

УДК 620.179.142.5

Д.А. Шаранова¹, e-mail: sharanova.dasha@mail.ru

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» (Санкт-Петербург, Россия).

Бесконтактные методы выявления питтинговых дефектов стенок металлических изделий

Большинство металлов имеют склонность к коррозии, поэтому важной задачей является контроль надежности оборудования, которое в результате коррозии может разрушаться с катастрофическими последствиями. Для предотвращения последствий коррозионных процессов необходим регулярный контроль остаточной толщины Т стенок объектов. В статье рассмотрены вопросы проведения контроля толщины металлических изделий без контакта преобразователя с металлом стенок трубопроводов и нефтехранилищ с помощью основных бесконтактных методов выявления питтинговых дефектов, а именно: электромагнитно-акустического (ЭМА), метода рассеяния (вытеснения) магнитного потока Magnetic Flux Leakage и вихретокового метода измерения полей переменного тока Alternating Current Field Measurement (ACFM). Описаны особенности применения оборудования, разработанного на их базе, а также реализуемые методики контроля. Приведены также основные сравнительные технические характеристики. Рассмотрены мешающие параметры, преимущества и недостатки данных методов. Исходя из рассмотренных технических характеристик методов MFL, ACFM и ЭМА приведена таблица, на основании которой в зависимости от особенностей применения можно выбрать оптимальный метод и подобрать конкретное оборудование.

Ключевые слова: питтинговая коррозия, электромагнитно-акустический (ЭМА) метод, метод рассеяния магнитного потока, метод измерения полей переменного тока.

.....

D.A. Sharanova¹, e-mail: sharanova.dasha@mail.ru

¹ Saint Petersburg Mining University (Saint Petersburg, Russia).

Non-contact methods for detecting pitting defects of metal products wall

Most metals have a tendency to rust therefore an important task is to control the reliability of the equipment as it can be destroyed with catastrophic consequences due to corrosion. To prevent the effects of corrosion processes regular monitoring of the residual thickness T of the walls of objects is required.

In the article the questions of control of thickness of metal products without contact of the transducer with the metal walls of pipelines and storage tanks using the main non-contact methods for the detection of pitting defects, namely electromagnetic-acoustic (EMA), a method of scattering (displacement) magnetic flux Magnetic Flux Leakage and eddy current method of measurement of fields of alternating current Alternating Current Field Measurement (ACFM) are considered. The features of the application developed on their basis as well as implemented methods of control are described. The main comparative specifications are given. Nuisance parameters of advantages and disadvantages of these methods are analyzed. Based on the review of the technical performance of MFL methods, ACFM and EMA, a table is presented on the basis of which, depending on the features of the application, you can choose the best method and choose the specific equipment.

Keywords: pitting corrosion, electromagnetic-acoustic method, MFL, ACFM.

Почти все металлоконструкции эксплуатируются в естественных природных средах. Магистральные и промышленные трубопроводы, водоводы работают в сложных условиях, что приводит к утонению стенок из-за образования

зон питтинговой коррозии. Эксплуатируемые металлические мосты также подвергаются питтинговой коррозии, степень которой зависит главным образом от способов защиты и текущего содержания сооружений.

Коррозионные повреждения, уменьшая площадь сечения элементов, снижают их нагрузочную способность и могут явиться причиной аварий. Скорость развития коррозии зависит от химического состава металла, его

обработки и защиты, разновидности агрессивной среды, влажности, температуры, напряженного состояния и др. Главным фактором возникновения и развития коррозии является увлажнение поверхности металла.

Для предотвращения последствий коррозионных процессов необходим регулярный контроль остаточной толщины Т стенок объектов. Для выявления питтинговых повреждений преимущественно применяют методы неразрушающего контроля.

Одним из основных для измерения Т является ультразвуковой вид неразрушающего контроля (УЗК). Однако у УЗ-контроля есть свои недостатки. Использование пьезоэлектрических преобразователей требует подготовки поверхности для ввода ультразвука в металл (снятия покрытия) и обеспечения шероховатости поверхности не ниже пятого класса. Для обеспечения акустического контакта на контролируемый участок изделия предварительно наносят контактные жидкости, такие как вода, масло, клейстер. При контроле вертикальных или сильно наклоненных поверхностей необходимо применять густые контактные жидкости с целью предотвращения их быстрого стекания. Для контроля изделий с внешним диаметром менее 200 мм необходимо использовать притертые преобразователи, которые в таком виде непригодны для контроля изделий с плоскими поверхностями.

