренний диаметр 7 мм; толщина 3,5 мм; концентратор – 7x6,5 мм.



Рисунок 3.12 – ЭМА преобразователь

В режиме излучения ЭМАП крепился в центре окружности через прокладки различной толщины. Распределение давления в пучке, создаваемом ЭМА-преобразователем, в зависимости от угла отклонения от оси измерялось стандартным прямым преобразователем. ЭМАП и ПЭП были настроены на частоту 2,5 МГц. Результаты измерения приведены в таблице 3.7 и показаны в виде полярной диаграммы на рисунке 3.13.

Таблица 3.7 – Измерение амплитуды в режиме излучения

Радиус (мм)	Амплитуда	Углы										
		-50°	-40°	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°	40°	50°
30	A(отн. ед)	0,31	0,95	1,00	2,98	5,00	10,0	5,00	3,00	1,00	0,96	0,33
50	A(отн. ед)	–	0,50	1,00	2,00	5,00	10,0	3,00	2,00	0,98	0,50	–
70	A(отн. ед)	–	0,55	1,50	2,00	5,50	10,0	5,50	2,00	1,70	0,50	–
90	A(отн. ед)	–	–	1,80	1,50	3,50	10,0	3,50	1,50	1,75	–	–
90	A(отн. ед)	–	–	0,40	1,50	3,00	10,0	3,00	1,50	0,50	–	–

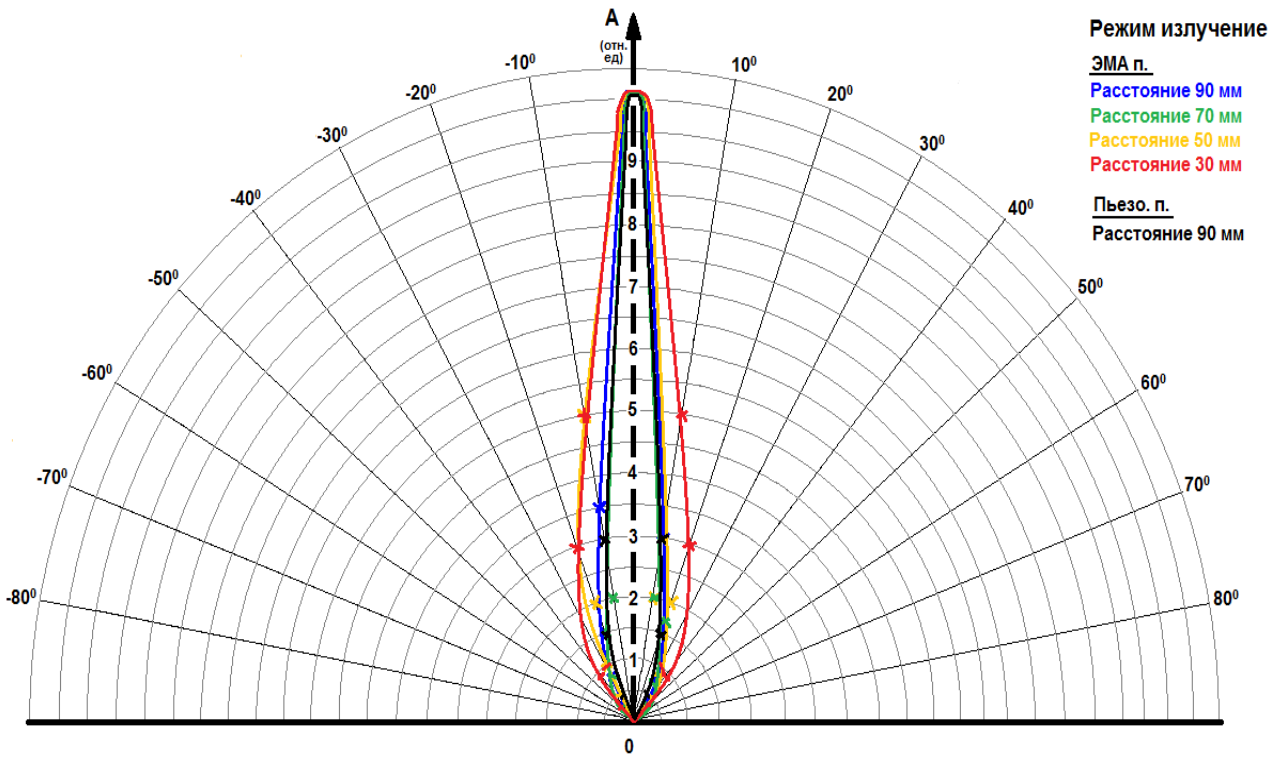


Рисунок 3.13 – Диаграммы направленности в режиме излучения

В режиме приёма ПЭП крепился в центре окружности. Давление в пучке, создаваемое пьезопреобразователем, измерялось ЭМА-преобразователем. Измерялась зависимость напряжения, снимаемого с ЭМАП, от угла отклонения от оси. Результаты измерения приведены в таблице 3.8 и показаны в виде полярной диаграммы на рисунке 3.14.

