ПОРТАТИВНЫЙ НАКЛАДНОЙ ПРЯМОЙ СОВМЕЩЕННЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ЧЕРЕЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЛОИ ТОЛЩИНОЙ ДО 20 ММ НА ПОВЕРХНОСТИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

© 2022 г. Г.М. Сучков^{1,*}, Р.П. Мигущенко^{1,**}, О.Ю. Кропачек^{1,***}

¹Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина 610002 Харьков, ул. Кирпичева, 2 e-mail: *hpi.suchkov@gmail.com; **mrp1@ukr.net; ***kropachek@ukr.net

Поступила в редакцию 17.01.2022; после доработки 04.02.2022 Принято к публикации 28.03.2022

Разработан портативный прямой совмещенный электромагнитно-акустический преобразователь для толщинометрии ферромагнитных изделий через диэлектрические прослойки толщиной до 20 мм путем совершенствования плоской высокочастотной катушки индуктивности и новой электронной схемы преобразователя. Для проверки возможностей нового преобразователя разработан стенд. Показано, что новая электронная схема управления бесконтактного сенсора позволяет качественно согласовать датчик с генератором зондирующих импульсов и усилителем принятых ультразвуковых пакетных сигналов. В результате обеспечивается контроль более тонких изделий с большей чувствительностью. Экспериментальные исследования показали, что новый электромагнитно-акустический преобразователь дает возможность проводить толщинометрию ферромагнитных изделий при воздушном зазоре или толщине диэлектрических покрытий до 20 мм.

Ключевые слова: ультразвуковая толщинометрия, электромагнитно-акустический преобразователь, генератор зондирующих импульсов, предварительный усилитель, донный сигнал, зазор, ферромагнитное изделие.

DOI: 10.31857/S0130308222050025; EDN: BLPCRM

введение

Мировая промышленность использует большое число изделий, изготовленных из ферромагнитных материалов, в своем большинстве стальных: листы, трубы, заготовки и др. При эксплуатации такие изделия подвержены абразивному утонению, особенно на гибах труб, и коррозии. Для надежной эксплуатации стальные изделия покрывают краской, пластиком, керамикой и другими покрытиями. Однако в полной мере защитить изделия от повреждений во время эксплуатации невозможно. Кроме того, например, в трубопроводах различного назначения, емкостях для хранения жидкостей и в аналогичных изделиях на внутренних стенках формируются отложения, иногда значительной толщины. Вследствие этого обнаружение коррозионных повреждений металла под такими отложениями существенно осложняется. Практически невозможно измерять остаточную толщину металла.

Как правило, измеряют толщину или обнаруживают поврежденные участки в таких объектах путем применения неразрушающих методов, среди которых основным является ультразвуковой (УЗ) [1]. Традиционные УЗ технологии контроля требуют предварительной зачистки поверхности ввода/приема ультразвука. По данным ОАО «Харьковский котельно-механический завод» затраты на подготовку поверхности стальных изделий примерно равны затратам на проведение УЗ контроля. Аналогичные данные приводятся в статьях [2, 3].

Для решения проблем традиционного ультразвукового контроля довольно успешно выполняются исследования и разработки электромагнитно-акустического (ЭМА) способа возбуждения и приема ультразвуковых импульсов, о чем свидетельствует значительное количество информационных сообщений, опубликованных в последнее время [4—28]. Несмотря на значительные технические и экономические преимущества ЭМА-метода контроля, он имеет существенный недостаток [1, 4, 5, 28] — недостаточную эффективность ЭМА-преобразователей (ЭМАП). Даже в случае толщинометрии для получения необходимого значения амплитуды донных импульсов по отношению к амплитуде шума зазор между ЭМАП и металлом должен быть минимальным [1, 5, 11, 12], что не позволяет проводить УЗ контроль без удаления покрытий или отложений толщиной до 20 мм (рис. 1).

В последнее время прилагаются существенные усилия для увеличения расстояния между ЭМАП и поверхностью металла [7, 10, 13—18]. Так, в работах [13, 28] отмечено, что ЭМА-



Рис. 1. Образец из трубы диаметром 1200 мм, бывшей в эксплуатации, с локальными отложениями на внутренней поверхности толщиной до 20 мм и более.