Как правило, ультразвуковая толщинометрия не может дать ответ на вопрос о реальных размерах дефекта, лишь о его отражательной способности в направлении приемника. Эти величины коррелируют, но не для всех типов дефектов. Кроме того, некоторые дефекты практически невозможно выявить с использованием ультразвуковых методов в силу их характера, формы или расположения в объекте контроля.

Практически невозможно производить достоверный ультразвуковой контроль металлов с крупнозернистой структу-

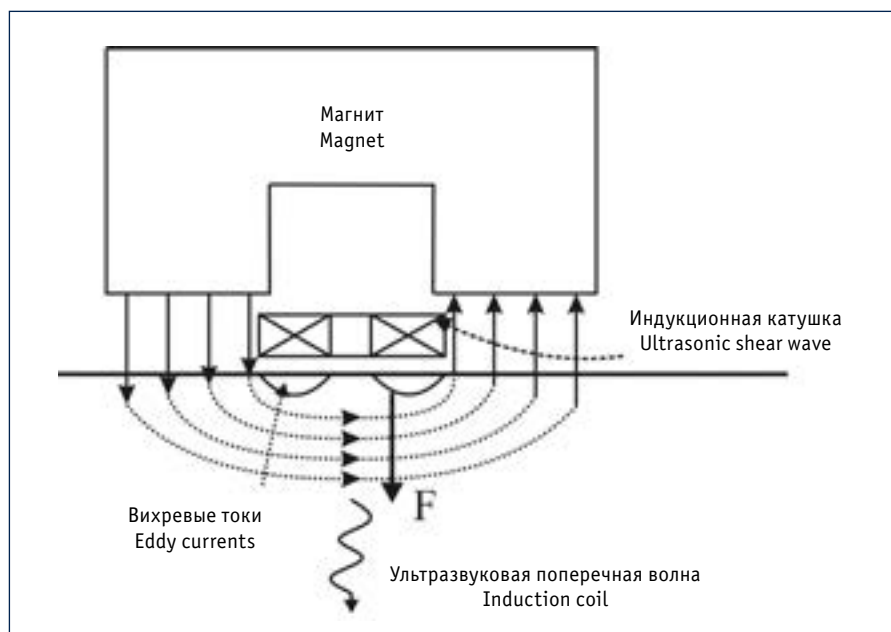


Рис. 1. Схема ЭМА-преобразователя для поперечных волн

Fig. 1. EMA transducer diagram for shear waves

рой из-за большого рассеяния и сильного затухания ультразвука.

Рассмотрим возможность проведения контроля стенок металлических изделий без контакта преобразователя с металлом стенки изделия, особенности их применения и основные сравнительные технические характеристики.

Бесконтактное выявление питтинговой коррозии и мест утонения стенки могут обеспечивать электромагнитно-акустический (ЭМА) метод, метод рассеяния (вытеснения) магнитного потока Magnetic Flux Leakage и вихревой метод измерения полей переменного тока Alternating Current Field Measurement (ACFM). Рассмотрим достоинства и недостатки этих методов применительно к рассматриваемой задаче, условиям применения и достоверности получаемой информации.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИЙ (ЭМА) МЕТОД

Действие электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМА) основано на электродинамическом и магнитоупругом взаимодействиях. Импульсные

акустические колебания возбуждаются и принимаются бесконтактным способом. За счет магнитоупругого взаимодействия происходит взаимное притяжение и отталкивание ферромагнитного материала и индукционной катушки, в которой генерируется мощный импульс тока. Электродинамическое взаимодействие возникает в токопроводящих материалах. Переменное магнитное поле возбуждает в металлической стенке объекта контроля (ОК) вихревые токи. На элемент объема ОК, в котором течет вихревой ток, действует ponderomotorная сила F , направление которой показано стрелками на рис. 1. Под действием переменной силы F элемент объема совершает колебания. В результате по нормали к поверхности распространяется ультразвуковая поперечная волна, упругие смещения которой лежат в плоскости, параллельной поверхности. Пондеромоторная сила пропорциональна произведению силы переменного тока J и магнитной индукции B . Поэтому и амплитуда упругих смещений также пропорциональна произведению JB [1].