Таблица 3.8 – Измерение амплитуды в режиме приёма

Ра- диус (мм)	Амплитуд а	Углы										
		-50°	-40°	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°	40°	50°
30	A(отн. ед)	0,50	0,95	2,00	2,00	5,00	10,0	4,00	2,00	1,60	0,95	0,55
50	A(отн. ед)	–	0,49	1,50	1,50	5,50	10,0	4,00	1,80	1,50	0,51	–
70	A(отн. ед)	–	0,60	1,25	1,25	5,55	10,0	4,50	1,60	1,25	0,55	–
90	A(отн. ед)	0,40	1,00	1,50	1,50	5,00	10,0	5,00	1,50	1,50	0,85	0,40
90	A(отн. ед)	–	–	0,45	1,00	3,00	10,0	3,00	1,00	0,45	–	–

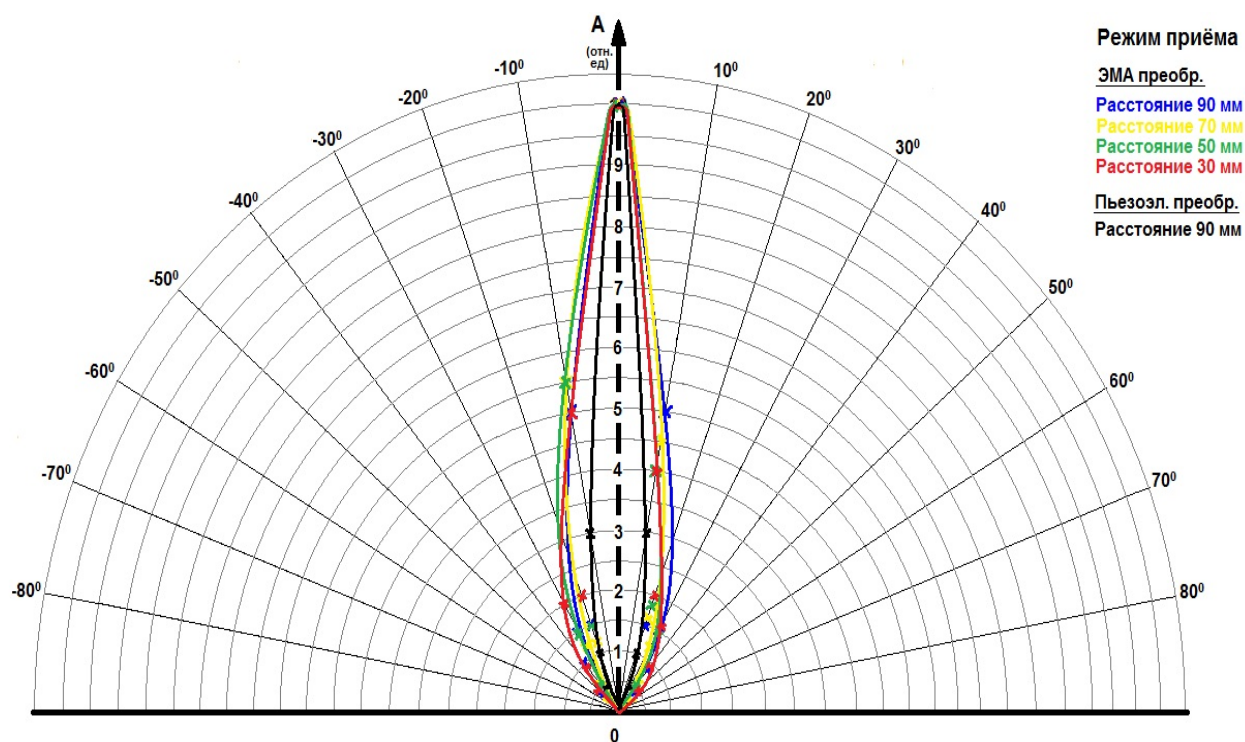


Рисунок 3.14 – Диаграммы направленности в режиме приёма

Полученные диаграммы сравнивались с диаграммами направленности стандартного пьезоэлектрического преобразователя диаметром 12 мм на частоту 2,5 МГц. Анализ показал, что диаграммы направленности ЭМАП с приведенными размерами имеет диаграмму направленности, близкую к диаграмме направленности ПЭП с диаметром пластин 12 мм.