датчики могут работать с зазорами до 1 мм, преобразователи прибора ОКО ndt GROUP [14] и дефектоскопа EMACON-01 [15] могут работать при зазорах до 2 мм; ЭМАП, выпускаемые канадской фирмой Innerspec [16], могут работать с зазорами до 1 мм, в приборе NKD-019 «UltraSonic» — при контроле листов и труб через воздушные зазоры до 4 мм [17]. В автоматических ЭМА-установках для зеркально-теневого контроля рельсов, внедренных в 1983-1985 гг. на ОАО «Кузнецкий металлургический комбинат», ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат» и АО МК «Азовсталь» [ТУ 14-2-542-83, ТУ 14-2-584-84, ТУ У 14-2-1199-97] зазор составлял 5 мм (с использованием постоянных электромагнитов массой около 100 кг). На сайте предприятия ОКТАΝТА-NDT [18] сообщается о разработке ручного толщиномера с ЭМА преобразователем, который может работать при зазорах до 6 мм. Авторы работы [19] предложили конструкцию ЭМАП для толщиномера, который может позволить выполнять измерения при зазорах или при диэлектрических покрытиях до 10 мм. Однако предложенный преобразователь обладает значительным временем переходных процессов после воздействия зондирующего импульса, что не позволяет измерять толщины ферромагнитных изделий величиной до 20 мм. Определенный успех по увеличению зазора между ЭМАП и металлом до 25 мм достигнут авторами работы [20], но это техническое решение может использоваться только для волн Лэмба.

Прямолинейный подход к проблеме существенного увеличения расстояния между ЭМАП и металлом путем увеличения тока в высокочастотной катушке индуктивности до сотен ампер [7, 8, 10, 21] и величины индукции магнитного поляризующего поля до 1,2 Тл [4, 7, 8, 10, 19, 22] на сегодня практически себя исчерпали.

Необходимы новые подходы к поставленной проблеме. Для этого осуществляются теоретические [5, 6, 22, 23, 28] и экспериментальные [4, 5, 7, 11, 19, 22, 24] исследования. Например, в [27] предложена новая конструкция высокочастотной катушки индуктивности и новая схема питания, что, по мнению автора, может увеличить эффективность возбуждения УЗ импульсов ЭМА-способом.

Анализ данных, приведенных в известных информационных источниках, позволили сформулировать цели работы:

разработать ЭМАП, который позволит выполнять толщинометрию ферромагнитных изделий при зазорах или толщине диэлектрических покрытий и отложений до 10 ... 20 мм;

существенно уменьшить длительность переходных процессов после завершения действия зондирующих импульсов («звон»), что, при прочих равных условиях, позволит измерять толщину относительно тонких участков ферромагнитных металлоизделий.

РАЗРАБОТКА ЭМАП, МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В качестве базового объекта для разработки авторы использовали ЭМА-преобразователь, описанный в статье [19] (рис. 2).

Мощный постоянный магнит 1 на основе соединения NeFeB фиксируется в корпусе при помощи ферромагнитной пластины — магнитопровода 2. Магнит 1 отделяется от катушки 3 экранирующей пластиной 4, выполненной, например, из латуни типа ЛС69 толщиной 0,2 мм. Она необходима для исключения появления когерентных помеховых ультразвуковых импульсов в теле магнита 1. Жгут 3 из нескольких изолированных проводников плоской высокочастотной катушки индуктивности (ВКИ) помещается в окантовку 5 из диэлектрика. Окантовка 5 соединяется с протектором 6 из стеклотекстолита, после чего катушка 3 заливается клеем. На протекторе 6 закреплена окантовка 7 из латуни. В отдельном корпусе 8 ЭМАП размещены элементы электронного управляющего устройства проводниками ВКИ 3 (диоды, конденсаторы, резисторы на рис. 2 не показаны).



Рис. 2. Конструкция базового ЭМАП.

Размеры разработанного преобразователя: 62×65×130 мм³. Масса ЭМАП составила 1,7 кг. Этот преобразователь имеет ряд преимуществ по сравнению с другими:

возбуждает и принимает высокочастотные сдвиговые линейно-поляризованные ультразвуковые импульсы нормально поверхности ферромагнитного изделия (их скорость распространения примерно в 2 раза меньше, чем у продольных волн), что важно при толщинометрии тонких изделий;

хорошо согласуется с низкоомным выходом питающего генератора импульсов высокочастотного тока и высокоомным входом приемного усилителя за счет применения автоматических электронных переключателей;

обладает высокой чувствительностью в отношении донных импульсов;

отличается пониженной чувствительностью по отношению к электромагнитным помехам за счет выполнения ВКИ в форме «крыльев бабочки».