Ссылка для цитирования (for citation):

Шаранова Д.А. Бесконтактные методы выявления питтинговых дефектов стенок металлических изделий // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2016. № № 10. С. 34–40.

Sharanova D.A. Non-contact methods for detecting pitting defects of metal products wall (In Russ.). Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory, 2016, No. 7–8, 10, P. 34–40.

Таблица 1. Сравнительные характеристики ЭМА-, MFL- и ACFM-методов диагностики

Table 1. Comparative characteristics of EMA-, MFL- and ACFM-methods of diagnostics

Основные характеристики метода Main characteristics of the method	Электромагнитно-акустический (ЭМА) метод Electromagnetic-acoustic (EMA) method	Метод рассеяния (вытеснения) магнитного потока (MFL) Magnetic flux leakage (expulsion) (MFL)	Метод измерения полей переменного тока (ACFM) Method of AC fields measurement (AC FM)
Объекты контроля Test objects	Металлические изделия и полуфабрикаты стальных труб, листового проката и других изделий из стали, а также алюминия и других металлов Metal products and semi-finished steel pipes, sheet metal and other products made of steel, as well as aluminum and other metals	Металлические ферромагнитные изделия, полуфабрикаты и сварные соединения Ferromagnetic metal products, semi-finished products and welded joints	Трубы диаметром ≥ 4 мм и толщиной ≥ 1 мм Pipes with diameter ≥ 4 mm and thickness of ≥ 1 mm
Типы обнаруживаемых дефектов Types of detected defects	Поверхностные и подповерхностные питтинговые и плоскостные коррозионные повреждения, трещины, волосовины, заковы, закаты, включения, флокены Surface and sub-surface pitting and planar corrosion damages, cracks, fine cracks, forging folds, backfins, inclusions, flakes	Поверхностные и подповерхностные (на глубине до 2–3 мм) питтинговые или плоскостные коррозионные повреждения стенок изделий, продольные или поперечные разрывы или трещины, дефекты продольных сварных швов Surface and sub-surface (at a depth of 2–3 mm) pitting or corrosion planar damages of products walls, longitudinal or transverse fractures or cracks, defects of longitudinal welds	Метод ACFM позволяет обнаружить поверхностные и подповерхностные дефекты ACFM method allows detection of surface and subsurface defects
Диапазон измерения Measurement range	Диапазон измеряемых толщин: для стали – 1–60 мм; для алюминия – 0,7–100 мм Thickness measurement range: Steel – 1–60 mm; aluminum – 0,7–100 mm	Диапазон толщины до 20 мм. Максимальная толщина покрытия – 6 мм Thickness range up to 20 mm. Maximum coating thickness – 6 mm	Поверхностные и подповерхностные дефекты Surface and subsurface defects
Зазор Clearance	До 4 мм Up to 4 mm	10 мм 10 mm	–

Основные преимущества ЭМА-технологии возбуждения и приема ультразвуковых колебаний при измерении остаточной толщины стенок изделий:

- нет необходимости использования контактной жидкости, как в классических пьезоэлектрических преобразователях;
- возможность проведения измерения сквозь неметаллические покрытия толщиной до 4 мм;
- обеспечение надежного и достоверного контроля объектов с загрязненной поверхностью;
- контроль объектов при большой скорости перемещения преобразователя;
- обеспечение контроля объектов экстремальной кривизны;
- контроль объектов в условиях, имеющих низкую и экстремально низкую температуру без каких-либо ограничений. К недостаткам метода следует отнести: сравнительно низкую чувствительность и помехозащищенность; относительную сложность оборудования.