Зависимость эффективности преобразования от величин зазора между изделием и преобразователем в режимах излучения и приёма приведена на рисунке 3.15.

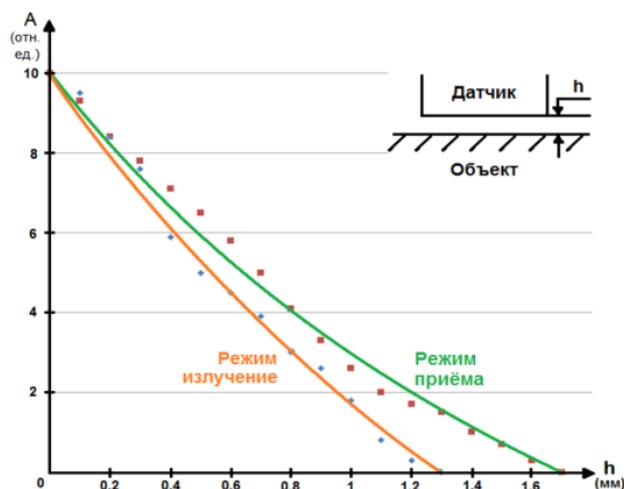


Рисунок 3.15 – Зависимость амплитуды A от величины зазора h

Анализ показывает, что преобразователь работоспособен с зазорами до 1 мм.

3.4 Исследование оптимального соотношения числа витков индуктора в режимах излучения и приёма

Для определения оптимального соотношения числа витков индуктора был использован образец из алюминия в виде набора полуцилиндров радиусами 30, 50, 70, 90 мм (рисунок 3.10).

В режиме излучения ЭМАП крепился в центре окружности. Давление в пучке, создаваемом ЭМА–преобразователем, в зависимости от числа витков индуктора измерялось стандартным прямым преобразователем. ЭМАП и ПЭП были настроены на частоту 2,5 МГц. Результаты измерения показаны в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Зависимость амплитуды от числа витков в режиме излучения

n	10	20	30	40	50	60
$A(\text{отн. ед.})$	0,77	1,00	0,96	0,82	0,68	0,45

В режиме приёма ПЭП крепился в центре окружности. Давление в пучке, создаваемое пьезопреобразователем, измерялось ЭМА –

преобразователем. Измерялась зависимость напряжения, снимаемого с ЭМАП, от числа витков индуктора. Результаты измерения записаны в таблицу 3.10 и показаны в виде графика на рисунке 23.

Таблица 3.10 – Зависимость амплитуды от числа витков в режиме приёма

n	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
A(отн ед)	0,58	0,73	0,83	0,89	0,96	0,97	1,00	0,96	0,84	0,72	0,60