При своих достоинствах этот ЭМАП имеет существенные недостатки:

при значительных расстояниях между ЭМАП и поверхностью изделия добротность высокочастотной катушки индуктивности возрастает, что приводит к существенному увеличению длительности «звона» в цепях преобразователя после окончания действия питающего импульса тока. В результате невозможно измерять толщину тонких изделий по параметрам первого донного импульса и невозможно принимать импульсы, отраженные от дефектов, расположенных на небольших расстояниях от поверхности ввода УЗ импульсов;

электронная схема переключения проводников жгута ВКИ сложная и громоздкая;

из-за конструктивных особенностей проводники жгута ВКИ имеют разную длину, что приводит к неполному соответствию частот возбуждаемых и принимаемых УЗ импульсов;

различная длина проводников жгута ВКИ приводит к разным величинам токов, проходящих в каждом из проводников. Следовательно, повышается вероятность выхода из строя диодных ключей и всего устройства.

Для устранения отмеченных недостатков авторы предложили для базового ЭМАП изменить конструкцию плоской высокочастотной катушки, схему ее подключения и новую электронную схему управления, которую следует выполнить следующим образом (рис. 3): a — вход схемы для подачи высокочастотных пакетов импульсов тока от генератора зондирующих импульсов (ГЗИ); $\mathcal{I}_1, \mathcal{I}_2, \mathcal{I}_3$ — диодные ключи; C_1, C_2 — конденсаторы; R — резистор; L — жгут параллельно включенных изолированных проводников ВКИ одинаковой длины, 6 витков (рис. 4); Тр — высокочастотный согласующий трансформатор; b — выход ЭМАП.



Рис. 3. Электронная схема ЭМАП.



Рис. 4. Высокочастотная катушка индуктивности ЭМАП в диэлектрической оправке.

Работает новая электронная схема следующим образом. На вход *а* подается пакетный высоковольтный высокочастотный импульс питания. Диодные ключи $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2$ и \mathcal{A}_3 открываются. Образуется резонансный контур из *L*, C_1 и C_2 , а также выходных параметров ГЗИ. В *L* образуется мощный высокочастотный ток силой в сотни ампер, необходимый для возбуждения УЗ импульсов. После выключения высоковольтного импульса питания закрываются диодные ключи $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2$ и \mathcal{A}_3 . В результате образуется контур: выход ГЗИ—*R*—*C*₂, что позволяет рассеять существенную часть энергии, накопленную в выходных каскадах ГЗИ, исключая ее влияние на принимаемые донные сигналы. В результате уменьшается длительность «звона» после выключения импульса питания плоской высокочастотной катушки ЭМАП (рис. 5).



Рис. 5. Амплитуды напряжения на катушке индуктивности ЭМАП: *а* — использована базовая электронная схема; *б* — использована новая электронная схема.

Второй образованный отдельный контур, состоящий из $L - C_1$ и входных параметров усилителя, является приемным. Наведенная в L от принимаемых донных УЗ импульсов ЭДС через согласующий трансформатор Тр с выхода b подается на вход усилителя. Выполнение высокочастотной катушки индуктивности жгутом изолированных проводников одинаковой длины с малым количеством витков (см. рис. 4), включенных параллельно, дает возможность дополнительно уменьшить интенсивность наводок от электромагнитных помех. Перераспределение емкостей C_1 и C_2 позволяет точно установить частоты сигналов как при возбуждении УЗ импульсов, так и при приеме, что повышает чувствительность ЭМАП в отношении к амплитудам донных сигналов.

Исследование новой электронной схемы ЭМАП показали, что длительность зондирующих импульсов напряжения на катушке индуктивности преобразователя, в сравнении с базовым, уменьшилась не менее, чем на 30 %, что подтверждается данными, приведенными на рис. 5. При измерениях зазор между преобразователем и образцом из стали ст. 45 толщиной 36,6 мм составлял 14,8 мм, максимальное напряжение на катушке индуктивности — более 1,2 кВ, длительность пакетного импульса 4 периода частоты заполнения равна $2,2\pm0,1$ МГц. Аналогичные результаты получены для зазоров до 20 мм. Известно, что основным показателем для обеспечения проведения толщинометрии является наличие амплитуды донных импульсов по отношению к помехам величиной не менее 3/1 (без применения средств обработки принятой информации) при зазорах до 20 мм. На рис. 6 приведены развертки на экране дефектоскопа для диэлектрических прокладок толщиной 14,8 мм (*a*) и 20,1 мм (δ). Зачистка поверхности ввода/приема ультразвуковых пакетных импульсов от окалины и ржавчины не проводилась. Анализ данных, приведенных на рис. 6, показывает, что полученные амплитуды донных импульсов достаточны для проведения толщинометрии ферромагнитных стальных изделий даже при зазоре около 20 мм.