ЭМА-метод существенно расширяет возможности ультразвукового контроля при высоких и низких температурах, шероховатой и загрязненной поверхности объектов, а также в случаях, когда контактные жидкости применять недопустимо [2]. При этом возможен сплошной сканирующий контроль с построением В-сканов поверхности (рис. 2).

МЕТОД РАССЕЯНИЯ (ВЫТЕСНЕНИЯ) МАГНИТНОГО ПОТОКА MAGNETIC FLUX LEAKAGE

Magnetic Flux Leakage (MFL) Technology – технология магнитного вида неразрушающего контроля, использующая, в соответствии с ГОСТ 24450-80, метод эффекта Холла для анализа магнитного поля рассеяния дефекта. Физический принцип метода заключается в следующем: намагничивающая система, состоящая из магнитов и магнитопровода, создает магнитный поток в объекте контроля (основной поток), при этом величина магнитной

индукции такова, что расположенный в области намагничивающей системы материал объекта контроля находится в состоянии, близком к магнитному насыщению [3].

В результате локального изменения сечения материала появляется дополнительный поток рассеяния над поверхностью объекта контроля, который регистрируется интегральным преобра-

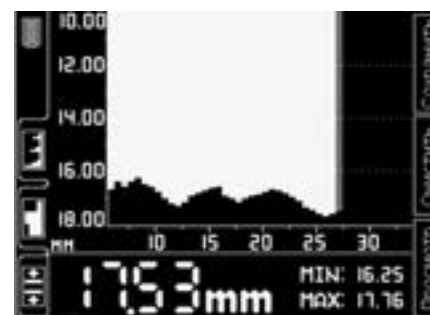


Рис. 2. В-скан контролируемой поверхности стенки ОК

Fig. 2. B-scan of controlled wall surface of tested object

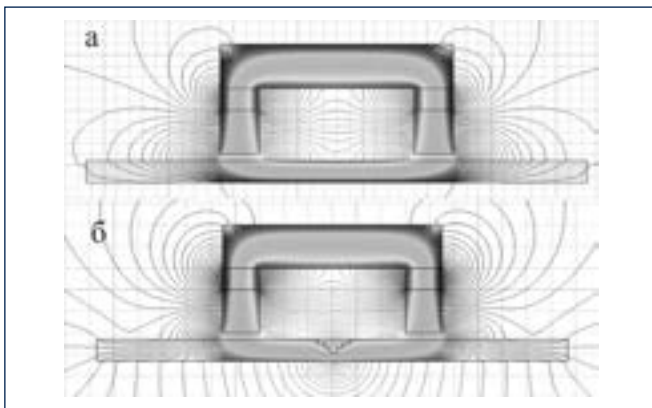


Рис. 3. Расчетная картина силовых линий магнитного поля на бездефектном участке стального листа (а) и линий магнитного поля рассеяния в районе искусственного дефекта (б)
Fig. 3. The estimated pattern of magnetic field lines on the defect-free area of the steel sheet (a) and the magnetic stray field lines in the area of artificial defect (b)

зователем, расположенным симметрично между полюсами магнитной системы, при сканировании поверхности стенки ОК [4] (рис. 3).

Основные преимущества этого метода заключаются в том, что он позволяет обнаруживать питтинговые повреждения материала с лицевой стороны под покрытием или с внешней стороны стенки изделия (трубы, листа или сечению каната) при наличии достаточного зазора между преобразователем и ОК (до нескольких мм) и обеспечивает высокую производительность контроля. Еще одним важным преимуществом является возможность оценки глубины и размеров обнаруженных дефектов [4]. При этом существенно, что процесс обнаружения дефектов и оценки их параметров по результатам обработки данных, полученных в ходе измерения, хорошо поддается автоматизации (рис. 4).

При использовании данного метода следует учитывать, что сканирование имеет три этапа: ускорение, движение с постоянной скоростью и торможение. При расположении твердотельного чувствительного элемента перпендикулярно поверхности объекта контроля (анализе тангенциальной составляющей H_x напряженности потока рассеяния) магнитное поле вихревых токов не влияет на результаты контроля. При расположении твердотельного чувствительного элемента парал-

лельно поверхности объекта контроля (анализе нормальной составляющей H_z напряженности потока рассеяния) магнитное поле вихревых токов влияет на результаты контроля и может вызвать погрешность измерения.