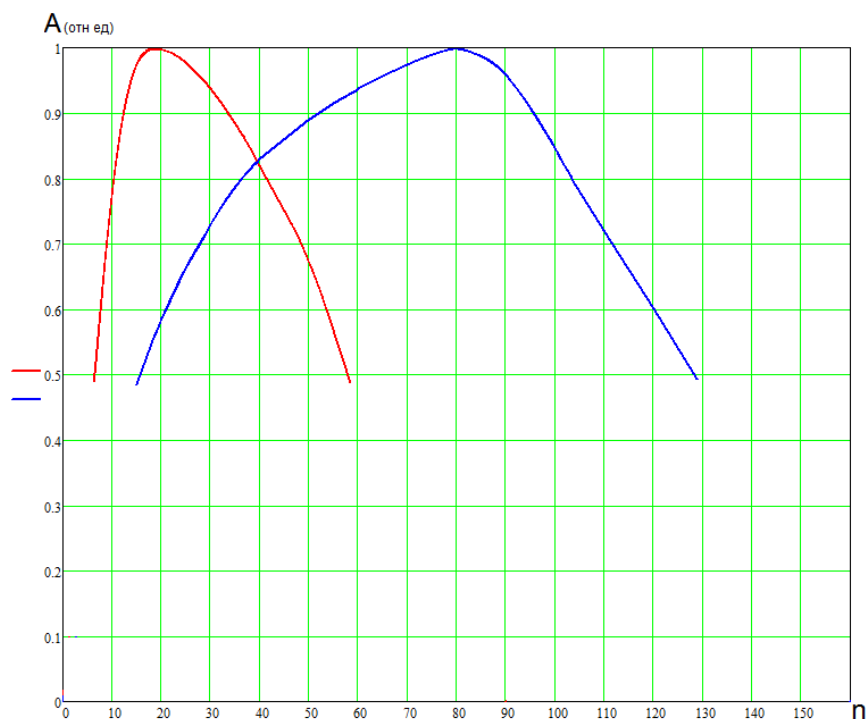


Рисунок 3.16 – Соотношения числа витков индуктора в режимах излучения (красная линия) и приёма (синяя линия)

Результаты измерений показали, что в режиме излучения число витков 17 является оптимальным. А для оптимальной работы в режиме приёма число обмотки индуктора должно составлять 80 витков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований разработана конструкция магнитной системы ЭМА преобразователя, обеспечивающая более высокую эффективность преобразования по сравнению с известными конструкциями. Показано также:

1. Расположение витков индуктора в зоне максимальной концентрации силовых линий магнитного поля повышает эффективность преобразования.
2. Катушка индуктора для возбуждения и приёма продольных волн должна иметь разное количество витков для режимов излучения и приёма.
3. Диаграмма направленности ЭМАП с приведёнными размерами близка к диаграмме направленности ПЭП с диаметром пластины 12 мм.

Результаты исследований магнитного поля ЭМА–преобразователя показали, что выбранная конструкция ЭМА преобразователя с проточкой на рабочем торце формирует магнитное поле требуемой формы и создает условия для размещения рабочих катушек в режиме приема и режиме излучения в зоне максимальной напряженности поля. Из этого следует, что рабочая обмотка в режиме излучения и в режиме приема должна располагаться на внешней поверхности концентратора. Расположение витков индуктора в зоне максимальной концентрации силовых линий магнитного поля повышает эффективность преобразования.

Результаты работы использованы при разработке системы контроля качества стальной авиационной подвески, изготавливаемой методом литья и имеющей шероховатую поверхность.

В разделе 4 по результатам выполненного задания для раздела **«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»** было достигнуто следующее:

– Были определены потенциальные потребители результатов исследования;

– Проведен SWOT–анализ, по результатам которого можно сделать вывод, что данная технология имеет преимущества по сравнению с

имеющимися разработками. Данная разработка и имеет низкую стоимость, по сравнению с существующими технологиями. Для повышения спроса необходима активная рекламная компания;

- Определены цели и требования к результатам проекта. Целью является исследование и изготовление электромагнитно–акустического преобразователя для контроля литья. Результатом должно быть создание более дешевых образцов для НК.

- Составлен план проекта, в соответствии с которым определяются объем работ и время, затрачиваемое на ее выполнение. Из календарного плана следует, что руководитель (Капранов Б.И.) занят календарных 323 дня (264 рабочих дней), исполнитель ВКР (Сыдыков Ж.Б.) занят календарных 492 дня (393 рабочих дней);

- Рассчитан бюджет научного исследования. Рассчитано, что для реализации проекта требуется 1971844 рубля;

- Проведена оценка экономической выгоды исследования, в результате которой определено, что исследование электромагнитно–акустического преобразователя является необходимым на стадии доработки и исследования.

В разделе «**Социальная ответственность**» магистерской работы описали рабочее место, провели анализ выявленных вредных и опасных проявлений факторов производственной среды, затронули вопросы охраны окружающей среды, рассмотрели защиту при возникновении чрезвычайных ситуаций, правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, а также организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