Для выполнения исследований возможности применения разработанного ЭМАП с зазором до 20 мм (толщиной диэлектрического покрытия) был разработан лабораторный стенд, блок-схема которого приведена на рис. 7.

Стенд содержит управляющий блок 1, соединенный с двухтактным усилителем 2 мощности пакетного высокочастотного зондирующего импульса тока и измерителем 3, в качестве которого



Рис. 6. Временные развертки на экране серийного дефектоскопа УД2-12 с донными импульсами, начиная с первого, при зазоре между протектором (1 мм) ЭМАП и поверхностью металла: 14,8 мм, индукция магнитного поля 0,26 Тл (*a*) и 20,1 мм, индукция магнитного поля 0,21 Тл (*б*).



Рис. 7. Стенд для исследований возможностей ЭМАП, предназначенного для проведения ультразвуковой толщинометрии изделий со значительным диэлектрическим промежутком между протектором преобразователя и поверхностью металла.

применен серийный ультразвуковой дефектоскоп УД2-12. Усилитель 2 соединен с прямым совмещенным ЭМАП 4, который также соединен с полосовым усилителем 5 принятого ультразвукового сигнала. Усилитель 5 соединен со стандартным дефектоскопом 3, который предназначен для измерения амплитуд принятых импульсов с помощью аттенюатора и измерения толщины контролируемого участка изделия 6 соответственно. Изображение разработанного ЭМАП показано на рис. 8.

Работает стенд следующим образом. Управляющий блок 1 формирует исходные сигналы в виде двух меандров, сдвинутых по фазе на 180 град, которые поступают на усилитель 2 мощности пакетного высокочастотного зондирующего импульса тока. Они складываются, усиливаются и подаются на ЭМАП 4. Одновременно управляющий блок 1 вырабатывает синхронизирующий импульс для дефектоскопа 3. ЭМАП 4 совместно с образцом 6 возбуждают в поверхностном слое металла сдвиговые ультразвуковые пакетные импульсы 7, которые распространяются в объем образца 6 под углом 0 град. Сдвиговые волны обладают примерно вдвое меньшей скоростью распространения, что, при прочих равных условиях, позволяет проводить толщинометрию изделий с примерно



Рис. 8. Изображение разработанного портативного накладного прямого совмещенного электромагнитно-акустического преобразователя для измерений толщины ферромагнитных изделий через диэлектрические прослойки толщиной до 20 мм.

вдвое меньшей толщиной. Отраженные от противоположной стороны образца 6 ультразвуковые (донные) импульсы 7 принимаются ЭМАП 4 (рис. 8), усиливаются блоком 5 и визуализируются дефектоскопом 3.

Управляющий блок 1 позволяет регулировать частоту заполнения пакета зондирующего импульса в диапазоне 0,2 ... 5 МГц, длительность зондирующего пакета в диапазоне 1 ... 10 периодов частоты заполнения, а также, при необходимости, вырабатывать импульсы управления на другие устройства. Двухтактный усилитель 2 мощности пакетного высокочастотного зондирующего импульса тока описан в статье [21], с практически плоской амплитудно-частотной характеристикой в диапазоне 0,8 ... 4,5 МГц. Рабочая частота ЭМАП 4 устанавливается с помощью конденсаторов C_1 и C_2 (см. рис. 3). Усилитель 2 мощности пакетного высокочастотного зондирующего импульса позволяет развивать в катушке индуктивности ЭМАП 4 пиковый ток более 600 А при пиковых напряжениях до 1,4 кВ в зависимости от толщины диэлектрического промежутка и свойств материала поверхностного слоя изделия.

Амплитудно-частотная характеристика приемного усилителя по уровню 0,7 охватывает интервал 0,5— 6,5 МГц.