Изменение μ_{ct} при сканировании будет приводить к плавному изменению H_x и H_z . Для подавления влияния $H_x(\mu_{ct})$ и $H_z(\mu_{ct})$ следует применять цифровой фильтр низких частот. Применение дифференциального включения преобразователей Холла обеспечивает эффект подавления рассматриваемых мешающих параметров [5].

Также мешающими параметрами при контроле с использованием технологии MFL являются шероховатость, волнистость (локальная неровность, сопоставимая с базой колес) и их вариация по поверхности объекта контроля.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ALTERNATING CURRENT FIELD MEASUREMENT (ACFM)

Метод ACFM позволяет с высокой степенью достоверности выявлять и контролировать параметры плоскостных дефектов в поверхностном и подповерхностном слоях металла стенок ОК. Протяженная обмотка W_b с переменным током возбуждает непосредственно под собой в электропроводящем полупространстве однородное электромагнитное поле, где в соответствии с принципом зеркального отображения вихревой ток будет практически линейен (рис. 5а). При нахождении обмотки над линейным дефектом (например, ручейкового коррозионного повреждения), направление которого совпадает с осью обмотки, произойдет искажение карти-

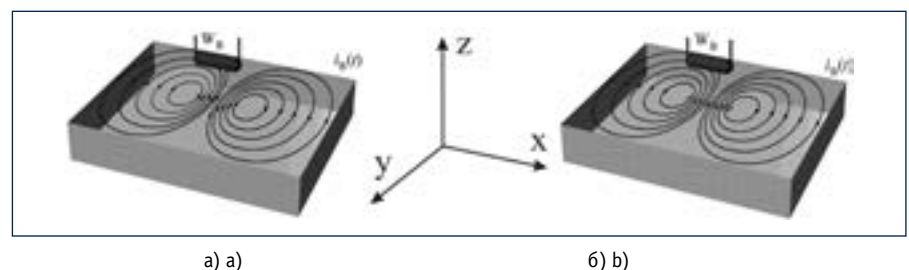


Рис. 5. Симметричная картина вихревых токов, возбуждаемых протяженной обмоткой в бездефектном объекте контроля (а), и ее искажение в районе линейного дефекта, направление которого совпадает с осью обмотки (б)
Fig. 5. Symmetrical pattern of eddy currents induced in the winding extended in defect-free test object (a), and its linear distortion in the vicinity of the linear defect, the direction of which coincides with the axis of the coil (b)

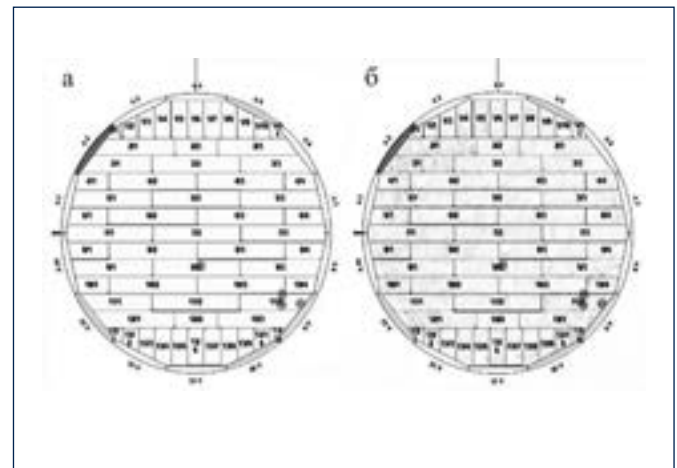


Рис. 4. Чертеж пола нефтехранилища (а) и его дефектограмма (б) с координатной привязкой
Fig. 4. Drawing of the storage tanks floor (a) and its defectogram (b) gridded