- На основании вышеизложенного можно заключить, что работа выполнена в полном объеме, цель достигнута. Результаты данной работы являются значимыми для организации. Разработанная по результатам исследования документация рассмотрена и одобрена руководством и находится на стадии внедрения в процессы организации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каневский И.И. Неразрушающие методы контроля: учеб. Пособие / И.И. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.
2. Опыт использования пьезопреобразователя нового типа для контроля литья. <http://www.ndt.com.ua/component/content/article?id=83:kontrol-litya>
3. Буденков, Г.А. Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики / Г.А. Буденков, О.В. Недзвецкая. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 135 с.
4. Васильев, А.Н. Электромагнитное возбуждение звука в металлах / А.Н. Ва–сильев, В.Д. Бучельников, С.Ю. Гуревич, М.И. Каганов, Ю.П. Гайдуков; отв. ред. В.М. Березин. – Челябинск –М.: Изд–во ЮУрГУ, 2001. – 339 с.
5. Комаров, В.А. Квазистационарное электромагнитно–акустическое преобразо–вание в металлах / В.А. Комаров. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. – 235 с.
6. Комаров, В.А. Оценка физико–механических свойств твердых тел квазиста–ционарным электромагнитным полем / В.А. Комаров, В.Ф. Мужичкий. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. –536 с.
7. Ермолов, И.Н. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге; под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.: ил.
8. Сучков, Г.М. О главном преимуществе ЭМА–способа / Г.М. Сучков // Дефек–тоскопия. – 2000. – N 10. — С. 67.
9. Сучков, Г.М. Повышение чувствительности ЭМА приборов / Г.М. Сучков, А.В. Донченко, А.В. Десятниченко и др. // Дефектоскопия.– 2008. – N 2. — С. 15–22.
10. Сучков, Г.М. Реальная чувствительность ЭМА–приборов / Г.М. Сучков, А.В. Донченко // Дефектоскопия. – 2007. – N 6. — С. 43–50.

11. Сучков, Г.М. Современные возможности ЭМА дефектоскопии / Г.М. Сучков // Дефектоскопия. – 2005. – N 12. — С. 24.

12. Тригубович, Б.В. К теории электромагнитного возбуждения ультразвука в ферромагнетиках в районе температуры Кюри / Б.В. Тригубович, Н.Е. Домород // Дефектоскопия. – 1984. – N 7. – С. 57–64.

13. Alers, G. A. Electromagnetic induction of ultrasonic waves: EMAT, EMUS, EMAR [электронный ресурс] / G. A. Alers // 16th World Conference on NDT. 2004, Monreal, Canada. – Режим доступа:

http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/non-contact_ultrasonics/691_alers.pdf.

21. Муравьев, В.В. К расчету параметров магнитной системы электромагнитно–акустического преобразователя / В.В. Муравьев, В.А. Стрижак, Е.Н. Балобанов // Интел–лектуальные системы в производстве. – 2011. – N 1. – С. 197–205.

23. Электромагнитно–акустический преобразователь. Патент РФ на полезную модель №134658 от 31.05.2013. / В. В. Муравьев, О.В. Муравьева, В.А. Стрижак, А.В. Пряхин, Е.Н. Балобанов; опубл. 20.11.2013, Бюл. N 32. – 8 с.: ил.

24. Электромагнитно–акустический преобразователь. Патент РФ на полезную модель №127931 от 23.11.2012. / В.В. Муравьев, О.В. Муравьева, В.А. Стрижак, А.В. Пряхин, Е.Н. Балобанов, Л.В. Волкова; опубл. 10.05.2013, Бюл. N 13. – 6 с.: ил.

25. Сучков, Г.М. Построение приборов для ультразвукового контроля и измерений с использованием ЭМА способа возбуждения и приема ультразвуковых импульсов / Г.М. Сучков // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2005. – N 2. — С. 36.

26. Сучков, Г.М., Генератор зондирующих импульсов для ЭМА–дефектоскопов / Г.М. Сучков, Петрищев О.Н., Чередниченко И.В., и др. // Дефектоскопия. – 2012. – N 9. — С. 42–47.

28. Комаров, В.А. Моделирование проявлений электромагнитно–акустического преобразования в металлах I. Преобразование

квазистационарного неоднородного элек–ромагнитного поля в упругие сдвиговые колебания / В.А. Комаров // Контроль. Диаг–ностика. — 2013. — N 3. — С. 17–25.

29. Комаров, В.А. ЭМА преобразование волн горизонтальной поляризации в маг–нитоупругих материалах / В.А. Комаров, С.Э. Бабкин, Р.С. Ильясов // Дефектоскопия. — 1993. — N 2. — С. 11–17.

30. Лещенко, Н.Г. Исследование эффективности возбуждения акустических коле–баний однопроводным излучателем под действием силы Лоренца. Разработка ЭМА пре–образователя. Приборная реализация / Н.Г. Лещенко, В.Ф. Мужичкий, В.Б. Ремезов // Дефектоскопия. — 2005. — N 7. — С. 13–22.