На первом этапе выполнены исследования рабочих параметров разработанного ЭМАП, при которых может быть обеспечена возможность толщинометрии ферромагнитных изделий. Для этого с помощью стенда были исследованы бездефектные листовые образцы из катаной стали 09Г2С и стали ст. 45 различной толщины без зачистки их поверхности от окалины и ржавчины по следующей методике. На образец 6 (см. рис. 7), размещали ЭМАП 4 с зазором 1,3 мм (обеспечивается возможность измерения индукции магнитного поля датчиком Холла) и по экрану дефектоскопа, изменяя частоту заполнения пакетного импульса с помощью управляющего блока *1*, находили максимальное значение амплитуд донных сигналов. Измеряли полученные значения индукции магнитного поля в зазоре, напряжения на ЕМАП, пикового значения высокочастотного тока в ВКИ преобразователя, а также амплитуду первого донного импульса. Затем между протектором 8 ЭМАП 4 размещали пластины 9 из стеклотекстолита разной толщины и повторяли измерения. Исследования выполнены при длительности зондирующих импульсов с заполнением пакета равным 7 периодам частоты заполнения сигнала.

Данные полученных измерений параметров, определяющих технологию УЗ контроля, при различных толщинах диэлектрических прокладок 9 между протектором 8 преобразователя 4 приведены в табл. 1.

Таблица 1

N⁰	Диэлектрическая прокладка толщиной, мм	Пиковый высокочастотный ток в катушке ЭМАП, А	Пиковое напряжение на ЭМАП, кВ	Индукция магнитного поля, Тл	Амплитуда первого донного импульса относительно шума, дБ
1	1,3±0,05	450±20	0,52±0,02	0,60±0,05	>42 (ограничение сигнала)
2	5,0±0,05	540±50	0,80±0,04	0,47±0,05	38±1
3	9,9±0,05	630±50	0,93±0,05	0,35±0,05	32±1
4	14,8±0,05	635±50	1,2±0,05	0,26±0,05	22±1
5	20,1±0,05	637±50	1,4±0,05	0,21±0,05	12±2

Результаты измерений определяющих параметров при исследованиях образцов из ферромагнтной стали ст. 45 толщиной 36,6 мм при различных толщинах диэлектрических прокладок

Анализ данных, приведенных в табл. 1 для разработанного ЭМА преобразователя, позволяет сделать следующие выводы.

В диапазоне зазоров между ЭМАП и поверхностью изделия, практически до 20 мм, амплитуда первого донного импульса по отношению к амплитуде шума достигает 12 дБ, что является достаточным [1] для проведения толщинометрии или дефектоскопии зеркально-теневым методом.

Установлено, что при увеличении зазора между ЭМАП и металлом увеличивается сила импульсного высокочастотного пикового тока в плоской высокочастотной катушке индуктивности и пиковое напряжение на преобразователе до 637 A и 1,4 кВ соответственно. Этот эффект обусловлен увеличением добротности ЭМАП, что подтверждается данными, приведенными на рис. 9. Следует отметить, что амплитудно-частотная характеристика преобразователя при зазоре 20,1 мм практически совпадает с амплитудно-частотными характеристиками для зазоров 10 мм и более. При этом индукция постоянного поляризующего поля уменьшается более чем в 2 раза примерно до 0,2 Тл, что, тем не менее, дает возможность проводить УЗ контроль (см. рис. 6).



Рис. 9. Экспериментальные приведенные амплитудно-частотные характеристики разработанного ЭМАП при зазорах 0,2 и 10 мм; f_{pe3} — резонансная частота.

Для проверки возможностей ультразвукового контроля ферромагнитных изделий различной толщины разработанным ЭМАП выполнены измерения толщины листовых образцов с помощью глубиномера дефектоскопа в составе стенда (см. рис. 7) путем усреднения десятикратных измерений. При исследованиях использована частота ультразвуковых сдвиговых колебания 2,2±0,1 МГц,

длительность пакетных импульсов — 7 периодов частоты заполнения зондирующего сигнала. Частота следования зондирующих импульсов — 100 Гц. Зачистка поверхности от ржавчины и окалины не производилась. Измеренные значения толщин образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений толщины листовых образцов из стали 09Г2С с использованием амплитуды первого донного импульса