Таблица 2. Электромагнитно-акустический (ЭМА) метод

Table 2. Electromagnetic-acoustic (EMA) method

Технические характеристики Specifications	Электромагнитно-акустический толщиномер A1270 Electromagnetic-acoustic thickness gage A1270	Толщиномер EM1301 Thickness gage EM1301	мини-ЭМА-толщиномер EM2210 Mini-EMA-thickness gage EM2210	Портативный ЭМА-толщиномер NKD-019E UltraSonic Portable EMA-thickness gage NKD-019E UltraSonic
Функциональные возможности Functionality	<ul style="list-style-type: none"> • Проведение измерений без предварительной подготовки поверхности и без контактной жидкости Measurements without prior surface preparation and without contact liquid • Измерение толщины металлических изделий через коррозионное и лакокрасочное покрытие толщиной до 1,5 мм Measurement of metal products thickness through corrosion and paint coating up to 1.5 mm thick • Малая апертура ЭМА-преобразователя (8 мм) позволяет проводить контроль труб малого диаметра (от 15 мм) Low aperture of EMA-converter (8 mm) allows for small-diameter tubes (15 mm) testing 	<ul style="list-style-type: none"> • Возможность работы со стробами Ability to work with strobes • Толщиномер имеет высокое соотношение сигнал/шум, благодаря чему повышена надежность работы при больших зазорах Thickness gage has a high signal/noise ratio, allowing greater reliability of operation with large clearances 	<ul style="list-style-type: none"> • Подключение планшета, смартфона или другого устройства Tablet, smartphone or other device connection • На показания прибора слабо влияет перекоп Misalignment has little effect on the readings 	<ul style="list-style-type: none"> • Измерение параметров объектов экстремально высокой и очень низкой температурой поверхности Measurement of objects parameters with extremely high and very low surface temperature • Измерения можно проводить через изоляционные покрытия Rough surface does not create obstacles to the correct measurements • Шероховатая поверхность не создает препятствий для корректных измерений Measurements can be carried out through the insulation coating
Диапазон измеряемых толщин, мм Thickness measurement range, mm	0,5–50	Для стали 1–60 For steel 1–60	Для стали 2–60 For steel 2–60	1,5–100
Диапазон частот преобразователя, МГц Transducer frequency range, MHz	2,5–5,0	3–5	3–5	4
Погрешность измерения остаточной толщины Accuracy of residual thickness measurement	$\pm(0,5\% + 0,01/0,1)$	$\pm 0,04$ мм $\pm 0,04$ mm	$\pm 0,04$ мм $\pm 0,04$ mm	$\pm 0,01$ мм $\pm 0,01$ mm
Диапазон зазора между датчиком и ОК, мм Clearance range between the sensor and TO, mm	До 2 Up to 2	До 3 Up to 3	До 2 Up to 2	До 4 Up to 4
Передача данных на ПК Data communication to a PC	Через USB Through USB	Через Wi-Fi или USB Through Wi-Fi or USB	Через USB Through USB	-

ны вихревых токов (рис. 5б) и картины результирующего магнитного поля [5]. В качестве информативного параметра преобразователя принято использовать амплитуды составляющих (проекции) V_z и V_x вектора магнитной индукции. В отсутствие дефекта линейный вихревой ток протекает в направлении оси Y , а магнитное поле однородно и направлено по оси X .

В случае наличия дефекта на поверхности объекта контроля наблюдается «разрыв» линий электрического поля. Напряженность электрического поля уменьшается в центре дефекта и увеличивается вблизи его краев. Вихре-

вой ток будет огибать дефект по краям. Вследствие этого при перемещении точки наблюдения вдоль дефекта к его середине наблюдается уменьшение составляющей V_x . Это уменьшение пропорционально глубине дефекта, а минимальное значение V_x соответствует максимальной глубине дефекта [5, 6]. Основными преимуществами метода являются:

- возможность инспекции без предварительной очистки поверхности объекта;
- простота работы и установки прибора;
- возможность вычисления глубины линейного дефекта;

- падение напряжения воздействующего поля по мере удаления зонда от объекта очень незначительно, поэтому отклонения в показаниях прибора сводятся к минимуму;

- данная технология не требует калибровки для измерения размеров линейных дефектов [6].

Основным недостатком метода является то, что многократные дефекты уменьшают способность оценить глубину дефекта.