31. Глухов, Н.А. Определение оптимальных параметров электромагнитно–акустических датчиков для контроля ферромагнитных листов / Н.А. Глухов, В.Н. Кол–могоров // Дефектоскопия. — 1973. — N 1. — С. 74–81.

32. Малинка, А. В. Излучение и прием ультразвуковых колебаний под заданным углом при электромагнитно–акустическом методе / А.В. Малинка // Дефектоскопия. — 1970. — N 5. — С. 16–20.

34. Грошев, В.Я. Анализ влияния конструктивных параметров на чувствитель–ность электромагнитно–акустических преобразователей / В.Я. Грошев // Дефектоскопия. — 1997. — N 4. — С. 32–41.

35. Муравьева, О.В. Реальная чувствительность входного акустического контроля прутков–заготовок при производстве пружин / О.В. Муравьева, В.В. Муравьев, В.А. Стрижак, Е.Н. Кокорина (Е.Н. Фокеева), М.А. Лойферман // В мире неразрушающего контроля — 2013 г. — N1. — С.62–70

36. Горбашова А. Г., Петрищев О. Н., Романюк М. И., Сучков Г. М., Хащина С. В. Исследование передаточных характеристик ультразвуковых трактов с электромагнитным возбуждением и регистрацией волн Рэлея в ферромагнетиках. Часть 2.

37. Горбашова А. Г., Петрищев О. Н., Романюк М. И., Сучков Г. М., Хащина С. В. Исследование передаточных характеристик ультразвуковых

трактов с электромагнитным возбуждением и регистрацией волн Рэлея в ферромагнетиках. Часть 1.

38. Хуснутдинова И.Г., Баширов М.Г., Усманов Д.Р., Хуснутдинова Л.Г. «Оценка степени поврежденности оболочковых конструкции с использованием электромагнитно–акустического метода контроля».

39. Патент №2350943 - Магнитная система электромагнитно-акустического преобразователя.

40. Патент Германии DE 4011686 -- Магнитная система электромагнитно-акустического преобразователя.

41. Патент РФ №2243550 – - Магнитная система электромагнитно-акустического преобразователя.

42. Ульянов Г.К. «О применении неконтактных магнитно-акустических искателей в ультразвуковой дефектоскопии».

43. Буденков Б.А., Буденков Г.А., Шаповалов П.Ф., Попова Л.А. «Повышение коэффициента преобразование при электромагнитном способе возбуждения и приёма упругих колебаний». «Дефектоскопия», №6, 1969, стр. 108.

44. Сазонов Ю.И., Шкарлет Ю.М. «Исследование бесконтактных методов возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний», «Дефектоскопия», №15, 1969, стр.1.

45. Алиев И.И. «Электрический справочник». – 5-е изд., стереотип. – М.: ИП РадиоСофт, 2010. – 21 с.

46. Самокрутов, А.А. Возможности оценки характера несплошности металла ультразвуковым томографом с цифровой фокусировкой антенной решетки / А.А. Само-крутов, В.Г. Шевалдыкин // Контроль. Диагностика. – 2011. – N 10. – С. 63–70.

47. ГОСТ 12.0.004–90. Организация обучения работающих безопасности труда. Общие положения.

48. ГОСТ 12.1.004–91. Пожарная безопасность. Общие требования.

49. ГОСТ 12.1.005–88. ССБТ. Общие санитарно–гигиенические требования рабочей зоны.

50. ГОСТ 12.1.041–83. Пожаровзрывобезопасность горючих пылей.

51. ГОСТ 12.1.044–89. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов.

Номенклатура показателей и методы их определения.

52. ГОСТ 12.4.009–83. Пожарная техника для защиты объектов.

53. ГОСТ 12.4.011–89. Средства защиты работающих.

54. ГОСТ 12.4.103–83. Одежда специальная защитная, средства индивидуальной защиты ног и рук.

55. ГОСТ 12.1.019 –79 (с изм. №1) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

56. ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

57. ГОСТ Р 22.0.01–94. Безопасность в ЧС. Основные положения.

58. ГОСТ Р 22.3.03–94. Безопасность в ЧС. Защита населения. Основные положения.

59. ГОСТ Р 22.0.07–95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники техногенных чрезвычайных ситуаций. Классификация и номенклатура поражающих факторов и их параметров.

60. ГОСТ 12.2.049–80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.

61. ГОСТ 12.2.032–78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

62. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

63. СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.

64. Постановление Правительства Республики Казахстан от 16.01.2009 г. № 14 – Об утверждении Технического регламента «Общие требования к пожарной безопасности»