№ пп	Толщина образца, мм	Измеренная, с применением разработанного ЭМАП, толщина образца при диэлектрических прокладках толщиной, мм					
		5,0	9,9	14,8	20,1		
1	8,8	8,8±0,1	8,8±0,2	Первый донный импульс перекрыт «звоном»	Первый донный импульс перекрыт «звоном»		
2	12,2	12,4±0,2	12,3±0,2	12,4±0,3	Первый донный импульс перекрыт «звоном»		
3	15,0	15,1±0,2	15,2±0,2	15,4±0,4	15,4±0,6		
4	20,4	20,4±0,1	20,5±0,2	20,4±0,2	20,6±0,4		
5	36,6	36,8±0,2	36,9±0,3	36,9±0,4	36,9±0,5		

Данные табл. 2 показывают, что разработанный ЭМАП позволяет проводить контроль изделий толщинами 15 мм и более с зазорами или диэлектрическими промежутками (отложениями) между преобразователем и поверхностью контролируемого участка металла величиной до 20 мм.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что при увеличении зазора до 15 ... 20 мм между ЭМАП и металлом и толщинах образцов 12 мм и менее первый донный импульс перекрывается «звоном». А учитывая целесообразность контроля методом ЭМА в первую очередь коррозионных повреждений, очевидно, что второго и последующих донных импульсов с достаточной амплитудой может и не быть. Следовательно, для обеспечения толщинометрии образцов толщиной менее 12 мм необходимы дальнейшие шаги по уменьшению длительности «звона» для создания условий УЗ толщинометрии с зазорами 15 ... 20 мм и более при величине амплитуды первого донного импульса, достаточного для проведения контроля.

Измеренные и приведенные в табл. 2 данные толщин образцов практически во всех случаях является завышенными на 1 ... 3,5 %, что является приемлемым, т.к. недопустимое утонение объектов, как правило, превышает 5 % и более от толщины изделия [29]. Дополнительными исследованиями было установлено, что эти завышенные значения толщины обусловлены наличием на поверхности возбуждения/приема ультразвуковых импульсов локальных участков окалины, скрепленной с поверхностью.

выводы

1. Разработан новый портативный накладной прямой совмещенный электромагнитно-акустический преобразователь для ультразвукового контроля ферромагнитных изделий, который позволяет проводить тощинометрию при воздушных зазорах или диэлектрических покрытиях и осаждениях толщиной до 20 мм.

2. Разработано схемотехническое решение по созданию электронной схемы электромагнитноакустического преобразователя при возбуждении ультразвуковых импульсов, которое обеспечивает при зазорах 10 ... 20 мм толщинометрию более тонких изделий по параметрам первого или последующих донных сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ермолов И.Н., Ланге Ю.В.* Неразрушающий контроль / Справочник. В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. М.: Изд-во Машиностроение, 2004. 864 с.

2. Судакова К.В., Казюкевич И.Л. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции // В мире неразрушающего контроля. 2004. № 3. С. 8—10.

3. Семеренко А.В. Применение ЭМАП для контроля коррозии и эрозии паронагревателей котельных установок // Территория NDT. 2014. № 1. С. 42—43.

4. *Petrov K.V., Murav'eva O.V., Myshkin Y.V.* Modeling Magnetic, Electric, and Acoustic Fields of a Pass-Through Transducer When Testing Cylindrical Objects // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. P. 102—110/. https://doi.org/10.1134/S1061830919020062

5. Плеснецов С.Ю. Розвиток методів та засобів для електромагнітно-акустичного контролю стрижневих, трубчастих та листових металовиробів / Автореф. дис. д.т.н. Харків, 2021. Вид. ФОП Єфименко С.А. 40 с.

6. Плеснецов С.Ю., Сучкова Г.М., Корж Д.И., Суворова М.Д. Новые теоретические исследования и разработки в области электромагнитно — акустического преобразования (Обзор) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2018. № 2. С. 24—31.

7. Сучков Г. М., Плеснецов С. Ю., Мещеряков С. Ю., Юданова Н. Н. Новые разработки электромагнитно-акустических преобразователей (обзор) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2018. № 3. С. 27—34.

8. *Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю*. Чувствительность контроля электромагнитно-акустическими преобразователями (Обзор, ч. 1) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2018. № 4. С. 45—50.

9. Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Плеснецов С.Ю. О чувствительности ультразвукового контроля поверхностными волнами, возбуждаемыми и принимаемыми электромагнитно-акустическими преобразователями (Обзор, ч. 2) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2019. № 1. С. 47—52.

10. Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Плеснецов С.Ю. Чувствительность ультразвукового контроля ЭМА способом при выявлении естественных внутренних дефектов металлоизделий. Возможности ЭМА толщинометрии. (Обзор, ч. 3) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2019. № 2. С. 51—57.

11. Willems H. Расширенные возможности для проверки коррозии газопроводов с использованием технологии EMAT [электронный pecypc] / H. Willems, B. Jaskolla, T. Sickinger, A. A. Barbian, F. Niese / 10-я Европейская конференция по неразрушающему контролю. 2010. Москва. Режим доступа: http:// www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1 11 16.pdf

12. Сайт компании АКС [электронный ресурс]. Режим доступа: https://acsys.ru/ (Дата обращения: 19.09.2021).

13. Тарабрин В.Ф., Бобров В.Т., Одынец С.А., Бабушкин И.А., Кулешов Р.В., Соловьёв В.Н. Однониточный ЭМА дефектоскоп для контроля рельсов // Матеріали 4-ї Національної науково-технічної конференції і виставки «Неруйнівний контроль та технічна діагностика — 2003. Київ. 19—23 травня 2003. С. 318—320.

14. Сайт компании OKO ndt GROUP [электронный pecypc]. Режим доступа: https://www.ndt.com.ua/ ru/products/ema/emacon-01/ (Дата обращения: 19.09.2021).

15. Сайт компании ООО «ЗАПАДПРИБОР» [электронный ресурс]. Режим доступа https://zapadpribor. com/emacon-01/ (Дата обращения: 13.01.2022).

16. Сайт канадской фирмы Innerspec [электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.innerspec. com/portable/emat-sensors (Дата обращения: 19.09.2021).

17. Сайт компании Nordinkraft [электорнный ресурс]. Режим доступа: www.nordinkraft.de. (Дата обращения: 23.08.2019).

18. Сайт предприятия OKTANTA-NDT [электорнный ресурс]. Режим доступа: https://oktanta-ndt.ru/ ru/home/ (Дата обращения: 20.09.2021).

19. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Радев Х.К., Петрищев О.Н., Десятниченко А.В. Электромагнитно-акустический преобразователь для ультразвуковой толщинометрии ферромагнитных металлоизделий без удаления диэлектрического покрытия // Технічна електродинаміка. 2016. № 2. С. 78—82.

20. *He Jianpeng, Dixon Steve, Hill Samuel, Xu Ke.* A New Electromagnetic Acoustic Transducer Design for Generating and Receiving S0 Lamb Waves in Ferromagnetic Steel Plate // Sensors. 2017. V. 17 (5). P. 1023. https://doi.org/10.3390/s17051023

21. Suchkov G. M., Mygushchenko R.P., Plesnetsov S. Yu. Powerful Sources for High Frequency Electromagnetic Transducers for Measurement, Monitoring and Diagnostics // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. V. 53. No. 12. P. 850—855.

22. Gobov Yu.L., Mikhailov A.V., Smorodinskii Ya.G. Magnetostriction Electromagnetic–Acoustic Excitation of Ultrasonic Waves without a Bias Field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. V. 52. P. 697–702.

23. Mikhailov A.V., Gobov Yu.L., Smorodinskii Ya.G., Shcherbinin S.V. An Electromagnetic–Acoustic Transducer with Pulsed Biasing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. V. 51. P. 467–475.

24. Aleshin N. P., Gobov Yu.L., Mikhailov A.V. Automatic ultrasonic inspection of large-diameter pipes // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. P. 133—140.

25. *Gobov Y.L., Mikhailov A.V., Smorodinskii Y.G.* A magnetizing system for an EMA scanner-flaw detector // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. P. 659—666.

26. Чабанов В.Е., Жуков В.А. Расчет и проектирование электромагнитно-акустических преобразователей для ультразвукового неразрушающего контроля. Приборы и техника физического эксперимента // Научно-технические ведомости С.-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2014. № 3. С. 57—73.

27. *Tolipov K.B.* Possibilities for Increasing the Efficiency of Contactless Emitters of Acoustic Waves // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. V. 53. P. 304—307. https://doi.org/10.1134/S106183091704009X

28. Буденков Г.А., Недзвецкая О.В. Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики. М.: Издательство физико-математической литературы, 2004. 136 с.

29. РД 24.200.13-90. Трубы стальные бесшовные. Методика входного ультразвукового контроля сплошности. Дата введения 01.07.1991 г.

Дефектоскопия № 5 2022