Однако на данный момент этот метод применяется только за рубежом для решения ограниченного ряда задач. Это объясняется, в том числе, и недо-

Таблица 3. Метод рассеяния (вытеснения) магнитного потока (MFL)

Table 3. Magnetic flux leakage (expulsion) (MFL)

Технические характеристики Specifications	Silverwing Handscan MFL – мини-сканер плоских пластин Silverwing Handscan MFL – mini scanner of flat plates	Silverwing MFLi3000 – промышленный сканер днищ резервуаров Silverwing MFLi 3000 – industrial scanner of tank bottoms	Silverwing MFL 2000 – высокоскоростной сканер обнаружения коррозии днища резервуаров Silverwing MFL 2000 – high-speed scanner for tank bottom corrosion detection	Магнитный дефектоскоп MFL10 Magnetic flaw detector MFL 10
Функциональные возможности Functionality	<ul style="list-style-type: none"> Постоянные магниты последнего поколения Permanent magnets of the last generation Легкий блок электроники, работающий на отдельной батарее Light electronics module running on a separate battery Простое в использовании и экономичное средство проверки Easy-to-use and cost-effective testing tool 	<ul style="list-style-type: none"> Быстрый и экономичный контроль Fast and efficient testing Простая в использовании эргономичная конструкция Easy-to-use ergonomic design Система автоматического обнаружения дефектов Automatic defects detection system Быстрая и экономичная проверка Fast and cost-effective verification Простая в использовании эргономичная конструкция Easy-to-use ergonomic design Система автоматического обнаружения дефектов Automatic defects detection system 		<ul style="list-style-type: none"> Простота в эксплуатации. Например, при подключении по USB система определяет дефектоскоп как внешний накопитель информации Easy to operate. For example, when connected via USB, the system determines flaw detector as an external data storage device Практически мгновенная готовность системы к работе Instantaneous system availability
Диапазон измерения толщины, мм Thickness measurement range, mm	До 15 Up to 15	До 20 Up to 20		
Детекторы, кол-во датчиков Холла Detectors, number of Hall sensors	18	256	36	Датчики Холла Hall sensors
Скорость, м/с Speed, m/sec	0,5			0–5
Максимальная толщина покрытия, мм Maximum coating thickness, mm	6			2
Ширина сканирования, мм Scanning width, mm	150	300	300	180
Время непрерывной работы, ч Continuous operation time, h	10	3	10	12
Диапазон рабочих температур, °C Operating temperature range, °C	–30...55			0...50

статочной проработкой методической и нормативно-технической базы. В частности, отсутствуют стандарты на сам метод АСFM и средства его метрологического обеспечения.

Каждый из перечисленных выше методов имеет свои достоинства и недостатки. Однако, чтобы обеспечить возможность проведения сплошного контроля

остаточной толщины стенки ОК, что не достигается в настоящее время при использовании только УЗ-толщинометрии, применяемой практически повсеместно и регламентируемой нормативной документацией, необходимо использовать сплошной контроль, а не выборочный, который обеспечит гарантированное выявление коррозионных поврежде-

ний. Рассмотрим основные особенности описанных выше методов, приведенные в табл. 1, на основании которой в зависимости от особенностей применения можно выбрать оптимальный метод, а с использованием табл. 2–4 – конкретное оборудование.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод том, что с использовани-

Таблица 4. Метод измерения полей переменного тока (ACFM)

Table 4. Method of AC fields measurement (AC FM)

Технические характеристики Specifications	Система неразрушающего контроля сварных швов ACFM Amigo Nondestructive test system of welds ACFM Amigo	Подводная система неразрушающего контроля сварных швов ACFM U31-D Underwater nondestructive test system of welds ACFM U31-D
Функциональные возможности Functionality	<ul style="list-style-type: none"> • Становится возможным аналитическое моделирование воздействия дефектов на поле. Это позволяет определить размеры дефекта только по показаниям датчика вблизи дефекта Analytical modeling of the impact of defects on the field becomes possible. It allows determination of the size of the defect only by the sensor readings near a defect • Резкие изменения проницаемости или проводимости (например, в сварном шве) очень мало влияют на показания датчиков, поскольку направление тока можно сделать нормальным к поверхности раздела Sudden changes in permeability or conductivity (e.g., weld) have very little effect on the sensor readings, since the current direction can be made perpendicular to the interface • Изменения полного сопротивления катушки датчика при удалении от inspected поверхности относительно невелики, поскольку как напряженность входного поля, так и результирующие сигналы от дефекта ослабляются гораздо в меньшей степени при использовании однородного входного поля Sensor coil impedance changes with at the distance from the inspected surface are relatively small, since both the input field strength, and the resulting signals of a defect are attenuated in a much lesser degree when using a uniform input field 	
Массив сенсоров Sensors package	16 каналов (8 пар сенсоров) плюс кодировщик данных 16 channels (8 pairs of sensors) plus data encoder	
Диапазон измерения толщины, мм Thickness measurement range, mm	До 15 Up to 15	До 10 Up to 10
Максимальная толщина покрытия, мм Maximum coating thickness, mm	До 10 Up to 10	До 5 Up to 5
Время непрерывной работы, ч Continuous operation time, h	10	6
Диапазон рабочих температур, °C Operating temperature range, °C	-20...40	

ем ЭМА-преобразователей оптимально проводить локальный оперативный контроль остаточной толщины стенок изделия в районе сварных швов. На ос-

нове преобразователей, реализующих технологию MFL, следует разрабатывать системы для контроля больших площадей с высокой производительностью,

а с использованием метода ACFM следует выполнять поиск коррозионных трещин малой площади или большой протяженности.

Литература:

1. Бирюков Д.Ю. Преобразователи и методы неразрушающего контроля. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. 179 с.
2. Кириков А.В., Забродин А.Н., Комлик А.В. Методы и средства ультразвукового контроля проката с применением электромагнитно-акустических преобразователей // В мире неразрушающего контроля. 1999. № 3. С 18–20.
3. Потапов А.И., Сясько В.А., Пудовкин О.П. Оптимизация параметров первичных измерительных преобразователей, реализующих технологию MFL // Дефектоскопия. 2015. № 8. С. 64.
4. Слесарев Д.А., Абакумов А.А. Обработка и представление информации в MFL методе неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 2013. № 9. С. 3.
5. Потапов А.И., Сясько В.А., Соломенчук П.В. и др. Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий. Т. 2: Электромагнитные и магнитные методы дефектоскопии и контроля свойств материалов. СПб.: Нестор-История, 2015. 440 с.
6. Потапов А.И., Соломенчук П.В., Сясько В.А. Обеспечение достоверности при неразрушающем вихретоковом контроле резьбы с использованием тангенциальных преобразователей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 9. С. 58–64.

References:

1. Biryukov D.Yu. Transducers and NDT methods. Ekaterinburg, UGTU-UPI, 2008, 179 pp. (In Russian)
2. Kirikov A.V., Zabrodin A.N., Komlik A.V. Methods and means of mill products ultrasonic control using electromagnetic acoustic transducers. V mire nerazrushayushchego kontrolya = In the world of non-destructive testing, 1999, No. 3, P. 18–20. (In Russian)
3. Potapov A.I., Syasko V.A., Pudovkin O.P. MFL technology primary instrument transducers parameters optimization. Defektoskopiya = Fault detection, 2015, No. 8, P. 64. (In Russian)
4. Slesarev D.A., Abakumov A.A. Processing and presentation of information in MFL NDT. Defektoskopiya = Fault detection, 2013, No. 9, P. 3. (In Russian)
5. Potapov A.I., Syasko V.A., Solomenchuk P.V., et. al. Electromagnetic and magnetic methods of non-destructive testing of materials and products. Vol. 2 – Electromagnetic and magnetic methods of fault detection and control of material properties. Saint-Peterburg, Nestor-Istoriya, 2015, 440 pp. (In Russian)
6. Potapov A.I., Solomenchuk P.V., Syasko V.A. Ensuring reliability in non-destructive eddy current testing of thread using tangential transducers. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroeniye = Proceedings of the higher educational institutions. Mechanical Engineering, 2012, No. 9, P. 58–64. (In Russian)